Б.В.БОРЕВСКИЙ
Н.И.ДРОБНОХОД
Л.С.ЯЗВИН

# ОЦЕНКА ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Допущено Министерством высшего и среднего специального образования УССР в качестве учебника для студентов геологических факультетов университетов и горных вузов

2-е издание, переработанное и дополненное

КИЕВ
ГОЛОВНОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ИЗДАТЕЛЬСКОГО ОБЪЕДИНЕНИЯ
«ВЫЩА ШКОЛА»
1989

ББК 26.326я73
Б82

УДК 551.49(075.8)

Р е ц е н з е н т: кандидат геолого-минералогических наук, доцент *А. М. Антропцев* (Днепропетровский горный институт)

Редакция литературы по биологии и географии
Редактор *А. Ф. Трегуб*

**Боревский Б. В. и др.**

Б82 Оценка запасов подземных вод / Б. В. Боревский, Н. И. Дробноход, Л. С. Язвин — 2-е изд., перераб. и доп. — К. : Выща шк. Головное изд-во, 1989. — 407 с.: ил.

ISBN 5-11-001204-0.

Рассматриваются основные виды ресурсов (запасов) подземных вод, закономерности их формирования и современные методы оценки, особенности постановки и проведения поисково-разведочных работ на воду. В этом издании дана новая классификация запасов подземных вод, введены новые разделы по оценке влияния водоотбора на окружающую среду, подсчету эксплуатационных запасов методом математического моделирования, оценке запасов в специфических условиях эксплуатации; особое внимание уделено принципам схематизации условий формирования эксплуатационных запасов подземных вод.

Нормативные материалы приведены по состоянию на 1 января 1989 г.

Для студентов геологических факультетов университетов и горных вузов.

Б $\frac{1804050000-089}{M211(04)-89}$ 142—89

ББК 26.326я73

ISBN 5-11-001204-0

© Издательское объединение «Вища школа», 1982
© Издательское объединение «Выща школа», 1989, с изменениями

## ВВЕДЕНИЕ

Вода является одним из важнейших жизненно необходимых видов природных ресурсов, использующихся практически во всех сферах жизни и деятельности человека, и одновременно неотъемлемой составной частью природы. Ее отбор и безвозвратные потери могут существенно сказываться на состоянии окружающей природной среды. Слабая защищенность водных объектов от антропогенных воздействий приводит к их прогрессирующему загрязнению. Все это выдвигает проблему рационального использования и охраны водных ресурсов от истощения и загрязнения в ряд важнейших социально-экономических и экологических проблем современности.

В настоящее время во многих странах мира уже ощущается острый дефицит пресной воды, и именно наличие воды определяет развитие промышленности и сельского хозяйства.

Неотъемлемой составной частью водных ресурсов являются подземные воды, которые широко используются в народном хозяйстве для водоснабжения, орошения земель и обводнения пастбищ, а также для лечебных целей (минеральные воды), как сырье для извлечения ценных компонентов (промышленные воды) и для теплофикации (теплоэнергетические воды). Особенно велико значение пресных подземных вод, которые во многих странах являются основным источником водоснабжения населения, причем их роль в общем балансе хозяйственно-питьевого водопотребления с каждым годом увеличивается.

Подземные воды как источник водоснабжения имеют ряд преимуществ перед поверхностными. Они, как правило, характеризуются более высоким качеством, лучше защищены от загрязнения и испарения, их ресурсы в значительно меньшей степени зависят от сезонных и многолетних изменений климата, во многих случаях подземные воды могут быть получены в непосредственной близости от потребителя. Водозаборы подземных вод можно вводить в эксплуатацию постепенно, по мере роста потребностей, в то время как строительство гидротехнических сооружений для использования поверхностных вод требует обычно крупных единовременных капитальных вложений. Все эти обстоятельства, из которых важнейшим является лучшая защищенность подземных вод по сравнению с поверхностными, предопределили существенный рост использования подземных вод для хозяйственно-питьевого водоснабжения. Если еще 20—25 лет тому назад в СССР

доля подземных вод в коммунальном водоснабжении не превышала 10—15 %, то в настоящее время большая часть городов страны удовлетворяет свои потребности в воде хозяйственно-питьевого качества за счет подземных источников. Только в 20 % городов нашей страны водоснабжение базируется целиком на поверхностных водах. Более 60 % городов Советского Союза снабжаются исключительно подземными водами, около 20 % — имеют смешанные источники водоснабжения. Полностью за счет подземных вод или при наличии смешанных источников водоснабжения осуществляется обеспечение водой таких крупных городов и промышленных центров, как Киев, Харьков, Минск, Баку, Тбилиси, Рига, Ташкент, Ереван, Вильнюс, Алма-Ата, Фрунзе, Воронеж, Уфа, Караганда, Красноярск, Львов, Хабаровск, Сочи, Ворошиловград, Томск, Тюмень, Норильск, Южно-Сахалинск и многие другие.

Подземные воды используются для водоснабжения практически во всех природных зонах страны. Особенно велика их роль в аридных, а также в северных и северо-восточных районах страны, где имеющиеся поверхностные водотоки (водоемы) в определенный период года пересыхают (перемерзают) и подземные воды являются единственным источником водоснабжения. Однако и в других областях страны подземные воды, как уже указывалось, часто являются основным источником хозяйственно-питьевого водоснабжения.

Еще большую роль играют подземные воды в водоснабжении сельского населения и обводнении пастбищ. В последние годы значительно усилилось использование подземных вод и для орошения (в Среднеазиатских республиках, Казахстане и республиках Закавказья).

Ресурсы подземных вод на территории СССР, которые могут быть использованы в народном хозяйстве, составляют в настоящее время около 10 — 12 тыс. $м^3/с$, из них используется только немногим более 10 %.

Сопоставление современного отбора подземных вод с их природными ресурсами показывает, что в Советском Союзе имеются значительные возможности увеличения отбора подземных вод. Однако следует учитывать, что подземные воды, так же как и поверхностные, распределены на территории страны крайне неравномерно. В связи с этим условия обеспечения ими народнохозяйственных потребностей в отдельных республиках и экономических районах существенно различны.

В решениях XXVII съезда КПСС предусмотрена необходимость улучшения обеспечения водой населения, рационального использования воды в народном хозяйстве, санитарного состояния окружающей среды; поставлена задача усиления поисков и разведки подземных вод, чем подчеркивается необходимость неуклонного повышения их роли в водоснабжении населения, и прежде всего для питьевых и бытовых целей.

Принципиально новый этап в комплексном решении природоохранных задач открывает принятое в январе 1988 г. постановление ЦК КПСС и Совета Министров СССР «О коренной перестройке дела охраны природы в стране». Этим постановлением признано необходимым образовать Государственный комитет по охране природы, на ко-

торый возлагаются разработка и проведение единой научно-технической политики в охране природы и рациональном использовании природных ресурсов, государственный контроль за использованием и охраной всех видов природных ресурсов, в том числе поверхностных и подземных вод.

В общем комплексе вопросов рационального природопользования вопросы использования и охраны подземных вод занимают особое место, что связано с двойственной природой подземных вод как органического компонента природной среды. С одной стороны, подземные воды являются одним из ценнейших полезных ископаемых в земных недрах, а с другой — частью общих водных ресурсов суши.

Интенсивный отбор подземных вод приводит к изменению природных условий.

Указанные обстоятельства выдвигают необходимость научного и практического обоснования возможностей рационального использования подземных вод в народном хозяйстве.

Под рациональным использованием подземных вод следует понимать экономически целесообразный их отбор, обеспечивающий охрану от загрязнения и истощения их эксплуатационных запасов при условии сохранения на заданном уровне величины поверхностных водных ресурсов и других элементов окружающей среды. Целесообразность использования подземных вод с учетом всех вышеуказанных факторов может быть определена только на основании оценки величины их запасов.

Оценка запасов подземных вод заключается в определении количества и качества воды, пригодной для использования в народном хозяйстве в сложившейся природной обстановке под влиянием естественных и антропогенных факторов и с учетом природоохранных ограничений.

По своему качеству и целевому назначению подземные воды как полезное ископаемое подразделяются на питьевые и технические, минеральные, теплоэнергетические и промышленные. Они характеризуются различными условиями формирования, изучаются и оцениваются раздельно.

Оценка запасов подземных вод является важнейшей научной и практической задачей современной гидрогеологии, для решения которой в СССР проводятся многочисленные гидрогеологические исследования в государственном масштабе. На гидрогеологические работы по изучению и оценке запасов пресных, минеральных, промышленных и теплоэнергетических вод государство ежегодно затрачивает многие миллионы рублей.

Основная цель данного учебника — дать систематическое изложение основ оценки запасов подземных вод и их особенностей в различных гидрогеологических условиях.

В учебнике рассматриваются основные понятия и общие положения оценки запасов подземных вод, классификация, современные методы их оценки, прогнозирование качества подземных вод, основные требования к охране подземных вод при эксплуатации. Рассмотрены также особенности оценки влияния эксплуатации на природную

среду, оценки прогнозных ресурсов крупных регионов, особенности постановки и проведения геологоразведочных работ на воду.

Важное место в учебнике занимают также вопросы обоснования и оптимизации видов и объемов исследований, разработка которых представляет собой актуальную проблему совершенствования методики проведения геологоразведочных работ для целей оценки эксплуатационных запасов подземных вод. Как подчеркивается в учебнике, решение этой проблемы следует искать на путях широкого применения эвристических методов исследований, базирующихся на теории, аналогии, интуиции и здравом смысле. Особое внимание уделено принципам схематизации гидрогеологических условий, требованиям к информационной характеристике гидрогеологических условий и обоснованию исходных данных для целей оценки запасов.

Рассмотрение и изложение основного материала ведется применительно к оценке запасов питьевых и технических подземных вод, занимающей ведущее место в общем комплексе поисково-разведочных работ на воду. Особенности оценки запасов минеральных, теплоэнергетических и промышленных вод рассмотрены в специальной главе.

Для более глубокого и полного понимания методики оценки запасов изложение ведется с привлечением фактического материала из практики разведки и оценки запасов в различных гидрогеологических условиях с рассмотрением конкретных примеров.

Первое издание настоящего учебника вышло в 1982 г., и его содержание базировалось в основном на разработках, выполненных в 70-е годы. Проведенный за истекшие годы комплексный анализ и обобщение результатов разведки новых и изучения опыта эксплуатации ранее разведанных месторождений, новые методические и теоретические результаты, полученные в этой области, особенно по вопросам формирования эксплуатационных запасов подземных вод, а также выход в свет ряда новых нормативных и директивных документов потребовали значительной переработки, изменения и расширения содержания учебника по сравнению с его первым изданием. Были учтены критические замечания, сделанные в адрес авторов и направленные, прежде всего, на необходимость более полного и всестороннего рассмотрения методики и технологии оценки запасов различными методами, в том числе методом математического моделирования в различных гидрогеологических условиях, учета специфики отбора и использования подземных вод, общих принципов их разведки и оценки.

В специальных разделах рассмотрены вопросы оценки запасов подземных вод в районах разведываемых и разрабатываемых месторождений подземных вод, влияния эксплуатации на геологическую среду и ряд других вопросов, проанализированы современные тенденции совершенствования методики разведочных работ и требований к их результатам с учетом решений XXVII съезда КПСС и последующих решений партии и правительства.

В основу учебника положены разработки, проведенные за последние 20 лет в различных научно-исследовательских организациях и высших учебных заведениях страны на базе обобщения практического опы-

та разведочных работ на воду организациями Мингео СССР и других ведомств, а также зарубежного опыта аналогичных исследований. Естественно, при составлении учебника в него вошли основные разработки авторов, выполненные во ВНИИ гидрогеологии и инженерной геологии Мингео СССР (Б. В. Боревский, Л. С. Язвин) и на кафедре гидрогеологии и инженерной геологии Киевского государственного университета (Н. И. Дрэбноход). Указанные разработки явились основой курса лекций по оценке запасов подземных вод, читаемого на геологическом факультете Киевского государственного университета.

# ГЛАВА 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ОЦЕНКИ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

## 1.1. ОСОБЕННОСТИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД КАК ПОЛЕЗНОГО ИСКОПАЕМОГО

Подземные воды как один из видов природных ресурсов и элементов природной среды, используемых в народном хозяйстве, характеризуются двойственной природой. С одной стороны, это подвижное полезное ископаемое, находящееся в земных недрах и извлекаемое из них, с другой — часть общих водных ресурсов суши.

Как *полезное ископаемое* подземные воды являются непосредственной частью земных недр, и их запасы определяются геолого-гидрогеологическими условиями изучаемого объекта. Как часть *общих водных ресурсов суши* они находятся в тесной связи между собой, с поверхностными водами и атмосферой. В связи с этим величина запасов подземных вод зависит не только от геолого-гидрогеологических, но и от физико-географических факторов, а также антропогенных, связанных с изменением водохозяйственной обстановки и определяющих изменение условий питания, качества и отбора подземных вод.

Двойственная природа подземных вод определила целый ряд их специфических особенностей, которые коренным образом отличают подземные воды от других видов не только твердых, но и подвижных (нефти, газа) полезных ископаемых и которые необходимо учитывать при оценке их запасов:

1. Полная или частичная возобновляемость подземных вод является их главной особенностью, принципиально несвойственной ни одному другому виду полезных ископаемых, формирующихся исключительно в течение геологического времени.

Эта особенность связана с постоянным или периодическим современным питанием подземных вод (как части общих водных ресурсов суши), обусловленным их тесной связью с поверхностными и атмосферными водами.

2. Формирование баланса водоотбора за счет различных генетических составляющих (источников формирования: поверхностные воды, подземные воды смежных водоносных горизонтов и бассейнов подземных вод) и изменение их величины и соотношения во времени.

Эти две особенности приводят к целому ряду следствий, обусловливающих возможность увеличения запасов подземных вод в процессе эксплуатации.

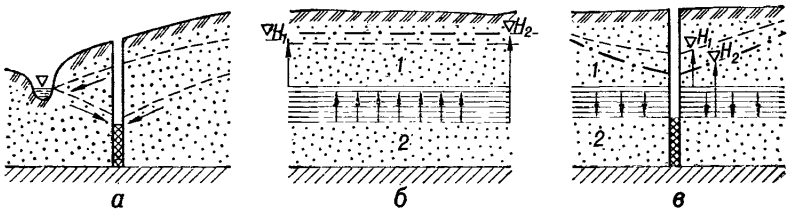



Рис. 1. Изменение условий формирования подземных вод под влиянием водоотбора:
$H_1$ — уровень водоносного горизонта *1*; $H_2$ — уровень водоносного горизонта *2*

3. Тесная взаимосвязь подземных вод с внешней средой и, как следствие, зависимость величины их запасов от климатических, гидрографических и других внешних по отношению к водоносной системе естественных и антропогенных факторов, в том числе водохозяйственной обстановки, и их изменений во времени. Эта взаимосвязь проявляется прежде всего в граничных условиях, т. е. в условиях на границах пласта в плане и разрезе. Граничные условия (условия взаимосвязи подземных вод с поверхностными, условия питания и разгрузки подземных вод и т. д.) проявляются в процессе эксплуатации водозаборов и во многом предопределяют возможность использования подземных вод.

Подземные воды — единственное полезное ископаемое, в процессе эксплуатации которого происходит не только расходование, но и дополнительное формирование, вызванное усилением питания подземных вод при их отборе. Эксплуатация подземных вод может привести к коренным изменениям условий их питания и разгрузки. Так, при отборе подземных вод из водоносных горизонтов, гидравлически связанных с поверхностными водотоками (водоемами), последние из областей разгрузки в естественных условиях превращаются в области питания (рис. 1, *а*). В слоистых толщах, которые состоят из ряда водоносных горизонтов, разделенных слабопроницаемыми отложениями, при эксплуатации одного из горизонтов происходит либо усиление питания из смежного горизонта, либо прекращение разгрузки подземных вод эксплуатируемого горизонта и начинается их перетекание из смежного горизонта в эксплуатируемый. На рис. 1, *б*, представлена водоносная система, состоящая из двух водоносных горизонтов. Уровень нижнего в естественных условиях находится выше уровня верхнего, благодаря чему происходит разгрузка подземных вод нижнего горизонта в верхний через слабопроницаемый слой под действием разницы напоров между этими горизонтами. При эксплуатации нижнего водоносного горизонта в нем формируется воронка депрессии, и его уровень устанавливается ниже, чем уровень вышележащего (рис. 1, *в*). Разгрузка подземных вод снизу вверх прекращается, и в эксплуатируемый горизонт начинает поступать вода из верхнего горизонта. Увеличение питания может происходить также и при уменьшении испарения с уровня грунтовых вод во время его понижения, а также при проведении различных водохозяйственных мероприятий (гидротехническое и ирригационное строительство, орошение земель и т. п.).

4. Возможность повторного участия уже использованных (возвратных) вод в питании водоносных горизонтов и формировании водоотбора за счет сброса сточных вод, потерь из водопроводных коммуникаций, инфильтрации на орошаемых массивах. Возможность повторного многократного использования подземных вод не свойственна ни одному другому полезному ископаемому.

5. Возможность формирования новых запасов подземных вод, а также увеличения их величины за счет водохозяйственного строительства или специальных инженерных мероприятий по искусственному подпитыванию подземных вод. Образование искусственных линз пресных подземных вод — яркая иллюстрация этой особенности. Причем формирование новых запасов подземных вод может носить попутный характер при водохозяйственном строительстве или быть целенаправленным при искусственном подпитывании.

Перечисленные особенности связаны прежде всего не только с подвижностью подземных вод, но и с их свойствами как органического элемента природной внешней среды и части общих водных ресурсов суши. Другие особенности связаны преимущественно с подвижностью подземных вод в земных недрах (как подвижного полезного ископаемого) и могут быть свойственны и другим подвижным жидким и газообразным полезным ископаемым.

6. Возможность изменения качества подземных вод в процессе эксплуатации под влиянием естественных и антропогенных факторов, которое может происходить в направлении как его ухудшения (подсос более минерализованных или загрязненных подземных или поверхностных вод), так и улучшения (формирование линз пресных вод при подтягивании поверхностных, перетекание более пресных вод из смежных водоносных горизонтов).

7. Значительное превышение области формирования запасов над площадью участка, где осуществляется их водоотбор.

8. Зависимость величины водоотбора и положения динамических уровней подземных вод на одном из участков эксплуатируемого водоносного горизонта от условий и масштабов эксплуатации на других участках, расположенных часто на больших расстояниях между собой. Эта особенность определяет изменение величины запасов под влиянием взаимодействия между собой водозаборов, дренажей горных выработок и, как следствие, невозможность механически суммировать запасы воды, подсчитанные на различных участках одного и того же водоносного горизонта, как это обычно делается для твердых полезных ископаемых.

9. Зависимость величины отбора подземных вод от схемы эксплуатации. Это связано с тем, что возможность рационального отбора определяется не столько количеством воды, находящейся в пласте, и количеством воды, поступающей в пласт в естественных и антропогенных условиях, сколько от

фильтрационных свойств водовмещающих пород, определяющих сопротивление движению подземных вод к водозаборным сооружениям. Иными словами, определяя возможность отбора подземных вод, всегда нужно учитывать два аспекта — балансовый и гидродинамический. Первый определяет обеспеченность отбора водными ресурсами, второй — техническую возможность добычи воды водозаборными сооружениями, от которой и зависит возможность создания рациональной схемы эксплуатации. Так, в водоносном горизонте может содержаться очень большое количество воды, но если водовмещающие породы характеризуются очень малыми коэффициентами фильтрации и скважины, оборудованные на эти породы, не могут дать высокого дебита, то эксплуатация этого горизонта может быть нерентабельной с технико-экономической точки зрения. В других случаях производительность водозаборных скважин может достигать значительных величин ввиду высокой водопроводимости водовмещающих пород, но в связи со слабой обеспеченностью источниками питания имеющихся запасов воды может хватить на довольно ограниченное время.

Таким образом, общее количество воды, находящейся в пласте и поступающей в пласт, еще не определяет возможности ее рационального отбора для дальнейшего использования в народном хозяйстве.

### 1.2. ВИДЫ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД И ИХ КЛАССИФИКАЦИЯ

Перечисленные основные особенности подземных вод, отличающие их от других полезных ископаемых, предопределили необходимость выделения нескольких понятий, характеризующих: а) количество воды, находящейся в водоносном пласте; б) количество воды, поступающей в водоносный пласт за определенный промежуток времени в естественных (под«естественными» понимаются условия, сформировавшиеся в данной физико-географической и геолого-гидрогеологической обстановке вне связи с антропогенной деятельностью) условиях, при проведении водохозяйственных мероприятий, а также в связи с эксплуатацией подземных вод (суммарное питание подземных вод, которое часто может быть выражено в расходе потока через поперечное сечение водоносного пласта); в) количество воды, которое может быть отобрано водозаборными сооружениями.

Иными словами, если при оценке перспектив использования твердых полезных ископаемых, нефти и газа достаточно одного понятия «запасы полезного ископаемого», характеризующего их суммарное весовое (или объемное) содержание в недрах, то для подземных вод одно это понятие не может полностью охарактеризовать возможность их рациональной эксплуатации.

Подвижность подземных вод и их возобновляемость обусловливают необходимость учета не только их объемного содержания в недрах, но и питания в естественных и нарушенных деятельностью человека (в том числе и эксплуатацией подземных вод) антропогенных условиях. На необходимость учета питания в естественных условиях указывал еще в начале 30-х годов один из основоположников отечественной гид-

рогеологии академик Ф. П. Саваренский, который предложил различать «запасы» подземных вод и их «ресурсы». «Подземные воды,— писал Ф. П. Саваренский,— не обладают постоянными запасами как прочие полезные ископаемые, так как они возобновляются в процессе круговорота воды на земном шаре... Поэтому правильнее говорить не о «запасах» подземных вод, а о «ресурсах» подземных вод, понимая под этим термином обеспечение в водном балансе данного района поступление 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 связи с тем, что при решении научных и практических гидрогеологических задач приходится иметь дело с различными видами запасов и ресурсов подземных вод, многими исследователями были предложены различные классификации запасов подземных вод (классификации П. И. Бутова, К. И. Макова, Е. Ф. Тамма, М. Е. Альтовского, М. П. Семенова, Н. А. Плотникова, Г. Н. Каменского, Ф. А. Макаренко, Р. В. Бородина, Б. И. Куделина, Ф. М. Бочевера, Н. И. Плотникова, Н. Н. Биндемана, Н. М. Фролова и Л. С. Язвина и др.).

В большинстве перечисленных классификаций различаются: объем воды в водоносном горизонте и питание подземных вод в естественных условиях (или расход потока). Однако эти виды запасов назывались по-разному. Так, объем воды в пласте П. И. Бутов именовал «пассивными запасами»; М. Е. Альтовский, М. П. Семенов, Ф. М. Бочевер — «статическими запасами»; К. И. Маков, Е. Ф. Тамм, Н. А. Плотников — «вековыми запасами»; Б. И. Куделин — «геологическими запасами»; Н. Н. Биндеман — «естественными запасами». Питание подземных вод (расход потока) К. И. Маков и Г. Н. Каменский называют «естественными динамическими запасами»; М. Е. Альтовский, М. П. Семенов, Ф. М. Бочевер — «динамическими запасами»; Ф. А. Макаренко, Б. И. Куделин, Н. Н. Биндеман — «естественными ресурсами».

Во многих классификациях выделяются запасы, которые могут быть отобраны из водоносных горизонтов водозаборными сооружениями (эксплуатационные запасы или эксплуатационные ресурсы).

В практике гидрогеологических исследований в настоящее время наибольшее применение получила классификация Н. Н. Биндемана (1963). Исходя из сущности терминов «запасы» и «ресурсы» (по Ф. П. Саваренскому), Н. Н. Биндеман подразделил запасы и ресурсы подземных вод по их генезису на естественные запасы, естественные ресурсы, искусственные запасы, искусственные ресурсы, привлекаемые ресурсы.

Естественные запасы — это масса (объем) гравитационной воды в пласте в естественных условиях. Поскольку в напорных пластах давление выше атмосферного, то часть этих запасов содержится здесь за счет упругих свойств и пласта воды. Она высвобождается из горных пород без осушения пласта.

В связи с этим в составе естественных запасов выделяются: 1) ем-

костные запасы — объем воды, высвобождающийся из пласта при его осушении; 2) упругие запасы — объем воды, извлекаемый в напорных условиях без осушения пласта за счет проявления его упругих свойств при понижении давления (уровня).

Естественные ресурсы — величина питания подземных вод в естественных условиях, которая во многих случаях находит свое выражение в расходе подземного потока. Естественные ресурсы равны сумме всех природных элементов баланса данного горизонта (перетекание из смежных горизонтов, инфильтрация атмосферных осадков, фильтрация из рек и водоемов).

Искусственные запасы — объем подземных вод, образующийся в пласте под влиянием искусственных факторов, в частности в результате орошения, подпора поверхностными водоемами, искусственного заводнения пласта (магазинирования). По своей сути они аналогичны естественным запасам.

Искусственные ресурсы — расход воды, идущей на пополнение подземных вод за счет инфильтрации на площадях орошения, их водохранилищ и каналов или в результате проведения специальных мероприятий по усилению питания водоносных горизонтов.

Привлекаемые ресурсы — дополнительное питание подземных вод, формирующееся при образовании депрессионных воронок в районах водозаборов за счет возникновения или усиления фильтрации из рек, увеличения питания атмосферными осадками вследствие уменьшения испарения с поверхности грунтовых вод при росте глубины их зеркала, усиления или возникновения процессов перетекания.

Естественные и искусственные запасы выражаются в единицах объема ($м^3$, $км^3$), а естественные, искусственные и привлекаемые ресурсы — в единицах расхода (л/с, $м^3$/сут).

Кроме того, в данной классификации в самостоятельный вид выделяются эксплуатационные запасы подземных вод (ЭЗПВ). Это 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.

Как следует из определения понятия «эксплуатационные запасы», эта величина представляет собой производительность водозаборного сооружения и выражается в единицах расхода (обычно в $м^3$/сут). Поэтому более логичным было бы, по мнению Н. Н. Биндемана, использование термина «эксплуатационные ресурсы», а с термином «запасы» можно согласиться лишь с практической точки зрения, поскольку они утверждаются ГКЗ СССР, которая утверждает не «ресурсы», а «запасы».

При прогнозных региональных оценках, когда ресурсы подземных вод учитываются как часть общих ресурсов, предпочтительнее пользоваться термином «эксплуатационные ресурсы», как характеристикой потенциальных возможностей эксплуатации подземных вод в крупном регионе.

Классификация Н. Н. Биндемана оказалась наиболее жизнеспособной. На протяжении более 20 лет она широко использовалась в практике гидрогеологических исследований и явилась основой действующих в настоящее время нормативных и методических документов ГКЗ СССР и Мингео СССР, определяющих порядок проведения работ по разведке и оценке эксплуатационных запасов подземных вод.

В то же время за истекший период выявились отдельные несовершенства этой классификации. Резко усилившееся влияние на формирование ресурсов подземных вод антропогенных факторов, в том числе значительная интенсификация использования подземных вод потребовали более четкого и целенаправленного отражения в классификации особенностей подземных вод как полезного ископаемого, связанных с влиянием на их формирование антропогенной деятельности.

К основным недостаткам классификации Н. Н. Биндемана можно отнести следующие.

Прежде всего, в ней нет четкого разграничения понятий видов ресурсов подземных вод, существующих вне связи с эксплуатацией и в условиях эксплуатации, т. е., с одной стороны, естественных и искусственных ресурсов, с другой — эксплуатационных. Кроме того, привлекаемые ресурсы являются частью эксплуатационных и выделение их наряду с естественными и искусственными как таксонов одного ранга недостаточно правомерно. Вызывает замечание и использование термина «емкостные запасы» в противопоставлении к «упругим», так как упругие запасы также характеризуют емкость водоносного горизонта.

В одну категорию искусственных запасов и ресурсов включены запасы и ресурсы, формирующиеся попутно (например, при гидротехническом строительстве или орошении), и запасы и ресурсы, образующиеся при целенаправленных мероприятиях по искусственному подпитыванию подземных вод. В классификации Н. Н. Биндемана не учтено и то обстоятельство, что в ряде районов (например, в районах исторически развитого орошения) практически невозможно разделить естественное и искусственное питание подземных вод и их естественные и искусственные запасы. В. А. Листенгартен предложил в таких условиях ресурсы и запасы называть сложившимися, а В. М. Шестопалов — естественно-антропогенными. Нуждаются также в уточнении понятия «эксплуатационные запасы» и «привлекаемые ресурсы».

Не до конца последовательно в классификации Н. Н. Биндемана используются термины «запасы» и «ресурсы» (как уже указывалось, в ней величину возможного отбора воды в единицах расхода предлагается на конкретных участках называть эксплуатационными запасами, а в отдельных регионах — эксплуатационными ресурсами).

В целом перечисленные недостатки существующих классификаций можно разделить на две группы. Первая, характерная для всех опубликованных до 1985 г. классификаций, включает недостатки методологического характера (использование в одной классификации различных оснований, выделение в качестве равноправных таксонов понятий различного ранга и т. д.). Вторая связана с недостаточным учетом раз-

нообразного влияния антропогенных факторов, в том числе эксплуатации подземных вод, необходимость которого значительно возросла в последние годы.

Попытка учета недостатков первой группы и упорядочения классификаций запасов и ресурсов подземных вод на базе системного подхода была сделана Н. М. Фроловым и Л. С. Язвиным (1984), которыми было предложено несколько последовательных и параллельных классификаций запасов и ресурсов подземных вод. В этих классификациях ими рассмотрено более 25 различных видов запасов и ресурсов. Безусловно выделение такого большого количества видов не вызывалось потребностью практики, сильно усложняло выделение основных понятий, определяющих главные особенности формирования различных видов ресурсов и запасов подземных вод, в том числе разграничение связанных и не связанных с эксплуатацией, поэтому эти классификации до сих пор не нашли применения в практике гидрогеологических работ.

Из методологических вопросов важную роль играет использование терминов «запасы» и «ресурсы». Так ряд исследователей считают их синонимами, другие авторы придерживаются указанного выше толкования Ф. П. Саваренского.

При разграничении в этом смысле понятий «запасы» и «ресурсы» следует иметь в виду, что все подземные воды верхнего гидродинамического этажа находятся в постоянном движении. Их «запасы», характеризующие объем воды, содержащейся в водоносной системе (горизонте, пласте, слое), также не являются неподвижными и постоянно замещаются в процессе водообмена, время которого в зависимости от размеров рассматриваемой системы может составлять от нескольких десятков лет до десятков и сотен тысяч лет. Поэтому различия между «запасами» и «ресурсами» подземных вод даже в понимании Ф. П. Саваренского не являются абсолютными. Их можно и нужно рассматривать лишь по отношению к величине современного питания подземных вод.

Другой принцип разделения на запасы и ресурсы заложен в классификациях запасов месторождений и прогнозных ресурсов полезных ископаемых (в том числе и подземных вод). В этих классификациях выделяются запасы месторождений, определяемые по данным геологоразведочных работ и исследований в процессе промышленного освоения месторождений, и прогнозные ресурсы, наличие которых предполагается на основе общих гидрогеологических представлений. Таким образом, в этом случае в основу разделения запасов и ресурсов положен принцип изученности (разведанности) полезного ископаемого. Так как запасы подземных вод, как и всех других полезных ископаемых, рассматриваются в Государственной и территориальных комиссиях по запасам полезных ископаемых (ГКЗ СССР и ТКЗ), необходимость унификации терминологии для всех полезных ископаемых является несомненной.

В связи с имеющимися разноречивыми предложениями по использованию терминов «запасы» и «ресурсы» (особенно применительно к эксплуатационным) целесообразно, во избежание путаницы, рассмат-

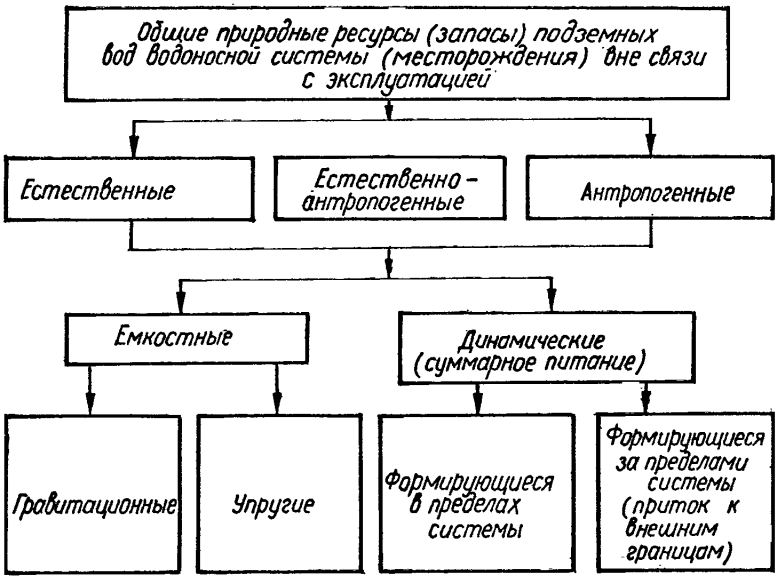



Рис. 2. Классификация ресурсов (запасов) подземных вод

ривать эти термины как синонимы. При этом основную содержательную нагрузку в термине должно нести прилагательное (прилагательные), стоящее перед «ресурсами» («запасами»). Термины же «запасы», «ресурсы» без прилагательных можно рассматривать как термины свободного пользования. В дальнейшем изложении термины «запасы» и «ресурсы» используются как синонимы.

Что касается недостатков второй группы, то совершенствование существующих классификаций в направлении более целенаправленного учета антропогенных составляющих в общей структуре ресурсов (запасов) подземных вод вытекает из практики и базируется на следующих обстоятельствах.

Подземные воды — единственный вид полезного ископаемого, формирование которого происходит в процессе их эксплуатации, что определяется тесной связью условий формирования с внешней средой. Поэтому антропогенные факторы наряду с естественными оказывают существенное влияние на формирование запасов подземных вод. К важнейшим из этих факторов, определяющих их количество и качество, относятся изменения водохозяйственной обстановки, в том числе условий питания и разгрузки подземных вод, водоотбор и другие геолого-технические условия эксплуатации, в том числе сброс уже использованных вод, загрязнение подземных вод. По сравнению с естественными, антропогенные факторы часто более изменчивы и подвижны. Их изменения во многих случаях носят случайный характер, так как связаны с различными аспектами народнохозяйственной деятельности, планы, время и условия реализации которой постоянно меняются.

Поэтому необходимы их выделение при изучении подземных вод и самостоятельный учет в прогнозных расчетах.

За последние 25 — 30 лет удельный вес и роль антропогенных факторов в формировании ЭЗПВ существенно возросли, что связано с резким усилением нарушенности естественных условий питания и режима подземных вод в пределах как отдельных эксплуатируемых месторождений и участков, так и целых крупных регионов. Такая обстановка сложилась, например, в Средней Азии, где в силу интенсивного орошения с применением химических удобрений питьевые подземные воды оказались подвержены региональному загрязнению.

Существенно возросшая степень влияния антропогенной деятельности на формирование ЭЗПВ должна найти отражение и в классификации «общих природных» и эксплуатационных запасов подземных вод, как базовой основы их изучения, разведки и оценки. Под «общими природными» здесь мы понимаем запасы, формирующиеся в сложившейся на период исследований естественно-антропогенной обстановке вне связи с эксплуатацией подземных вод.

Эксплуатация подземных вод является одним из видов антропогенной деятельности, особенно важной в отношении рассматриваемых вопросов оценки их запасов. Поэтому среди всей совокупности антропогенных факторов, определяющих условия формирования запасов подземных вод, следует четко различать: а) не связанные с эксплуатацией подземных вод и б) связанные с эксплуатацией подземных вод. Такое разделение, несомненно, должно найти отражение и в классификациях запасов подземных вод.

Таким образом, возросший удельный вес антропогенных факторов в формировании природных и эксплуатационных запасов подземных вод потребовал разработки новой классификации запасов.

Предлагаемая классификация приведена на рис. 2 и 3. Она базируется на классификации Н. Н. Биндемана, некоторые основные понятия которой частично сохранены, а другим дается новая трактовка. Классификация разработана авторами при участии А. Б. Островского. Как и в классификации Н. Н. Биндемана, общие природные и эксплуатационные запасы рассматриваются раздельно. Поэтому на рис 2 и 3 приведены по существу две классификации: классификация общих природных запасов (ресурсов) подземных вод, существующих вне связи с их эксплуатацией, и классификация эксплуатационных запасов подземных вод по источникам формирования.

В приведенных классификациях понятия «запасы» и «ресурсы» в целом рассматриваются как синонимы, учитывая прежде всего то, что, например, «естественные запасы» хотя и характеризуют емкость пласта, но являются подвижными и постепенно замещаются в процессе водообмена за счет питания подземных вод. Поэтому на первое место выдвигается то, что одно из понятий должно характеризовать емкость пласта или объем воды в нем, а другое — суммарное питание подземных вод. Поэтому принципиальные различия между «запасами» и «ресурсами» (в понимании Н. Н. Биндемана) можно учитывать прилагательными, используемыми перед этими терминами. В то же время, учитывая сложившуюся практику, термин «запасы» более удобно относить

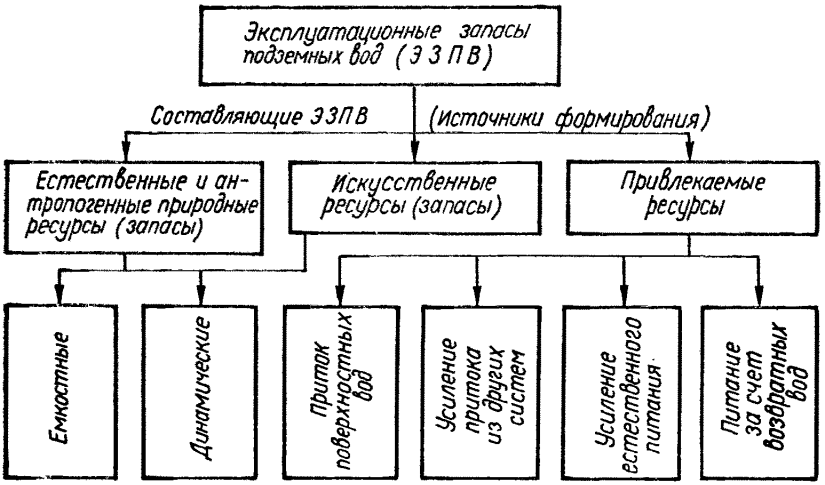



Рис. 3. Классификация эксплуатационных запасов подземных вод по источникам формирования

к объемам воды в пласте, а «ресурсы» — к величине питания подземных вод. В отношении терминов «эксплуатационные запасы» и «ресурсы» может быть сохранена позиция Н. Н. Биндемана. В предлагаемой классификации общих природных ресурсов (запасов) подземных вод они рассматриваются как сумма емкостных и восполняемых ресурсов, формирующихся под влиянием естественных и антропогенных факторов, не связанных с эксплуатацией. В тех случаях, когда естественные и антропогенные ресурсы и емкостные запасы невозможно разделить, их предлагается называть естественно-антропогенными (термин В. М. Шестопалова).

Таким образом, согласно предлагаемой классификации общие природные ресурсы подземных вод подразделяются по их генезису на естественные, антропогенные и естественное-антропогенные. По условиям нахождения подземных вод в водоносной системе их запасы (ресурсы) подразделяются на емкостные и динамические (см. рис. 2).

*Емкостные запасы* характеризуют объем (или массу) подземных вод, содержащихся в водоносной системе (пласте), которые могут быть извлечены из него при снижении напора.

Та часть емкостных запасов, которая может быть получена при снижении напора за счет упругих свойств воды и пород, называется упругими запасами. Та часть запасов, которая может быть получена за счет осушения пород, называется гравитационными запасами.

*Динамические ресурсы* — это суммарное питание подземных вод за счет комплекса естественных и антропогенных факторов (инфильтрация атмосферных осадков, фильтрация из рек, каналов, водохранилищ, поступление воды из смежных водоносных систем, дополнительное питание подземных вод при хозяйственной деятельности, в том числе на массивах орошения, и т. п.). Динамические ресурсы частично или полностью находят отражение в расходе потока.

Поскольку суммарное питание подземных вод формируется под влиянием как естественных, так и антропогенных факторов, что не учитывалось Н. Н. Биндеманом, термин «естественные ресурсы», выражающий суммарное питание подземных вод в естественных условиях, потребовал замены. Естественные ресурсы — это лишь часть питания подземных вод, поэтому мы предлагаем вернуться к термину динамические ресурсы, как характеристике суммарной величины питания подземных вод под влиянием естественных и антропогенных факторов, не связанных с эксплуатацией.

Динамические ресурсы подразделяются на формирующиеся в пределах изучаемой водоносной системы и вне ее. Такое разделение важно и удобно при обосновании гидрогеологических моделей и расчетных схем, так как позволяет выделить из суммарного питания подземных вод изучаемой водоносной системы или любого ее элемента внешние притоки.

Эксплуатационные запасы (ресурсы) возникают только в связи с эксплуатацией и не могут существовать вне ее.

Под *эксплуатационными запасами (ресурсами)* предлагается понимать средний за расчетный период расход подземных вод, который может быть получен на месторождении (участке) с помощью геолого-экономически обоснованных водозаборных сооружений при заданных режиме, условиях эксплуатации и качестве, удовлетворяющем требования целевого использования подземных вод в народном хозяйстве с учетом природоохранных ограничений.

Согласно этому определению ЭЗПВ должны подсчитываться применительно к принятым конкретным или обобщенным схемам (в зависимости от стадии изучения) водозаборных сооружений, планируемой очередности освоения запасов и заданному графику водоотбора с учетом существующей водохозяйственной обстановки, ее планируемых в течение расчетного срока изменений и допустимых пределов влияния водоотбора на окружающую среду.

Как видно из рис. 3, естественные и антропогенные ресурсы составляют лишь одну из групп источников формирования эксплуатационных запасов. Кроме того, источниками формирования ЭЗПВ являются искусственные (емкостные и динамические) и привлекаемые ресурсы.

К *искусственным ресурсам* предлагается относить лишь то количество воды, которое поступает в водоносный пласт в результате целенаправленных мероприятий по подпитыванию подземных вод на водозаборах, что отличает их от других источников антропогенного характера. Такое выделение представляется оправданным для более целенаправленного разделения этих источников формирования при разведке и оценке запасов, а также проектировании водозаборных сооружений. В отличие от антропогенных, искусственные ресурсы для участия в формировании ЭЗПВ требуют проведения специальных инженерных мероприятий при строительстве и эксплуатации водозаборных сооружений и в этом смысле являются легко «управляемыми».

Содержание понятия *привлекаемые ресурсы* в целом как источника формирования ЭЗПВ сохраняется в понимании Н. Н. Биндемана.

В них включаются только те источники дополнительного питания, которые не поступали в рассматриваемую водоносную систему до начала эксплуатации. Поэтому по определению привлекаемые ресурсы могут быть только динамическими.

По генезису привлекаемые ресурсы формируются за счет:

а) привлечения поверхностных вод;

б) усиления естественного питания при сокращении испарения на участках неглубокого залегания уровня грунтовых вод;

в) усиления (или возникновения притока) из смежных водоносных систем;

г) возвратных вод, повторно участвующих в питании подземных после их отбора водозаборными сооружениями и использования по целевому назначению.

Хотя повторное поступление возвратных вод в водоносный пласт происходит через поверхностные водные объекты либо как усиление питания подземных вод за счет инфильтрации, их выделение в самостоятельный источник питания оправдано с точки зрения оценки их качества и количества подземных вод как полезного ископаемого, а также возможности их повторного использования в народном хозяйстве.

Следует указать, что содержание понятия «привлекаемые ресурсы» может меняться в зависимости от рассматриваемого гидрогеологического объекта. Если при оценке эксплуатационных запасов подземных вод рассматривается вся водоносная система, состоящая из водоносных и слабопроницаемых горизонтов, привлекаемые ресурсы формируются только за счет внешних по отношению к этой системе источников. Однако если рассматривается и оценивается какой-либо один водоносный горизонт системы, то его привлекаемые ресурсы могут формироваться и путем перетекания из смежных водоносных горизонтов. В этих случаях привлекаемые ресурсы данного горизонта формируются за счет емкостных запасов и динамических ресурсов смежных горизонтов.

В предложенных классификациях нашли отражение все основные особенности подземных вод как полезного ископаемого. Их использование позволяет хорошо проследить долю антропогенных факторов в общей структуре баланса водных ресурсов и эксплуатационных запасов подземных вод, а также выделить источники их формирования.

Следует отметить, что в литературе, вышедшей в основном до шестидесятых годов, можно встретить несколько иное толкование термина «эксплуатационные запасы». Так, в классификации 1950 г. под эксплуатационными запасами понимался расход подземных вод, который может быть получен «без ухудшения эксплуатационного режима и качества воды в течение амортизационного срока работы каптажного сооружения». Г. Н. Каменский считал, что отбор воды в количестве, равном эксплуатационным запасам, должен проходить «без заметного изменения установившегося эксплуатационного режима, т. е. без заметного снижения производительности эксплуатационных водозаборных сооружений и без снижения динамических уровней подземных

вод». В этих определениях нашли отражение господствовавшие в 30—50-х гг. представления о том, что отбор подземных вод не должен превышать их естественных ресурсов и что при дебите водозаборных сооружений, равном динамическим ресурсам, эксплуатация будет происходить при установившемся режиме, т. е. не учитывались все основные источники формирования ЭЗПВ, включающие помимо динамических ресурсов также и емкостные запасы.

Если сопоставить определение эксплуатационных запасов в классификации Н. Н. Биндемана и действующей классификации эксплуатационных запасов подземных вод, с одной стороны, и предлагаемое — с другой, можно заметить существенные различия.

Новая формулировка понятия «эксплуатационные запасы подземных вод» была предложена Б. В. Боревским (1986) исходя из следующих соображений:

1. В действующем в настоящее время определении не учитываются экологические аспекты эксплуатации подземных вод и возможное влияние их отбора на изменение окружающей среды. Отбор подземных вод водозаборными сооружениями может вызывать изменение гидрогеологических условий, которое, в свою очередь, приводит к изменениям отдельных компонентов природной среды, причем эти изменения могут иметь как негативный, так и позитивный характер. К основным негативным последствиям относятся: сокращение водности поверхностных водотоков и водоемов, изменение природных ландшафтов (угнетение или гибель растительности), оседание земной поверхности, активизация карстово-суффрозионных процессов. Необходимость локализации или полного предотвращения указанных факторов может приводить к существенному изменению схемы водозаборных сооружений, а в некоторых случаях к ограничению водоотбора или вообще к отказу от использования подземных вод.

2. Второе изменение связано с заменой понятия «рациональными в технико-экономическом отношении водозаборными сооружениями» на понятие «геолого-экономически обоснованными водозаборными сооружениями». Эта замена связана с необходимостью учета кроме собственно технико-экономических также и социальных и экологических факторов. Кроме того, при предварительной оценке эксплуатационных запасов технико-экономические обоснования обычно не проводятся.

3. Требовало конкретизации понятие «количества подземных вод». В связи с тем, что при эксплуатации дебит водозаборных сооружений меняется, предложено под эксплуатационными запасами понимать средний расход за период эксплуатации.

В связи с тем, что в настоящее время в гидрогеологической литературе и в том числе в нормативных документах используется терминология, соответствующая классификации Н. Н. Биндемана, в табл. 1.1 приводятся перечень основных понятий и соответствующие им термины из классификации Н. Н. Биндемана и принятые в настоящей работе.

Как видно из представленной таблицы, сущность каждого понятия (каждого вида) характеризуется прилагательным. При необходимости

**1.1. Сопоставление содержания терминов в классификациях запасов подземных вод**

| Содержание основных понятий | Классификация Н. Н. Биндемана | Классификация авторов |
|---|---|---|
| Объем (масса) подземных вод, содержащихся в водоносном горизонте, которые могут быть извлечены из него при снижении напора, осушении пласта или вытеснении воды из пород | Естественные запасы, искусственные запасы | Емкостные запасы (ресурсы) |
| Суммарное питание подземных вод | Естественные ресурсы, искусственные ресурсы | Динамические ресурсы (запасы) |
| Емкостные и динамические запасы (ресурсы) подземных вод, сформировавшиеся под действием естественных факторов | Естественные запасы, естественные ресурсы | Естественные запасы (ресурсы) |
| Емкостные и динамические запасы (ресурсы) подземных вод, сформировавшиеся под влиянием антропогенных факторов | Искусственные запасы, искусственные ресурсы | Антропогенные ресурсы (запасы) |
| Емкостные и динамические запасы (ресурсы) подземных вод, сформировавшиеся под влиянием как естественных, так и антропогенных факторов | — | Естественно-антропогенные запасы (ресурсы) |
| Емкостные и динамические запасы (ресурсы) подземных вод, формирующиеся при искусственном подпитывании подземных вод для увеличения их запасов | Искусственные запасы, искусственные ресурсы | Искусственные запасы (ресурсы) |
| Расход водозаборных сооружений при заданных ограничениях | Эксплуатационные запасы (ресурсы) | Эксплуатационные запасы (ресурсы) |
| Дополнительное питание подземных вод, возникающее при их эксплуатации | Привлекаемые ресурсы | Привлекаемые ресурсы (запасы) |

одновременного учета как условий нахождения в водоносной системе, так и генезиса запасов употребляются последовательно два прилагательных (например, естественные динамические запасы, антропогенные емкостные запасы и т. д.).

Как следует из определения приведенного понятия «эксплуатационные запасы (ресурсы) подземных вод», их величина зависит не только от гидрогеологических условий, но и от схемы водоотбора (системы размещения водозаборных сооружений, расстояний между ними, расходов отдельных водозаборных сооружений). Поэтому оценка эксплуатационных запасов подземных вод на отдельных участках выполняется только применительно к конкретным схемам водозаборов.

При оценке прогнозных эксплуатационных ресурсов отдельных регионов и крупных гидрогеологических структур, на основе которых выполняются только проработки по схемам использования подземных вод, конкретные схемы водозаборных сооружений, как правило, еще отсутствуют. В связи с этим в зависимости от схемы эксплуатации на одной и той же площади и в одной и той же гидрогеологической структуре эксплуатационные запасы могут иметь различные значения. Это послужило основанием для выделения двух видов эксплуатационных ресурсов подземных вод, которые в настоящее время наиболее часто обозначаются терминами «потенциальные эксплуата-

ционные ресурсы» и «перспективные эксплуатационные ресурсы». Под потенциальными эксплуатационными ресурсами при этом понимается расход подземных вод, который может быть получен при размещении водозаборных сооружений по всей площади распространения продуктивных водоносных горизонтов и при расстояниях между сооружениями, обеспечивающих относительно полное использование всех источников формирования эксплуатационных ресурсов при заданных понижениях уровня подземных вод и расчетном сроке эксплуатации. Таким образом, потенциальные эксплуатационные ресурсы характеризуют «максимально возможный» в оцениваемом регионе расход водозаборных сооружений. В реальных условиях размещение водозаборных сооружений по всей площади распространения водоносных горизонтов в связи с физико-географическими, технико-экономическими и экологическими факторами по существу невозможно. В связи с этим потенциальные эксплуатационные ресурсы характеризуют только потенциальную обеспеченность того или иного района подземными водами и служат мерой сравнения различных районов в этом отношении.

Реальные возможности отбора подземных вод отражают перспективные эксплуатационные ресурсы, которые подсчитываются применительно к определенной схеме расположения водозаборных сооружений и условиям их эксплуатации.

При различных принятых для расчетов схемах расположения водозаборных сооружений и условиях их эксплуатации одной и той же величине потенциальных эксплуатационных ресурсов подземных вод всегда будут соответствовать различные значения перспективных эксплуатационных ресурсов, причем в связи с фильтрационными сопротивлениями водовмещающих пород перспективные ресурсы всегда меньше потенциальных.

По предложению Н. Н. Биндемана и других авторов отношение величины перспективных ресурсов $Q_{эп}$ к потенциальным $Q_{п}$ рекомендуется называть коэффициентом прогнозного использования подземных вод $\gamma$. Тогда

$$Q_{эп} = \gamma Q_{п}. \qquad (1.1)$$

Таким образом, перспективные эксплуатационные ресурсы являются частью потенциальных эксплуатационных ресурсов.

В рассмотренных в настоящем разделе классификациях не отражено разделение эксплуатационных запасов (ресурсов) подземных вод на категории по степени их разведанности (изученности). Для этих целей служит специальная классификация эксплуатационных запасов подземных вод, в которой выделяются разведанные эксплуатационные запасы, предварительно оцененные эксплуатационные запасы и прогнозные ресурсы. Эта классификация будет рассмотрена в гл. 14, а методика оценки прогнозных ресурсов в гл. 15.

Кроме того, эксплуатационные запасы подземных вод могут подразделяться по целевому назначению, по целесообразности и возможности промышленного освоения (балансовые и забалансовые) и т. п.

Рассмотрим особенности формирования динамических ресурсов и эксплуатационных запасов подземных вод, определяющие основные принципы их оценки.

### 1.3. ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Как отмечалось ранее, динамические ресурсы подземных вод представляют собой величину их суммарного возобновляемого питания и равны сумме всех приходных элементов водного баланса в пределах изучаемой системы подземных вод (водоносный горизонт, бассейн, район и т. д.).

Среднемноголетнее питание подземных вод численно равно суммарной разгрузке подземных вод, что может быть выражено следующим балансовым уравнением:

$$\sum_{i=1}^{n} Q_i = \sum_{J=1}^{N} Q_J, \tag{1.2}$$

где $Q_i$ — расход $i$-го ($i = 1, 2, \ldots, n$) источника питания подземных вод; $Q_J$ — расход $J$-го ($J = 1, 2, \ldots, N$) источника разгрузки подземных вод.

Практически всегда питание подземных вод существенно изменчиво во времени, испытывая суточные, сезонные и многолетние колебания. Любая гидрогеологическая система содержит в себе емкостные запасы, играющие регулирующую роль и компенсирующие в той или иной степени неравномерность питания во времени. Величина регулирующей емкости водоносных систем определяет степень ее инерционности по отношению к сбалансированности питания и разгрузки во времени.

Поэтому в силу инерционности любой гидрогеологической системы равенство (1.2) для отдельных интервалов времени нарушается в результате несбалансированности величин питания и разгрузки. В эти периоды происходит уменьшение или накопление емкостных запасов, и уравнение (1.2) приобретает вид

$$\sum_{i=1}^{n} Q_i \pm \frac{\Delta V_e}{t} = \sum_{J=1}^{N} Q_J, \tag{1.3}$$

где $\Delta V_e$ — уменьшение или увеличение емкостных запасов подземных вод в течение времени $t$.

Величина регулировочных запасов определяет продолжительность периода времени, в течение которого можно принимать осредненное значение питания подземных вод. Например, при изучении родникового стока этот период может ограничиваться сутками, а в крупных артезианских бассейнах и межгорных впадинах исчисляться десятками и даже сотнями лет.

Балансовое равенство (1.2) не будет соблюдаться также в том случае, если в течение многих лет изменения величин питания и разгрузки подземных вод будут иметь циклический или трендовый характер в результате преобразования ресурсоформирующих факторов.

По предложению члена-корреспондента АН УССР В. М. Шестопалова (1983) с учетом конкретных видов суммарного питания и разгрузки балансовое уравнение естественных динамических ресурсов может быть записано следующим образом:

$$Q_д = \varepsilon + Q_б + Q_{п.в} + Q_{эл} + Q_е + Q_{дг} + Q_м = Q_и + \\ + Q'_б + Q_{п.в} + Q'_е + Q_г + Q_{рд}, \quad (1.4)$$

где $\varepsilon$ — инфильтрационное (и конденсационное) питание; $Q_и$ — разгрузка путем испарения и транспирации; $Q_б$ и $Q'_б$ — водообмен (приток и отток) со смежными гидрогеологическими системами( для отдельных водоносных горизонтов и комплексов водообмен с выше- и нижезалегающими горизонтами и комплексами через разделяющие слои); $Q_{п.в}$ и $Q'_{п.в}$ — соответственно питание из поверхностных водотоков и водоемов и подземный приток в них; $Q_е$ и $Q'_е$ — соответственно питание и разгрузка подземных вод за счет изменения емкостных запасов; $Q_{эл}$ — элизионное питание; $Q_{дг}$ — питание за счет дегидратации минералов; $Q_г$ — расходование воды на гидратацию минералов; $Q_м$ — поступление вод из магматических растворов; радиолиз воды.

При практической оценке динамических ресурсов в связи с оценкой эксплуатационных запасов подземных вод составляющие $Q_{дг}$, $Q'_м$, $Q_г$, $Q_{рд}$, а также в большинстве случаев $Q_{эл}$ обычно не рассматриваются вследствие пренебрежимо малой величины по сравнению с другими элементами баланса питания и разгрузки, играющими основную роль.

При изучении динамических ресурсов часто используются понятия «подземный сток» и «подземный сток в реки». Подземный сток ($Q_{п.с}$) представляет собой расход подземного потока в том или ином сечении водоносной системы, обеспеченный питанием на площади, находящейся выше по потоку от этого сечения. В отличие от динамических ресурсов, подземный сток количественно отражает не все питание рассматриваемой гидрогеологической системы или отдельных водоносных горизонтов и комплексов, а лишь ту часть суммарного питания, которая остается за вычетом разгрузки подземных вод по мере латеральной фильтрации, происходящей выше расчетного сечения потока (например, разгрузки путем испарения, перетекания в соседние системы, горизонты и т. д.). Поэтому подземный сток, как характеристика динамических ресурсов, количественно обычно меньше их действительной величины. Исключение составляют случаи, когда по направлению движения потока разгрузка подземных вод отсутствует.

Подземный сток в реки $Q_{п.с.р}$ представляет собой ту часть подземного стока, которая разгружается в реки. Учитывая, что могут быть и другие виды разгрузки (например, латеральный отток, испарение и т. п.), подземный сток в реки, как правило, меньше подземного стока. Это различие определяется степенью гидродинамического несовершенства русел рек или степенью дренирования рекой рассматриваемой водоносной системы.

Соотношение между динамическими ресурсами, подземным стоком и подземным стоком в реки можно представить в следующем виде:

$$Q_д \geqslant Q_{п.с} \geqslant Q_{п.с.р}. \quad (1.5)$$

В многопластовой гидрогеологической системе суммарные динамические ресурсы системы определяются суммой питания или разгрузки на внешних границах системы (инфильтрация, испарение, разгрузка в реки и др.). Суммировать динамические ресурсы отдельных горизонтов водоносной системы нельзя.

Формирование динамических ресурсов подземных вод — это естественно-исторический процесс поступления, изменения и расходования воды в литосфере в естественных и нарушенных антропогенной деятельностью условиях. В изучении этого процесса обычно различают три основных аспекта: гидрогеодинамический, гидрогеохимический, гидрогеотермический.

Гидрогеодинамический аспект предусматривает качественную и количественную оценки питания, движения и разгрузки подземных вод. Гидрогеохимический и гидрогеотермический аспекты связаны с изучением свойств и состава воды.

Формирование ресурсов подземных вод находится в сложных условиях взаимодействия и взаимообусловленности подземной гидросферы с атмосферой, литосферой, биосферой и поверхностной гидросферой. Методологически изучение закономерностей формирования основано на установлении генетических связей количества и качества подземных вод с определяющими их факторами.

Все факторы формирования динамических ресурсов подземных вод подразделяются на естественные и антропогенные.

В комплексе естественных факторов выделяются следующие группы: физико-географические, геологические, гидрогеологические.

**Физико-географические факторы** определяют особенности формирования водного и солевого баланса на поверхности Земли, оказывают первостепенное влияние прежде всего на величину питания и качество грунтовых вод, а также характер и интенсивность водообменных процессов в той или иной гидрогеологической структуре.

По характеру влияния группа физико-географических факторов может быть подразделена на подгруппы климатических, орографических, гидрологических и биогенных факторов.

Такие климатические факторы, как атмосферные осадки (вид, количество, режим, характер выпадания, химический состав) и испарение (величина, режим), являются исходными в формировании инфильтрационного питания подземных вод, которое играет также существенную роль и в формировании солевого баланса зоны полного водного насыщения. Промерзание почв снижает потенциальные возможности инфильтрационного питания подземных вод в период зимних оттепелей и весеннего снеготаяния. Температура и влажность воздуха важны в формировании зональной смены увлажненности территории вообще и процессов конденсации в частности.

Орографические факторы являются основополагающими в формировании характера потоков подземных вод и закономерностей территориального распределения питания и разгрузки. Это, в свою очередь, обусловливает особенности формирования качества подземных вод в различных геоморфологических условиях.

К гидрологическим факторам формирования динамических ресур-

сов подземных вод отнесены: режим поверхностного стока, морфология русел рек, качество поверхностных вод. Режим поверхностного стока прежде всего проявляется в характере водообменных процессов в водоносных горизонтах, вскрываемых речной сетью. Строением русел рек определяется интенсивность взаимосвязи между подземными и поверхностными водами. Качество поверхностных вод особую важность приобретает в формировании качества подземных вод при их эксплуатации.

В самостоятельную подгруппу выделены биогенные факторы: растительность и почвы. Растительность является одним из основных факторов формирования баланса поверхностных и подземных вод. Особо в этом плане выделяется залесенность местности, способствующая уменьшению поверхностного и увеличению подземного стока. Почвы не являются в прямом смысле биогенным фактором и поэтому отнесены в эту подгруппу условно. Роль же их в интенсивности водообменных процессов и формировании качества инфильтрационных вод значительна. Почвенно-растительный слой является граничным на поверхности земли минерально-органогенным образованием, от свойств которого зависит режим влажности и солей в зоне аэрации, а также интенсивность инфильтрационного питания грунтовых вод. Дневная поверхность этого слоя является геохимическим барьером, где происходит резкая смена химического состава дождевых вод.

**Геологические факторы** определяют характер и свойства среды, в которой при ее существенном влиянии происходит формирование количества и качества подземных вод.

С геоструктурными факторами связано многообразие гидрогеологических структур, отличающихся спецификой водообменных процессов (гидрогеологические массивы, платформенные артезианские бассейны и т. д.).

Литология и строение осадочного чехла, коры выветривания, минерально-петрографический состав и трещиноватость кристаллических пород фундамента являются основополагающими в формировании гидрогеологических, в том числе и гидрогеохимических параметров.

**Гидрогеологические факторы** определяют интенсивность водообмена, а также характер и интенсивность тепломассопереноса в условиях зоны аэрации и зоны полного водонасыщения, что в конечном итоге проявляется в закономерностях пространственного распределения гидрохимических типов вод в минерализации. В целом гидрогеологические факторы обусловливают балансовую структуру подземных вод в естественных и антропогенных условиях.

В комплекс основных антропогенных факторов отнесены различные искусственные объекты, сооружения, строительство и эксплуатация которых изменяет направленность формирования и структуру водного и солевого баланса в подземных водах. Влияние антропогенных факторов происходит в условиях тесного взаимодействия с естественными факторами. При этом отдельные из естественных факторов могут быть существенно преобразованы. Прежде всего это относится к режиму поверхностных вод, мощности зоны аэрации, граничным

условиям. В ряде случаев (например, при интенсификации карстовых процессов, засоленности, уплотнении и разуплотнении пород и т. д.) могут изменяться и фильтрационные свойства хорошо и слабопроницаемых слоев.

По особенностям влияния с некоторой мерой условности в комплексе антропогенных факторов можно выделить отдельные их группы, характерные для тех или иных хозяйственно-экономических условий: а) промышленного и гражданского строительства; б) гидротехнического строительства; в) сельскохозяйственных мелиораций; г) лесотехнических мероприятий.

Такие антропогенные факторы, как шламо- и хвостохранилища, пруды-охладители и пруды-накопители, отстойники, водопроводно-канализационная сеть, промышленные и гражданские сооружения, предопределяют появление дополнительных источников питания подземных вод. Застройка территории, агролесотехническая мелиорация, лесотехнические мероприятия обеспечивают изменение сложившегося в естественных условиях соотношения приходных и расходных статей водного баланса на поверхности земли, в зоне аэрации и зоне полного водонасыщения.

Действие горных выработок на строительных площадках, в районах разработки месторождений полезных ископаемых, а также работа различных дренажных (водопонизительных и водозаборных) сооружений увеличивает интенсивность водообменных процессов.

По данным многолетних гидрометеорологических наблюдений, осушительные мелиорации в пределах Полесья в конечном итоге уменьшают меженный сток рек.

Огромную преобразующую роль в формировании водообменных процессов и баланса подземных вод играют такие факторы, как водохранилища и водные мелиорации сельскохозяйственных земель.

Изменение естественной структуры водного баланса под влиянием антропогенных факторов во многих случаях приводит к подтоплению территорий, засолению земель и другим отрицательным последствиям.

Изменение гидродинамических условий оказывает существенное влияние и на формирование качества подземных вод. Как правило, антропогенные факторы в условиях промышленного и гражданского строительства, агрохимическая мелиорация являются источниками загрязнения геологической среды, в том числе и подземной гидросферы.

Как правило, те или иные составляющие процесса формирования динамических ресурсов подземных вод в конкретных условиях по своему значению могут быть несущественными или отсутствовать. Так, основным процессом формирования грунтовых вод во многих случаях оказывается инфильтрация атмосферных осадков, исходя из величины которой производится оценка естественных динамических ресурсов.

Достижения современной гидрогеологии и гидрогеодинамики свидетельствуют о том, что в формировании динамических ресурсов артезианских водоносных горизонтов ведущую роль играют процессы, пе-

ретекания через слабопроницаемые слои. Причем эти процессы, как правило, происходят по всей площади распространения водоносных пластов, отличаясь лишь в зависимости от конкретных гидродинамических условий интенсивностью и направленностью (приток или отток). Интенсивность вертикального водообмена в артезианских бассейнах определяется проницаемостью, мощностью, выдержанностью и количеством слабопроницаемых пластов, а также особенностями тектонической их нарушенности.

Благодаря процессам вертикальной взаимосвязи водоносных горизонтов между собой и с поверхностными водами в классических «областях транзита» наибольшую роль играют процессы перетекания.

В соответствии с классическими представлениями важное место в питании напорных водоносных пластов отводится щитам, окружающим артезианские бассейны. Результаты же количественной оценки динамических ресурсов подземных вод свидетельствуют о том, что питание со стороны щитов в пополнении артезианских вод незначительно. Например, приток подземных вод с Украинского щита в Причерноморский артезианский бассейн составляет в общем питании всего лишь около 2—3 %, а в Днепровский артезианский бассейн — не превышает 3—5 %.

Наличие и важность процессов перетекания в формировании динамических ресурсов подземных вод свидетельствуют о том, что та или иная часть классической области транзита должна рассматриваться или как область питания, или как область разгрузки, или как та и другая одновременно. В значительной мере это определяется орогидрографическими особенностями территории. Как правило, в пределах основных водораздельных пространств происходит нисходящая фильтрация между этажно залегающими пластами; в долинах рек и других понижениях рельефа, способствующих разгрузке подземных вод, фильтрация имеет преимущественно восходящее направление.

Все это свидетельствует о неприемлемости при изучении динамических ресурсов напорных вод классических представлений о выделении в артезианских бассейнах основных областей питания, транзита и разгрузки водоносных горизонтов.

### 1.4. ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Определяющее значение при оценке перспектив использования подземных вод в народном хозяйстве имеют эксплуатационные запасы. Именно этот вид запасов подземных вод определяет их сущность как полезного ископаемого. Вместе с тем перечисленные в предыдущих разделах особенности подземных вод как полезного ископаемого и как составной части водных ресурсов суши предопределили весьма важное их отличие от всех других видов полезных ископаемых. Это отличие прежде всего заключается в том, что эксплуатационные запасы подземных вод формируются не в течение геологического времени, а непосредственно в процессе их отбора водозаборными сооружениями и могут изменяться в процессе эксплуатации.

Формирование эксплуатационных запасов подземных вод является процессом многофакторным. Как полезное ископаемое, они являются непосредственной частью земных недр и их величина определяется условиями залегания, строения, литологическим составом, структурой порового пространства водовмещающих пород и другими геолого-гидрогеологическими особенностями продуктивных водоносных горизонтов. Как часть общих водных ресурсов, подземные воды различных водоносных горизонтов находятся во взаимосвязи между собой, с поверхностными водами и атмосферой. В связи с этим формирование ЭЗПВ, так же как и динамических ресурсов, происходит под влиянием как геолого-гидрогеологических, так и орогидрографических, климатических и других природных факторов, а также антропогенных (техногенных) факторов, связанных с изменением водохозяйственной обстановки и определяющих возможность изменения условий питания, качества и условий отбора подземных вод из земных недр.

Рассмотрим коротко основные понятия, связанные с формированием запасов в соответствии с предложениями Б. В. Боревского (1987). Под формированием эксплуатационных запасов подземных вод понимается процесс поступления воды к водозаборным сооружениям, характер которого определяется совокупностью естественных геолого-гидрогеологических, физико-географических и антропогенных факторов, в том числе геолого-технических условий разработки месторождений подземных вод, а также их изменением при эксплуатации (факторы формирования ЭЗПВ).

Факторы, определяющие природную естественную и антропогенную обстановку, в которой происходит эксплуатация, и величину возможного водоотбора, могут быть определены как условия формирования эксплуатационных запасов подземных вод. К основным из них относятся:

А. Естественные факторы (физико-географические и геолого-гидрогеологические), включающие

1) характер залегания, распространения, геолого-структурные особенности, состав и строение водовмещающих пород;

2) гидрогеологические параметры водоносных и слабопроницаемых пластов, в том числе параметры взаимосвязи подземных вод различных водоносных горизонтов и подземных и поверхностных вод;

3) источники формирования (питания) подземных вод, поступающих к водозаборным сооружениям, определяющие балансовую структуру водоотбора и находящие свое отражение в граничных условиях;

4) гидрогеохимическую обстановку.

Б. Антропогенные факторы:

1) водохозяйственная обстановка, определяющая изменение (увеличение или уменьшение) питания подземных вод;

2) геолого-технические условия освоения эксплуатационных запасов подземных вод, определяющие конструкцию и схему водозаборных сооружений, их местоположение относительно границ распространения продуктивных водоносных пластов и источников питания, а также собственно величина водоотбора;

3) антропогенные источники загрязнения подземных вод.

Совокупность перечисленных факторов определяет пространственно-временную гидродинамическую структуру фильтрационного потока (размеры, форму поверхности и глубину депрессионной воронки), возможные изменения качества воды, а также влияние эксплуатации на различные компоненты окружающей среды.

В процессе эксплуатации гидродинамическая структура потока претерпевает коренную трансформацию по сравнению с естественно-антропогенной обстановкой, что, в свою очередь, вызывает изменение и пространственной гидрогеохимической структуры. На прогнозе основных изменений пространственно-временной гидродинамическо-гидрогеохимической структуры потока и базируется оценка эксплуатационных запасов подземных вод. Особенностью формирования эксплуатационных запасов подземных вод является нестабильность большинства перечисленных факторов во времени как под влиянием изменения уровней (напоров) подземных вод при эксплуатации, так и вследствие других антропогенных воздействий (в первую очередь — изменения водохозяйственной обстановки).

Изменчивость основных факторов формирования ЭЗПВ в пространстве и во времени и характер взаимосвязей между ними определяют различную сложность условий формирования (от простых до очень сложных) и значительные трудности их изучения.

Несмотря на многофакторность и сложность, формирование эксплуатационных запасов подземных вод имеет всегда детерминированный характер. Между основными факторами, обусловливающими формирование эксплуатационных запасов и режим водоотбора, имеются более или менее четко выраженные причинно-следственные связи, находящие свое отражение в основных закономерностях формирования эксплуатационных запасов.

Эти закономерности находят проявление во влиянии на главные особенности процесса формирования эксплуатационных запасов как различных сочетаний основных факторов формирования, так и наиболее характерных особенностей возможных тенденций их пространственно-временных изменений.

Общая величина ЭЗПВ водоносного горизонта на заданный расчетный срок эксплуатации связана с основными источниками их формирования следующим балансовым соотношением (см. рис. 3):

$$Q_э = \alpha_1 Q_{п.д} + \alpha_2 Q_{п.е} + \alpha_3 Q_{и.д} + \alpha_4 Q_{и.е} + Q_{пр}, \qquad (1.6)$$

где $Q_э$ — эксплуатационные запасы; $Q_{п.д}$ — природные (естественные и антропогенные) динамические ресурсы; $Q_{п.е} = \frac{V_е}{t}$ — расход, который может быть получен за счет полной сработки природных емкостных запасов за расчетное время эксплуатации; $Q_{и.д}$ и $Q_{и.е} = \frac{V_и}{t}$ — соответственно искусственные динамические ресурсы и расход, который может быть получен за счет полной сработки искусственных емкостных запасов за расчетное время $t$; $Q_{пр}$ — привлекаемые ресурсы; $\alpha_1$, $\alpha_2$, $\alpha_3$, $\alpha_4$ — коэффициенты использования различных видов динамических ресурсов и емкостных запасов.

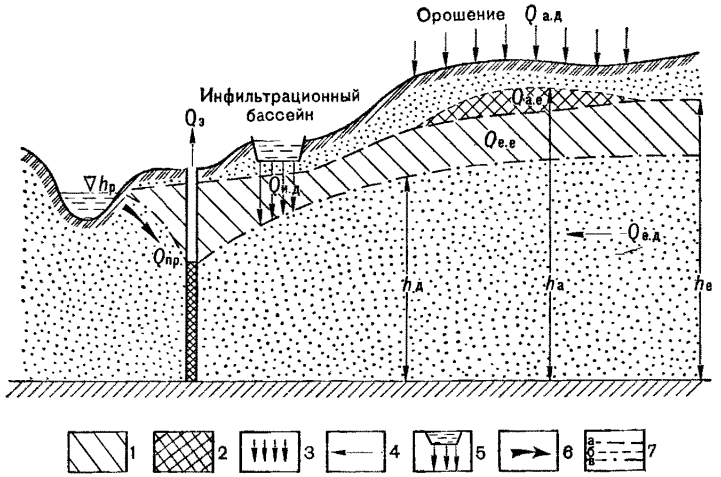



Рис. 4. Схема формирования ЭЗПВ ($Q_э$) за счет различных источников:
*1* — сработанные естественные емкостные запасы ($Q_{е.е}$); *2* — сработанные антропогенные емкостные запасы ($Q_{а.е}$); *3* — инфильтрация оросительных вод ($Q_{а.д}$); *4* — приток с водосборной площади за счет естественного питания ($Q_{е.д}$); *5* — приток из инфильтрационного бассейна, пополняемого из реки ($Q_{и.д}$); *6* — приток из реки ($Q_{пр}$); *7* — уровень подземных вод: *а* — в естественных условиях ($h_е$), *б* — в естественно-антропогенных ($h_а$); *в* — в условиях эксплуатации ($h_д$)

В реальной природной обстановке $Q_{п.д}$ и $Q_{п.е}$ при оценке запасов следует по возможности разделять на естественные ($Q_{е.д}$ и $Q_{е.е}$) и антропогенные ($Q_{а.д}$ и $Q_{а.е}$) составляющие, поскольку коэффициенты их использования, как правило, будут неодинаковые. Кроме того, они могут характеризоваться различным качеством воды. Это приведет к разделению отдельных слагаемых в уравнении (1.6) на составляющие: $Q_{е.д}$, $Q_{е.е}$, $Q_{а.д}$, $Q_{а.е}$.

Формирование эксплуатационных запасов (притока подземных вод к водозаборным сооружениям) иллюстрируется схемой, представленной на рис. 4.

В величину привлекаемых ресурсов входят также возвратные воды, поступающие в водоносный горизонт путем инфильтрации или через поверхностные водные источники. Величина $Q_{пр}$ характеризует усиление питания подземных вод, вызванное эксплуатацией (возникновение или усиление фильтрации поверхностных вод, инфильтрационного питания, смещения подземных водоразделов и т. п.). При рассмотрении баланса отдельного водоносного горизонта, а не водоносной системы в целом в $Q_{пр}$ может входить перетекание из смежных горизонтов, которое в системе входит в природные динамические и емкостные запасы.

Выражение (1.6) не позволяет непосредственно численно определить $Q_э$, так как входящие в него коэффициенты $\alpha_i$ не могут быть определены вне связи с условиями и режимом водоотбора. В зависимости от условий формирования эксплуатационных запасов подземных

вод $0 \leqslant \alpha_i \leqslant 1$, причем $\alpha_i$ могут изменяться во времени как во внутригодовом, так и в многолетнем разрезе или оставаться постоянными. Их величина и характер изменения определяются совокупностью перечисленных выше факторов формирования ЭЗПВ.

Из выражения (1.6) хорошо видно, что при изменении коэффициентов $\alpha_i$ источники формирования ЭЗПВ и их соотношение могут изменяться во времени под влиянием изменений естественных и антропогенных факторов, в том числе и целенаправленно. Возможность их целенаправленного изменения приводит к возможности управления формированием ЭЗПВ. Последнее коренным образом отличает пресные подземные воды от всех других видов полезных ископаемых, в том числе других типов подземных вод, и позволяет предотвратить процессы их истощения путями, не связанными с ограничением использования.

В количественном отношении изменения условий формирования ЭЗПВ находят свое отражение в трансформации пространственной гидродинамической структуры потока; в качественном — гидрогеохимической.

При известных совокупностях факторов формирования ЭЗПВ, охарактеризованных количественно, и характере их взаимосвязи процесс управления формированием эксплуатационных запасов сводится в общем случае к целенаправленному формированию заданной структуры фильтрационного потока.

Переходя к характеристике роли отдельных источников формирования ЭЗПВ, отметим, что в зависимости от условий формирования превалирующую роль могут играть различные виды запасов (ресурсов). Так, при работе береговых водозаборных сооружений, расположенных вдоль рек со значительным меженным расходом, основным источником формирования эксплуатационных запасов являются привлекаемые ресурсы (фильтрация из реки), а роль динамических и емкостных запасов относительно невелика. ЭЗПВ ограниченных структур и массивов, где водоносные горизонты практически не связаны с поверхностным стоком, формируются в основном за счет сработки емкостных запасов и перехвата динамических ресурсов. Для глубоко залегающих артезианских водоносных горизонтов в бассейнах платформенного типа основную роль играют упругие запасы, в то время как для неглубоко залегающих горизонтов, хорошо связанных с вышележащими, наибольшее значение приобретают привлекаемые ресурсы (перетекание из вышележащих горизонтов). В районах интенсивного орошения значительную роль могут играть антропогенные динамические ресурсы (инфильтрация оросительных вод). На участках искусственного подпитывания подземных вод часто основным источником формирования эксплуатационных ресурсов являются искусственные ресурсы.

Как следует из уравнения (1.6), эксплуатационные запасы подземных вод могут быть обеспечены источниками формирования на определенный период эксплуатации или на неограниченное время. В последнем случае источниками формирования эксплуатационных запасов являются динамические ресурсы, а также привлекаемые ресурсы (если они, в свою очередь, обеспечены на неограниченный срок эксплуа-

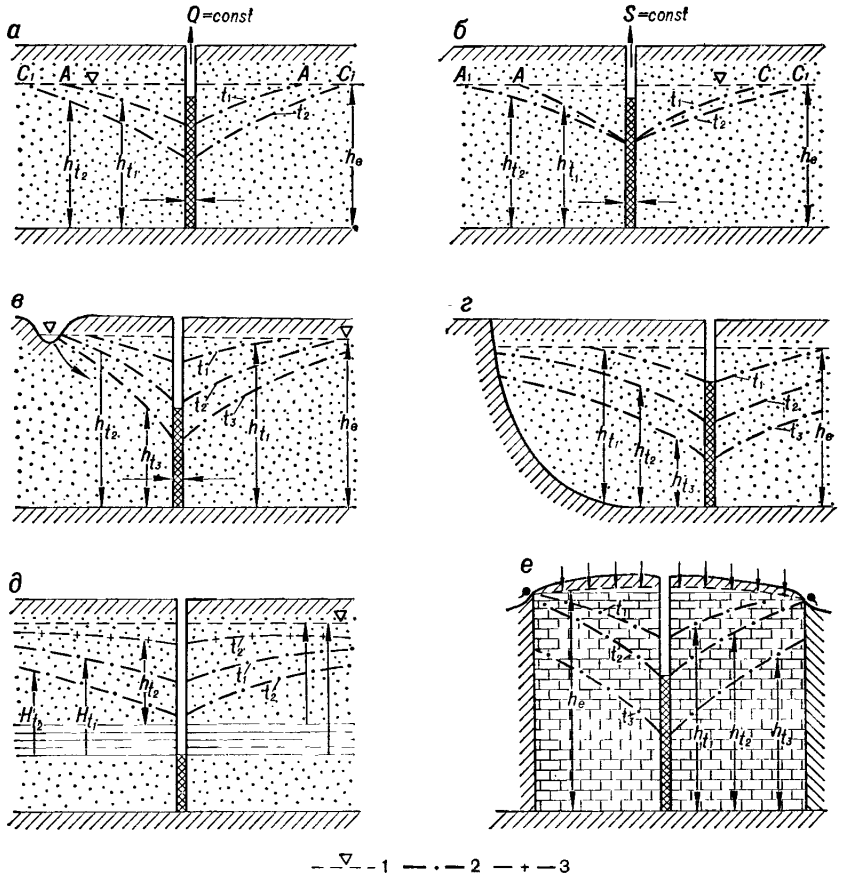



Рис. 5. Схема формирования воронки депрессии при работе водозаборных сооружений при типовых граничных условиях:

*а* — в неограниченном безнапорном пласте с постоянным дебитом; *б* — в неограниченном безнапорном пласте с постоянным понижением; *в* — в полуограниченном пласте с границей постоянного напора (река); *г* — в полуограниченном пласте с непроницаемой границей; *д* — в неоднородно-слоистом пласте; *е* — в закрытом круговом пласте. *1* — уровень подземных вод в естественных условиях; *2* — уровни подземных вод эксплуатируемого горизонта ($h_{t1} H_{t1}$, $h_{t2}$ $H_{t2}$, $h_{t3}$); *3* — уровень подземных вод питающего горизонта.

тации), так как при $t \to \infty$ второй и четвертый члены правой части уравнения (1.6) превращаются в нуль.

Рассмотрим некоторые особенности формирования ЭЗПВ при эксплуатации в типовых условиях.

Неограниченный пласт. В неограниченном однородном пласте при работе скважины с постоянным расходом понижение напора подземных вод распространяется с равной скоростью во всех направлениях. Пусть имеется безнапорный пласт, не получающий питания, в связи с чем динамические ресурсы подземного потока и его уклон равны нулю. В пласте работает скважина с постоянным дебитом $Q$ (рис. 5, *а*). Допустим, что в какой-то момент времени $t$ после на-

чала откачки кривая депрессии заняла положение $ABC$. Дебит скважины в этот период формировался благодаря осушению пласта, т. е. за счет сработки емкостных запасов по площади круга радиусом $AB$. При дальнейшем водоотборе депрессионная воронка должна развиться дальше и в какой-то момент времени $t_1$ депрессия распространится до точек $A_1$ и $C_1$. Расширение депрессии обязательно вызовет снижение уровня в скважине (точка $B$), так как в противном случае уменьшился бы градиент потока к скважине и дебит стал бы уменьшаться. В связи с тем, что по мере расширения депрессии площадь, на которой будет происходить изменение напора, все время увеличивается, темпы снижения уровня соответственно, замедляются.

Вместе с тем поскольку водоотбор обеспечивается только за счет сработки емкостных запасов, расширение депрессионной воронки и снижение уровня воды будут продолжаться весь период эксплуатации, причем заданный постоянный расход может поддерживаться только до тех пор, пока он будет обеспечиваться остаточной мощностью водоносного горизонта в скважине.

При работе скважин с постоянным понижением (рис. 5, *б*) после того, как кривая депрессии на какой-то момент времени $t_1$ заняла положение $ABC$, как и в случае постоянного дебита, будет происходить расширение депрессионной воронки, которая в момент времени $t_2$ займет положение $A_1BC_1$. Поскольку точка $B$ не может перемещаться в глубь пласта (согласно поставленному условию), градиент потока все время будет уменьшаться, что, в свою очередь, вызовет уменьшение дебита. Как и в предыдущем случае, из-за увеличения площади осушения пласта темпы изменения дебита замедлятся, но неустановившийся режим сохранится на весь период эксплуатации.

Скорость замедления уровней подземных вод определяется фильтрационными и емкостными параметрами водоносных пластов. Чем больше водопроводимость пласта, тем быстрее распространяется влияние откачки и медленнее темп снижения уровня. Наоборот, чем больше водоотдача пород, тем медленнее развивается депрессия, так как при одном и том же количестве откаченной воды объем осушенной зоны тем меньше, чем больше водоотдача пласта. В скальных трещиноватых породах, характеризующихся небольшой водоотдачей, в безнапорных водоносных горизонтах депрессия растет значительно быстрее, чем при откачках из галечников, крупнозернистых песков и других рыхлообломочных отложений, обладающих повышенной водоотдачей. Как известно, способность пласта передавать изменение уровня подземных вод со свободной поверхностью характеризуется коэффициентом уровнепроводности $a_y$, который равен отношению проводимости пласта $kh_{ср}$ к его гравитационной водоотдаче $\mu$. В реальных природных условиях величина коэффициента уровнепроводности обычно составляет $10^3 — 10^4$ м²/сут.

В напорных изолированных водоносных горизонтах при отсутствии взаимосвязи со смежными горизонтами режим подземных вод при эксплуатации характеризуется в целом теми же закономерностями, однако при снижении напоров до его кровли осушение пласта не происходит. В этих условиях формирование эксплуатационных запасов

подземных вод связано с проявлением упругого режима фильтрации. При снижении пластового давления (напора) происходит уменьшение объема порового пространства и упругое расширение воды, что вызывает вытеснение ее из пласта в скважину.

Параметром, характеризующим скорость развития депрессионных воронок в напорных пластах, является коэффициент пьезопроводности, равный отношению коэффициента фильтрации к упругоемкости пласта или отношению водопроводимости к упругой водоотдаче. Поскольку упругая водоотдача на несколько порядков ниже гравитационной, скорость изменения уровня в напорных пластах значительно выше, чем в безнапорных (коэффициент пьезопроводности обычно составляет $10^5 — 10^7$ м$^2$/сут).

Полуограниченный пласт. Рассмотрим сначала безнапорный водоносный горизонт, непосредственно связанный с рекой, которая является границей постоянного напора (рис. 5, *в*).

При отсутствии потока подземных вод в первый период эксплуатации формирование эксплуатационных запасов будет происходить точно так же, как и в неограниченном водоносном горизонте, т. е. только за счет сработки емкостных запасов подземных вод. Кривая депрессии займет положение, показанное на момент времени $t_1$, продолжительность которого зависит от расстояния водозаборного сооружения до реки и коэффициента уровнепроводности. Чем больше коэффициент уровнепроводности и чем меньше расстояние от реки, тем меньше продолжительность периода, на протяжении которого река не будет оказывать влияния на формирование эксплуатационных запасов подземных вод. По истечении этого периода на величину понижения уровня в водозаборном сооружении будет оказывать влияние граница пласта, начнется поступление поверхностных вод к водозаборному сооружению, темп падения уровня замедлится (положение депрессии на время $t_2$) и через определенное время понижение уровня стабилизируется ($t_3$). В таких условиях со временем будет уменьшаться роль емкостных запасов и расти значение привлекаемых ресурсов . После установления стационарного режима источником формирования эксплуатационных запасов будут только привлекаемые ресурсы (поверхностный сток).

При наличии естественного потока режим движения будет характеризоваться в целом теми же особенностями, что и режим в условиях бассейна подземных вод: снижение уровней и развитие депрессии в первый период и последующая стабилизация, когда на понижение уровня начнет оказывать влияние граница пласта. В первый период формирование эксплуатационных запасов будет происходить за счет емкостных запасов водоносного горизонта. При достижении депрессией границ пласта в формировании эксплуатационных запасов начинают играть роль динамические ресурсы в зоне влияния водозаборного сооружения. Если дебит водозаборного сооружения не превышает величины динамических ресурсов, то на период стабилизации эксплуатационные запасы полностью формируются за их счет, а между рекой и водозаборным сооружением образуется водораздел. Однако динамические ресурсы обычно характеризуются величинами, которые

1.2. **Доля источников формирования эксплуатационных запасов подземных вод вблизи реки, %**

| Источники формирования | t, сут | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 1,0 | 10,0 | 100,0 | 1000,0 | |
| Емкостные запасы | 100 | 98 | 90 | 74 | 28 | 9 | 3 | 0 |
| Динамические ресурсы | 0 | 2 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Привлекаемые ресурсы | 0 | 0 | 0 | 16 | 62 | 81 | 87 | 90 |

значительно меньше дебита водозаборного сооружения. В этих условиях начинается привлечение речных вод к водозаборному сооружению, и его дебит с этого момента времени будет формироваться за счет двух источников: динамических и привлекаемых ресурсов. В реальных условиях роль привлекаемых ресурсов будет намного существеннее, чем динамических.

В табл. 1.2 показано изменение отдельных источников формирования ЭЗПВ во времени для водозаборного сооружения, представляющего собой линейный ряд скважин большой напряженности, расположенный вдоль реки на расстоянии 100 м, причем длина ряда значительно превышает расстояние от ряда до реки. В естественных условиях водоносный горизонт дренировался рекой. Отношение единичного расхода естественного потока (расход потока шириной 1 м) к единичному дебиту линейного ряда (дебиту, приходящемуся на 1 м длины ряда) равно 0,1. Расчеты проведены при коэффициенте уровнепроводности $4 \cdot 10^3$ м$^2$/сут.

Как видно из таблицы, в рассматриваемом примере емкостные запасы играют существенную роль только в самый первый период эксплуатации. Уже в первые сутки начинается перехват естественного потока, причем доля динамических ресурсов в общем балансе водоотбора достаточно быстро достигает своей предельной величины. В дальнейшем главенствующую роль начинают играть привлекаемые ресурсы (поверхностные воды), которые уже на десятые сутки обеспечивают более 60 % производительности водозаборного сооружения.

В полуограниченном пласте с непроницаемой границей (рис. 5, *г*) формирование ЭЗПВ происходит в первый период времени, пока депрессия не достигла границы, так же как в неограниченном пласте (время $t_1$). Затем по мере достижения депрессией непроницаемой границы пласта скорость снижения уровня возрастает по сравнению с неограниченным пластом.

Время наступления квазистационарного режима ($t_2$) по сравнению с неограниченным пластом возрастает, так как зависит не только от параметров водоносного горизонта, но и от расстояния водозаборной скважины до непроницаемой границы. В дальнейшем в любой момент времени $t_3$ кривая депрессии параллельна самой себе, но скорость снижения уровня в этой области в 2 раза выше, чем в неограниченном пласте.

Неустановившийся режим продолжается весь период эксплуатации, а ЭЗПВ формируются за счет емкостных запасов.

Неоднородно-слоистый пласт состоит из двух водоносных горизонтов, разделенных слабопроницаемым слоем. Рассмотрим случай, когда границы пласта в плане не оказывают влияния на работу водозаборного сооружения. Водозаборное сооружение заложено в напорном горизонте *2*, отделенном от вышележащего безнапорного горизонта *1* слабопроницаемым слоем (рис. 5, *д*). Пьезометрический уровень напорного пласта в естественных условиях совпадает со свободной поверхностью безнапорного.

В рассматриваемых условиях закономерности изменения уровня подземных вод в первый период будут аналогичны прбанализированным ранее в изолированном напорном пласте (время $t_1$). В этот период формирование эксплуатационных запасов подземных вод целиком происходит за счет сработки упругих запасов эксплуатируемого водоносного горизонта. В дальнейшем в связи со снижением уровня в эксплуатируемом водоносном горизонте, которое, в свою очередь, вызывает понижение уровня в смежном пласте, начинается перетекание воды из верхнего горизонта в нижний, и кривая депрессии займет положение, соответствующее времени $t_2$. Продолжительность первого периода, когда процессы перетекания практически не сказываются, зависит от коэффициента фильтрации ($k_0$) и мощности ($m_0$) слабопроницаемого слоя и параметров водоносных горизонтов. В связи с тем, что в эксплуатируемый горизонт начинает поступать дополнительное по сравнению с естественными условиями количество воды, темп снижения уровня замедляется, а основным источником формирования эксплуатационных запасов становятся емкостные запасы питающего безнапорного горизонта. В тех случаях, когда верхний водоносный горизонт, из которого происходит перетекание, в естественных условиях представляет собой зону разгрузки подземных вод испарением либо этот горизонт гидравлически связан с поверхностными водотоками и водоемами, в этом пласте через непродолжительное время уровень может стабилизироваться, что приводит к стабилизации уровня и в нижнем эксплуатируемом водоносном горизонте. Источником формирования ЭЗПВ в этом случае являются динамические ресурсы верхнего горизонта, или привлекаемые ресурсы. В случае, когда перетекание обеспечивается сработкой емкостных запасов питающего горизонта, эксплуатация происходит при неустановившемся режиме, а при участии привлекаемых поверхностных вод и динамических ресурсов верхнего горизонта возможна стабилизация.

В тех случаях, когда пласт, из которого происходит перетекание, является напорным, ЭЗПВ формируются за счет сработки упругих запасов питающего пласта. По отношению к эксплуатируемому горизонту все ресурсы, формирующиеся за счет перетекания, можно рассматривать как привлекаемые. В табл. 1.3 показано соотношение различных источников формирования на разные моменты времени для следующих схем:

I — нижний пласт напорный, верхний — безнапорный, при эксплуатации происходит снижение уровня в верхнем пласте;

II — нижний пласт напорный, верхний — безнапорный, в верхнем пласте уровень поддерживается практически постоянным;

**1.3. Доля источников формирования эксплуатациоиных запасов подземных вод в неоднородно-слоистых пластах, %**

| № схемы | Источники формирования | t, сут | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 0,1 | 1,0 | 10,0 | 100,0 | 1000,0 |
| I | Упругие запасы эксплуатируемого горизонта | 100 | 100 | 63 | 10 | 1 |
| I | Привлекаемые ресурсы | 0 | 0 | 37 | 90 | 99 |
| II | Упругие запасы эксплуатируемого горизонта | 100 | 100 | 63 | 10 | 1 |
| II | Привлекаемые ресурсы | 0 | 0 | 37 | 90 | 99 |
| III | Упругие запасы эксплуатируемого горизонта | 100 | 100 | 71 | 53 | 50 |
| III | Привлекаемые ресурсы | 0 | 0 | 29 | 47 | 50 |

III — оба пласта напорные.

Расчеты сделаны для условий заложения водозаборного сооружения в нижнем горизонте. Параметр слабопроницаемого слоя $k_0/m_0$ ($k_0$ — коэффициент фильтрации, $m_0$ — мощность) принят равным $10^4$ — 1/сут, водоотдача безнапорного горизонта $\mu = 0{,}1$, упругая водоотдача напорных пластов $\mu^* = 0{,}001$.

Как видно из таблицы, для двух первых схем доля привлекаемых ресурсов уже на сотые сутки после начала эксплуатации достигает 90 %. Причем интересно, что в обоих случаях получились близкие результаты. Это объясняется тем, что при принятой величине водоотдачи безнапорный горизонт обладает значительными емкостными запасами, в связи с чем в этом горизонте происходит незначительное понижение уровня. Поэтому здесь основным фактором, определяющим закономерности формирования эксплуатационных запасов, является параметр слабопроницаемого слоя ($k_0/m_0$).

В третьем случае роль привлекаемых ресурсов значительно меньше. В этих условиях соотношение упругих запасов эксплуатируемого горизонта и привлекаемых ресурсов со временем определяется соотношением величин водоотдачи нижнего и верхнего горизонтов.

Закрытые круговые пласты. Рассмотрим безнапорный круговой пласт, со всех сторон окруженный практически непроницаемыми породами. В естественных условиях происходит питание этого пласта за счет инфильтрации атмосферных осадков. Разгружаются подземные воды на контакте с непроницаемыми породами в виде родникового стока и испарения (рис. 5, *е*). В центре пласта расположена скважина, из которой производится откачка. В первый период откачки снижение уровня происходит так же, как в неограниченном пласте (кривая, соответствующая времени $t_1$). В этот период эксплуатационные запасы формируются за счет емкостных запасов. После того как депрессия достигнет границ пласта, начнется перехват естественного потока и уменьшение расхода родников на границах пласта, а кривая депрессии будет соответствовать достигнутому положению на время $t_2$. При этом если дебит родников превышает расход водозаборного сооружения, движение со временем стабилизируется. В этих

условиях производительность водозаборного сооружения будет целиком обеспечиваться динамическими ресурсами водоносного горизонта. Если расход водозаборного сооружения превышает родниковую разгрузку, будет продолжаться снижение уровня подземных вод, причем это снижение будет связано со временем прямолинейной зависимостью (время $t_3$). В этом случае эксплуатационные запасы формируются как за счет динамических ресурсов, так и емкостных запасов подземных вод.

Как видно из рассмотренных примеров, даже если эксплуатационные запасы полностью обеспечены величиной динамических и привлекаемых ресурсов, в период формирования воронки депрессии будет более или менее значительной в балансе водоотбора и доля емкостных запасов, что обусловливает неустановившийся режим фильтрации в этот период. Продолжительность этого периода может охватить не только начальный, но и весь период эксплуатации. Продолжительность периода неустановившейся фильтрации и долю динамических и привлекаемых ресурсов в общем балансе водоотбора определяют такие параметры, как водопроводимость и водоотдача пластов, вертикальная гидропроводность слабопроницаемых пластов, разделяющих водоносные горизонты, расстояние водозаборного сооружения от границ пласта, контуров питания и разгрузки, условия на границах, допустимое понижение уровня.

Учитывая неравномерность питания подземных вод во внутригодовом и многолетнем разрезе, характерным режимом работы водозаборного сооружения является режим периодической сработки и восполнения емкостных запасов. В периоды отсутствия питания или его резкого уменьшения, которые могут охватывать меженные периоды или циклы маловодных лет, возрастает доля сработки емкостных запасов, которые затем полностью или частично восполняются за счет усиления поступления в воронку депрессии динамических или привлекаемых ресурсов в многоводные периоды.

### 1.5. ПОНЯТИЕ О МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Подземные воды, пригодные для практического использования в народном хозяйстве, как и все другие полезные ископаемые, формируют месторождения подземных вод. Впервые в гидрогеологической практике термин «месторождение» был предложен А. М. Овчинниковым еще в 30-х годах для минеральных вод. Под месторождением минеральных вод он понимал «пространственно оконтуриваемые скопления воды определенного состава (отвечающего установленным кондициям) в количествах, достаточных для экономически целесообразного использования». Применительно к пресным водам, используемым для водоснабжения и орошения, идея А. М. Овчинникова о понятии «месторождение» была поддержана Г. Н. Каменским (1947) и развита Н. И. Плотниковым (1959, 1965). Отмечая определенную условность этого понятия в связи с подвижностью воды и водообновляемостью ее ресурсов, Н. И. Плотников убедительно показал правомерность и практическую

важность термина «месторождение» для систематизации материалов оценки запасов подземных вод, усовершенствования методики их поисков и разведки в различных природных условиях. Однако следует отметить, что, говоря о месторождениях подземных вод, нельзя рассматривать их как «скопление» или «накопление» подземных вод, так как их скопления может и не быть. Так, дебиты водозаборных сооружений в речных долинах почти полностью формируются за счет привлечения поверхностного стока. На основании анализа особенностей формирования эксплуатационных запасов подземных вод в различных гидрогеологических условиях с учетом их специфики как динамичного полезного ископаемого Л. С. Язвиным и Б. В. Боревским в 1976 г., в отличие от ранее существовавших определений, было предложено понимать под месторождениями подземных вод не участки «скопления», а участки с благоприятными условиями для отбора подземных вод. Это определение с небольшими редакционными изменениями вошло в инструкцию по применению классификации эксплуатационных запасов и прогнозных ресурсов подземных вод, утвержденную в 1984 г., и в настоящее время выглядит следующим образом. Под м е с т о р о ж д е н и е м п о д з е м н ы х в о д (МПВ) подразумевается пространственно-ограниченная часть водоносной системы, в пределах которой под влиянием естественных или искусственных факторов создаются благоприятные по сравнению с окружающими площадями условия для отбора подземных вод в количестве, достаточном для целевого использования их в народном хозяйстве. Часть площади месторождения подземных вод, на которой производится их извлечение из недр водозаборным сооружением, принято называть эксплуатационными участками. На крупных месторождениях могут выделяться несколько участков, которые могут быть однотипными, или различаться между собой по геолого-гидрогеологическим условиям и условиям освоения.

В пределах месторождения могут выделяться один или несколько продуктивных водоносных пластов, являющихся непосредственными объектами эксплуатации.

Высокая динамичность подземных вод, широкое площадное распространение водоносных горизонтов, значительное превышение площадей областей формирования запасов и влияния водоотбора над площадью участков эксплуатации вызывают некоторую неопределенность при оконтуривании месторождений подземных вод и обосновании их границ. Это приводит к тому, что ряд исследователей вообще ставят под сомнение возможность и целесообразность использования понятия «месторождение» применительно к подземным водам.

К решению этого вопроса необходимо подходить с учетом того, что для всех полезных ископаемых понятие «месторождение» является не геологическим, а геолого-экономическим. Оно определяет местонахождение полезного ископаемого, которое в количественном и качественном отношении может быть предметом промышленной разработки при данном состоянии техники и в данных экономических условиях (Геологический словарь, М., 1973). В таком понимании выделение границ месторождения определяется не только геолого-гидрогеологическими условиями, но и конкретными народнохозяйственными

требованиями, а также условиями освоения разведуемых месторождений. При таком подходе к понятию «месторождение» в вышеприведенном определении в составе благоприятных условий должны учитываться не только геолого-гидрогеологические, но и экономические факторы. Именно эти факторы могут быть определяющими для выделения месторождений подземных вод на фоне относительно равноценных условий формирования запасов по физико-географическим и геолого-гидрогеологическим факторам.

Введение в понятие «месторождение» экономических категорий позволяет исключить из определения «сравнение с окружающими площадями», так как такое сравнение уже есть элемент учета экономических условий освоения подземных вод.

С учетом этих соображений может быть дана следующая формулировка понятия «месторождение подземных вод».

Под месторождением подземных вод (МПВ) следует понимать пространственно ограниченную часть водоносной системы, в пределах которой под влиянием сочетания комплекса геолого-экономических факторов создаются благоприятные условия для отбора подземных вод в количестве, достаточном для их целевого использования в народном хозяйстве.

Условность границ месторождения свойственна всем видам полезных ископаемых. Так, конфигурация границ рудных месторождений и их размеры могут существенно изменяться в зависимости от существующих кондиций по величине минимального содержания полезного ископаемого. При этом изменение границ месторождения происходит на фоне естественного содержания в горной породе полезного ископаемого.

Объекты, рассматривающиеся как рудопроявления из-за некондиционного содержания в них полезного ископаемого, при изменении экономической обстановки (коньюнктуры) и совершенствовании техники разработки и технологии извлечения полезного ископаемого могут переходить в категорию месторождений.

Границы месторождений, например строительных материалов, при одинаковых условиях залегания и качестве на больших площадях выделяются условно в контурах разведанной площади, определяемой только экономическими факторами (условия освоения, благоприятные условия для землеотведения, местоположение относительно потребителей и пр.).

Возвращаясь к месторождениям подземных вод, отметим, что к технико-экономическим факторам, характеризующим возможные границы месторождения, относятся факторы, определяющие: а) возможность размещения водозаборных сооружений и трасс водоводов по условиям местности и землеотведения, застроенности территории, наличия сельскохозяйственных угодий и т. п.; б) полный или частичный вывод земель из сферы народнохозяйственного освоения в связи с разработкой месторождения и необходимостью организации зон санитарной охраны, которые должны быть непосредственно связаны с разработкой и включаться в контур месторождения; в) природоохранные ограничения.

Помимо контура МПВ следует выделять: 1) область влияния водозаборных сооружений, совпадающую с площадью депрессионной воронки; 2) область формирования ЭЗПВ, соответствующую площади водосбора, где формируются подземные воды, поступающие в пределы месторождения. Контуры этих областей могут как различаться, так и совпадать. Возможные изменения гидрогеологических условий и окружающей среды в области влияния также должны учитываться в технико-экономическом и социально-экономическом обосновании целесообразности эксплуатации месторождения.

Таким образом, в соответствии с предложенным определением понятия МПВ их контуры следует принимать (Б. В. Боревский, 1986):

1) с учетом естественных геолого-гидрогеологических факторов, определяющих условия формирования эксплуатационных запасов собственно в пределах месторождения: а) по границам продуктивных водоносных горизонтов, имеющих ограниченное по площади распространение; б) по границам зон повышенной водопроводимости в пределах водоносных горизонтов, имеющих широкое площадное распространение; в) по границам развития некондиционных вод в случаях, когда при полном освоении месторождения за расчетный срок некондиционные воды с этого контура подтянутся к водозаборным сооружениям и качество воды в смеси перестанет соответствовать требованиям;

2) с учетом технико-экономических и социально-экономических факторов, определяющих возможность освоения месторождений, при равноценных геолого-гидрогеологических условиях на большой площади: а) по границам зон санитарной охраны (для питьевых вод), определяющих полное или частичное выведение земель из народнохозяйственного оборота; б) по границам участков, где возможны и целесообразны размещение водозаборных сооружений и организация зон санитарной охраны (последняя — только для питьевых вод) с учетом природных условий и возможностей народнохозяйственного освоения территории.

На рис. 6 приведены основные схемы выделения границ месторождений пресных подземных вод (МППВ) в типовых условиях и их соотношение с областями влияния водозабора и формирования ЭЗПВ.

При наличии в пределах месторождения нескольких продуктивных взаимосвязанных водоносных горизонтов общая граница проводится по контуру горизонта, охватывающего большую площадь (по наиболее удаленным границам).

В общем случае при определении контура месторождения в разрезе его нижняя граница принимается по подошве глубоко залегающего горизонта, принципиально пригодного для использования по целевому назначению, а верхняя — по поверхности земли.

При наличии в разных горизонтах вод различного качества, пригодных для питьевых в одном и технических целей в другом, либо питьевых и минеральных вод, на одной и той же площади могут быть выделены два месторождения подземных вод различного целевого назначения.

Сформулированные принципы выделения границ МПВ показывают, что со временем их положение и конфигурация, также как и гра-

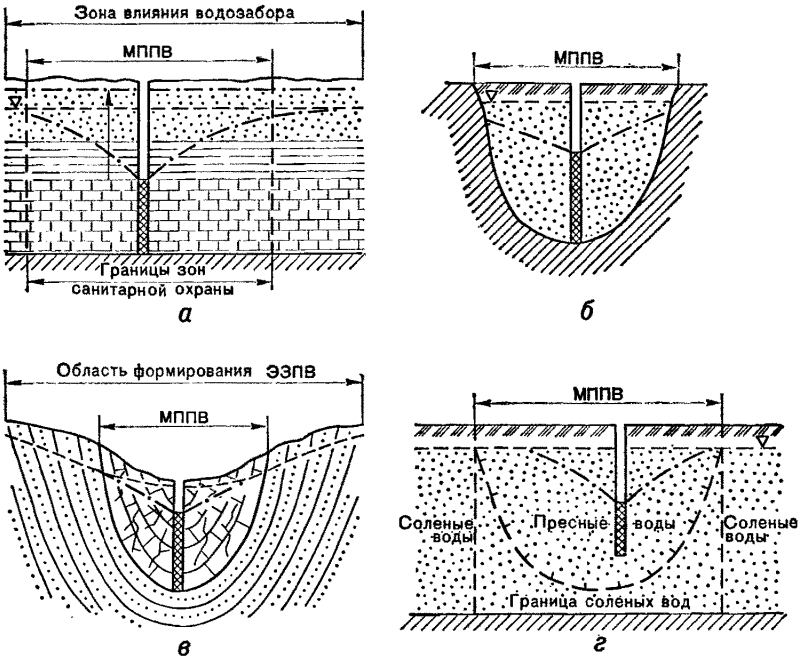



Рис. 6. Основные схемы выделения границ месторождений подземных вод:
*а* — в неограниченном пласте; *б* — в ограниченном пласте; *в* — в пределах зоны повышенной водопроводимости на фоне развития слаботрещиноватых пород; *г* — в условиях линзы пресных вод

ницы месторождений других полезных ископаемых, могут изменяться в зависимости от социально-экономической коньюнктуры и величины водоотбора, схемы и местоположения водозаборных сооружений, водохозяйственной обстановки и других антропогенных факторов.

Рассмотрение особенностей месторождений подземных вод показывает, что для их формирования необходим комплекс благоприятных естественных геолого-гидрогеологических и физико-географических факторов, которые в сочетании с антропогенной обстановкой и социально-экономической конъюнктурой приводят к возможности формирования месторождения. К таким факторам относятся: а) наличие пластов-коллекторов с высокими фильтрационными свойствами; б) благоприятные (естественные или антропогенные) условия питания и восполнения запасов подземных вод; в) качество подземных вод, отвечающее установленным кондициям; г) возможность защиты подземных вод от загрязнения; д) благоприятная социально-экономическая конъюнктура.

Совокупность таких благоприятных условий формируется как в процессе геологического развития территории, так и под влиянием современной физико-географической и антропогенной обстановки. Особенности формирования ЭЗПВ позволяют при отсутствии какого-либо из перечисленных факторов в естественных природных условиях

создавать их искусственно (при благоприятном сочетании остальных факторов), т. е. создавать новые месторождения подземных вод.

Следует отметить, что в настоящее время некоторые гидрогеологи предлагают включить в контуры месторождения всю площадь распространения водоносного горизонта, на которой происходят питание и разгрузка подземных вод (С. Ш. Мирзаев), или площадь, подземный сток с которой играет существенную роль в формировании дебитов водозаборных сооружений (Н. И. Дробноход — для условий Украинского щита).

### 1.6. ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ ИЗУЧЕНИЯ РЕСУРСОВ ПИТЬЕВЫХ И ТЕХНИЧЕСКИХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В СССР

Развитие знаний о запасах подземных вод тесно связано с разработкой и совершенствованием методики их изучения, с развитием знаний о процессах фильтрации в различных гидрогеологических условиях. Поэтому естественно, что методические разработки по оценке запасов подземных вод вошли в практику проведения гидрогеологических исследований только лишь с 20—30-х годов XX ст. Большую роль при этом сыграли решения правительства о национализации природных богатств нашей страны и планомерном их освоении для нужд народного хозяйства. Важные задания перед гидрогеологами были поставлены на I Гидрогеологическом съезде (1931 г.).

Развитие знаний о запасах подземных вод шло по двум основным направлениям: 1) изучение общих природных ресурсов подземных вод; 2) изучение эксплуатационных запасов подземных вод.

Впервые в России попытка оценить естественные динамические ресурсы на основе изучения количества подземных вод, поступающих в речную сеть, была сделана в 1887—1888 гг. инженерами В. Г. Шуховым, Е. К. Кнорре и К. Э. Лембке при изысканиях и постройке первого Московского городского водозаборного сооружения в Мытищах. В годы Советской власти большую работу по изучению естественных динамических ресурсов подземных вод проводили Г. Н. Каменский, И. В. Гармонов, Д. И. Щеголев, Н. С. Токарев и другие ученые. И уже на I Гидрологическом съезде демонстрируется карта естественных ресурсов грунтовых вод одного из подмосковных районов, составленная Г. Н. Каменским и И. В. Гармоновым.

К особо важным методам изучения величины питания грунтовых вод следует отнести метод, основанный на применении уравнений неустановившейся фильтрации в конечных разностях, предложенный в начале 40-х годов Г. Н. Каменским. Этот метод не утратил значения и в настоящее время, хотя и претерпел ряд усовершенствований в работах А. В. Лебедева, П. А. Киселева, М. А. Вевиоровской и др.

С 1949 г. для изучения инфильтрационного питания подземных вод широко применяется метод общего водного баланса той или иной территории. Важное значение в разработке этого метода имеют работы А. В. Лебедева, В. Г. Ткачук, М. М. Крылова и других исследователей.

Большая заслуга в изучении естественных динамических ресурсов грунтовых и артезианских вод принадлежит Б. И. Куделину. Им был детально разработан метод выделения подземного стока из поверхностного на основе генетического расчленения гидрографа реки, нашедший широкое применение в различных районах страны. Под руководством Б. И. Куделина была выполнена региональная оценка подземного стока всей территории СССР. В последние годы это направление развивается учениками Б. И. Куделина — И. С. Зекцером, В. А. Всеволожским, Н. А. Лебедевой и др.

Начиная с 70-х годов большое развитие получили работы в области региональной оценки динамических ресурсов подземных вод на базе изучения основных закономерностей их формирования (В. М. Шестопалов, В. А. Всеволожский, Н. И. Дробноход и др.); теоретические и экспериментальные исследования в области оценки инфильтрационного питания подземных вод (А. В. Лебедев, В. А. Барон, И. С. Пашковский, А. Б. Ситников и др.).

Систематическое изучение эксплуатационных запасов подземных вод для целей водоснабжения началось в Советском Союзе в 30-х годах, но само понятие «эксплуатационные запасы» появилось несколько позже.

Развитие народного хозяйства в первые годы пятилетки, рост городов, создание новых промышленных центров привели к необходимости строительства крупных централизованных водозаборных сооружений. Решение проблемы водоснабжения потребовало разработки методики разведки подземных вод и оценки их запасов. Эти исследования начали проводиться в Бюро по изучению и использованию подземных вод, организатором и руководителем которого был известный советский гидрогеолог В. С. Ильин, а в работах принимали участие такие крупные ученые, как О. К. Ланге, А. Н. Семихатов, Г. Н. Каменский. В этот период были выполнены значительные объемы разведочных работ на воду в различных районах страны. В решении этих задач большое значение имели труды М. Е. Альтовского, опубликовавшего в 1936 г. первую работу по методике гидрогеологических исследований для водоснабжения, Н. А. Плотникова, Г. Н. Каменского, М. П. Семенова, С. В. Троянского и др. Перечисленные исследования относятся к первому этапу изучения эксплуатационных запасов подземных вод в СССР, начавшемуся после Октябрьской революции и продолжавшемуся до начала пятидесятых годов. Несмотря на ряд интересных работ, проведенных в этот период, в целом для него характерны слабая гидрогеологическая изученность территории страны, небольшой объем планомерных гидрогеологических исследований и недостаточная разработанность теоретических основ разведки и оценки запасов подземных вод. Строительство многих водозаборных сооружений в те годы осуществлялось без проведения специальных гидрогеологических работ.

Бурный рост потребности в подземных водах в послевоенные годы, связанный с восстановлением и развитием промышленности и сельского хозяйства, вызвал резкое увеличение масштабов разведки подземных вод для водоснабжения. Особенно крупные исследования начали

выполняться с середины 50-х гг. В связи с этим подземные воды стали рассматриваться как полезное ископаемое, а их эксплуатационные запасы должны были утверждаться в Государственной комиссии по запасам полезных ископаемых ГКЗ СССР, ранее ВКЗ, при Совете Министров СССР. В 1951 г. были утверждены первая классификация эксплуатационных запасов подземных вод, подготовленная во ВСЕГИНГЕО Н. А. Плотниковым при участии Г. В. Богомолова и Г. Н. Каменского, и инструкция ВКЗ по применению этой классификации. В этот период работы по поискам и разведке подземных вод для водоснабжения стали проводиться гидрогеологической службой Министерства геологии СССР планомерно, в государственном масштабе. Научной основой оценки эксплуатационных запасов подземных вод в это время служила теория установившегося движения. Оценка эксплуатационных запасов сводилась, как правило, к определению расхода естественного потока, расчета производительности скважин по кривым дебитам и, в редких случаях, к расчетам взаимодействующих скважин методом срезок М. Е. Альтовского.

Накопление и обобщение опыта разведки подземных вод в различных гидрогеологических условиях, постоянный рост масштабов использования подземных вод и главным образом анализ эксплуатации ряда крупных водозаборных сооружений показали, что принятые для оценки запасов гидравлические и балансовые методы, основанные на теории установившегося движения, во многих случаях не отвечают конкретным природным условиям. Так, на некоторых водозаборных сооружениях, несмотря на кажущуюся обеспеченность запасов расходом подземного потока, происходили постоянное снижение уровня воды в скважинах и развитие депрессионных воронок даже при постоянном водоотборе. В других случаях при небольшой величине естественного расхода эксплуатация происходила при установившемся режиме, несмотря на то, что отбор воды явно превышал расход потока. В связи с этим необходимо было разработать теоретические положения, связанные с оценкой влияния геологического строения и гидрогеологических условий на формирование эксплуатационных запасов подземных вод и с закономерностями движения подземных вод к водозаборным сооружениям. Это знаменовало новый этап в изучении эксплуатационных запасов подземных вод, качественно отличающийся от предыдущего. Большое значение для развития учения о запасах подземных вод имела разработка первой типизации месторождений подземных вод, предложенной Н. И. Плотниковым в 1959 г. В это же время в гидрогеологическую науку и практику было внедрено понятие о граничных условиях водоносных горизонтов как об основных факторах, определяющих формирование эксплуатационных запасов подземных вод. Основные типы граничных условий были рассмотрены Ф. М. Бочевером (1961) и несколько позднее дополнены Н. Н. Биндеманом (1963).

Анализ условий формирования запасов различных типов месторождений подземных вод позволил значительно расширить применение гидродинамических методов для расчетов работы водозаборных сооружений и разработку методики опытно-фильтрационных исследований.

На этом этапе были созданы принципиально новые методы оценки эксплуатационных запасов, базирующиеся на теориях упругого режима и неустановившейся фильтрации, развитие которых в Советском Союзе связано с работами Ф. М. Бочевера, Н. Н. Биндемана, Н. Н. Веригина, В. Н. Шестакова, В. Н. Щелкачева и др.

Несколько позднее при оценке запасов подземных вод начинают учитываться процессы перетекания через слабопроницаемые отложения. Несмотря на то что основы теории перетекания были заложены советскими гидрогеологами Н. К. Гиринским и А. Н. Мятиевым еще в 1948 г., на практике эти процессы начали учитываться только с середины 60-х гг.

Если до начала 60-х гг. изучение эксплуатационных запасов подземных вод как в практическом, так и теоретическом плане проводилось в основном на отдельных локальных участках с целью водоснабжения конкретных потребителей, то позже в связи с резким увеличением потребности в воде и ростом водоотбора возникла необходимость в прогнозной оценке ресурсов подземных вод в региональном плане для территории Советского Союза в целом. Такая работа впервые была выполнена гидрогеологической службой Министерства геологии СССР под методическим руководством ВСЕГИНГЕО с целью гидрогеологического обоснования Генеральной схемы комплексного использования и охраны водных ресурсов. Группой сотрудников ВСЕГИНГЕО под руководством Н. Н. Биндемана и Ф. М. Бочевера была разработана оригинальная методика оценки и картирования эксплуатационных ресурсов подземных вод, на основе которой была составлена «Карта модулей эксплуатационных ресурсов подземных вод» (масштаб 1 : 5 000 000), изданная в 1964 г. Эта работа позволила выявить основные закономерности формирования эксплуатационных запасов подземных вод в различных районах страны и дать общую характеристику обеспеченности отдельных районов подземными водами.

Развитию учения о запасах подземных вод способствовало широкое внедрение в практику гидрогеологических исследований по разведке подземных вод и оценке их запасов метода математического моделирования (разработки В. М. Шестакова, И. К. Гавич, И. Е. Жернова, Д. И. Пересунько, И. И. Крашина, Л. К. Гохберга, В. С. Плотникова, Д. Р. Литвака др.). Вначале использовались в основном методы аналогового моделирования, а начиная с 70-х годов — ЦВМ.

Большой вклад в разработку программного обеспечения ЦВМ для оценки ЭЗПВ внесли А. А. Плетнев, Л. В. Семендяева, В. М. Лившиц, Е. А. Полшков, А. А. Рошаль и др.

Методы математического моделирования позволили более полно учитывать сложную природную обстановку, особенно при слоистом строении водоносных горизонтов, неоднородности фильтрационных свойств водовмещающей среды, неравномерности питания во времени и по площади и др. В связи с этим применение методов математического моделирования способствует общему повышению достоверности оценок запасов подземных вод и рационализации разведочных работ.

В последние годы развиваются исследования, связанные с охраной подземных вод от истощения и загрязнения. Здесь следует отметить

работы Ф. М. Бочевера, К. С. Боголюбова, Н. Н. Лапшина, К. И. Сычева, Н. А. Плотникова, Н. И. Плотникова, М. А. Хордикайнена и других авторов по гидрогеологическому обоснованию искусственного пополнения запасов подземных вод и оценке их эксплуатационных запасов с учетом искусственного восполнения; работы Ф. М. Бочевера, В. М. Гольдберга, Н. Н. Лапшина, Е. Л. Минкина, А. Е. Орадовской, посвященные прогнозу качества воды при эксплуатации и гидрогеологическому обоснованию зоны санитарной охраны водозаборных сооружений.

Большой вклад по повышению эффективности разведочных работ и внедрению в практику оценки ЭЗПВ научно-обоснованных методик и передового опыта внес отдел подземных вод ГКЗ СССР под руководством Н. Д. Краснопевцева.

Интенсивным развитием работ в области изучения эксплуатационных запасов подземных вод характеризуются 70-е годы, что было связано с новыми требованиями, предъявляемыми к рациональному природопользованию со стороны народного хозяйства. Возрастающее влияние техногенной деятельности на загрязнение, в первую очередь поверхностных вод, вызвало значительное увеличение использования подземных вод как источника хозяйственно-питьевого водоснабжения. Интенсивное использование подземных вод поставило на повестку дня ряд вопросов, которым ранее, за редким исключением, не уделялось достаточного внимания. Решение этих вопросов составило основу третьего этапа исследований ресурсов подземных вод, который начался в 70-е годы и продолжается до настоящего времени.

Исследования этого этапа были нацелены на всестороннее изучение условий формирования эксплуатационных запасов подземных вод, генетический подход к характеристике основных факторов формирования запасов, целенаправленное обоснование по данным поисково-разведочных работ гидрогеологических моделей условий формирования эксплуатационных запасов месторождений различных типов подземных вод.

Наибольший вклад в развитие теории и методики поисково-разведочных работ на воду и оценки ЭЗПВ внесли на этом этапе коллективы институтов ВСЕГИНГЕО (Б. В. Боревский, В. Д. Гродзенский, Л. С. Язвин и др.), МГУ (Н. И. Плотников), МГРИ (И. К. Гавич), ГИДРОИНГЕО (С. Ш. Мирзаев). ЛитНИГРИ (В. И. Иодказис), АН УССР (В. М. Шестопалов), КГУ (Н. И. Дробноход), ВИМСа (Б. Г. Самсонов).

Большой вклад в становление современного производственно-методического уровня поисково-разведочных работ на подземные воды внесли гидрогеологи территориальных производственных геологических объединений Мингео СССР, среди которых можно выделить: «Спецгидрогеология» — В. А. Грабовников, В. А. Манукян; «Центрогеология» — В. Д. Долбин, М. В. Кочетков, А. М. Просеков, В. И. Реутов; «Севкавгеология» — Н. Н. Кутепов, А. Б. Островский, В. Г. Тимохин, В. Ф. Суханов, А. В. Федоров; «Башкиргеология» — М. С. Верзаков; «Уралгеология» — Ю. В. Нечаев, Г. И. Зайцев, С. В. Палкин; «Приморгеология» — В. С. Рынков; «Казгеология» — В. И. Белянин,

В. Д. Малахов; «Укргеология» — Д. Р. Литвак, Г. Г. Лютый, Э. Э. Соболевский, А. И. Юревич; «Белорусгеология» — А. И. Аверков, С. П. Гудак, В. А. Ольховик, А. Н. Панасенко; «Узбекгидрогеология» — В. П. Волков; «Киргизгеология» — Р. С. Мангельдин; «Молдгеология» — Л. П. Шараевский; «Азгеология» — В. А. Листенгартен и многие другие.

Этот этап характеризуется: общим повышением требований к достоверности гидрогеологических прогнозов при оценке запасов подземных вод; совершенствованием методики поисково-разведочных работ на подземные воды; разработкой новых принципов и методов комплексного использования поверхностных и подземных вод; оценкой влияния отбора подземных вод на поверхностные воды и другие компоненты природной среды, а также влияния водохозяйственного строительства на ресурсы подземных вод; усилением мероприятий по охране подземных вод от загрязнения и истощения.

Особую важность эти исследования приобрели в последние годы — годы перестройки всего хозяйственного механизма нашей страны. Необходимость перехода на интенсивный путь ведения хозяйства потребовала более детального учета всех имеющихся резервов в использовании подземных вод, определения оптимальных масштабов отбора воды на эксплуатируемых месторождениях с учетом природоохранных мероприятий. Большое значение имела и поставленная в эти годы задача обеспечения всех населенных пунктов подземными источниками водоснабжения.

В этот период под руководством ВСЕГИНГЕО были проведены крупные исследования второго этапа региональной оценки эксплуатационных ресурсов подземных вод основных гидрогеологических регионов, имеющих важное народнохозяйственное значение. Эксплуатационные ресурсы, в отличие от первого этапа, оценивались применительно к заданной схеме размещения водозаборных сооружений с учетом реальных потребностей в воде на перспективу и основных особенностей формирования ЭЗПВ.

Основные положения региональной оценки ресурсов на этом этапе были разработаны Б. В. Боревским, Л. С. Язвиным, И. И. Крашиным, Д. И. Пересунько, Л. К. Гохбергом, Д. И. Ефремовым и другими специалистами в период с 1971 по 1976 г. и затем творчески развиты при проведении работ в отдельных регионах страны.

Такая оценка с широким использованием методов математического моделирования на АВМ и ЭЦВМ была выполнена для крупнейших на территории страны артезианских бассейнов и гидрогеологических массивов.

Принципиальным обстоятельством, существенно повлиявшим на методику проведения поисково-разведочных работ и оценку эксплуатационных запасов подземных вод, явилось утверждение новой «Классификации эксплуатационных запасов подземных вод» (1983) и инструкции по ее применению для месторождений питьевых и технических вод. Основой для подготовки этих документов явились результаты научных разработок ВСЕГИНГЕО (Л. С. Язвин, Б. В. Боревский) по оценке достоверности гидрогеологических прогнозов и принципам категоризации ЭЗПВ.

Как уже отмечалось, на современном этапе важнейшую роль приобретают вопросы комплексного использования и охраны всех водных ресурсов. В этом направлении существенное развитие приобретают исследования по оценке изменения речного стока при отборе подземных вод (Е. Л. Минкин, В. С. Усенко, В. Д. Гродзенский, М. М. Черепанский и др.), влияния водохозяйственной деятельности на изменение ресурсов подземных вод (С. Ш. Мирзаев).

Одним из реальных методов охраны подземных вод от истощения является использование вод, отбираемых при разработке месторождений твердых полезных ископаемых, на участках вертикального дренажа в орошаемых районах, при защите территории от подтопления. В этом направлении в последние годы стали проводиться целенаправленные исследования. Так, дренажные воды на месторождениях твердых полезных ископаемых, которые могут быть использованы для водоснабжения, орошения земель или извлечения ценных компонентов, начали рассматриваться как попутное полезное ископаемое. При наличии потребностей в этих водах должна быть осуществлена оценка эксплуатационных запасов дренажных вод. ГКЗ СССР совместно с ВСЕГИНГЕО разработаны требования к изучению и подсчету запасов подземных вод на месторождениях твердых полезных ископаемых.

Необходимость учета при оценке эксплуатационных запасов подземных вод влияния их проектируемого отбора на изменение других компонентов природной среды определила некоторую активизацию исследований в этом направлении, хотя проводятся они еще в явно недостаточных объемах.

Одним из важных видов гидрогеологических исследований в области ресурсов подземных вод на современном этапе явились разработка научных основ и создание первой очереди автоматизированной информационной системы Государственного водного кадастра (ГВК) по подземным водам. Работы по ведению Государственного водного кадастра были начаты в 1977 г. в соответствии с постановлением Совета Министров СССР. Система ГВК состоит из трех подсистем — «Поверхностные воды» (Госкомгидромет СССР), «Подземные воды» (Мингео СССР) и «Использование вод» (Минводхоз СССР), между которыми предусмотрен регулярный обмен данными. Введение Государственного водного кадастра планируется осуществлять с помощью автоматизированной системы, оснащенной современными вычислительными средствами. Автоматизированная информационная система «ГВК — подземные воды» основывается на банках данных, включающих как паспортную информацию об основных водных объектах и их запасах (бассейны подземных вод, водоносные горизонты, месторождения), так и информацию о режиме подземных вод. Система «ГВК — подземные воды» позволяет удовлетворять запросы различных организаций о ресурсах и режиме подземных вод как в виде регулярно публикуемой информации, так и путем ответов на регламентированные и нерегламентированные запросы, а также позволяет осуществлять оценку состояния основных водных объектов.

Следует также отметить исследования в области создания постоянно действующих моделей гидрогеологических регионов, с помощью

которых могут осуществляться управление режимом эксплуатации подземных вод и переоценка их эксплуатационных запасов (Д. И. Ефремов, А. И. Клюквин, И. И. Крашин, Н. С. Огняник, И. С. Пашковский, А. А. Рошаль).

### 1.7. ОФИЦИАЛЬНЫЕ ДОКУМЕНТЫ И ПОЛОЖЕНИЯ, РЕГЛАМЕНТИРУЮЩИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПИТЬЕВЫХ И ТЕХНИЧЕСКИХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В СССР*

Так как подземные воды, пригодные для использования в народном хозяйстве, в СССР рассматриваются и как полезное ископаемое, и как часть водных ресурсов, и компонент природной среды, порядок их изучения и эксплуатации регламентируется официальными документами:

Основными государственными, межведомственными и ведомственными документами являются:

Основы законодательства Союза ССР и союзных республик о недрах, утвержденные Законом СССР от 9 июля 1975 г.;

Основы водного законодательства Союза ССР и союзных республик, утвержденные Законом СССР от 10 декабря 1970 г.;

Классификация эксплуатационных запасов и прогнозных ресурсов подземных вод, утвержденная постановлением Совета Министров СССР от 25 февраля 1983 г. № 177; Инструкция по применению ее к месторождениям питьевых и технических вод, утвержденная председателем ГКЗ СССР 19 января 1984 г.;

Положение об охране подземных вод, утвержденное Министерством геологии СССР, Министерством мелиорации и водного хозяйства СССР, Министерством здравоохранения СССР и согласованное с Государственным комитетом СССР по надзору за безопасным ведением работ в промышленности и горному надзору, июль — август 1984 г.;

Источники централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения. Гигиенические, технические требования и правила выбора — ГОСТ 2761—84, утвержденный и введенный в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 27 ноября 1984 г., № 4013;

Вода питьевая. Гигиенические требования и контроль за качеством — ГОСТ 2874—82;

Строительные нормы и правила. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. СНиП 2.04-84, утвержденные постановлением Государственного комитета СССР по делам строительства 27 июня 1984 г., № 123;

Положение о порядке проектирования и эксплуатации зон санитарной охраны источников водоснабжения и водопроводов хозяйственно-питьевого назначения, утвержденное Министерством здравоохранения СССР 18 декабря 1982 г.;

---

* Приводятся, рассматриваются документы и положения, действующие по состоянию на 01.01.88 г.

Положение о порядке согласования и выдачи разрешения на специальное водопользование, утвержденное постановлением Совета Министров СССР 10 июня 1977 г., № 500.

Все эти документы являются обязательными для выполнения всеми организациями независимо от их ведомственной подчиненности, проводящими поиски и разведку, проектирование водозаборных сооружений и эксплуатацию подземных вод.

В соответствии с требованиями к геологическому изучению недр, к которому относятся и поисково-разведочные работы на подземные воды, организации, осуществляющие эти работы, обязаны обеспечить:

рациональное, научно обоснованное направление и эффективность работ по геологическому изучению недр;

полноту изучения геологического строения недр, горно-технических, гидрогеологических и других условий разработки разведанных месторождений;

достоверность определения количества и качества запасов основных и совместно с ними залегающих полезных ископаемых и содержащихся в них компонентов; геолого-экономическую оценку месторождений;

ведение работ по геологическому изучению недр методами и способами, исключающими неоправданные потери полезных ископаемых и снижение их качества.

Разведка подземных вод производится на основании заявок головных проектных организаций, согласованных с Госпланами союзных республик. Заявка на разведку подземных вод может приниматься и выполняться при условии указания в ней обоснованной текущей и перспективной потребности раздельно на питьевую и техническую воду. В заявках на проведение разведочных работ должны быть также отражены требования к качеству воды (для технического водоснабжения и орошения), расстояние от участка водозаборного сооружения до потребителя, тип водозаборного сооружения, способ водоотбора, режим и расчетный срок водопотребления.

Составление проектов и выделение капитальных вложений на строительство новых и реконструкцию существующих водозаборных сооружений производится только после утверждения эксплуатационных запасов подземных вод Государственной комиссией по запасам полезных ископаемых при Совете Министров СССР (ГКЗ СССР) или территориальной комиссией по запасам полезных ископаемых при геологических организациях Министерства геологии СССР (ТКЗ) (в исключительных случаях с разрешения Совета Министров СССР проектирование водозаборных сооружений может производиться до утверждения запасов с обязательным их последующим утверждением). Утверждение эксплуатационных запасов подземных вод не требуется, если капитальные вложения на устройство водозаборных сооружений не превышают 500 тыс. руб., а по объектам железнодорожного транспорта — 1 млн. руб. В этих случаях оцененные эксплуатационные запасы апробируются научно-техническими советами организаций, проводящих разведочные работы.

В общую сумму капитальных вложений входят затраты на водоприемные устройства, насосные станции, сооружения водоподготовки, резервуары, а также магистральные водоводы.

В ТКЗ утверждаются эксплуатационные запасы месторождений питьевых и технических вод, предназначенных для централизованного питьевого водоснабжения районных центров, городов и населенных пунктов районного подчинения, поселков городского типа, совхозов и колхозов; для водоснабжения небольших промышленных предприятий с дополнительной или общей потребностью в воде до 15 тыс. м³/сут; для орошения земель и обводнения пастбищ с потребностью в воде (в пересчете на круглогодичный водоотбор) до 25 тыс. м³/сут.

При проведении разведочных работ и проектировании водозаборных сооружений подземных вод следует учитывать, что в соответствии с Основами водного законодательства использование подземных вод питьевого качества для нужд, не связанных с питьевым и бытовым водоснабжением, как правило, не допускается. В районах, где отсутствуют необходимые поверхностные водные источники и имеются достаточные запасы подземных вод питьевого качества, использование последних для целей, не связанных с питьевым и бытовым водоснабжением, допускается только с разрешения органов по регулированию использования и охране вод.

Подземные воды, не отнесенные к категории питьевых, могут в установленном порядке использоваться для технического водоснабжения, орошения и других производственных нужд с соблюдением требований рационального использования и охраны вод.

В соответствии с ГОСТ 2761—84 источники централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения с учетом их санитарной надежности выбирают в следующем порядке: межпластовые напорные воды, межпластовые безнапорные воды; искусственно пополняемые грунтовые воды и подрусловые подземные воды; поверхностные воды. Возможность использования пригодных для питьевого водоснабжения подземных вод должна рассматриваться и при недостаточных их запасах, восполнение дефицита следует производить за счет менее надежных в санитарном отношении источников воды.

Участок размещения водозаборных сооружений должен быть согласован с органами по регулированию использования и охране вод, исполнительными комитетами местных советов народных депутатов, органами, осуществляющими Государственный санитарный надзор, охрану рыбных запасов и т. д., а участок детальной разведки — также с водопотребляющими и проектными организациями. Отвод земель для строительства водозаборных сооружений производится в соответствии с Основами земельного законодательства Союза ССР и союзных республик на основании решений исполнительных комитетов соответствующих Советов народных депутатов или, если эти земли находятся в пользовании колхозов, на основании решений соответствующих колхозов. Предприятия, заинтересованные в отводе земель, должны получить согласование с землепользователями до начала проектных работ, а организации, проводящие разведочные работы, должны согла-

совать с землепользователями участок детальной разведки и места размещения разведочно-эксплуатационных скважин и возможность отвода земель для строительства водозабора в будущем.

Качество подземных вод хозяйственно-питьевого водоснабжения должно удовлетворять требованиям ГОСТ 2874—82, а в случае несоответствия этим требованиям могут быть рекомендованы мероприятия по улучшению качества воды согласно СНиП 2.04.02—84.

Допустимые концентрации в воде веществ, не вошедших в ГОСТ 2874—82, не должны превышать нормы, установленные Министерством здравоохранения СССР для источников централизованного водоснабжения. Требования к качеству воды для технического водоснабжения и орошения определяются соответствующими государственными и отраслевыми стандартами, техническими условиями (например, ГОСТ 25900—83. «Воды для орошения юга Украины. Общие требования к составу и свойствам»), а при отсутствии таких норм — требованиями водопотребляющих организаций.

Для водозаборных сооружений, независимо от их ведомственной принадлежности, подающих воду для хозяйственно-питьевого использования, должны быть организованы зоны санитарной охраны (ЗСО). Возможность организации ЗСО должна решаться на стадии выбора источника централизованного водоснабжения. Проект ЗСО должен быть составной частью проекта хозяйственно-питьевого водоснабжения. Проект ЗСО, а также план мероприятий, предназначенных для надежного обеспечения требуемого качества источника водоснабжения, должны быть согласованы с органами и учреждениями санитарно-эпидемиологической службы, органами по регулированию использования и охране вод, органами коммунального хозяйства и органами Министерства геологии.

В тех случаях, когда для организации зон санитарной охраны требуется благоустройство территории, необходимый комплекс мероприятий и обязательность их выполнения до ввода в эксплуатацию водозаборных сооружений следует согласовать с соответствующим исполкомом Совета народных депутатов перед началом детальной разведки. Необходимые затраты на проведение этих мероприятий должны учитываться в проекте водозаборного сооружения.

Использование подземных вод для водоснабжения является одним из видов специального водопользования, осуществление которого возможно только при наличии соответствующего разрешения на специальное водопользование. Это разрешение выдается министерствами мелиорации и водного хозяйства и другими союзно-республиканскими и местными органами этих ведомств. Разрешение на специальное водопользование выдается водопользователям при условии согласования с органами государственного санитарного надзора, геологии, а также органами, осуществляющими охрану рыбных запасов.

Исходя из основных требований и положений официальных документов геологоразведочные организации, проводящие поисково-разведочные работы на подземные воды, должны получить следующие заявки и согласования:

заявку головной проектной организации с указанием в ней обоснованной текущей и перспективной потребности раздельно на питьевую воду;

согласование с органами по регулированию использования и охране водных ресурсов возможности использования подземных вод в определенном количестве, а при использовании питьевых вод для технического водоснабжения, орошения и других производственных нужд — специальные согласования использования подземных вод по указанному назначению;

согласование участка детальной разведки — с исполнительными комитетами местных Советов народных депутатов, землепользователями, органами по регулированию использования и охране вод, геологии, водопотребляющими и проектными организациями;

участки детальной разведки питьевых вод должны быть так же дополнительно согласованы с органами санэпидслужбы по вопросам возможности размещения водозаборных сооружений и организации зон санитарной охраны;

согласование с органами санэпидслужбы возможности использования для хозяйственно-питьевых целей подземных вод с минерализацией до 1,5 г/л и (или) общей жесткостью до 10 мг-экв/л;

согласование с исполнительными комитетами соответствующих советов народных депутатов необходимого комплекса мероприятий и сроков их выполнения по благоустройству территории с целью организации зон санитарной охраны (при необходимости);

согласование с проектной организацией схемы водозаборного сооружения.

**Контрольные вопросы.** 1. Какие особенности подземных вод как полезного ископаемого принципиально отличают их от других полезных ископаемых? В чем заключается единство всех видов природных вод и в чем оно проявляется? 2. Какие виды ресурсов природных вод рассматриваются при оценке запасов? В чем заключаются их генетические различия и физическая природа? Что их объединяет? 3. Чем различаются и чем связаны природные и эксплуатационные запасы подземных вод? 4. Какие существуют источники формирования ЭЗПВ и как они влияют на формирование режима подземных вод при эксплуатации? 5. На чем основана классификация запасов подземных вод? Является ли она необходимой основной для понимания методики оценки запасов подземных вод? 6. Как влияют основные факторы формирования подземных вод на их величину и ее изменение во времени? 7. В чем основной смысл понятия формирования ЭЗПВ? Чем отличается их формирование от формирования запасов других полезных ископаемых? 8. Как проявляются основные закономерности режима подземных вод при эксплуатации в типичных условиях и с чем они связаны? 9. На чем основана возможность управления формированием ЭЗПВ и в чем оно должно заключаться? 10. Что такое месторождение подземных вод? Можете ли Вы четко представить себе границы месторождения подземных вод? 11. Чем различаются основные этапы изучения ресурсов подземных вод в СССР? Являются ли ваши знания, полученные при изучении гл. 1 и других гидрогеологических дисциплин, достаточными для понимания содержания исследований на каждом из охарактеризованных этапов и формулировки задач на будущее? 12. В чем основной смысл официальных документов и положений, регламентирующих использование подземных вод в СССР? Как Вы оцениваете роль юридических аспектов водопользования при оценке ЭЗПВ?

# ГЛАВА 2. ОЦЕНКА ЕМКОСТНЫХ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Емкостные запасы подземных вод представляют собой массу свободной воды, находящейся в порах и трещинах водоносных пластов. Емкостные запасы подземных вод, являющиеся основным источником водоснабжения и орошения, принято выражать в единицах объема.

Емкостные запасы подразделяются на гравитационные и упругие. Первые характеризуют объем воды, который можно получить из водоносных пород либо при их осушении, либо при замещении исходной воды водой другого состава. Последний случай характерен, например, для отбора подземных вод на морских побережьях, когда вследствие интрузии морских соленых вод при работе водозаборных сооружений происходит замещение пресных пластовых вод солеными морскими.

Упругие запасы представляют собой объем воды, высвобождающийся в процессе откачки при снижении пластового давления за счет объемного расширения воды и уменьшения порового пространства.

## 2.1. ПАРАМЕТРЫ ЕМКОСТИ ПЛАСТОВ

В общем случае емкостные запасы определяются геометрическими размерами и емкостными параметрами водонасыщенной толщи. Под емкостными параметрами горных пород следует понимать показатели, характеризующие их способность к водоотдаче или водонасыщению при изменении уровня воды в безнапорном пласте или давления в напорном.

При этом гравитационным емкостным запасам соответствуют показатели гравитационной емкости горных пород, а упругим емкостным запасам — упругой емкости.

Гравитационная емкость горных пород характеризуется коэффициентом водоотдачи (гравитационной водоотдачи) при осушении пласта и коэффициентом недостатка насыщения при заполнении пор водой. Величина коэффициентов водоотдачи и недостатка насыщения представляет собой отношение изменения объема воды ($\Delta V$) к осушенному или насыщенному объему породы ($V$):

$$\mu = \frac{\Delta V}{V}, \tag{2.1}$$

где $\mu$ — коэффициент водоотдачи или недостатка насыщения в долях единицы, который может быть представлен следующими зависимостями, показывающими балансовую структуру их формирования:

$$\mu_в = W_п - W_{ст} - W_в - W_м; \tag{2.2}$$

$$\mu_н = W_п - W_е - W_в, \tag{2.3}$$

где $\mu_в$ и $\mu_н$ — соответственно коэффициенты водоотдачи и недостатка водонасыщения; $W_п$ — полная влагоемкость горной породы (влажность породы при полном насыщении); $W_{ст}$ — влажность породы,

определяемая наличием гравитационной воды в углах пор (стыковая влажность); $W_в$ — относительное объемное содержание защемленного воздуха в породе; $W_м$ — максимальная молекулярная влагоемкость породы; $W_е$ — естественная влажность породы.

В воздушно-сухом состоянии $W_е < (W_{ст} + W_м)$, поэтому, как правило, коэффициент водоотдачи меньше коэффициента недостатка водонасыщения, однако эти различия незначительны и в практических расчетах при оценке запасов обычно не учитываются.

Для расчетов в качестве показателя гравитационной емкости пластов, а иногда как аналога свободной водоотдачи принимается значение безразмерного коэффициента активной пористости $n_а$. Он представляет собой отношение объема пор (площади пор), обеспечивающих процесс фильтрации, к объему (площади поперечного сечения) породы:

$$n_а = \frac{V_а}{V}, \tag{2.4}$$

где $V_а$ — объем активных пор, через который происходит фильтрация воды.

Коэффициент активной пористости и коэффициент водоотдачи различны по физической сути (первый — динамическая характеристика, второй — емкостная), поэтому численно они часто могут не совпадать. Как показывают лабораторные опыты, водоотдача пластов обычно меньше активной пористости. Тем не менее для практических расчетов в ряде случаев вместо коэффициента водоотдачи используется коэффициент активной пористости из-за невозможности определения первого в зоне полного водонасыщения без осушения.

В гидрогеологической литературе для определения коэффициента водоотдачи кроме формулы (2.2) используется следующая формула:

$$\mu_в = W_п - W_м. \tag{2.5}$$

Расчеты по этой формуле дают несколько завышенные результаты в связи с недоучетом, в первую очередь, защемленного воздуха.

Формирование водоотдачи — сложный динамический процесс, закономерности которого изучены недостаточно. В работах В. М. Шестакова, Н. Болтона и ряда других исследователей изменение водоотдачи во времени связывается с процессами переформирования капиллярной зоны при передаче воды из этой зоны на свободную поверхность. При понижении уровня капиллярная зона в начальный момент растягивается, и только через какое-то время в этой зоне наступает динамическое равновесие, при котором и происходит стабилизация коэффициента водоотдачи.

Проведенными исследованиями установлена зависимость коэффициента водоотдачи от скорости снижения уровня воды $V_с$, высоты капиллярной зоны $h_к$, коэффициента фильтрации пород $k_z$.

И. С. Пашковским (1983) зависимость между изменением во времени ($t$) коэффициента водоотдачи и обобщенным параметром $\xi$, учитывающим указанные показатели, представлена в виде

$$\xi = \frac{k_z t}{h_к V_с}. \tag{2.6}$$

Зависимость изменения относительного коэффициента водоотдачи $\bar{\mu} = \frac{\mu_t}{\mu}$ (отношение текущего значения водоотдачи $\mu_t$ к предельному $\mu$) от величины $\xi$, получена И. С. Пашковским, приведена на рис. 7.

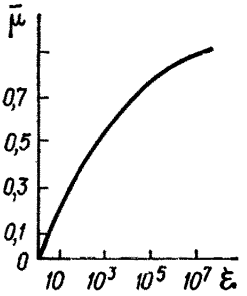


Рис. 7. График зависимости $\bar{\mu} = f(\xi)$

В формировании процессов водоотдачи и насыщения существенную роль играет также неоднородность строения горных пород (их гетерогенность), связанная с наличием разнородных по проницаемости и емкости пор и других пустот. Это, например, пористо-трещинные среды, когда слабопроницаемые, но обладающие значительной емкостью блоки разделены хорошо проводящими, но характеризующимися небольшой емкостью трещинными каналами; среда, состоящая из разных систем трещин (трещинно-трещинные среды) и т. д.

Если горные породы рассматриваются как системы с двойной (или тройной) пористостью, формирование предельной величины водоотдачи также происходит с запаздыванием в течение определенного промежутка времени.

Несмотря на то что величина свободной водоотдачи фактически изменяется во времени, для решения гидрогеологических задач, в том числе и оценки емкостных запасов подземных вод, как правило, ее значение приближенно принимается постоянным, равным ее предельному значению. Дело в том, что в водоносных горизонтах процессы формирования гравитационной водоотдачи сравнительно кратковременны. Поэтому учет переменности водоотдачи может быть необходим при специальных расчетах на относительно краткосрочные периоды времени (определение питания подземных вод при паводках на массивах орошения и т. д., а также при определении гидрогеологических параметров при откачках и по данным режимных наблюдений). В большинстве случаев при расчетах, связанных с оценкой запасов, может быть принято постоянное значение предельной водоотдачи водоносных горизонтов, поскольку оценка запасов подземных вод выполняется, как правило, на многолетний период эксплуатации водозаборов, когда коэффициент водоотдачи достигает своего предельного значения.

По данным И. С. Пашковского (1985), время достижения полного значения предельной водоотдачи составляет: для песков — примерно 10 суток, а для суглинков и глинистых пород — на два-три порядка больше.

Коэффициент водоотдачи существенно зависит от литологических особенностей и физико-механического состава пород. Для песчаных пород (мелко- и среднезернистых песков) его величина, как правило, составляет 0,10 —0,20.

Значения коэффициента водоотдачи крупнозернистых гравелистых песков можно принимать примерно равными 0,25—0,30; пылеватых и глинистых песков, а также супесей — 0,05—0,10; суглинков и глин — 0,01—0,05. В трещиноватых породах значение коэффициента

водоотдачи колеблется в широких пределах: для известняков — 0,01—0,1, для песчаников, сланцев, изверженных пород — 0,001—0,03.

Если гравитационная емкость характеризует процессы осушения (насыщения) пород главным образом в безнапорных пластах, то упругая емкость, определяемая упругими свойствами воды и горных пород, используется для характеристики емкостных свойств напорных водоносных горизонтов.

Напорный водоносный горизонт в тех случаях, когда уровень подземных вод не снижается ниже его кровли и когда не происходит вытеснение содержащейся в горизонте воды водами другого состава, может отдавать воду из-за снижения напора при водоотборе вследствие:

а) расширения воды при снижении гидростатического давления;

б) сжатия скелета породы (уменьшения ее пористости) в связи с увеличением суммарной нагрузки на пласт.

На изменение объема порового пространства кроме гидростатического давления существенно влияют процессы деформации пород на их контактах, перепаковка зерен породы, деформирование цементирующего вещества и др.

Для характеристики процессов изменения объема воды при действии упругих сил В. Н. Щелкачев предложил использовать так называемый коэффициент упругоемкости, обобщенно учитывающий характеристики упругости воды и пород.

Этот коэффициент представляет собой общее изменение объема воды в единице объема пласта при единичном значении изменения давления (напора):

$$\beta^* = \gamma_в (n_0 \beta_в + \beta_с), \qquad (2.7)$$

где $\gamma_в$ — плотность воды; $n_0$ — пористость породы; $\beta_в$ — коэффициент объемной упругости воды (изменение единичного объема воды при единичном изменении давления); $\beta_с$ — коэффициент объемной упругости горных пород (изменение единичного объема породы при единичном изменении давления).

Коэффициенты $\beta_в$ и $\beta_с$ имеют размерность $м^{-1}$, величина $\beta_в$ изменяется в пределах $(2{,}7...5)\ 10^{-6}\ м^{-1}$, а $\beta_с$ — $(0{,}3...2)\ 10^{-6} м^{-1}$.

При указанных значениях коэффициент упругоемкости составляет $10^{-5} ... 10^{-6}\ м^{-1}$. При этом, как показал В. А. Мироненко (1983), в большинстве случаев, кроме чисто трещиноватых пород, преобладающее влияние на формирование упругой емкости оказывает величина уменьшения объема порового пространства, а расширение воды играет подчиненную роль.

Большое значение в формировании емкостных запасов могут иметь упругое отжатие из слабопроницаемых пород. Как показано В. А. Мироненко (1978), Т. А. Плугиной (1981, 1984), коэффициент упругоемкости глинистых пород может на 1—2 порядка превышать упругоемкость водоносных горизонтов, составляя обычно $10^{-3}...10^{-4}\ м^{-1}$.

По своей балансовой сущности

$$\beta^* = \frac{\Delta V_у}{m \Delta S}, \qquad (2.8)$$

где $\Delta V_y$ — изменение объема воды в единичном элементе пласта мощностью $m$ при изменении напора $\Delta S$ за счет упругих свойств породы и воды.

Показателем упругой емкости пласта является также коэффициент упругой водоотдачи $\mu^*$. Этот коэффициент, в отличие от коэффициента упругоемкости, представляет собой изменение объема воды при единичном изменении напора в элементе пласта единичной площади и высотой, равной мощности пласта. Из этого следует, что

$$\mu^* = m\beta^*. \tag{2.9}$$

Из сопоставления зависимостей (2.7) и (2.9) нетрудно видеть, что коэффициент упругой водоотдачи является безразмерным параметром и, по аналогии с коэффициентом свободной водоотдачи, представляет собой отношение объема воды $V_y$, выделяющейся из пласта при понижении напора за счет упругих свойств воды и деформации горных пород, к объему сформировавшейся при этом депрессии:

$$\mu^* = \frac{V_y}{V_д}. \tag{2.10}$$

Примерные значения коэффициента $\mu^*$ для рыхлых пород составляют $10^{-3} \ldots 10^{-4}$, для трещиноватых — $10^{-4} \ldots 10^{-6}$. На величину упругой водоотдачи при изменении внешних нагрузок на пласт оказывают влияние перераспределение напряжений в породах кровли и подошвы, колебания атмосферного давления и уровня грунтовых вод и т. д. Поэтому упругая водоотдача является некоторым обобщенным параметром, в котором, как отмечает Ф. М. Бочевер, «суммарно отражаются механические свойства пласта и окружающих его пород и перераспределение в пласте гидродинамического давления под влиянием тех или иных возмущений первоначального его состояния».

С учетом упругого отжатия воды из глинистых пород, залегающих в кровле и подошве (согласно М. Хантушу), обобщенная упругая водоотдача ($\mu^*$) многослойной системы определяется зависимостью

$$\mu^{**} = \left(\mu^* + \frac{1}{3}\mu_o\right), \tag{2.11}$$

где $\mu_o$ — упругая водоотдача глинистых пород.

Поскольку $\mu_o \gg \mu^*$, упругой емкостью глинистых пород пренебрегать нельзя.

Параметр $\mu^*$ намного меньше коэффициента свободной водоотдачи, что позволяет пренебрегать упругой емкостью при изучении емкостных гравитационных запасов безнапорных пластов.

### 2.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕМКОСТНЫХ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Величина емкостных гравитационных запасов $V_з$ равна

$$V_з = \mu V, \tag{2.12}$$

где $V$ — объем пласта.

Формула (2.12) справедлива для однородных пластов. Для неоднородных

$$V_з = \sum_{i=1}^{n} \mu_i V_i, \tag{2.13}$$

где $\mu_i$ и $V_i$ — коэффициент водоотдачи и объем пласта на $i$-м участке ($i = 1, 2, 3, \ldots, n$).

Гравитационные запасы напорных пластов во времени практически постоянны. В безнапорных же пластах они непрерывно изменяются в связи с суточными, годовыми, многолетними колебаниями свободного зеркала грунтовых вод под влиянием различных метеорологических и гидрологических факторов — климата, режима рек и т. д. Поэтому для безнапорных пластов, согласно М. Е. Альтовскому, различают максимальные гравитационные запасы, соответствующие наиболее высокому положению уровенной поверхности; минимальные, определяемые объемом пласта при наиболее низком состоянии поверхности грунтовых вод; средние, а также запасы различной обеспеченности (например, 95 % обеспеченности).

Объем гравитационной воды, находящейся в зоне колебаний уровня грунтовых вод, т. е. выше наиболее низкого положения свободного зеркала (по Н. А. Плотникову, 1959), называется регулировочными запасами. Термин «регулировочные» введен в связи с тем, что объем гравитационной воды регулирует расход потока подземных вод. Регулировочные запасы — это часть емкостных запасов грунтовых вод, поэтому их определяют в соответствии с формулой (2.12):

$$V_{р.з} = \mu V_р, \tag{2.14}$$

где $V_{р.з}$ — регулировочные запасы грунтовых вод; $V_р$ — объем водоносной толщи между данным и наиболее низким положением уровня грунтовых вод.

Расчет упругих запасов ($V_у$) подземных вод может быть проведен по формуле

$$V_у = \beta^* H_{ср} V, \tag{2.15}$$

где $H_{ср}$ — величина средневзвешенного напора над кровлей пласта.

Учитывая, что $V = mF$, а $\beta^* m = \mu^*$, формулу (2.15) можно представить в следующем виде:

$$V_у = \mu^* F H_{ср}, \tag{2.16}$$

где $F$ — площадь распространения водоносного горизонта.

По формулам (2.15) и (2.16) определяются максимально возможные упругие запасы, которые могут быть получены при понижении уровня подземных вод до кровли водоносного горизонта на всей площади его распространения.

Необходимо отметить, что упругим запасам подземных вод артезианских пластов в течение длительного времени уделялось очень мало внимания. Они не выделялись как особая категория запасов и не

учитывались в расчетах. Между тем в условиях артезианских бассейнов платформ эти запасы имеют большое значение, особенно в начальные периоды эксплуатации.

**Контрольные вопросы.** 1. Какими параметрами определяются емкостные запасы подземных вод? В чем проявляются их общие и отличительные особенности? 2. В чем заключается физический смысл понятия «упругие запасы»? Зависит ли величина упругой емкости от гравитационной? 3. Является ли движение воды необходимым для формирования упругих запасов? 4. Почему и когда при изучении гравитационной емкости упругими запасами можно пренебречь? 5. Могут ли в природе существовать упругие запасы при отсутствии гравитационных? А как источник формирования ЭЗПВ? 6. Чем определяется величина гравитационной водоотдачи водоносных пластов?

# ГЛАВА 3. ОЦЕНКА ДИНАМИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

## 3.1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТОДОВ ОЦЕНКИ

Природные (естественные, антропогенные и естественно-антропогенные) динамические ресурсы подземных вод определяются величиной их суммарного питания. Ведущими процессами, определяющими величину питания подземных вод, являются: инфильтрация в водоносный пласт атмосферных осадков, оросительных и поверхностных вод, фильтрация из естественных и искусственных поверхностных водных объектов, а также приток подземных вод из смежных с изучаемой водоносных систем.

В качестве объекта оценки динамических ресурсов могут выступать гидрогеологический район, водоносная система, водоносная структура (в пределах верхнего гидродинамического этажа подземной гидросферы) либо отдельный водоносный горизонт (комплекс) в пределах гидрогеологических структур разного порядка.

При изучении динамических ресурсов какого-либо отдельного водоносного горизонта (комплекса) следует также учитывать питание, поступающее через его кровлю и подошву путем перетекания через слабопроницаемые отложения.

За многолетний период питание, как правило, характеризуется его среднемноголетней величиной (норма питания — НП), которая равна их суммарной разгрузке, так как приходные и расходные статьи в естественных условиях сбалансированы. Поэтому динамические ресурсы могут быть определены также по сумме расходных элементов их баланса (физическое испарение и транспирация, родниковый сток, фильтрация в поверхностные водотоки и водоемы, отток в соседние водоносные системы). На практике кроме динамических ресурсов выделяют понятия «подземный сток» и «подземный сток в реки» (§ 1.3).

С учетом соотношения (1.5) определение динамических ресурсов по величине подземного стока или подземного питания рек практически всегда приводит к их занижению. Так, по данным В. М. Шестопалова (1983), для Украинского Полесья подземное питание рек составляет лишь около 20 % величины $Q_д$.

Только в тех случаях, когда кроме дренирования реками, другие пути разгрузки подземных вод практически отсутствуют, такие оценки могут быть достаточно объективными.

Динамические ресурсы обычно выражаются в единицах расхода (л/с, м³/сут, км³/год). Кроме того, они могут быть представлены величиной слоя воды ($h_{ст}$), поступающей в водоносный горизонт в единицу времени (мм/сут, мм/год, м/год). Для характеристики динамических ресурсов может быть использован также модуль динамических ресурсов ($M_д$), представляющий собой величину питания водоносного горизонта (системы водоносных горизонтов), на единичной площади его распространения. Как правило, эта величина имеет размерность л/с · км² и связана со слоем стока следующей зависимостью:

$$M_д = 0{,}0317 h_{ст}, \qquad (3.1)$$

где $h_{ст}$ — слой воды, идущий на питание подземных вод, мм/год.

Определение $M_д$ проводится для комплексного балансового района, его отдельного участка, бассейна стока или частного водосбора. $M_д$ может определяться как для отдельного водоносного горизонта, так и для системы водоносных горизонтов по формуле

$$M_д = \frac{Q_д}{F}, \qquad (3.2)$$

где $Q_д$ — динамические ресурсы, л/с, формирующиеся на площади $F$, км².

В гидрогеологической литературе кроме модуля динамических ресурсов пользуются понятиями «модуль подземного стока» ($M_{п.с}$) и «модуль подземного питания рек» ($M_{п.с.р}$), рассчитываемыми аналогично (3.2).

Для определения динамических ресурсов подземных вод используется ряд методов, которые можно разделить на три группы:

1) методы определения питания подземных вод;

2) методы определения разгрузки подземных вод (в том числе подземного стока в реки);

3) методы определения расхода потока подземных вод.

Строго говоря, только методы первой группы представляют собой методы полной оценки динамических ресурсов подземных вод. Методы второй группы могут быть использованы в тех случаях, когда имеется возможность оценить суммарную разгрузку подземных вод, а не ее отдельные компоненты (например, подземное питание рек). Если какой-нибудь из путей разгрузки не будет учтен, величина $Q_д$ окажется заниженной.

Это же относится и к методам третьей группы, поскольку величина расхода потока может существенно меняться в зависимости от выбранного расчетного сечения.

На рис. 8 показана схема грунтового потока, который на одном участке получает инфильтрационное питание (ε), на другом — происходит разгрузка подземных вод испарением (—ε′) и в речную сеть. Если расход подземных вод определяется в сечениях I или II, то в его формировании участвует только часть питания, формирующаяся выше расчетного сечения, и динамические ресурсы окажутся заниженными.

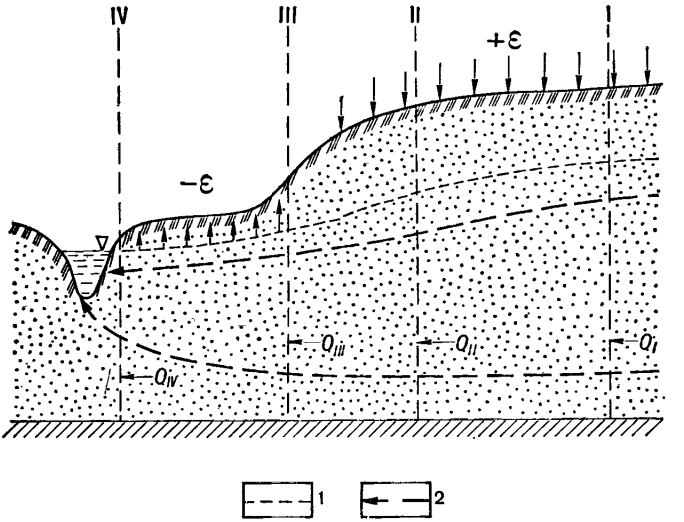



Рис. 8. Схема формирования расхода грунтового потока в различных поперечных сечениях:
*1* — уровень грунтовых вод; *2* — линия тока

И только в том случае, когда расход потока рассчитывается в сечении III, будут оценены суммарные динамические ресурсы. Но уже в сечении IV расход будет уменьшаться на величину разгрузки испарением. Таким образом, $Q_{IV} < Q_{III} > Q_{II} > Q_I$. В связи с изложенным при оценке общих динамических ресурсов по расходу потока вод должно учитываться положение расчетного сечения по отношению к областям питания и разгрузки подземных вод.

При определении величины динамических ресурсов по суммарному питанию подземных вод используется зависимость

$$Q_д = \sum_{i=1}^{n} \varepsilon_i F_i + Q_б, \tag{3.3}$$

где $\varepsilon_i$ — интенсивность питания подземных вод за счет $i$-го источника; $F_i$ — площадь, на которой происходит питание за счет $i$-го источника; $Q_б$ — приток из смежных систем (боковой приток).

В соответствии с режимом климатообразующих факторов условия питания и разгрузки подземных вод существенно меняются по сезонам года и в многолетнем разрезе. Поэтому величина динамических ресурсов также может быть подвергнута значительным колебаниям в зависимости от водности расчетного периода.

Методы определения величины питания, разгрузки подземных вод, а также расходов подземного потока по своему содержанию могут быть классифицированы следующим образом (табл. 3.1): гидродинамические (в том числе методы математического моделирования), основанные на использовании зависимостей, полученных на основании решения дифференциальных уравнений фильтрации; балансовые, где

**3.1. Типизация методов оценки динамических ресурсов подземных вод**

| Наименование методов | Разновидности методов | Определяемые величины |
|---|---|---|
| Гидродинамические (в том числе математическое моделирование) | Расчет по данным наблюдений за режимом подземных вод на основании уравнений нестационарной и стационарной фильтрации аналитическими и численными методами | Питание подземных вод<br>Разгрузка подземных вод |
| | Расчет расхода потока подземных вод по данным о параметрах пласта и уклоне потока | Расход потока подземных вод |
| | Расчет питания подземных вод с учетом влагопереноса через зону аэрации | Питание подземных вод |
| Балансовые | Решение уравнений общего водного баланса, баланса вод зоны аэрации и баланса подземных вод | Питание подземных вод, разгрузка подземных вод |
| | Натурное определение (инфильтрационного питания подземных вод и испарения с их уровня) путем непосредственных измерений | |
| Гидрометрические | Изучение изменения расхода поверхностных вод в двух створах на участках питания или разгрузки подземных вод | Отдельные компоненты питания и разгрузки подземных вод в реки |
| | Оценка меженного стока реки | Компоненты разгрузки подземных вод (подземный сток в реки) |
| | Генетическое расчленение гидрографа реки | |
| | Изучение изменения химического состава и температуры поверхностных и подземных вод в двух створах | То же |
| | Изучение родникового стока | Компонент разгрузки (родниковый сток) |
| Гидрогеологических аналогов | Полная аналогия<br>Частичная аналогия | Питание и разгрузка подземных вод |

величина питания подземных вод оценивается по уравнениям общего водного баланса или баланса подземных вод, а также путем непосредственных замеров на специальных балансовых площадках; гидрометрические методы оценки отдельных компонентов питания и разгрузки подземных вод по изучению поверхностного стока; методы аналогии.

Приведенная типизация дает возможность более целенаправленно и эффективно применять различные методы оценки динамических ресурсов подземных вод, при этом для повышения достоверности расчетов рекомендуется по возможности использовать несколько независимых методов.

### 3.2. ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Гидродинамические методы определения питания и разгрузки подземных вод основаны на решении дифференциальных уравнений неустановившейся (в частном случае — установившейся фильтрации) типа

$$\frac{\partial H}{\partial t} = a_y \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\varepsilon}{\mu}, \qquad (3.4)$$

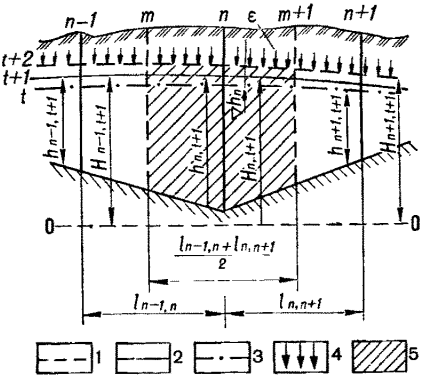



Рис. 9. Схема к выводу уравнения в конечных разностях для одномерного безнапорного потока для оценки питания подземных вод:

Уровни грунтовых вод на различные моменты времени интервала $\Delta t$: *1* — на конечный момент $t+2$; *2* — на средний момент $t+1$; *3* — на начальный момент $t$; *4* — питание грунтовых вод сверху; *5* — расчетный элемент потока

где ε — интенсивность инфильтрационного питания подземных вод; $a_y$ — коэффициент уровнепроводности; μ — коэффициент водоотдачи.

Решение дифференциальных уравнений проводится аналитическими и численными методами, причем для реализации последних используются ЭВМ.

Широкое применение получила методика определения питания подземных вод путем решения обратных задач по известным данным об уровенных поверхностях на различные моменты времени и о параметрах пластов. Причем решение соответствующих уравнений для системы, состоящей из водоносных и слабопроницаемых пластов, позволяет определить питание и разгрузку подземных вод отдельных водоносных горизонтов и за счет перетекания через слабопроницаемые пласты.

А. В. Лебедевым (1976, 1980) получен ряд аналитических решений для определения инфильтрационного питания в условиях различных схем строения пластов по данным об изменениях уровней в наблюдательных скважинах и на границах пласта.

Одним из наиболее распространенных методов определения питания подземных вод является метод конечных разностей.

Метод конечных разностей основан на применении для гидродинамического анализа режима грунтовых вод уравнения неустановившейся фильтрации в конечных разностях, выведенного Г. Н. Каменским (1943) для профильного и планового потоков. Метод развит в работах А. В. Лебедева (1976, 1980), П. А. Киселева (1967, 1975, 1980) и др.

Для получения исходных данных необходимо иметь не менее трех скважин, расположенных в створе по направлению потока подземных вод.

Согласно расчетной схеме (рис. 9) при наличии постоянного по площади инфильтрационного питания грунтовых вод ε из уравнения фильтрации в конечных разностях следует:

$$\varepsilon = \mu_н \frac{\Delta h_n}{\Delta t} - \frac{1}{l_{n-1,n} + l_{n,n+1}} \left[ k_m (h_{n-1,t+1} + h_{n,t+1}) \frac{H_{n-1,t+1} - H_{n,t+1}}{l_{n-1,n}} - \right.$$

$$\left. - k_{m+1} (h_{n,t+1} + h_{n+1,t+1}) \frac{H_{n,t+1} - H_{n+1,t+1}}{l_{n,n+1}} \right], \qquad (3.5)$$

где $\mu_н$ — коэффициент недостатка насыщения; $\Delta h_n$ — изменение уровня грунтовых вод за время $\Delta t$ в скважине $n$, равное $\Delta h_n = H_{n,t+2} - H_{n,t}$; $H_{n,t}$ и $H_{n,t+2}$ — уровни в скважине соответственно в начальный момент времени $t$ и конечный момент $t + 2$; $k_m$ и $k_{m+1}$ — коэффициенты фильтрации пород соответственно в сечениях $m$ и $m + 1$; $l_{n-1,n}$ и $l_{n,n+1}$ — расстояние между скважинами $n - 1$, $n$ и $n + 1$; $h_{n-1,t+1}$ и $h_{n+1,t+1}$ — мощности грунтового потока в средний момент времени $t + 1$ расчетного промежутка времени $\Delta t$ соответственно в скважинах $n - 1$, $n$ и $n + 1$; $H_{n-1,t+1}$, $H_{n,t+1}$ и $H_{n+1,t+1}$ — гидродинамические напоры в сечениях $n - 1$, $n$ и $n + 1$ в тот же момент времени $t + 1$.

Для однородного горизонтального пласта ($k_m = k_{m+1} = k$) при $H = h$ и $l_{n-1,n} = l_{n,n+1} = l$ формула (3.5) приобретает следующий вид:

$$\varepsilon = \frac{\mu_н \Delta h_n}{\Delta t} - \frac{k}{2l^2}(h^2_{n-1,t+1} - 2h^2_{n,t+1} + h^2_{n+1,t+1}). \qquad (3.6)$$

В условиях установившейся фильтрации, когда

$$\mu_н \frac{\Delta h_n}{\Delta t} = 0 \text{ и } h_{n-1,t+1} = h_1,\ h_{n,t+1} = h_2 \text{ и } h_{n+1,t+1} = h_3,$$

$$\varepsilon = \frac{k}{2l^2}(2h_2^2 - h_1^2 - h_3^2). \qquad (3.7)$$

Для определения величины динамических ресурсов методом конечных разностей годовые циклы режимных наблюдений разбивают на отдельные небольшие промежутки времени $\Delta t$ с характерными условиями питания грунтовых вод. По результатам расчета величина $\varepsilon$ может принимать положительные и отрицательные значения. При положительном значении она соответствует средней интенсивности питания в течение расчетного времени, при отрицательном — средней интенсивности разгрузки (например, за счет испарения) грунтовых вод.

Величина питания или разгрузки за расчетное время $\Delta t$ определяется как $\varepsilon \Delta t$. Суммированием отдельно вычисленных $\varepsilon \Delta t$ можно подсчитать годовые суммы питания и расходования подземных вод.

Принципиально метод конечных разностей применим для оценки динамических ресурсов подземных вод как в простых, так и в сложных гидрогеологических условиях. Однако для успешного его применения требуется создание хорошо развитой сети режимных наблюдательных скважин и надежное определение фильтрационных характеристик пластов.

Поскольку грунтовые воды часто связаны с нижележащими водоносными горизонтами, в балансе грунтового потока следует учитывать составляющую перетока ($\varepsilon_0$), что определяет необходимость изучения уровня напорного горизонта ($H_н$) и проницаемости разделяющего слоя ($k_0$). При игнорировании перетока в напорный горизонт величина питания грунтовых вод ($\varepsilon$) может быть определена с существенной ошибкой.

Для учета этой составляющей в исходные зависимости (3.5)—(3.7) должно быть добавлено слагаемое, учитывающее водообмен с напор-

ным пластом, равный для случая установившейся фильтрации

$$\varepsilon_0 = k_0\left(\frac{h_n - H_н}{m_0}\right)l. \qquad (3.8)$$

При определении инфильтрации по приведенным формулам установившейся фильтрации необходимо иметь в виду, что они практически применимы только для однородных пластов в условиях плоскопараллельного потока, так как даже сравнительно небольшие изменения проницаемости пластов и уклона подземных вод могут приводить к ошибкам, а иногда и к абсурдным выводам.

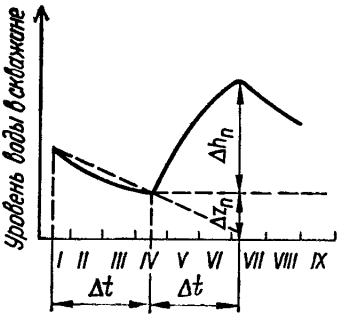



Рис. 10. Схема к расчету питания грунтовых вод путем анализа режима их уровня в одиночной скважине (по Н. Н. Биндеману, 1963)

Эти недостатки в значительной мере снимаются при использовании для определения питания традиционного метода Г. Н. Каменского по конверту из 5 скважин (1953).

Метод конечных разностей лежит также в основе методов определения питания грунтовых вод по наблюдениям за режимом уровня в одиночной скважине. Из этих методов наиболее распространен метод, предложенный Н. Н. Биндеманом (1960) для зандровых и аллювиальных равнин при небольшой глубине залегания уровня (2—4 м).

Из конечно-разностного уравнения (3.5) следует, что в периоды резкого повышения уровня грунтовых вод разность между расходами в расчетных сечениях $m$ и $m + 1$ (рис. 9), определяемая вторым слагаемым правой части уравнения, намного меньше первого слагаемого и может быть принята равной нулю. Тогда для горизонтального безнапорного потока

$$\varepsilon = \mu_н \frac{\Delta h_n}{\Delta t}. \qquad (3.9)$$

Инфильтрация, рассчитанная по формуле (3.9), дает заниженные результаты, так как наблюдаемая в скважине величина $\Delta h_n$ является результатом подъема уровня воды за счет поступления ее из зоны аэрации и снижения уровня, связанного с естественным оттоком воды к местам дренирования (рекам, озерам и т. д.). С учетом этого обстоятельства

$$\varepsilon = \mu_н \frac{\Delta h_n + \Delta z_n}{\Delta t}, \qquad (3.10)$$

где $\Delta z_n$ — величина, на которую уровень грунтовых вод снизился за время $\Delta t$ за счет оттока воды по водоносному горизонту.

Величину $\Delta z_n$ Н. Н. Биндеман предлагает определять приблизительно, исходя из предпосылки, что в периоды питания как отток грунтовых вод, так и вызванное оттоком понижение уровня существенно не изменяются по сравнению с предшествующим периодом спада уровня при отсутствии питания (например, зимой, когда зона аэрации промерзла, или летом при отсутствии дождей). В таком случае величи-

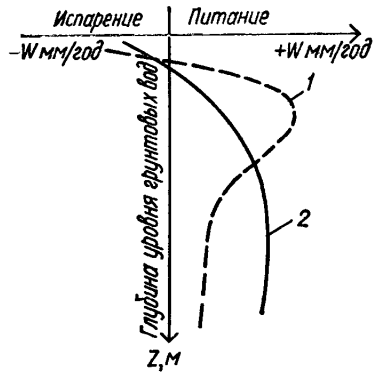



Рис. 11. График зависимости величины питания грунтовых вод от глубины залегания их уровня:

*1* — по данным наблюдений за режимом уровней; *2* — по расчету влагопереноса (по И. С. Пашковскому, 1982)

ну $\Delta z_n$ удобно определять по графику режима грунтовых вод, продлевая линию снижения уровня за время $\Delta t$, равное времени повышения уровня, до точки $A$, соответствующей максимуму уровня (рис. 10).

Метод предложен для определения величины питания в периоды наиболее интенсивного подъема уровня. Аналогично определяются величины $\Delta h_n$ и $\Delta z_n$ для всех $i$-х периодов питания и подъема уровня грунтовых вод, после чего их суммируют. Среднегодовую величину инфильтрации рассчитывают по формуле

$$\varepsilon = \mu_{\text{н}} \sum_{i=1}^{n} \frac{(\Delta h_{ni} + \Delta z_{ni})}{365} .$$

Способ определения инфильтрационного питания, предложенный Н. Н. Биндеманом, выгодно отличается от метода конечных разностей Г. Н. Каменского. Его можно применять для анализа данных режимных наблюдений в одной скважине. Наиболее достоверны результаты определения $\varepsilon$ по этому методу на участках, характеризующихся равенством притока и оттока грунтовых вод. В связи с этим применять его целесообразно на водораздельных плато (вдали от реки), где уровенная поверхность почти горизонтальна, а разность притока и оттока близка к нулю.

Наиболее детально недостатки конечно-разностных методов, в том числе метода Н. Н. Биндемана, проанализированы И. С. Пашковским (1982, 1985).

Прежде всего в основу этих методов заложен ряд указанных выше предпосылок, которые далеко не всегда соблюдаются и особенно существенны для метода Н. Н. Биндемана: отток подземных вод в период подъема уровня соответствует его величине до начала подъема. В период спада инфильтрационное питание (разгрузка) отсутствует, степень водонасыщения следует считать постоянной. Но даже если предположить, что все эти предпосылки соблюдаются, то и в этом случае указанным методом можно определять только приращение поступления к свободной поверхности, а не само поступление, т. е. величину питания, которая в значительной мере зависит от условий расходования воды в период спада при вертикальной миграции влаги за счет испарения и транспирации растениями.

Применение этого метода может дать и принципиально неверные результаты по определению нормы питания. С увеличением глубины за-

легания уровня от поверхности земли амплитуда его подъема в период наибольшего поступления влаги сначала увеличивается, а затем снова уменьшается, что интерпретируется обычно как первоначальное увеличение питания с глубиной (вследствие снижения величины испарения и транспирации), а затем постепенное уменьшение (рис. 11, кривая *1*).

И. С. Пашковским (1982) доказано, что такая трактовка известных экспериментально установленных фактов уменьшения амплитуды колебания уровня с увеличением глубины его залегания связана не с уменьшением питания подземных вод, а с меньшей изменчивостью его интенсивности во времени в различные сезоны года. Норма питания при этом может увеличиваться или оставаться постоянной, определяясь осредненной за длительный период алгебраической суммой положительных и отрицательных расходов влаги у свободной поверхности грунтовых вод. Вследствие этого при определенных условиях норма питания может иметь отрицательный знак, что свидетельствует о преимущественной разгрузке грунтовых вод за счет испарения.

Если для оценки питания используются величины не полных напоров, а их приращений, могут возникнуть ложные выводы об уменьшении величины питания с ростом глубины уровня грунтовых вод, так как в этом случае определяется не величина питания в данный период, а только ее приращение относительно предыдущего периода.

На основании совместного рассмотрения фильтрации в насыщенных (водоносный горизонт) и влагопереноса в ненасыщенных (зона аэрации) породах И. С. Пашковский (1982) показал, что с увеличением глубины залегания уровня среднемноголетнее питание возрастает, стремясь к некоторой постоянной величине (см. рис. 11, кривая *2*). Поэтому более надежные величины как среднемноголетнего, так и сезонного или краткосрочного питания могут быть определены гидродинамическими расчетами с учетом влагопереноса в зоне аэрации.

Методы оценки питания подземных вод с учетом влагопереноса в зоне аэрации базируются на учете зависимости режима осушения (насыщения) породы от динамики уровня грунтовых вод и параметров влагопереноса: коэффициента влагопереноса $k_в(W)$; высоты всасывания $\Psi(W)$; начальных и граничных условий.

Из многочисленных методов оценки питания по гидродинамическим моделям с учетом влагопереноса в зоне аэрации наиболее полно разработанным является метод И. С. Пашковского (1973, 1985), основанный на решении уравнения

$$\frac{\partial}{\partial z}\left(k_в \frac{\partial H}{\partial z}\right) + \xi = C\frac{\partial H}{\partial t}, \quad C = \frac{\partial W}{\partial \psi(W)}, \tag{3.11}$$

где $C$ — дифференциальная влагоемкость; $\xi$ — интенсивность внутренних стоков (например, отбор влаги корнями растений), или источников (за счет проникновения влаги по отдельным макропорам и пр.); $k_в$ — коэффициент влагопереноса; $W$ — влажность породы; $H$ — напор, определяемый как $(h + z)$; $h$ — пьезометрическая высота в зоне полного насыщения (на свободной поверхности $h = 0$), в зоне аэрации

($\Psi = -h$); $z$ — вертикальная координата, ориентированная снизу вверх.

$$\Psi = -H_к \ln \frac{W - W_м}{W_п - W_м}, \tag{3.12}$$

где $W_п$ — полная влагоемкость; $W_м$ — максимальная молекулярная влагоемкость; $H_к$ — приведенная высота капиллярной зоны, равная

$$H_к = \frac{V_к}{\mu}, \tag{3.13}$$

где $V_к$ — объем воды в капиллярной зоне; $\mu$ — коэффициент емкости.

В зоне аэрации при отсутствии движения влаги высота всасывания в каждой точке численно равна ее ординате $z$. В случае, когда $\Psi(W) > z$, в зоне аэрации имеет место восходящий поток, а при $\Psi(W) < z$ — нисходящий.

Измерение высоты всасывания производится тензиометром, выполняющим функции измерителя давления влаги (фильтр тензиометра керамический, измерение давления осуществляется вакуумметром или ртутным манометром) (Н. Е. Дзекунов, И. Е. Жернов, Б. А. Файбышенко, 1987).

Уравнение (3.11) описывает влагоперенос и в зоне насыщения, и в зоне аэрации. Поскольку это уравнение нелинейно, для его решения в основном используются численные методы с применением ЭВМ.

Анализ данных об изменении нормы питания в зависимости от глубины залегания уровня грунтовых вод, полученных в результате натурных исследований и численных расчетов на ЭВМ для различных природных условий в достаточно большом диапазоне глубин (исключая почвенный слой), позволил И. С. Пашковскому аппроксимировать эту зависимость экспоненциальной функцией вида

$$\varepsilon(z) = \varepsilon_н - (\varepsilon_н - \varepsilon_0) e^{-z/z_к}, \tag{3.14}$$

где $\varepsilon_0$ — норма питания при залегании уровня у поверхности земли; $\varepsilon_н$ — норма питания при большой глубине залегания уровня ($z \to \infty$); $z_к$ — константа, зависящая от параметров влагопереноса; для песков $z_к = 0{,}1$ м; для супесей — 0,3; для суглинков — 1,0; для глин — 1 ... 2 м. Величина $\varepsilon_н$ ориентировочно может быть определена по формуле

$$\varepsilon_н = x_з \eta(\alpha), \quad \alpha = \left(\frac{x_з}{x_{эф}}\right)^{1/3}, \tag{3.15}$$

где $x_з$ — осадки зимнего периода, когда испарение практически отсутствует; $x_{эф}$ — эффективные осадки летнего периода, определяемые разностью между суммарным испарением $E_л$ и суммарными осадками за этот период $x_л$, т. е. $x_{эф} = E_л - x_л$.

При $2 > \alpha > 0{,}54$ можно принять

$$\eta(\alpha) = 0{,}283\alpha - 0{,}116. \tag{3.16}$$

При $\alpha < 0{,}54$ можно считать, что $\eta(\alpha) \approx 0$.

Значение $\varepsilon_0$ можно оценить из данных водного баланса участка:

$$\varepsilon_0 = x_0 - z_0 - y_0, \tag{3.17}$$

где $x_0$ — норма осадков; $z_0$ — норма испаряемости; $y_0$ — норма поверхностного стока.

Поскольку $\varepsilon_0$ рассчитывают по формуле (3.17), в которую входит не величина испарения с уровня грунтовых вод, а, как правило, большая величина $z_0$ — испаряемость с открытой водной поверхности, величину $\varepsilon_0$ определяют с некоторым занижением.

Описанная методика может использоваться для предварительных и региональных оценок динамических ресурсов. Для более детальных оценок требуется проведение специальных балансовых исследований для надежного определения элементов уравнения (3.17) с учетом специфических условий местности (залесенность, тип почв, растительность и другие особенности ландшафта). Натурные наблюдения должны проводиться не менее 2—3 лет в комплексе с определением параметров влагопереноса в полевых и лабораторных условиях.

К основным преимуществам метода относятся:

1) надежность и обоснованность получаемых величин питания, достаточно полно учитывающих процессы поступления влаги в водоносный горизонт при инфильтрации воды с поверхности земли через зону аэрации;

2) возможность учитывать изменение во времени величины питания при изменении глубины залегания уровня грунтовых вод непосредственно при гидродинамических расчетах.

Эффективность исследований возрастает при сочетании традиционных методов оценки питания с расчетами влагопереноса в зоне аэрации.

Метод расчета расхода подземного потока. Использование этого метода чаще всего сводится к расчетам по формуле Дарси, которую можно представить следующим образом:

$$Q_p = \frac{k_1F_1 + k_2F_2}{2} J, \qquad (3.18)$$

где $k_1$ и $k_2$ — коэффициенты фильтрации водоносного горизонта в сечениях, расположенных выше и ниже по потоку перпендикулярно направлению движения воды; $F_1$ и $F_2$ — соответствующие площади расчетных сечений; $J$ — средний напорный градиент между сечениями:

$$J = \frac{H_1 - H_2}{l}, \qquad (3.19)$$

где $H_1$ и $H_2$ — средние напоры в нижнем и верхнем сечениях; $l$ — расстояние между сечениями.

Выбор расчетных сечений подземного потока производится с помощью карт гидроизогипс или гидроизопьез.

Если расчетные параметры, входящие в формулу (3.18), меняются по сечению потока, то вдоль фронта потока выделяют блоки с более или менее однородными условиями. Производится расчет расходов потока в пределах каждого блока, которые затем суммируются.

Общий расход потока часто находят как произведение единичного расхода $q_p$ на ширину потока $B$.

Определяя расход потока на различные периоды времени, можно оценить его изменчивость в сезонном и многолетнем разрезе.

Развитием этого метода является *оценка расхода подземных вод по гидродинамической сетке* (по ячейкам лент тока), составляемой на основе карты гидроизогипс (для напорных вод — гидроизопьез); этот метод позволяет скорректировать значения параметров по каждой ленте тока.

При сложной конфигурации пьезоизогипс элементарные ленты тока могут объединяться в блоки, а отдельные ячейки — в подблоки (В. М. Шестопалов, 1974).

Расчет расходов на входе ($Q_i$) и выходе ($Q_{i+1}$) каждой ячейки (подблока) гидродинамической сетки позволяет оценить дополнительную величину питания и разгрузки в пределах этого расчетного элемента площадью $F_i$:

$$\Delta Q_i = Q_{i+1} - Q_i \tag{3.20}$$

и тем самым оценить интенсивность питания и разгрузки ($\varepsilon_i$) в пределах этой площади:

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta Q_i}{F_i}. \tag{3.21}$$

В этом случае значение $\varepsilon_i$ является балансовым и может не всегда отражать полную величину питания или разгрузки через кровлю и подошву пласта в пределах выделенной площади. Нередко оно отражает только превышение питания над разгрузкой или наоборот (т. е. алгебраическую сумму).

Существенные ограничения на данный метод накладывают погрешности определения водопроводимости, интерполяции ее значений так же, как и значений напоров по площади.

Метод требует достаточно надежной увязки исходных значений водопроводимости и напоров, что наиболее успешно достигается корректировкой исходных данных при моделировании на ЭВМ.

В противном случае могут быть в отдельных блоках не только ошибочные, но даже нереальные результаты, вплоть до получения значений питания или разгрузки с обратным знаком.

В многослойных водоносных системах ведущая роль в площадном питании напорных горизонтов принадлежит перетеканию воды через слабопроницаемые разделяющие слои.

Интенсивность питания подземных вод за счет процессов перетекания наиболее просто может быть определена непосредственным расчетом по формуле Дарси:

$$\varepsilon_{\text{п}} = \frac{k_0}{m_0}(H_2 - H_1), \tag{3.22}$$

где $\varepsilon_{\text{п}}$ — количество воды, поступающее в единицу времени в рассматриваемой водоносный горизонт через единичную площадь его слабопроницаемой кровли или подошвы (модуль перетекания); $k_0$ и $m_0$ — соответственно коэффициент фильтрации и мощность слабопроницаемого пласта; $H_1$ и $H_2$ — гидродинамические напоры соответственно рассматриваемого и соседнего (выше- или нижележащего) пластов.

Положительная разность между $H_2$ и $H_1$ ($H_2 > H_1$) в формуле (3.22) свидетельствует о том, что в изучаемый пласт из соседнего поступает вода с интенсивностью перетекания $\varepsilon_п$. При $H_2 < H_1$ наблюдается расход воды перетеканием через слабопроницаемые породы в соседний пласт. Определить величину перетекания по формуле (3.22) просто, однако на практике применение этого метода не всегда возможно. Это объясняется прежде всего трудностями определения коэффициента фильтрации слабопроницаемых раздельных слоев, а также установления особенностей изменения взаимосвязи между водоносными горизонтами по площади.

Оценивая в целом гидродинамические методы определения питания, разгрузки подземных вод и расхода подземного потока, необходимо отметить, что их использование требует надежных данных по гидрогеологическим (фильтрационным и емкостным) параметрам водоносных горизонтов и условиям на границах. Исключительно важное значение при этом приобретает степень фильтрационной однородности водоносных горизонтов, так как для неоднородных фильтрационных сред использование аналитических и конечно-разностных зависимостей может привести, как уже указывалось, к абсурдным результатам (в период инфильтрации получить испарение и наоборот). Поэтому в таких случаях, особенно при рассмотрении достаточно больших районов, предпочтение следует отдавать методам математического моделирования на ЭВМ, позволяющим учесть как неоднородность пластов, так и изменчивость величины питания по площади. Особенности применения этого метода для оценки питания рассмотрены в гл. 8.

Существенным недостатком гидродинамического метода расчета расхода подземного потока является также возможная ошибка в определении фильтрационных параметров пласта, устанавливаемых, как правило, в отдельных точках, и в построении карты гидроизогипс, по которой определяется уклон подземного потока.

### 3.3. БАЛАНСОВЫЕ МЕТОДЫ

Уравнения водного баланса основаны на равенстве приходных и расходных его статей в пределах водоносной системы. Баланс подземных вод можно составлять для любой территории (участок, бассейн реки и т. д.) и для любого промежутка времени. В полном виде с учетом всех приходных и расходных статей баланса оно приведено в § 1.3. Из практических соображений при составлении уравнений водного баланса для конкретных участков часто прибегают к упрощениям, исключая из уравнения (1.4) те члены, которые мало влияют на точность расчета.

Для оценки динамических ресурсов подземных вод балансовые расчеты проводят на специально выбранных и оборудованных балансовых участках, а затем полученные данные распространяются на площади со сходными условиями. При проведении исследований в пределах крупных гидрогеологических районов, характеризующихся бо́льшим или меньшим разнообразием геологического строения, физико-географических условий, выбирают несколько балансовых участков, размещенных в типичных условиях залегания, питания, движения

и разгрузки подземных вод. Во многих случаях целесообразным и удобным оказывается выделение балансовых районов в пределах частных водосборов замкнутых речных бассейнов.

Балансовые методы применимы для оценки динамических ресурсов как грунтовых, так и напорных вод. Однако при этом следует иметь в виду, что эти методы можно применять лишь в условиях, когда определяемые составляющие водного баланса по своей величине существенно больше по сравнению с погрешностями их определения.

Методы, основанные на решении уравнений водного баланса локальных участков, позволяют оценить питание грунтовых вод путем решения уравнений баланса воды на поверхности земли, в зоне аэрации или в водоносном горизонте.

Метод, основанный на решении уравнения баланса воды на поверхности земли, разработан и применен С. К. Калугиным (1957) для засушливых и полузасушливых районов, где питание подземных вод происходит главным образом в период весеннего снеготаяния. Его сущность сводится к следующему. На исследуемой территории выбирается опорный речной бассейн, площадь которого может изменяться от единиц до сотен и более квадратных километров. В пределах этого бассейна в предвесенний период 1—2 раза проводятся снегомерные съемки для определения запасов воды в снеге. Запасы воды в снеге суммируются с атмосферными осадками, выпавшими за время снеготаяния. Это суммарное количество воды, за счет которого происходит формирование как поверхностного, так и подземного стока, называется *эффективными осадками*.

Затем инфильтрационное питание может быть определено по следующему уравнению баланса воды на поверхности земли замкнутого речного бассейна:

$$\varepsilon = X_{эф} - (Y_в + Z_в), \qquad (3.23)$$

где $Y_в$ — весенний поверхностный сток; $Z_в$ — испарение в течение периода стока; $X_{эф}$ — эффективные атмосферные осадки.

Величина инфильтрационного питания грунтовых вод, рассчитанная по балансовому уравнению (3.23), является несколько завышенной, так как в нее входят и возможные потери воды на насыщение зоны аэрации. Отсюда следует, что применение указанного балансового метода определения динамических ресурсов грунтовых вод целесообразно лишь при относительно неглубоком (5 — 20 м) залегании подземных вод и при условии, что зона аэрации сложена трещиноватыми скальными породами. В этих условиях потери воды в зоне аэрации будут минимальными. Несмотря на указанный основной недостаток, рассматриваемый метод рекомендуется для практического использования, так как он прост, не связан с проведением дорогостоящих буровых и опытных гидрогеологических работ.

Особенно широкое применение этот метод нашел в Казахстане, на Урале и в других районах распространения с поверхности трещиноватых и закарстованных пород.

Накопленный по отдельным регионам материал позволяет применять в упрощенной форме этот метод без специальных балансовых ис-

следований, по аналогии используя величину коэффициента просачивания (инфильтрации) эффективных осадков $\alpha$.

*Коэффициент просачивания* определяется отношением части атмосферных осадков, поступивших на питание подземных вод, к общей величине эффективных осадков, участвующих в этом питании:

$$\alpha = \frac{\varepsilon}{X_{эф}}. \qquad (3.24)$$

По значению коэффициента просачивания может быть определена величина инфильтрационного питания на основании данных только о величине эффективных осадков. По данным М. А. Хордикайнена (1976), характерные значения коэффициента $\alpha$ в условиях Центрального Казахстана составляют 0,4 — 0,5 на участках неглубокого залегания трещиноватого субстрата, на участках с мощными корами выветривания (до 100 м) он снижался до 0,3 — 0,35, а при наличии суглинистого покрова — до 0,2 — 0,25.

Использование оценок питания по величине коэффициента просачивания целесообразно широко использовать при предварительных и региональных исследованиях в связи с несомненной простотой и отсутствием необходимости в проведении специальных исследований. Однако следует иметь в виду, что точность метода невысока.

Согласно *уравнению баланса влаги в зоне аэрации,* по А. В. Лебедеву (1976),

$$\varepsilon\Delta t = X + K - Z + 1000\frac{Y_1 - Y_2}{F}\Delta t - D, \qquad (3.25)$$

где $X$ — количество атмосферных осадков за время $\Delta t$, мм; $K$ — величина конденсации водяных паров на поверхности и в зоне аэрации за данное время, мм; $Z$ — суммарное испарение с дневной поверхности (эвапотранспирация), мм; $Y_1$ и $Y_2$ — соответственно приток и отток поверхностных вод с балансового участка, м³/сут; $F$ — площадь участка, м²; $D$ — приращение запасов влаги за время $\Delta t$ на поверхности земли и в зоне аэрации, мм.

Балансовое уравнение (3.25), несомненно, точнее, чем уравнение (3.23). Однако его применение во многих случаях практически невозможно из-за присутствия в нем величин $K$ и $D$, трудноопределимых в массовых масштабах при проведении полевых работ.

Балансовый метод может быть использован для определения динамических ресурсов подземных вод в тех случаях, когда отдельные составляющие питания (инфильтрация атмосферных осадков, просачивание поверхностных вод, боковой приток) определены независимыми методами. Тогда при использовании балансового метода производится их суммирование. То же самое можно сказать и об определении динамических ресурсов по сумме расходных элементов.

Для изучения инфильтрационного питания грунтовых вод испарения и транспирации других составляющих баланса грунтовых вод и почвогрунтов зоны аэрации широко применяется лизиметрический метод. Лизиметрические установки имеют площадь поперечного сечения от 0,1—5 м² до 25—100 м², иногда более, устанавливаются

на различную глубину. Методика оценки инфильтрации (испарения) по лизиметрам основана на компенсационном принципе. Путем долива или отлива воды через питающую систему создаются условия для поддержания грунтовых вод на заданном уровне.

По количеству откачиваемой влаги из лизиметра определяется величина инфильтрации, по количеству долитой воды — величина испарения.

Большие затруднения возникают при экстраполяции данных лизиметрических исследований на обширные площади питания водоносного горизонта, характеризующиеся разнообразием климатических, геоморфологических, геоботанических условий, изменчивостью строения зоны аэрации и т. д. К тому же длительность лизиметрических наблюдений (обычно многолетний период), необходимая для получения более или менее надежных данных, обычно намного превышает сроки гидрогеологических изысканий. Все это ограничивает возможности широкого внедрения экспериментальных методов в практику исследований для целей водоснабжения.

В настоящее время эти методы широко применяются в практике мелиоративного строительства, где процессы накопления, движения и расхода воды в зоне аэрации играют первостепенную роль в формировании искусственной гидрогеологической обстановки.

Метод среднемноголетнего водного баланса был предложен Б. И. Куделиным (1960) для оценки инфильтрационного питания и разгрузки артезианских водоносных горизонтов, залегающих ниже зоны дренирования местной речной сетью.

При этом были приняты следующие допущения:

1. Для глубоких водоносных горизонтов с большими периодами водообмена можно исходить из их многолетнего водного баланса, пренебрегая сезонными и даже годовыми изменениями питания и разгрузки, что позволяет использовать для расчетов уравнение многолетнего водного баланса.

2. Расчетные балансовые участки в пределах изучаемой площади распространения водоносных горизонтов можно выделять в соответствии с территорией замкнутых речных бассейнов и воспользоваться для расчетов многолетними наблюдениями за речным стоком.

Тогда из уравнения среднемноголетнего водного баланса может быть определено среднемноголетнее питание ($+\varepsilon_0$) на площади инфильтрационного питания, либо среднемноголетняя восходящая разгрузка ($-\varepsilon$):

$$\pm\varepsilon_0 = X_0 - Y_0 - Z_0, \qquad (3.26)$$

где $X_0$, $Y_0$, $Z_0$ — соответственно многолетняя норма атмосферных осадков, речного стока и испарения.

Значения этих величин могут быть получены по соответствующим справочным материалам Гидрометцентра СССР.

Однако использование этого метода для оценки питания артезианских вод и их разгрузки по уравнению (3.26) может дать только самые общие представления об определенных величинах. Это связано с тем, что погрешность определения таких элементов баланса, как испа-

рение, поверхностный сток, во многих случаях превышает искомую величину питания подземных вод. Кроме того, следует иметь в виду, что в пределах речного бассейна могут происходить на различных участках весьма сложные процессы взаимодействия между горизонтами в условиях восходящей и нисходящей фильтрации. Поэтому уравнение (3.26) не характеризует ни полного нисходящего инфильтрационного питания, ни полной восходящей разгрузки в пределах рассматриваемого бассейна, а только разницу между ними. В связи с изложенным метод общего водного баланса рекомендуется использовать как вспомогательный при региональных оценках динамических ресурсов подземных вод для весьма ориентировочных расчетов.

Эти замечания, хотя и в значительно меньшей степени, относятся к использованию методов расчета баланса воды на земной поверхности и балансу влаги в зоне аэрации.

При использовании этих методов необходимо, чтобы искомая величина питания подземных вод существенно превосходила возможные ошибки в определении входящих в балансовые уравнения величин.

### 3.4. ГИДРОМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Метод, основанный на определении разности расхода реки в двух гидрометрических створах. На специально оборудованных гидрометрических постах расход рассчитывается в зависимости от положения уровня по кривой расходов (рис. 12). Наблюдаемое изменение за вычетом расхода притоков реки равно величине стока подземных вод на участке их разгрузки из дренируемых водоносных горизонтов. Расход подземного потока в реку в этом случае составит

$$Q_р = Q_2 - Q_1, \tag{3.27}$$

где $Q_1$ и $Q_2$ — расходы реки соответственно в верхнем и нижнем гидрометрических створах.

Средний единичный расход подземного потока по длине реки рассчитывается по формуле

$$q_р = \frac{Q_2 - Q_1}{l}, \tag{3.28}$$

где $l$ — расстояние между створами.

Метод, основанный на определении разности расхода реки в двух гидрометрических створах, может быть применен и для определения части динамических ресурсов подземных вод, формируемой за счет поглощения поверхностного стока. Тогда в формулах (3.27) и (3.28) расход $Q_2$ будет меньше расхода $Q_1$.

Рассмотренный метод определения расхода подземного потока довольно прост, однако для успешного его использования расчетные гидрометрические створы должны выбираться таким образом, чтобы разность замеренных в них расходов превышала суммарную величину возможных погрешностей измерения расходов реки.

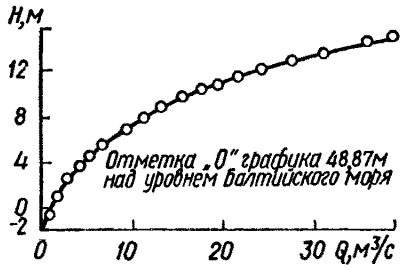



Рис. 12. Кривая расходов реки

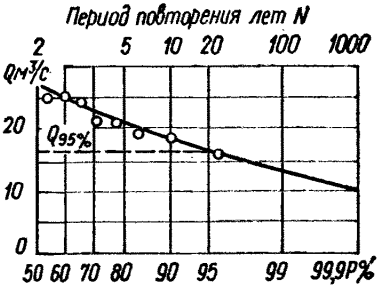



Рис. 13. Кривая обеспеченности расхода реки

Учитывая изменчивость подземного стока во времени, для определения средней или заданной обеспеченности его величины необходимо вести наблюдения за стоком рек в течение нескольких лет, в крайнем случае — не менее одного года, а полученные данные увязывать затем с данными многолетних наблюдений на реке-аналоге.

Метод, основанный на изучении меженного стока реки. Часто при решении водохозяйственных задач (например, при обосновании строительства водозаборного сооружения подземных вод) динамические ресурсы подземных вод устанавливаются по расходу реки в меженный период (период низкой водности).

Этот метод определения динамических ресурсов основан на том, что меженный, а тем более минимальный, сток реки формируется в период устойчивого ее питания за счет подземных вод зоны интенсивного водообмена, когда поверхностный сток отсутствует или не оказывает существенного влияния на речной сток.

На гидрографе стока этот период соответствует периоду низкой водности реки, когда имеются лишь незначительные колебания (до 10 — 15 %) расходов воды, вызванные изменением интенсивности подземного стока.

Водность года наблюдений имеет случайный характер, поэтому важной практической задачей является оценка минимального меженного (или среднего минимального 30-дневного) стока, соответствующего подземному питанию реки с заданной вероятностью превышения (обеспеченностью).

Для практических целей нас может интересовать как среднемноголетняя величина подземного питания рек (50 % вероятности превышения), так и минимальная (85, 90, 95 %), рассматриваемые как гарантированные.

При достаточно продолжительных и репрезентативных рядах наблюдений расчеты характеристик речного стока производятся по кривым обеспеченности (рис. 13).

Кривая обеспеченности (или кривая вероятности превышения) — это интегральная кривая, показывающая обеспеченность или вероятность превышения (в долях единицы или процентах) данной величины среди общей совокупности ряда. Практическое применение разрабо-

танных методов построения кривых обеспеченности описано в работе А. А. Лучшевой (1976).

Метод генетического расчленения гидрографов рек. Этот метод основан на выделении из общего стока реки той его части, которая формируется за счет дренирования водоносных горизонтов и комплексов. Это достигается построением и анализом графиков колебаний речного стока во времени (обычно за год), которые, как известно, называются гидрографами, или гидрограммами, реки.

Характеристика метода и особенности его применения подробно рассмотрены Б. И. Куделиным (1960).

Поскольку для многих речных бассейнов имеются данные по стоку за многолетний период наблюдений, использование метода генетического расчленения гидрографа реки для определения подземного стока дает возможность получать надежные среднемноголетние количественные характеристики той части динамических ресурсов подземных вод интенсивного водообмена, которая дренируется в руслах рек.

Обоснование применения описываемого метода было дано Б. И. Куделиным с учетом режима и динамики стока воды в реки из отдельных водоносных горизонтов, что определяется условиями залегания, питания и разгрузки подземных вод.

Особенности режима подземного стока в реки, определяемые характером гидравлической взаимозависимости подземных и речных вод, обусловливают разные схемы расчленения гидрографов рек.

Б. И. Куделиным разработана методика расчленения гидрографов для следующих типовых условий питания рек подземными водами: 1) река получает питание за счет грунтовых вод, имеющих с ней постоянную гидравлическую связь; 2) река получает питание за счет грунтовых вод, не имеющих с ней гидравлической связи; 3) река получает смешанное грунтовое питание из водоносных горизонтов как имеющих, так и не имеющих с ней гидравлической связи; 4) река получает питание за счет грунтовых и артезианских вод.

Выделенные схемы подземного питания рек не отражают всех разнообразных случаев гидравлической связи водоносных горизонтов с рекой, имеющей большую площадь водосбора, который характеризуется сложными геологическим строением и гидрогеологическими условиями. Поэтому оценка величины подземного стока в реки по гидрографам возможна для небольших рек и не приемлема для крупных.

Основные принципы расчленения гидрографов рек рассмотрим на примере первых двух наиболее характерных условий гидравлической взаимосвязи подземных и поверхностных вод (рис. 14).

*Расчленение гидрографа реки при ее питании из водоносных горизонтов, имеющих постоянную гидравлическую связь с рекой.* Режим грунтового стока из водоносных горизонтов, имеющих постоянную гидравлическую связь с рекой, противоположен по направленности фаз режиму речного стока. Причем в этом случае наблюдается полная зависимость режима подземного стока от режима рек. В период максимального поверхностного стока подземный сток в реку имеет минимальные значения. Это связано с тем, что при резком подъеме уровня вод в реке создается подпор грунтовых вод, в результате чего подземный

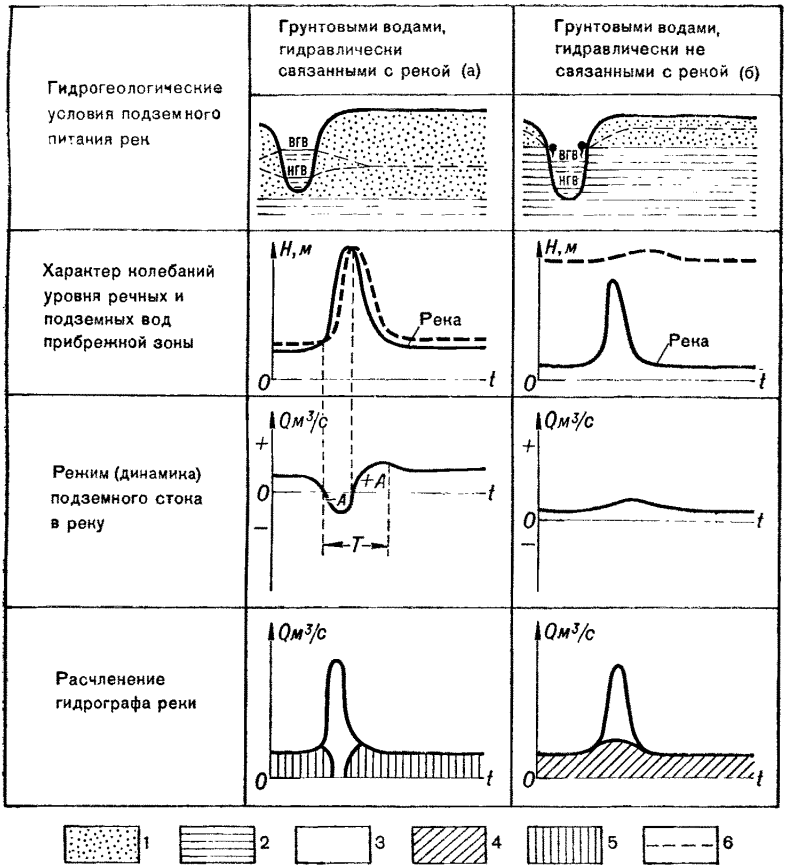



Рис. 14. Типовые схемы расчленения гидрографа реки (по Б. И. Куделину, 1960): *1* — водоносные породы; *2* — водоупорные породы; *3* — поверхностный сток; *4* — подземный сток из водоносных горизонтов, гидравлически не связанных с рекой; *5* — то же для гидравлически связанных с рекой; *6* — уровень подземных вод

сток в реку уменьшается или прекращается. В течение восходящей стадии паводка происходит фильтрация речных вод в водоносный горизонт. Этот процесс продолжается до тех пор, пока не пройдет пик паводка.

**Пример.** На рис. 15 представлен гидрограф реки, в бассейне которой распространен один основной горизонт грунтовых вод, питающий реку и имеющий постоянную гидравлическую с ней связь. Площадь гидрографа, соответствующую подземному питанию реки, выделяют следующим образом. Сначала подземный сток в межень о половодья отделяют прямыми вертикальными линиями *AB* и *DE*. Половодье началось 20 марта одновременно во всем бассейне. С этого момента подземное питание реки в результате подпора прекратилось. Однако в течение некоторого времени после начала половодья в створе будут проходить грунтовые воды, поступившие в русло до 20 марта выше створа, вплоть до ее верховий. Скорость течения в пик половодья 46 км/сут, расстояние от верховий реки до створа равно 368 км. Следовательно, грунтовые воды будут стекать в течение 8 сут (368 км : 46 км/сут = 8 сут) и из са-

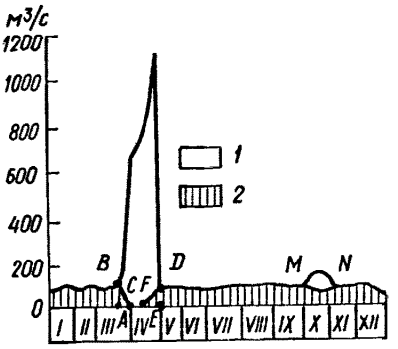



Рис. 15. Выделение подземного стока на гидрографе реки:
*1* — поверхностный сток; *2* — подземный сток

мых отдаленных частей бассейна пройдут створ 28 марта (точка *C* на гидрографе). Снижение расхода грунтовых вод, проходящих створ в половодье транзитом, на гидрографе отображается прямой *BC*.

Половодье окончилось в створе 8 мая (точка D), а в верховьях — 10 апреля. Значит, 10 апреля в реку начали поступать грунтовые воды. Они достигнут расчетного створа, как и в предыдущем случае, через 8 суток. Поэтому грунтовый сток в створе будет замеряться не 8 мая, когда начнется подземное питание в низовьях бассейна, а на 20 дней раньше, т. е. 18 апреля. Увеличение грунтового стока во времени на гидрографе отображается прямой *FD*. К 8 мая, когда процесс берегового регулирования закончится, река переходит полностью на подземное питание. Грунтовый сток в период дождевого паводка в октябре следует отделять от поверхностного плавной линией *MN*.

*Расчленение гидрографа реки при ее питании из водоносных горизонтов, не имеющих гидравлической связи с рекой.* Режим грунтового стока из водоносных горизонтов, не имеющих гидравлической связи с рекой, близок к режиму речных вод, хотя и не зависит от него. В период паводков повышению уровня и увеличению расхода воды в реке способствует подъем уровенной поверхности и увеличения расхода подземных вод (рис. 14). В меженный период наблюдаются наиболее низкое состояние уровней и минимальные расходы воды в водоносном горизонте. В условиях отсутствия гидравлической связи подземных вод с рекой характерны некоторые смещения во времени однонаправленных изменений грунтового и поверхностного стока, и разница в размерах этих изменений объясняется лишь меньшей динамичностью подземных вод по сравнению с поверхностными. С учетом закономерностей подземного стока в реку из водоносных горизонтов, гидравлически не связанных с рекой, грунтовый сток на гидрографе общего речного стока рекомендуется выделять по методу Ф. А. Макаренко. Согласно этому методу расход грунтовых вод, стекающих в любое время года с площади речного бассейна выше наблюдательного створа $Q_р$, рассчитывается по формуле

$$Q_р = q_м k_i, \tag{3.29}$$

где $q_м$ — меженный расход реки, являющийся мерой грунтового питания реки в меженный период; $k_i$ — коэффициент динамичности грунтового стока в реку; величина $k_i$ устанавливается для определенного периода времени (например, для каждого месяца) как отношение суммарного дебита опорных родников в бассейне реки в этот период к дебиту тех же родников в межень; для времени меженного стока реки $k_i = 1$.

Нанеся на гидрограф реки значения $Q_р$, рассчитанные для того или иного отрезка времени, и соединив точки между собой линиями,

получим площадь гидрографа, которая соответствует грунтовому стоку в реку за год (рис. 14). С помощью этого метода объем грунтового стока за год или за любое другое время можно вычислить и без построения гидрографа общего стока реки, пользуясь формулой

$$\sum Q_{\text{р}} = q_{\text{м}} \sum_{i=1}^{n} k_i, \tag{3.30}$$

где $n$ — число периодов времени, для которых рассчитывался коэффициент $k_i$.

По вычисленной величине годового подземного стока рассчитываются усредненные значения для речного бассейна — слой, модуль, коэффициент подземного стока в реку.

Расчет слоя подземного стока в реки $h_{\text{ст}}$ в миллиметрах в год производится по формуле

$$h_{\text{ст}} = 0{,}001 \frac{Q_{\text{р}}}{F_{\text{б}}}, \tag{3.31}$$

где $Q_{\text{р}}$ — годовой подземный сток в реку, м$^3$; $F_{\text{б}}$ — площадь речного бассейна, км$^2$.

Модуль подземного стока $M_{\text{п}}$ (л/с · км$^2$) равен

$$M_{\text{п}} = \frac{Q_{\text{р}}}{31{,}5 \cdot 10^3 F_{\text{б}}}. \tag{3.32}$$

Единицы измерения $Q_{\text{р}}$ и $F_{\text{б}}$ те же, что и в формуле (3.31).

Коэффициент подземного стока в реку (%) вычисляется по формуле

$$k_{\text{п}} = \frac{h_{\text{ст}}}{x} 100\ \%, \tag{3.33}$$

где $x$ — слой осадков.

Метод, основанный на использовании данных о химическом составе подземных и поверхностных вод. Этот метод может быть применен для приближенной оценки подземного питания рек. При этом подземный и поверхностный стоки вычисляют решением системы уравнений:

$$Q_{\text{реч}} = Q_{\text{подз}} + Q_{\text{пов}}; \tag{3.34}$$

$$CQ_{\text{реч}} = C_1 Q_{\text{подз}} + C_2 Q_{\text{пов}}, \tag{3.35}$$

где $Q_{\text{реч}}$ — годовой объем речного стока; $Q_{\text{подз}}$ — годовой объем подземного стока; $Q_{\text{пов}}$ — годовой объем поверхностного стока; $C$ — концентрация какого-либо компонента, например хлора, в речной воде в период наблюдений; $C_1$ — концентрация того же компонента в подземных водах в тот же период; $C_2$ — концентрация того же компонента в поверхностных водах в тот же период.

Из уравнений (3.34) и (3.35) получим:

$$Q_{\text{подз}} = Q_{\text{реч}} \frac{C - C_2}{C_1 - C_2}. \tag{3.36}$$

Согласно формуле (3.36) при $C = C_1$ $Q_{\text{подз}} = Q_{\text{реч}}$; при $C = C_2$ $Q_{\text{подз}} = 0$. В качестве $C$, $C_1$, $C_2$ может приниматься и температура воды.

Аналогичным образом можно оценить разгрузку подземных вод в реку между двумя створами в тех случаях, когда разница между расходами $Q_1$ (створ 1) и $Q_2$ (створ 2) лежит в пределах точности измерений, а подземные и поверхностные воды заметно различаются по концентрации каких-либо компонентов, сухому остатку или температуре. Тогда

$$\Delta Q = Q_2 - Q_1 = Q_1 \frac{C_2 - C_1}{C_{\text{подз}} - C_2}, \qquad (3.37)$$

где $C_1$, $C_2$, $C_{\text{подз}}$ — соответствующие значения концентраций или температур в створах 1, 2 и в подземных водах.

По формуле (3.37) может быть оценено и подземное питание рек между двумя створами методом искусственных индикаторов, запускаемых в верхнем створе.

Определение части динамических ресурсов подземных вод гидрометрическими методами позволяет получать надежные среднемноголетние характеристики подземного питания рек зоны интенсивного водообмена. Это достигается использованием уже имеющихся гидрометрических данных по стоку рек за многолетний период наблюдений без производства специальных дорогостоящих разведочных и опытных гидрогеологических работ. В этом важное преимущество указанных методов. В областях с хорошо развитой речной сетью при наличии многолетних данных о расходах рек гидрометрические методы следует рассматривать как основные методы оценки динамических ресурсов подземных вод в тех случаях, когда значительная часть разгрузки подземных вод осуществляется в речную сеть.

В то же время необходимо учитывать, что в расходах рек отражается подземный сток из всех дренируемых водоносных горизонтов и комплексов (безнапорных и напорных) со стороны обоих берегов, хотя по гидрогеологическим условиям правобережная и левобережная части реки нередко существенно отличаются друг от друга. Поэтому для определения динамических ресурсов каждого из оцениваемых горизонтов следует охарактеризовать долю подземного стока каждого из них в подземном питании рек. Для этого необходимо тщательно проанализировать условия их распространения и распределения мощности, особенности литологии и фильтрационных параметров.

Следует также иметь в виду, что, как уже неоднократно указывалось, в расходах рек, замеренных на гидрометрических постах, отражается не весь сток подземных вод, равновеликий их питанию. По мере движения к реке подземные воды частично расходуется на испарение, перетекание в нижележащие водоносные горизонты, не связанные с данной речной системой. Если река вскрывает водоносный горизонт не полностью, то часть подземных вод стекает с изучаемой территории по водоносным горизонтам или подрусловым потоком.

В ряде речных бассейнов применение рассматриваемых методов затруднено или вообще невозможно. К ним относятся бассейны, где отсутствуют достоверные гидрометрические данные, значительно развиты искусственное орошение и регулирование рек, искажающие естественные условия формирования речного стока, имеет место

существенное несовпадение поверхностного и подземного водосборов и т. д. На зарегулированных реках для расчленения гидрографов следует использовать данные наблюдений за расходами рек до начала регулирования стока.

Метод, основанный на изучении родникового стока. Если подземный поток полностью или частично разгружается на поверхности земли в виде родников (источников), его расход можно подсчитать непосредственным изучением дебитов родников:

$$Q_{\text{р}} = \sum_{i=1}^{n} q_i, \tag{3.38}$$

где $q_i$ — дебиты отдельных родников; $n$ — количество родников ($i = 1, 2, \ldots, n$).

Применять этот метод можно в тех речных долинах, где водоупорное ложе подземного потока располагается выше наиболее высокого уровня воды в реке, а также в горных районах, где потоки подземных вод практически полностью выходят на поверхность в виде сосредоточенных родников. Почти полный выход потока подземных вод имеет место в некоторых конусах выноса. Для повышения надежности результатов оценки динамических ресурсов режим родников необходимо изучать в течение нескольких лет, обрабатывая затем результаты наблюдений с применением методов математической статистики.

*Особенности применения гидрометрических методов в условиях многолетней мерзлоты.* Специфика физико-географических условий и явлений в районах распространения многолетнемерзлых пород обусловливает особенности определения динамических ресурсов подземных вод. Наиболее целесообразно здесь расчет величин этих ресурсов проводить по меженным расходам рек в зимний период, когда поверхностный сток, а также сток вод деятельного слоя, не представляющий интереса для водоснабжения, отсутствуют. Однако необходимо иметь в виду, что в районах распространения многолетней мерзлоты зимой наблюдается уменьшение подземного стока за счет потерь на образование льда на реках и на формирование наледей.

Поэтому в таких случаях при оценке динамических ресурсов подземных вод к величине меженного расхода рек следует добавлять расход воды на формирование ледяного покрова на реках и наледей водосбора. Для определения этого расхода объем льда $V_{\text{л}}$ на реке и наледей водосбора умножают на коэффициент $\chi$, учитывающий объемное расширение воды при замерзании, и делят на время формирования льда $\Delta t$. Тогда для некоторой площади бассейна реки полная величина подземного стока $Q_{\text{р}}$ будет равна

$$Q_{\text{р}} = Q'_{\text{р}} + \frac{\chi V_{\text{л}}}{\Delta t}, \tag{3.39}$$

где $Q'_{\text{р}}$ — средний меженный или минимальный расход реки.

Рассмотренные в настоящем разделе гидрометрические методы, использование которых направлено на оценку подземного питания рек и поглощения поверхностного стока, достаточно широко применя-

ются в практике гидрогеологических исследований. Их основным достоинством является возможность использования материалов непосредственных измерений расходов поверхностных водотоков. В то же время отметим, что оценка подземного питания реки или поглощение поверхностного стока по замерам в двух створах может дать достаточно надежные результаты, если искомая величина существенно превосходит возможную ошибку определения расхода поверхностных вод.

Использование методов расчленения гидрографа (гидрограммы) возможно только на незарегулированных реках и, как уже указывалось, для небольших бассейнов.

Возможность использования гидрохимического или температурного метода связана с наличием достаточно контрастных изменений изучаемых величин в подземных и поверхностных водах.

Гидрометрический метод изучения родникового стока дает достаточно надежные результаты при концентрированных выходах родников и значительно менее достоверные данные при площадном высачивании.

При оценке возможностей использования гидрометрических методов для определения динамических ресурсов подземных вод следует помнить, что этими методами устанавливается только часть динамических ресурсов. Удельный вес этой части в общей величине разгрузки и определяет целесообразность использования этих методов и достоверность количественной оценки динамических ресурсов подземных вод.

### 3.5. МЕТОДЫ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ АНАЛОГОВ

Приведенная в предыдущих разделах характеристика различных методов оценки динамических ресурсов подземных вод показывает, что ни один из имеющихся методов в большинстве случаев не может претендовать на высокую степень достоверности определения искомой величины. Даже наиболее надежные гидрометрические методы в тех случаях, когда точность замеров позволяет получить достоверные результаты, используются только для оценки части динамических ресурсов. В связи с этим исключительное значение приобретает использование метода гидрогеологических аналогов, особенно, когда в роли такого аналога выступает эксплуатируемое месторождение подземных вод.

Применение этих методов для решения гидрогеологических задач основано на экстраполяции тех или иных характеристик водоносных горизонтов, факторов формирования подземных вод с более изученных территорий на менее изученные при наличии данных, позволяющих судить о сходстве рассматриваемых площадей в отношении переносимой характеристики.

Метод аналогов при оценке динамических ресурсов подземных вод может быть использован в следующих основных направлениях:

1. Качественное доказательство возможности того или иного процесса формирования динамических ресурсов подземных вод (напри-

мер, доказательство питания или разгрузки подземных вод за счет перетекания).

2. Принятие по аналогии некоторых параметров водоносных горизонтов, которые необходимы для расчетов динамических ресурсов подземных вод (например, коэффициента фильтрации для расчета расхода потока, водоотдачи для расчета инфильтрации по данным режимных наблюдений).

3. Определение отдельных составляющих формирования динамических ресурсов (например, испарения, инфильтрации, перетекания).

4. Оценка динамических ресурсов по комплексному параметру, отражающему в совокупности условия их формирования.

В качестве такого комплексного параметра может быть использован площадный или линейный модули динамических ресурсов, подземного стока, коэффициент подземного стока, коэффициент просачивания или инфильтрации и т. п.

Из изложенного видно, что при использовании метода аналогии в первых трех направлениях на вновь оцениваемые территории переносятся только отдельные факторы (показатели), которые нельзя было достаточно надежно определить в процессе разведочных работ, режимных наблюдений или определение которых экономически нецелесообразно. Остальные исходные данные, необходимые для оценки динамических ресурсов, имеются. В таких случаях применяется *частичная* аналогия.

Оценка динамических ресурсов в четвертом направлении основана на применении *полной* аналогии. В этом случае для расчетов по изучаемой территории используется величина соответствующего модуля, в которую могут быть внесены коррективы с учетом специфики конкретных гидрогеологических условий (например, при несоответствии коэффициентов фильтрации или мощности основного водоносного горизонта на оцениваемой площади (участке) и участке-аналоге).

В. М. Шестопалов (1981) предложил для определения модуля динамических ресурсов подземных вод использовать опыт эксплуатации действующих водозаборов. Это возможно в тех случаях, когда при эксплуатации формируется стационарная воронка депрессии, границы которой могут быть достаточно надежно оконтурены, и когда имеются доказательства, что эксплуатационные запасы подземных вод формируются за счет динамических ресурсов. В таких условиях, которым отвечают обычно небольшие ограниченные структуры, модуль эксплуатационных ресурсов практически равен модулю динамических ресурсов. Определив по данным эксплуатации модуль динамических ресурсов, его можно использовать для оценки динамических ресурсов подземных вод других структур, находящихся в аналогичных условиях.

Метод аналогии получил дальнейшее развитие в работах В. М. Шестопалова (1981) на основе использования аппарата теории подобия и был назван им методом натурального моделирования.

### 3.6. ПРИНЦИПЫ РЕГИОНАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Под региональной оценкой динамических ресурсов подземных вод понимают определение их удельной и суммарной величины на значительных территориях, например, в пределах бассейнов грунтовых вод или артезианских вод, других гидрогеологических структур, административных областей, краев или любых крупных регионов.

Для региональной оценки динамических ресурсов гидродинамики целесообразно применять такие методы, которые, с одной стороны, не требуют проведения специальных дорогостоящих разведочных и опытных работ, с другой — позволяют получить результаты с достаточной для практики точностью.

Выбор метода региональной оценки определяется прежде всего особенностями природных условий того или иного района, целью и масштабом исследований, а также возможностями самого метода. Для грунтовых вод часто целесообразно применение метода генетического расчленения гидрографов рек и методов, основанных на изучении режима подземных вод; для артезианских бассейнов платформ — методов расчета расхода подземного потока по формулам гидродинамики (в том числе и методов моделирования); для областей инфильтрационного питания и разгрузки артезианских водоносных горизонтов — метода среднемноголетнего водного баланса. В карстовых районах успешно могут быть применены гидрометрические методы, в том числе и метод, основанный на изучении родникового стока. Величина части динамических ресурсов подземных вод аллювиальных отложений речных долин, соответствующая подземному питанию рек, может быть определена по меженному стоку реки. При наличии необходимых исходных данных следует стремиться к применению нескольких методов, что значительно повышает достоверность расчетов.

Региональная оценка динамических ресурсов подземных вод обычно выполняется применительно к балансовому району того или иного порядка. В качестве балансовых районов первого порядка могут быть приняты отдельные гидрогеологические регионы: артезианские бассейны, горно-складчатые массивы, щиты. В качестве балансовых районов второго порядка могут быть выделены площади распространения того или иного водоносного горизонта или комплекса с учетом особенностей их питания и разгрузки. Балансовыми районами более низких порядков принимаются, например, речные бассейны, участки развития подземных вод разных видов (карстовые, аллювиальные воды и т. д.).

Результаты региональной оценки динамических ресурсов подземных вод отображаются на специальных картах. С целью характеристики динамических ресурсов могут составляться следующие карты: 1) среднемноголетних модулей подземного стока, л/с·км$^2$; 2) среднемноголетнего слоя подземного стока, мм/год; 3) среднемноголетнего питания артезианских вод, мм/год; 4) среднегодовых коэффициентов подземного стока; 5) подземного стока, % от общего речного стока; 6) среднемноголетних минимальных модулей грунтового стока,

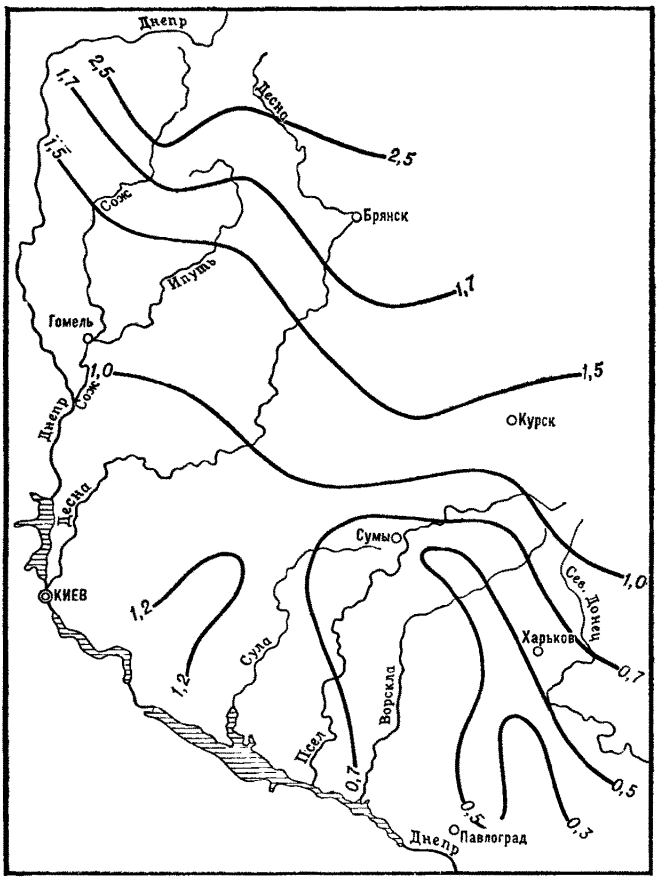



Рис. 16. Схематическая карта среднегодовых модулей подземного стока в реки, в л/с·км$^2$ (по Б. И. Куделину, 1960)

рассчитанных по минимальным расходам рек в зимнюю или летнюю межень, л/с·км$^2$; 7) суммарных динамических ресурсов подземных вод, м$^3$/сут, л/с.

На картах отдельные характеристики динамических ресурсов подземных вод показывают либо в виде изолиний (рис. 16), либо в виде площадей с условно-постоянными (средними) величинами отображаемых характеристик (рис. 17). Карты изолиний строятся интерполяцией данных по отдельным гидрометрическим постам и другим опорным пунктам наблюдений.

На основании этого комплекса карт можно определять величины подземного стока при составлении общего водного баланса территории, оценивать восполняемость подземных вод при региональной оценке эксплуатационных запасов, изучать закономерности формирования динамических ресурсов подземных вод в зависимости от тех или иных

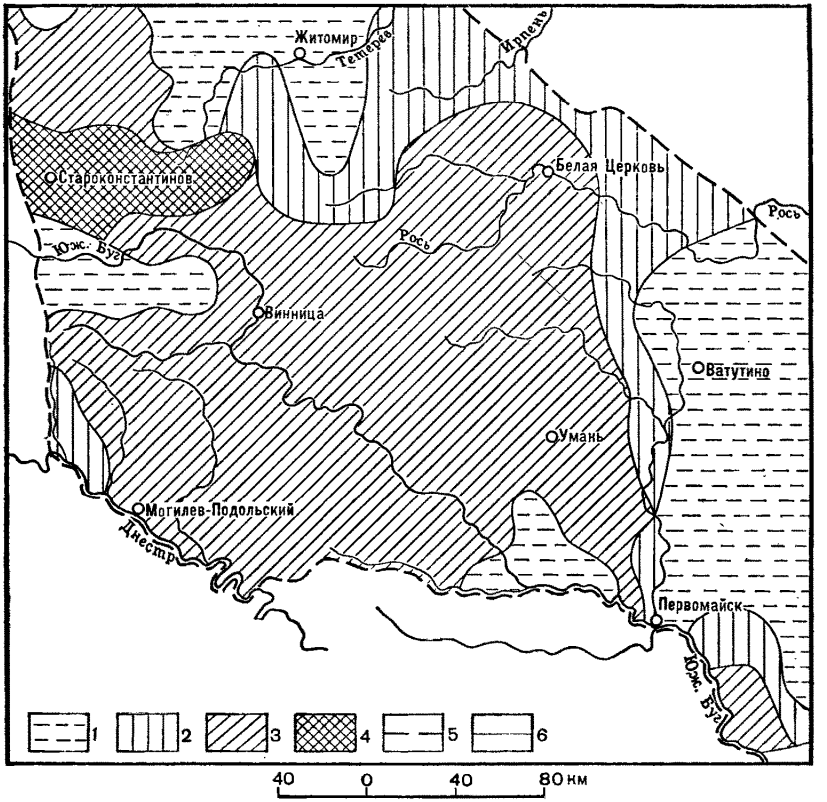



Рис. 17. Схематическая карта динамических ресурсов подземных вод центральной части Украинского щита (по Н. И. Дробноходу, 1988):

Площади с различными модулями динамических ресурсов, в л/с · км²: *1* — 0,1—0,2; *2* — 0,2—0,3; *3* — 0.3—0,4; *4* — 0.4—1,0. Границы: *5* — Украинского щита; *6* — площадей с различными модулями динамических ресурсов

факторов, определять динамические ресурсы подземных вод (среднегодовые, минимальные и другие) для заданного района и решать другие научные и практические задачи.

Масштаб карт естественных динамических ресурсов подземных вод выбирается в зависимости от целевого назначения карт и густоты гидрометрических и других пунктов наблюдений за стоком. От детальности построенных карт, абсолютных величин подземного стока, шага изолиний зависит точность определения подземного стока.

Пользуясь картой среднемноголетнего слоя подземного стока, расход подземных вод для любой площади водосбора рассчитывают по формуле

$$Q_{\text{р}} = \frac{Y_{\text{п}} F \cdot 10^6}{365 \cdot 10^3} = 2{,}74 h_{\text{ст}} F, \qquad (3.40)$$

где $Q_р$ — расход подземных вод с площади $F$, м³/сут; $h_{ст}$ — слой подземного стока, мм/год; $F$ — площадь водосбора подземных вод, км².

Расход подземных вод по карте модулей подземного стока вычисляется по формуле

$$Q_р = \frac{M_п F \cdot 86400}{1000} = 86{,}4\ MF, \tag{3.41}$$

где $Q_р$ — расход подземных вод, м³/сут, с площади $F$, км²; $M$ — модуль подземного стока, л/с · км².

Зная величину осадков в том или ином районе, величину подземного стока можно определить также пользуясь картой средних годовых коэффициентов подземного стока:

$$Q_р = \frac{k_п x F \cdot 10^6}{365 \cdot 10^6} = 2{,}74 k_п x F, \tag{3.42}$$

где $Q_р$ — расход подземных вод, м³/сут, с площади $F$, км²; $k_п$ — коэффициент подземного стока, доли единицы; $x$ — осадки, мм/год.

Величины расхода подземных вод, рассчитанные по формулам (3.40) — (3.42), характеризуют сток всех водоносных горизонтов зоны интенсивного водообмена (зоны дренирования). Чтобы оценить сток каждого горизонта (комплекса) отдельно, необходимо иметь дополнительную информацию об этих горизонтах: мощность горизонта, гидравлический уклон, фильтрационные свойства и т. д. Тогда модуль стока $i$-го горизонта $M_i$ можно рассчитать по формуле

$$M_i = M \frac{k_i m_i J_i}{\sum_{i=1}^{n} k_i m_i J_i}, \tag{3.43}$$

где $k_i$, $m_i$, $J_i$ — коэффициент фильтрации, мощность и гидравлический уклон каждого из водоносных горизонтов интенсивного водообмена.

**Контрольные вопросы.** 1. В каких единицах выражаются динамические ресурсы подземных вод и как они сопоставляются между собой? 2. Какие существуют основные методы оценки динамических ресурсов подземных вод? В чем заключаются их особенности? 3. Как зависит величина инфильтрационного питания грунтовых вод от глубины залегания их уровня? 4. Какие ограничения должны учитываться при определении величины инфильтрационного питания по наблюдениям за режимом уровня подземных вод в одиночной скважине? 5. Что такое коэффициент просачивания и как он используется при расчетах динамических ресурсов подземных вод? 6. Чем отличается оценка питания подземных вод методом И. С. Пашковского от оценок другими методами? 7. В чем заключаются балансовые методы оценки динамических ресурсов подземных вод? 8. Может ли быть определена точная величина динамических ресурсов подземных вод гидрометрическими методами и в каких условиях? 9. На каких принципах основывается выделение подземного стока на гидрографе реки? 10. Как могут отображаться различные характеристики динамических ресурсов подземных вод на картах?

# ГЛАВА 4. СОДЕРЖАНИЕ ОЦЕНКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

## 4.1. ЗАДАЧИ ОЦЕНКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Оценка эксплуатационных запасов подземных вод (ЭЗПВ) представляет собой комплекс гидрогеологических прогнозов, выполняемых для обоснования возможности эксплуатации подземных вод водозаборными сооружениями применительно к определенному целевому назначению их использования в народном хозяйстве.

Оценка ЭЗПВ может выполняться с целью:

1) получения исходных данных для проектирования и строительства новых, а также расширения действующих водозаборных сооружений и реализации других мероприятий, включающих в себя защиту подземных вод от истощения путем их искусственного подпитывания, загрязнения путем организации зон санитарной охраны, исключение или ограничение негативных влияний эксплуатации на окружающую среду, в том числе регулирование поверхностного стока рек, санитарное благоустройство территории и т. п.;

2) обоснования целесообразности использования в народном хозяйстве подземных вод, выявленных в процессе поисков и (или) предварительно разведанных месторождений, а также планирования и проектирования более детальных стадий поисково-разведочных работ на этих месторождениях;

3) оценки перспектив использования подземных вод в пределах отдельных крупных гидрогеологических структур и регионов или административно-территориальных единиц для составления комплексных схем использования и охраны водных ресурсов, региональных схем использования подземных вод, возможностей их территориального перераспределения, а также планомерного проведения поисково-разведочных работ на подземные воды.

В отличие от оценки ЭЗПВ конкретных месторождений, в последнем случае выполняется региональная оценка прогнозных эксплуатационных ресурсов подземных вод.

Как видно из задач и целевого назначения оценки ЭЗПВ, она обычно выполняется на одних и тех же месторождениях по нескольку раз на различных этапах (стадиях) их изученности. По мере повышения детальности изученности месторождения соответственно повышается детальность гидрогеологических прогнозов, связанных с оценкой ЭЗПВ, включая детализацию технико-экономических аспектов использования и отбора подземных вод.

Из приведенной в гл. 1 формулировки понятия «эксплуатационные запасы подземных вод» следует, что их оценка заключается в определении возможной производительности водозабора при заданном понижении уровня воды в каптажных сооружениях или прогнозе понижения уровней в них в пределах оцениваемой площади при заданной производительности водозабора. При этом должна быть доказана возмож-

ность эксплуатации подземных вод обоснованными в геолого-экономическом отношении водозаборными сооружениями при расчетной величине водоотбора в течение определенного срока работы водозаборных сооружений при условии, что качество подземных вод удовлетворяет заданному назначению в течение всего этого периода, а прогнозируемые изменения различных компонентов окружающей среды не выходят за пределы установленных ограничений.

Состав и содержание гидрогеологических прогнозов, выполняемых при оценке ЭЗПВ, определяются двойственной природой подземных вод: как подвижного полезного ископаемого и как части общих водных ресурсов суши.

Поэтому при оценке ЭЗПВ должны быть определены не только возможный расход водозаборных сооружений и прогнозируемые понижения уровня в эксплуатационных скважинах, но также понижения уровня в зоне влияния водозаборного сооружения как в эксплуатируемом водоносном горизонте, так и во взаимодействующих с ним смежных горизонтах; нужно доказать, что качество подземных вод в течение расчетного периода эксплуатации не выйдет за пределы установленных требований. Поскольку подземные воды тесно связаны с окружающей средой, должны быть выполнены также прогнозные оценки возможных изменений гидрогеологических условий под влиянием эксплуатации, которые могут оказать влияние на различные компоненты окружающей среды (развитие карстово-суффозионных процессов, угнетение растительности, изменение поверхностного стока рек, дебитов родников, проседание земной поверхности и т. п.).

Расчеты производительности водозаборных сооружений в зависимости от используемого метода расчета, особенностей гидрогеологических условий оцениваемого участка и степени их упрощения в расчетах не всегда учитывают балансовую структуру ЭЗПВ, а достоверность положенных в основу гидрогеологических прогнозов исходных данных и самих прогнозов может быть проверена только по опыту эксплуатации. Поэтому во многих случаях возникает необходимость оценки обеспеченности ЭЗПВ источниками их формирования независимыми методами. При оценке ЭЗПВ питьевого качества самостоятельной задачей является определение границ зон санитарной охраны водозаборных сооружений, знание которых необходимо для установления возможности их организации. Это связано с тем, что при отсутствии создания зон санитарной охраны эксплуатация подземных вод питьевого назначения запрещена.

Как показано в гл. 1, понятия ЭЗПВ и МПВ являются геолого-экономическими. Поэтому в состав оценки ЭЗПВ входит также обоснование наиболее рациональных в технико-экономическом отношении водозаборных сооружений, а в случае наличия альтернативных источников водоснабжения (главным образом при решении вопросов технического водоснабжения и орошения земель) — и технико-экономическое обоснование целесообразности использования подземных вод.

Детальность и достоверность гидрогеологических прогнозов, выполняемых при оценке ЭЗПВ, определяются характером перечисленных

выше решаемых задач и соответствующей им стадией поисково-разведочных работ. Достоверность выполненных прогнозов находит свое отражение в категориях подсчитанных запасов, определяющих их возможное использование в народном хозяйстве. Требования к запасам различных категорий рассмотрены в гл. 14.

На ранних стадиях поисково-разведочных работ оценка запасов может проводиться применительно к условным или обобщенным схемам водозаборных сооружений, на детальных — к конкретным. Соответственно меняются требования к уровню технико-экономических обоснований.

Естественно, при региональных оценках технико-экономические аспекты проблемы рассматриваются лишь в самых общих чертах, а последствия влияния эксплуатации на окружающую среду оцениваются прежде всего с точки зрения изменения поверхносного стока в случае участия поверхностных водных ресурсов в формировании ЭЗПВ.

Поэтому региональная оценка эксплуатационных ресурсов подземных вод существенно отличается по своему составу и содержанию от оценки эксплуатационных запасов разведанных месторождений.

### 4.2. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ И ЭЛЕМЕНТЫ ОЦЕНКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Оценка эксплуатационных запасов подземных вод включает комплекс вопросов, связанных с использованием месторождений в народном хозяйстве, в состав которых входят:

1) оценка обеспеченности ЭЗПВ различными балансовыми составляющими (источниками формирования);

2) расчет производительности водозаборных сооружений и соответствующих понижений уровня подземных вод;

3) расчет взаимодействия с водозаборными сооружениями на других участках в пределах области влияния оцениваемого;

4) прогноз возможных при эксплуатации изменений качества подземных вод;

5) определение границ зон санитарной охраны (при обосновании источников хозяйственно-питьевого водоснабжения);

6) оценка изменений геолого-гидрогеологических условий, определяющих возможное влияние эксплуатации подземных вод на окружающую среду, в том числе оценка изменений поверхностного стока;

7) технико-экономическое обоснование использования подземных вод и рациональных схем водозаборных сооружений.

В зависимости от задач и целевого назначения выполняемых расчетов, а также особенностей планируемого использования подземных вод, гидрохимической и санитарной обстановки различные вопросы из приведенного перечня могут решаться с разной степенью детальности и достоверности, а отдельные вопросы могут исключаться совсем.

Ключевым элементом оценки ЭЗПВ являются расчеты производительности водозабора. Расчеты всех остальных элементов оценки

определяются по существу расчетами производительности водозаборов и непосредственно с ними связаны.

В связи с тем, что в большинстве случаев потребителю должен быть обеспечен определенный расход воды, на практике этот расчет чаще всего заключается в определении расчетной глубины динамических уровней и соответствующих им величин понижений на конец расчетного периода эксплуатации при заданном расходе водозабора и сопоставлении прогнозной величины понижения с допустимой. Величина допустимого понижения уровня в водозаборных сооружениях определяется гидрогеологическими и технико-экономическими факторами. Теоретически предельная величина понижения может быть принята равной величине напора ($h_e$ или $H_e$) над подошвой водоносного горизонта. Однако принимаемые величины допустимого понижения всегда меньше своего предельного значения. Это связано с тем, что при эксплуатации в скважине должен быть сохранен столб воды ($h_p$), обеспечивающий нормальную работу насосного оборудования, а длина затопленной части фильтра должна обеспечивать поступление в скважину из пласта проектного расхода.

Кроме того, при оценке ЭЗПВ рекомендуется оставлять некоторый слой воды в скважине как запас, учитывающий неточность прогнозов, связанную с приближенностью применяемых расчетных методов, а также с невозможностью учета в расчетах всей сложности гидрогеологической обстановки. На практике величина допустимого понижения обычно принимается равной 0,5 — 0,7 мощности эксплуатируемого водоносного горизонта для безнапорных вод и величине напора плюс 0,5 — 0,7 мощности — для напорных. В то же время в безнапорных горизонтах большой мощности величина допустимого понижения может превышать указанные пределы, если будут получены доказательства, что остаточный столб воды обеспечивает нормальную работу скважины. Наоборот, для маломощных водоносных горизонтов допустимое понижение может быть меньше половины мощности. Для выбора величины допустимого понижения в безнапорных горизонтах (а также в напорных горизонтах, если предусматривается осушение пласта) должны быть установлены закономерности изменения фильтрационных свойств в вертикальном разрезе.

Для глубокозалегающих напорных водоносных пластов глубина динамического уровня не должна превышать максимальной величины возможного подъема воды серийно выпускаемым насосным оборудованием. Эта величина определяется технико-экономическими расчетами и может составлять 200—250 м и более. В то же время экономические или экологические соображения в некоторых случаях могут ограничить допустимое понижение необходимостью работы скважин в режиме самоизлива.

Допустимое понижение уровня может быть ограничено также особенностями изменений условий формирования эксплуатационных запасов (например, глубиной отрыва уровня от русла реки или подошвы питающего водоносного горизонта либо величиной абсолютных отметок уровней, исключающий возможность подтягивания некондиционных вод, и т. п.).

Во всех случаях выбор допустимого понижения уровня должен производиться с учетом возможных изменений общих ландшафтных условий (осушение вышележащих горизонтов, приводящее к гибели растительности, высыхание озер и т. д.) и необходимости охраны окружающей среды.

Эксплуатационные запасы могут считаться обеспеченными, если положение расчетного динамического уровня $h_р$ или расчетное понижение уровня $S_р$ не выходят за пределы максимально допустимого понижения $S_{доп}$, т. е. в этом случае должно выдерживаться условие

$$h_е - h_р = S_р \leqslant S_{доп}, \text{ или } H_е - h_р = S_р \leqslant S_{доп}. \qquad (4.1)$$

Если расчетное понижение уровня воды в скважинах больше допустимого, то это значит, что либо суммарный дебит водозабора подземных вод необеспечен источниками формирования запасов, либо фильтрационные свойства пласта недостаточны для получения расчетного дебита и расчеты следует или повторить, или изменить схему водозабора, или уменьшить проектный расход возозаборного сооружения.

При $S_р < S_{доп}$ расчетный дебит является обеспеченным. Более того, это указывает либо на возможность увеличения дебита водозабора в рассматриваемых условиях, либо на то, что принятое в расчет исходное количество воды можно получить при помощи меньшего числа скважин.

Как уже указывалось, оценка ЭЗПВ проводится либо на неограниченный срок, когда гидрогеологические условия определяют стабильный режим эксплуатации, либо на заранее установленный период, если эксплуатация будет проходить при неустановившемся режиме. В последнем случае расчетный срок определяется проектной организацией. Если такой срок проектной организацией не устанавливается, то расчетное время работы водозабора принимается обычно равным $10^4$ сут ($\approx$ 27,4 года). Этот срок превышает амортизационный период работы водозаборных сооружений и является достаточным либо для проведения переоценки запасов по данным многолетней эксплуатации, либо для изыскания других дополнительных источников водоснабжения рассматриваемого объекта.

Следует отметить, что оценка ЭЗПВ на неограниченный срок эксплуатации, несомненно, носит условный характер, так как в связи с освоением территории в большинстве случаев в процессе эксплуатации происходят такие изменения водохозяйственной или (и) природной обстановки, которые невозможно было предусмотреть в процессе оценки запасов подземных вод. В связи с этим утверждение эксплуатационных запасов во всех случаях целесообразно проводить на ограниченный расчетный срок эксплуатации.

Важной особенностью эксплуатационных запасов подземных вод является то обстоятельство, что они должны оцениваться применительно к заданному режиму водозабора. Последний может характеризоваться как постоянным расходом в течение всего расчетного срока эксплуатации, так и изменением этого расхода по сезонам года (главным образом при планировании их использования для орошения)

или в многолетнем разрезе (при изменении потребности в воде). В связи с этим оценка эксплуатационных запасов подземных вод должна проводиться применительно к заданному расчетному графику водоотбора. Однако в тех случаях, когда водоотбор во времени изменяется, остается неясным вопрос, какая величина расхода водозабора должна утверждаться в качестве эксплуатационных запасов подземных вод. Неясно также, какой принимать расчетный срок эксплуатации, когда в пределах одного и того же месторождения предусматривается удовлетворение как первоочередной, так и перспективной потребностей.

В настоящее время при оценке ЭЗПВ для орошения, когда наблюдается изменение расхода водозабора внутри года, к утверждению представляются эксплуатационные запасы, соответствующие расходу водозаборного сооружения при непрерывном режиме, т. е. его ежегодному расходу. Очевидно, этот же принцип следует перенести на все случаи неравномерного отбора подземных вод, в том числе и на оценку эксплуатационных запасов с учетом как первоочередной, так и перспективной потребности. В последнем случае в условиях нестационарной фильтрации оценку эксплуатационных запасов рекомендуется выполнять применительно к ступенчатому графику водоотбора (первая ступень — первоочередная потребность, вторая — перспективная потребность). Расчетный срок эксплуатации в этих условиях нужно определить как сумму продолжительности первой ступени с продолжительностью второй ступени, принимаемой равной 10 тыс. сут (если эта продолжительность не оговорена специально проектной организацией).

Таким образом при изменении расхода водозабора во времени его расчет проводится с учетом реального графика водоотбора, а к утверждению представляется средний за расчетный период дебит водозаборного сооружения.

Оценка ЭЗПВ на отдельных месторождениях выполняется применительно к наиболее рациональной при данных гидрогеологических условиях схеме водозабора, предусматривающей количество, глубину и систему размещения скважин или других каптажных сооружений, предельную глубину динамического уровня и другие факторы, определяющие технико-экономические условия использования подземных вод по заданному назначению. Выбор рациональной схемы водозабора производится по данным технико-экономического сопоставления различных вариантов эксплуатации (гл. 16).

Наиболее распространенным типом водозаборов подземных вод являются водозаборы, состоящие из того или иного количества вертикальных скважин с различной системой их расположения: 1) группы скважин, беспорядочно расположенных по площади; 2) линейные ряды скважин; 3) кольцевые системы скважин; 4) сетки скважин. Кроме скважинных водозаборов в практике водоснабжения используются галереи, лучевые водозаборы, шахтные колодцы и различные каптажи родников.

Оценка ЭЗПВ проводится применительно к существующей природной и водохозяйственной обстановке, поэтому она выполняется

на определенную фиксированную дату. В тех случаях, когда имеются разработанные проекты по ее изменению (строительство каналов и водохранилищ, переброска поверхностного стока, реконструкция оросительной сети и т. д.), оценивается возможное влияние намечаемых мероприятий на работу водозаборного сооружения, в необходимых случаях корректируются результаты расчетов, проводимых без учета проектируемых изменений, а также определяется целесообразность переоценки в последующем запасов подземных вод.

Подсчет ЭЗПВ в условиях их искусственного подпитывания проводится применительно к проектируемой схеме размещения водозаборных сооружений и сооружений для искусственного подпитывания (инфильтрационных бассейнов, нагнетательных скважин и др.) с учетом режима их эксплуатации.

Оценка ЭЗПВ, участвующих в обводнении месторождений твердых полезных ископаемых, проводится применительно с схеме намечаемого водоотбора с учетом положений классификации эксплуатационных запасов подземных вод и требований к комплексному изучению месторождений и подсчету запасов попутных полезных ископаемых и компонентов.

Вопросы оценки ЭЗПВ при использовании их для орошения, а также в условиях искусственного подпитывания и в районах разработки месторождений твердых полезных ископаемых рассмотрены в гл. 11.

Во всех случаях оценки ЭЗПВ при наличии на оцениваемой площади ранее разведанных месторождений и действующих одиночных или групповых водозаборных сооружений должно быть оценено влияние на них проектируемого водозаборного сооружения и даны рекомендации по организации водоснабжения потребителей, использующих существующие водозаборные сооружения, если последние в результате эксплуатации проектируемого водозабора выйдут из строя. Затраты на эти мероприятия должны учитываться при технико-экономическом обосновании эксплуатации подземных вод.

Соответственно должно быть учтено дополнительное расчетное понижение уровня на вновь оцениваемом месторождении (участке) от действующих водозаборных сооружений и неосвоенных к периоду оценки ранее подсчитанных и утвержденных запасов как на эксплуатируемых месторождениях, так и на ранее разведанных, но не введенных в эксплуатацию.

Срезка уровней от влияния действующих водозаборных сооружений и ранее подсчитанных запасов в пределах депрессионной воронки должна быть учтена при сопоставлении расчетного понижения с допустимым. Аналогично учитывается взаимодействие водозаборных сооружений при оценке запасов на нескольких одновременно оцениваемых участках.

При подсчете запасов в пределах площадей, где ранее выполнялись региональные оценки прогнозных ресурсов подземных вод, результаты вновь выполненного подсчета обязательно должны быть увязаны с региональными оценками.

При оценке ЭЗПВ действующих водозаборов должны быть учтены прежде всего возможности сохранения существующего отбора под-

земных вод и его увеличения при условии сохранения существующих схем водозаборных сооружений или даны соответствующие рекомендации по их конструкции.

По данным расчетов производительности водозаборов и соответствующих им прогнозных понижений уровней в области развития депрессии выполняются оценочные расчеты возможных изменений качества воды и границ зон санитарной охраны.

При этих расчетах должны быть учтены границы некондиционных вод по площади и в разрезе, структура фильтрационного потока, соответствующая расчетной производительности оцениваемого водозаборного сооружения в условиях его взаимодействия с другими, качество поверхностных вод, наличие и местоположение имеющихся и потенциальных источников загрязнения и т. п.

Исходя из основных задач и принципов оценки ЭЗПВ прогнозные расчеты рекомендуется выполнять в следующей последовательности:

1. На основании результатов проведенных поисково-разведочных работ устанавливаются основные закономерности геологического строения и гидрогеологических условий оцениваемой площади, особенности водохозяйственной обстановки, проводится схематизация гидрогеологических условий для целей оценки эксплуатационных запасов и выбираются методы этой оценки. При этом для различных элементов оценки запасов (расчет водозабора, прогноз изменения качества воды и т. д.) могут быть использованы различные методы. Общая характеристика этих методов оценки эксплуатационных запасов приводится в следующем параграфе, а основы схематизации гидрогеологических условий — в гл. 5.

2. Проводится оценка обеспеченности эксплуатационных запасов подземных вод. С этой целью выявляются и количественно оцениваются источники формирования запасов, сумма которых представляет собой верхний предел возможного отбора подземных вод. Эта оценка необходима для установления возможности удовлетворения заявленной в воде потребности, масштабов возможного использования подземных вод в пределах разведываемого месторождения и правильного учета в расчетных моделях (схемах) отдельных источников формирования при расчетах водозаборных сооружений.

3. Исходя из требуемой производительности водозабора и возможного дебита скважины определяются общее количество водозаборных скважин, система их расположения и расстояния между ними с учетом геолого-гидрогеологических границ в пределах изучаемой площади. Допустимое понижение уровня и расчетный срок эксплуатации устанавливаются по приведенным выше рекомендациям.

Применительно к выбранной схеме водозабора проводится расчет величины понижения уровня в водозаборных скважинах. При наличии на исследуемой площади действующих водозаборов и месторождений с утвержденными эксплуатационными запасами, а также других оцениваемых участков при расчетах необходимо учитывать их взаимодействие с проектируемым водозаборным сооружением.

В том случае, если расчетное понижение не превосходит допустимого, целесообразно провести дополнительный расчет для определе-

ния максимально возможного дебита при заданном допустимом понижении.

4. В тех случаях, когда на оцениваемой площади имеются подземные воды некондиционного состава, выполняется прогноз времени подтягивания контуров некондиционных вод в плане и разрезе и определяется результирующая концентрация в воде элементов, предельно допустимые концентрации (ПДК) которых лимитируются соответствующими стандартами и нормативами.

Если содержание каких-либо компонентов будет превосходить допустимые нормы, эксплуатационные запасы, подсчитанные без учета возможных изменений качества, должны быть уменьшены до величины, определяющей сохранение качества воды в требуемых кондициях.

5. Проводятся расчеты границ зоны санитарной охраны водозаборных сооружений, соответствующих расчетной величине водоотбора.

6. Оценивается влияние отбора подземных вод на поверхностный сток и на гидрогеологические условия, изменение которых может привести к негативным изменениям отдельных компонентов окружающей среды. В тех случаях, когда установлены ограничения по допустимым уменьшениям поверхностного стока или изменению гидрогеологических условий (например, по снижению уровня воды первого от поверхности водоносного горизонта) и эти ограничения не выдерживаются, производится уменьшение эксплуатационных запасов до величины, обеспечивающей выполнение установленных ограничений.

7. Проводится оценка влияния проектируемого водозаборного сооружения на имеющиеся в пределах депрессионной воронки действующие одиночные и групповые водозаборные сооружения, а при необходимости разрабатываются мероприятия, направленные на компенсацию негативного влияния планируемого водоотбора на эти сооружения.

8. Проводится категоризация подсчитанных эксплуатационных запасов подземных вод в соответствии с требованиями Классификации эксплуатационных запасов и прогнозных ресурсов подземных вод и инструкции по ее применению и оценивается подготовленность месторождения к промышленному основанию.

### 4.3. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТОДОВ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОГНОЗОВ ПРИ ОЦЕНКЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Для выполнения гидрогеологических прогнозов при оценке ЭЗПВ могут применяться следующие методы: гидродинамические, гидравлические, балансовые, гидрогеологических аналогов и экспертных оценок. Выбор метода прогнозирования зависит от сложности геолого-гидрогеологических условий оцениваемого месторождения или района, степени их изученности, целевого назначения расчетов, наличия опыта эксплуатации действующих водозаборных сооружений. При гидро-

геологических прогнозах отдельных элементов оценки ЭЗПВ (перечисленные в § 4.2) могут выполняться как каким-либо одним, так и различными методами, а также с использованием комбинированных методов. Это зависит как от теоретической разработанности методики прогнозирования отдельных элементов оценки запасов, так и от требуемой достоверности и детальности прогнозов, которые для этих элементов могут быть существенно различными.

Гидродинамические методы основаны на решении дифференциальных уравнений фильтрации подземных вод. Для простых гидрогеологических условий решения этих уравнений реализуются в виде аналитических расчетов. В более общем случае (в том числе в сложных условиях) решение дифференциальных уравнений осуществляется методом математического моделирования.

Если аналитические решения осуществляются относительно напоров или понижений уровня в отдельных точках водоносного пласта, то при моделировании решение выполняется относительно изменений уровня в пределах всей моделируемой области фильтрации.

Дифференциальные уравнения гидродинамики учитывают одновременно фильтрационное сопротивление движению подземных вод в пласте и баланс воды в каждом бесконечно малом элементе потока, а при интегрировании уравнений — в потоке в целом в пределах заданных при расчетах его границ. Поэтому дифференциальные уравнения гидродинамики являются одновременно динамическими и балансовыми (Н. Н. Биндеман, 1963), а прогнозные расчеты, выполненные путем решений этих уравнений при заданных начальных и граничных условиях, учитывают и баланс подземных вод. При правильном задании начальных и граничных условий в результатах прогнозирования понижений уровней одновременно учитывается обеспеченность ЭЗПВ балансовыми источниками восполнения.

Отмеченные особенности дифференциальных уравнений фильтрации позволяют в условиях потоков подземных вод не учитывать в подавляющем большинстве случаев расход потока, его изменения при работе водозабора, а также величину инфильтрационного питания в естественных или бытовых условиях. «Автоматически» величина питания водоносных горизонтов учитывается в положении уровней подземных вод, что было теоретически доказано еще в конце XIX в. Н. Е. Жуковским. Благодаря отмеченному достоинству гидродинамические методы позволяют при оценке ЭЗПВ прогнозировать изменение уровней воды в водозаборных скважинах, учитывать различные схемы расположения этих скважин и групповых водозаборных сооружений, их взаимодействие, а также оценивать роль границ горизонта, влияние которых будет проявляться в процессе водоотбора, т. е. широко использовать принцип суперпозиции в расчетах. Этот принцип является сегодня основополагающим по оценке ЭЗПВ аналитическими гидродинамическими методами и в первую очередь при расчетах взаимодействующих водозаборных сооружений и учете плановых границ пластов.

При применении принципа суперпозиции следует иметь в виду, что динамические ресурсы подземных вод, формирующиеся до начала

эксплуатации и разгружающиеся в пределах области развития депрессии, должны быть учтены заданием инверсии разгрузки.

Строго метод суперпозиции применим лишь в напорных потоках подземных вод, но при суммировании не прогнозных понижений, а фильтрационных сопротивлений, в большинстве случаев он применим и в безнапорных потоках. В то же время в потоках подземных вод с большими расходами (при высоких фильтрационных свойствах водоносных пластов и значительных уклонах потока) возникающие погрешности могут стать заметными и даже исказить результаты оценки ЭЗПВ. М. Хантушем (1964) было показано, что в безнапорных потоках на наклонном водоупоре уклон потока должен учитываться в прогнозных расчетах (см. гл. 8).

Оценки прогнозных изменений качества воды и зон санитарной охраны, как и все другие расчеты, связанные с учетом действительной скорости движения воды, должны учитывать реальную структуру фильтрационных потоков.

Вторым основным достоинством гидродинамических методов является то, что они при использовании математического моделирования практически не накладывают ограничений на сложность гидрогеологических условий (неоднородность фильтрационных и емкостных свойств, геометрические очертания и характер границ пластов, количество водоносных горизонтов в многопластовой системе, изменчивость условий питания, разгрузки, переменность водоотбора и т. д.) в пределах оцениваемого объекта.

Рассмотренные достоинства гидродинамических методов приводят (как отмечал Н. Н. Биндеман, 1963, 1970) к чрезмерной переоценке этих методов при подсчете ЭЗПВ, что связано «с подкупающим значением точности применяемого математического аппарата».

Гидродинамические методы имеют и определенные недостатки, ограничивающие их применение для целей оценки ЭЗПВ. Эти недостатки прежде всего связаны с тем, что практическая точность результатов оценки эксплуатационных запасов по формулам гидродинамики зависит от точности определения исходных фильтрационных параметров пластов (коэффициентов фильтрации, водопроводимости, уровне- и пьезопроводности, упругой и свободной водоотдачи и т. д.) и граничных условий. В реальных природных условиях эти характеристики устанавливаются, а затем учитываются в расчетной фильтрационной схеме с большими или меньшими погрешностями, поэтому, естественно, что гидродинамические расчеты дают приближенные в той или иной степени результаты.

Повышение точности расчетов эксплуатационных запасов подземных вод гидродинамическими методами может быть достигнуто путем применения методов математического моделирования. При этом всю сложность условий формирования эксплуатационных запасов в реальной гидрогеологической обстановке можно учесть полнее и детальнее, чем при расчетах по аналитическим формулам. К тому же можно значительно уточнить и достоверность исходной расчетной фильтрационной схемы, что достигается решением обратных задач. Но и в случае использования методов моделирования сохраняется

приближенность расчетов из-за недостаточной изученности граничных условий, фильтрационных и емкостных свойств исследуемых водоносных горизонтов, т. е. из-за приближенной аппроксимации природной обстановки на модели.

Применение моделирования целесообразно при сложных гидрогеологических условиях. В простой гидрогеологической обстановке оценку эксплуатационных запасов с достаточной для практики точностью можно производить по аналитическим формулам.

Гидравлические методы оценки эксплуатационных запасов подземных вод основаны на непосредственном использовании данных откачек из скважин или опыта эксплуатации действующих водозаборных сооружений. При этом в качестве расчетных широко используются эмпирические формулы, выбор которых обосновывается данными опыта. Практический расчет водозабора гидравлическим методом сводится к экстраполяции экспериментальных данных по кривым дебита (графикам зависимости дебита от понижения) или эмпирическим графикам зависимости понижения от времени. Гидравлические методы могут быть использованы и для прогноза изменений качества подземных вод, если в натурных условиях были получены данные о скорости продвижения фронта загрязненных вод и (или) изменении минерализации и содержании отдельных компонентов. Пределы возможной экстраполяции результатов экспериментов всегда должны быть строго ограничены.

Основным достоинством гидравлических методов расчетов водозаборных сооружений является то, что при их использовании не требуется определения расчетных гидрогеологических параметров горизонта, количественного описания начальных и граничных условий. Исходными расчетными характеристиками являются фиксированные дебиты и понижения уровней воды при опытных и опытно-эксплуатационных откачках, которые обобщенно учитывают усредненные фильтрационные свойства горизонта, дополнительное сопротивление движения воды в скважине и прискважинной зоне, а также возможное отклонение от линейного закона фильтрации. Это достоинство гидравлических методов предопределяет целесообразность их широкого использования для подсчета эксплуатационных запасов подземных вод в сложных гидрогеологических условиях, когда возникают большие трудности при определении параметров горизонтов и составлении расчетной фильтрационной схемы (например, в трещиноватых и закарстованных породах).

Гидравлические методы имеют и существенные недостатки. Прежде всего этими методами нельзя оценить обеспеченность ЭЗПВ, так как эмпирические зависимости учитывают баланс подземного потока только при соотношении его различных составляющих, соответствующем опытному водоотбору при достигнутом понижении уровня и других условиях проведения опыта. Обеспеченность эксплуатационных запасов в этом случае подсчитывают, применяя гидравлические методы совместно с гидродинамическими и балансовыми методами.

Недостатком гидравлических методов является и то, что возможности экстраполяции опытных данных по эмпирическим зависимос-

тям ограничены. Это обусловлено тем, что в процессе эксплуатации даже при постоянном водоотборе при росте воронки депрессии граничные условия подземного потока могут существенно измениться по сравнению с условиями при откачке. Поэтому эмпирическая зависимость между дебитом и понижением или понижением и временем при эксплуатации может отличаться от зависимости, установленной в ходе опытных работ.

Гидравлические методы целесообразно использовать для приближенных расчетов в весьма сложных гидрогеологических условиях, где гидродинамические методы практически неприменимы.

Сущность балансовых методов, применяемых для оценки эксплуатационных запасов, заключается в составлении баланса подземных вод в районе работы водозаборных сооружений. При этом принимается во внимание, что эксплуатационный дебит водозаборного сооружения формируется за счет сработки емкостных запасов, перехвата динамических ресурсов и поступления привлекаемых ресурсов из дополнительных источников питания водоносного горизонта, возникающих при образовании воронки депрессии (например, фильтрация воды из поверхностных водоемов и водотоков т. д.).

При помощи балансовых методов нельзя определить понижение уровня в конкретных водозаборных скважинах, а можно лишь оценить среднюю величину понижения уровня подземных вод в балансовом районе или на отдельном балансовом участке на конец расчетного периода эксплуатации водозаборного сооружения. В то же время только балансовые методы позволяют получить характеристику обеспеченности восполнения эксплуатационных запасов, подсчитанных другими методами (например, гидродинамическими или гидравлическими). Все это позволяет во многих случаях рассматривать балансовые методы как независимые, применяя которые можно оценить предел общих эксплуатационных возможностей отбора подземных вод на том или ином участке, месторождении и т. д., а также дать грубую оценку надежности прогнозов другими методами.

Рассмотренные выше гидродинамические, гидравлические и балансовые методы имеют свои преимущества и недостатки. Поэтому для оценки эксплуатационных запасов подземных вод могут использоваться как один из этих методов, так и все они совместно или в различных комбинациях. Выбор методов зависит от конкретных гидрогеологических условий и от степени их изученности.

Так, в тех гидрогеологических условиях, в которых расчетные параметры эксплуатируемого водоносного горизонта, необходимые для использования гидродинамических методов, трудно определить (например, в областях карстовых и трещинных вод), часто применяют комбинирование гидравлического и балансового методов. В этом случае дебит водозаборного сооружения и обеспечение запасов источником формирования рассчитывают отдельно, а затем сравнивают результаты для проверки их баланса как критерия обеспеченности эксплуатационных запасов.

Метод гидрогеологических аналогов основан на перенесении тех или иных характеристик водоносных горизонтов

и других факторов формирования ЭЗПВ с более изученных объектов (аналогов) на менее изученные при наличии данных, позволяющих судить о сходстве двух рассматриваемых объектов между собой в отношении переносимой характеристики: аналогичные граничные условия, условия восполнения, закономерности изменения водопроводимости и т. п. Сходство сопоставляемых объектов по абсолютной величине отдельных факторов формирования запасов при этом не обязательно. Их соотношение может быть учтено коэффициентами или масштабами подобия.

В случае, когда для гидрогеологических прогнозов используются методы теории подобия, ряд исследователей (например, И. С. Усенко, 1985) предлагают в отличие от *методов природных аналогов* выделять отдельно *методы натурного подобия,* рассматривая обе группы методов как две ступени *метода натурного моделирования.* Нам представляется, что название «метод гидрогеологических аналогов» более правильно отражает его сущность, а использование в прогнозных расчетах в той или иной степени различных элементов теории подобия лишь повышает их обеспеченность.

Аналогия может быть полной (интегральной) и частичной. При полной аналогии должна соблюдаться идентичность гидрогеологических условий сравниваемых территорий по комплексу факторов, определяющих величину эксплуатационных запасов подземных вод; при частичной — лишь по отдельным из них. Для расчетов принимают лишь те данные, которые можно перенести с объекта-аналога. Остальные данные, необходимые для подсчета запасов, определяются другими методами. Особенно эффективно использование метода гидрогеологических аналогов, если в качестве объекта-аналога могут быть приняты участки действующих водозаборов, а в качестве показателя аналогии может быть использован модуль эксплуатационных запасов подземных вод.

На дебиты и понижения уровней, изменение качества воды в условиях эксплуатации влияют многие факторы формирования эксплуатационных запасов (питание водоносного горизонта, перетекание из смежных водоносных горизонтов, упругая водоотдача слабопроницаемых глинистых пластов), которые обычно не проявляются в полной мере и их трудно оценить не только при опытах, но и сравнительно длительных опытно-эксплуатационных откачках. Поэтому методом гидрогеологических аналогов, как и гидравлическими методами, влияние различных факторов на режим работы водозабора оценивается интегрально. При использовании элементов теории с учетом критериев и коэффициентов подобия роль каждого фактора может быть оценена отдельно, но тогда должны быть получены необходимые исходные данные для определения этих коэффициентов.

На основании использования метода гидрогеологических аналогов можно решать следующие задачи: 1) проводить оценку (или переоценку) ЭЗПВ на участке действующего водозабора и тем самым определять возможность увеличения или необходимость уменьшения отбора воды; 2) обоснованно выбирать новые, благоприятные участки для разведки подземных вод; 3) получать наиболее достоверные данные

для оценки эксплуатационных запасов подземных вод на вновь разведываемых участках, которые находятся в условиях, аналогичных с эксплуатируемыми или разведанными. При оценке эксплуатационных запасов подземных вод по аналогии для экстраполяции данных, полученных на водозаборе-аналоге, применяются гидродинамические и гидравлические методы.

Метод экспертных оценок. Оценка эксплуатационных запасов подземных вод относится к такого рода прогнозам, при осуществлении которых достоверность информации, необходимой для принятия решения, во многих случаях невелика. Это связано главным образом с невозможностью получения всей необходимой информации в процессе разведочных работ, так как бóльшую часть этой информации по существу невозможно «измерить» и она носит расчетный характер. Для решения таких задач, когда достоверность информации невелика, в науке и технике используется метод экспертных оценок. Экспертные оценки при этом являются вероятностными, основанными на «способности личности давать полезную информацию в условиях неопределенности (С. Д. Бешелев, Ф. Г. Гурвич, 1973). Неизвестная нам количественная характеристика рассматриваемого явления (в нашем случае — возможный дебит водозабора, величина понижения уровня, возможное изменение качества воды, уменьшение поверхностного стока и т. д.) рассматривается в таких условиях как «случайная величина, отражением закона распределения которой является индивидуальная оценка специалиста-эксперта о достоверности или значимости того или иного события» (там же). Если такие оценки получены от группы экспертов, то предполагается, что «истинное» значение искомой величины находится внутри диапазона предложенных значений и что обобщенное мнение группы экспертов является более достоверным, чем мнение одного специалиста.

При использовании метода экспертных оценок необходимо учитывать не только величину оценки, данной тем или иным экспертом, но и субъективные особенности эксперта, дающего эти оценки. В связи с этим при использовании методов экспертных оценок исключительно важную роль играет процедура подбора экспертов и установление их значимости («веса») при решении конкретной заданной задачи. Одним из способов отбора экспертов является составление специальных анкет, в которых формулируются вопросы, позволяющие установить эрудицию и аналитические способности будущих экспертов и в том числе дать возможность для их «самооценки». В других случаях при отборе экспертов учитывается качественная оценка их специалистами данной отрасли.

Существует несколько способов проведения групповых экспертных оценок. Один из них, называемый методом согласования оценок, или индивидуальным методом, заключается в том, что каждый эксперт дает свою оценку, а затем на базе их оценок выводится согласованная обобщенная оценка. Второй способ (групповой) — получение сразу суммарной групповой оценки. И, наконец, третий способ, получивший название метода Дельфы, при использовании которого согласование индивидуальных оценок сочетается с последовательным

ознакомлением каждого эксперта с оценками остальных экспертов. При вычислении средней оценки (при использовании первого метода) каждому эксперту может быть установлен весовой коэффициент, определяемый на основе надежности его предыдущей деятельности как эксперта, его опыта, квалификации и т. д.

Подробно методы экспертных оценок охарактеризованы в работе С. Д. Бешелева и Ф. Г. Гурвича (1973).

**Контрольные вопросы, задания.** 1. Назовите основные задачи оценки эксплуатационных запасов подземных вод. 2. Что входит в состав оценки эксплуатационных запасов подземных вод? 3. Как определяется величина допустимого понижения уровня подземных вод? 4. Влияют ли экологические факторы на величину допустимого понижения уровня подземных вод? 5. Почему при оценке эксплуатационных запасов подземных вод расчетный срок принимают равным 25—27 годам? 6. Как учитывается при оценке эксплуатационных запасов заданный режим водоотбора? 7. В какой последовательности выполняется оценка эксплуатационных запасов подземных вод? 8. Какие методы используются для оценки эксплуатационных запасов подземных вод? 9. В чем заключается принцип суперпозиции и когда он используется при оценке эксплуатационных запасов подземных вод? 10. Охарактеризуйте основные достоинства гидравлических методов оценки эксплуатационных запасов подземных вод. 11. На чем основан метод гидрогеологических аналогов? Что такое полная и частичная аналогия? 12. В каких условиях целесообразно использовать метод экспертных оценок?

# ГЛАВА 5. ПРИНЦИПЫ СХЕМАТИЗАЦИИ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

## 5.1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ СХЕМАТИЗАЦИИ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ И ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛЕЙ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Для реализации оценки ЭЗПВ любым из охарактеризованных выше методов реальные природные условия их формирования должны быть схематизированы путем построения моделей месторождений подземных вод.

Поэтому схематизация физико-географических, геолого-гидрогеологических и антропогенных условий является первым и важнейшим этапом работ по оценке ЭЗПВ. Объективно и обоснованно проведенная схематизация определяет надежность и достоверность выполняемых на ее основе прогнозных расчетов. Обоснованность выполненной схематизации, в свою очередь, зависит главным образом от надежности исходной информационной характеристики основных факторов, определяющих условия формирования ЭЗПВ, и взаимосвязей между ними (§§ 1.3 и 1.4). Эти факторы должны найти свое отражение в *природной пространственно-временной гидрогеологической модели условий формирования эксплуатационных запасов,* являющейся исходной базой геофильтрационной и расчетной схематизации.

Любая схематизация представляет собой упрощение реальных гидрогеологических условий и представление их в виде формализо-

ванных схем. Основной принцип схематизации — **от сложного к простому.** Поэтому самым принципиальным вопросом схематизации является «определение допустимой степени упрощения» (Р. Линслей, 1976). Этот вопрос может быть решен только путем тщательного анализа всей исходной информации, характеризующей условия формирования ЭЗПВ, оценки степени ее детальности и достоверности, а также относительного влияния различных факторов формирования запасов на конечные результаты прогнозов. При этом особое внимание должно быть уделено учету характера взаимосвязей между различными факторами с целью выбора тех из них, которые заметно влияют на конкретное решение и должны быть отражены в геофильтрационной модели и учтены в расчетных моделях (схемах).

Естественно, что в зависимости от целевой задачи прогноза и стадии исследований (прогноз качества подземных вод или величины запасов, региональная или локальная оценка, предварительная или детальная оценка), требований к **детальности и достоверности** прогноза реальная природная модель одного и того же месторождения подземных вод может быть представлена в различной форме и схематизирована затем различным образом.

Основой для построения пространственно-временной природной гидрогеологической модели является полученная в процессе поисково-разведочных работ информации об основных факторах и закономерностях формирования ЭЗПВ. Эта информация в общем случае включает в себя характеристику:

1) геологического строения оцениваемой площади;

2) условий залегания и распространения водоносных горизонтов, слабопроницаемых и водоупорных слоев;

3) местоположения тектонических нарушений и их гидрогеологических особенностей;

4) основных источников формирования эксплуатационных запасов;

5) условий и источников питания и разгрузки подземных вод и их пространственной локализации;

6) основных гидрогеологических параметров водоносных горизонтов и слабопроницаемых пластов и закономерностей их изменения по площади и в разрезе;

7) качества подземных вод;

8) поверхностных водных объектов и условий взаимосвязи подземных и поверхностных вод;

9) строения зоны аэрации и условий инфильтрации атмосферных осадков;

10) антропогенных источников питания и разгрузки подземных вод;

11) санитарного состояния территории и антропогенных источников загрязнения и т. п.

Кроме того, исходная информация должна позволить охарактеризовать изменения во внутригодовом и многолетнем разрезе уровней и расходов подземных вод, условий и величины их питания и разгрузки как за счет естественных (в том числе гидрометеорологических), так

и антропогенных (в том числе под влиянием эксплуатации подземных вод) факторов.

На базе этой информации составляется природная гидрогеологическая модель условий формирования ЭЗПВ, учитывающая реальное строение разреза области фильтрации, ее геометрические очертания, условия на внутренних и внешних границах, закономерности изменения фильтрационных и емкостных параметров водоносных и слабопроницаемых пластов, режим подземных вод и другие особенности геолого-гидрогеологических, физико-географических и антропогенных условий формирования запасов. Эта модель отражает основные особенности и закономерности изменчивости всех *значимых факторов* формирования ЭЗПВ и характер их взаимосвязей между собой.

Значимыми следует считать те факторы, влияние которых существенно отражается на структуре поля напоров и характеристике расходов подземных вод в различных элементах области фильтрации и которые в дальнейшем будут влиять на структуру и режим напоров фильтрационных потоков и их расходные характеристики при эксплуатации.

В зависимости от сложности гидрогеологических условий на природной модели могут не найти количественного отражения отдельные параметры пластов и источники питания подземных вод, а будет дана лишь их качественная характеристика.

Независимо от формы представления информации природная гидрогеологическая модель должна отражать все основные особенности формирования ЭЗПВ. Затем она преобразуется в геофильтрационную (В. А. Мироненко, В. М. Шестаков, 1976), на которой реальная природная гидрогеологическая обстановка формализуется с выделением и количественной характеристикой основных факторов формирования ЭЗПВ (водоносных горизонтов, слабопроницаемых пластов и их границ, источников питания, распределения параметров и т. д.), подлежащих учету при оценке запасов. Геофильтрационная модель преобразуется затем в расчетные математические модели, учитывающие режим фильтрации в различных пластах, необходимость разделения одного и того же пласта на несколько расчетных слоев (например, мощных глинистых пластов), плановую разбивку на блоки области фильтрации и т. д.

Наиболее широкие возможности для учета в расчетной схеме всех особенностей формирования ЭЗПВ имеют математические конечно-разностные модели, реализуемые на АВМ и ЦВМ.

Для реализации различных прогнозных расчетов, входящих в состав оценки ЭЗПВ, обычно должна быть использована система расчетных моделей, которые строятся с учетом целевого назначения прогнозов и возможных способов их реализации. Поэтому расчетная (вычислительная) схематизация может существенно отличаться от геофильтрационной. Причем для прогнозных оценок производительности водозаборных сооружений, качества подземных вод, влияния на окружающую среду, входящих в состав оценки ЭЗПВ, могут использоваться и обычно используются различные расчетные модели.

При анализе природной гидрогеологической модели должна быть

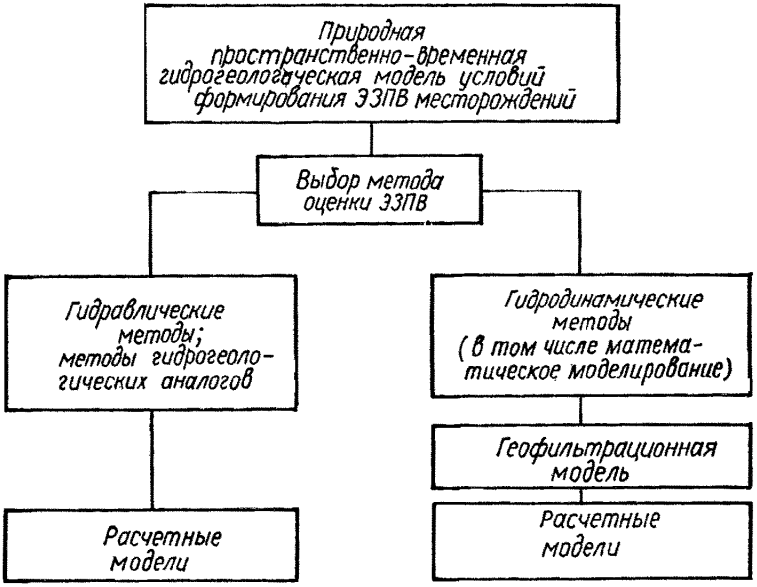



Рис. 18. Общая структура схематизации условий формирования ЭЗПВ оцениваемого месторождения

установлена принципиальная возможность составления геофильтрационной модели (по имеющейся информации) и соответствующих ей расчетных моделей. Такая возможность определяется сложностью природных условий. Сравнительно простые условия проще поддаются геофильтрационной схематизации, сложные — труднее либо не поддаются вообще.

Если есть возможность составить геофильтрационную модель, основными методами оценки эксплуатационных запасов подземных вод являются гидродинамические, в противном случае — гидравлические или метод гидрогеологических аналогов.

Общая структура и последовательность операций по схематизации гидрогеологических условий месторождений подземных вод представлены на рис. 18.

Переход от природной гидрогеологической модели к геофильтрационной и расчетной может быть осуществлен только в тех случаях, когда на основании имеющейся информации могут быть установлены и предварительно количественно оценены источники формирования эксплуатационных запасов подземных вод и закономерности изменения фильтрационных и емкостных свойств водовмещающих и слабопроницаемых отложений. Оценка эксплуатационных запасов подземных вод гидродинамическим методом применительно к расчетной схеме, составленной без соблюдения этих условий, может привести к неверным результатам.

Как указывалось в гл. 1, оценка эксплуатационных запасов прежде всего заключается в прогнозировании изменения гидродинамиче-

ской и гидрохимической структуры потоков подземных вод в разрабатываемом и взаимодействующих с ним водоносных горизонтах в пределах месторождения и области влияния его эксплуатации. Поэтому при геофильтрационной схематизации должны учитываться основные причинно-следственные связи между закономерностями изменчивости основных факторов формирования запасов и особенностями гидродинамическо-гидрохимической бытовой структуры потока. Выявление и раскрытие этих связей является залогом правильности перехода от природной к геофильтрационной модели месторождения, а также того, что при схематизации не будут исключены какие-либо значимые факторы формирования запасов. В некоторых случаях исключение отдельных значимых факторов из расчетных моделей производится целенаправленно в силу недостаточной их изученности, но при этом такое исключение может проводиться только при понимании и, по возможности хотя бы качественной оценки того, как такое упрощение отразится на результатах прогноза. В общем случае такие упрощения направлены на создание определенного запаса надежности в инженерных решениях и принципиально могут допускаться только тогда, когда они не приводят к искажению других элементов оценки запасов при проектировании с «инженерным запасом» одного из них.

Так, при прогнозировании понижения уровня в многопластовой системе взаимосвязанных через разделяющие толщи водоносных пластов кровля эксплуатируемого горизонта часто принимается непроницаемой. В этом случае расчетное понижение уровня окажется завышенным, но одновременно должно быть сделано допущение, что не произойдет снижение уровня грунтовых вод вследствие интенсификации перетекания, что при решении природоохранных задач приведет к принципиально неверным результатам.

Выход из этого положения может заключаться в использовании различной схематизации для раздельного решения каждой из указанных задач. Но в таком случае решения оказываются несбалансированными и не увязанными между собой, а результаты прогнозных оценок для обеих схем слишком ужесточены.

В данной главе рассмотрены принципиальные вопросы природной и геофильтрационной схематизации. При этом следует иметь в виду, что в геофильтрационной модели, в отличие от природной, все схематизируемые факторы формирования запасов и различные элементы природных условий, их определяющие, а также закономерности их пространственно-временных изменений должны найти конкретное **количественное отражение** в виде полей параметров, напоров, условий на внутренних и внешних границах и функций (графиков) зависимости их от времени.

Расчетная (вычислительная) схематизация носит преимущественно технический характер и будет рассмотрена в соответствующих главах, посвященных различным методам прогнозов.

Следует отметить, что до широкого внедрения в практику оценки ЭЗПВ к концу 60-х — началу 70-х годов методов математического моделирования расчетная схематизация при применении гидродинамических аналитических методов расчетов имела исключительно важное

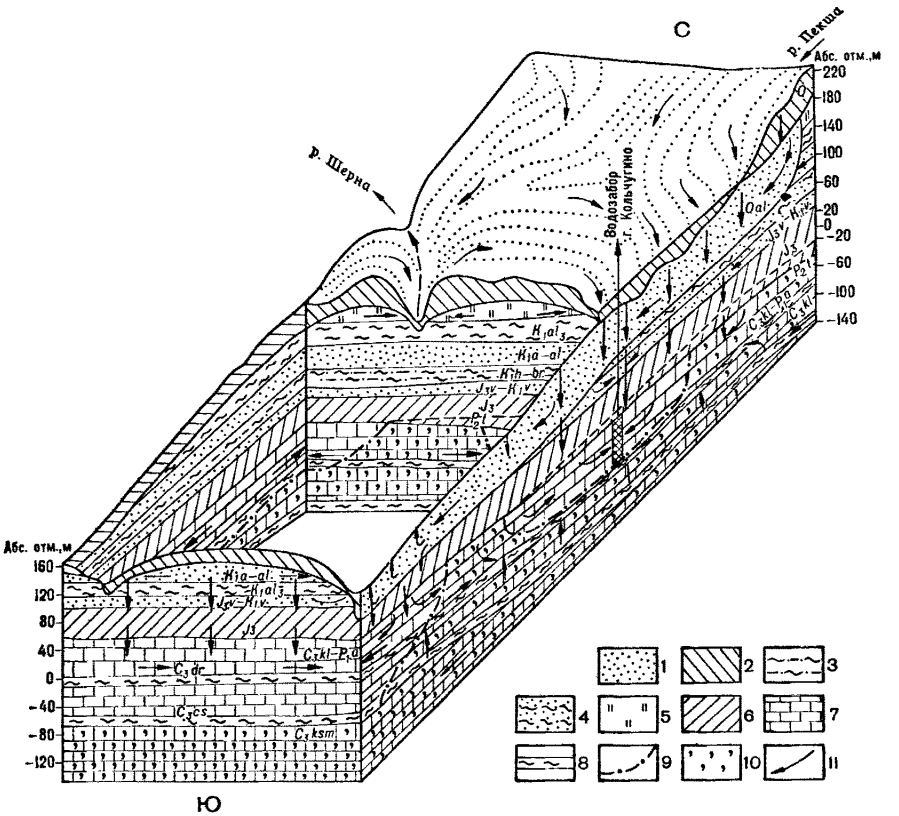



Рис. 19. Схема природной гидрогеологической модели Кольчугинского месторождения подземных вод (по В. С. Беляеву, Б. В. Боревскому, Г. Е. Ершову, 1986):

*1* — пески; *2* — суглинки; *3* — алевриты; *4* — песчаные глины; *5* — опоки; *6* — глины; *7* — известняки и доломиты; *8* — аргиллитоподобные глины; *9* — граница раздела кондиционных вод и вод повышенной жесткости и минерализации; *10* — жесткие воды; *11* — направление движения потока подземных вод. Водоносные горизонты: *Qal* — аллювиальный, *Q* — моренных суглинков, $K_1a$—$al$ — апт-альбский, $K_2st$ — сантонский, $J_3v$—$K_1v$ — валанжин-волжский, $C_3kl$—$P_1a$ — клязьминско-ассельский, $C_3kl$ — клязьминский, $C_3ksm$ — касимовский. Слабопроницаемые пласты: $K_1al_3$ — верхне-альбский (парамоновский), $K_1h$—$br$ — готерив-барремский, $J_3$ — верхнеюрский, $P_1t$ — татарский, $C_3dr$ — дрезненский, $C_3cš$ — щелковский

значение, которое определялось ограниченным набором имеющихся аналитических решений для типовых, достаточно простых расчетных схем. Поэтому сама расчетная схематизация (особенно в неоднородных, слоистых пластах и пластах со сложной геометрической конфигурацией границ и т. д.) зависела от наличия готовых решений и проводилась чаще всего применительно к ним. Это приводило во многих случаях к существенному искажению реальной природной обстановки. С внедрением в практику метода математического моделирования актуальность этого вопроса была в значительной степени снята.

На рис. 19 в качестве примера представлена природная гидрогеологическая модель Кольчугинского месторождения подземных вод, расположенного в центральной части Московского артезианского

бассейна. Месторождение приурочено к многопластовой водоносной системе, где под влиянием интенсивной эксплуатации подземных вод верхней части клязьминско-ассельского водоносного горизонта в результате нисходящего перетекания вод из мезо-кайнозойского чехла через слабопроницаемую толщу юрских и пермских глин в эксплуатируемом горизонте на фоне вод повышенной жесткости образовалась линза кондиционных вод.

В последующих параграфах главы будут рассмотрены особенности преобразования данной природной модели в геофильтрационную, а в гл. 8 — в систему расчетных математических моделей и результаты оценки на этой модели ЭЗПВ методом метематического моделирования.

## 5.2. ИНФОРМАЦИОННАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРИРОДНЫХ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

При построении природных гидрогеологических моделей условий формирования эксплуатационных запасов месторождений подземных вод следует исходить из того, что они (месторождения) в общем случае представляют собой детерминированные системы и принципиально могут быть полностью охарактеризованы совокупностью пространственно-временных геологических и физических полей (по Н. А. Огильви, 1974) и условий на их границах. Они включают поля, характеризующие фильтрационные, емкостные, миграционные параметры водоносных горизонтов и слабопроницаемых пластов; пьезометрические напоры и уровни, химический состав и температуру подземных вод, т. е. гидрогеодинамические, гидрогеохимические и гидрогеотемпературные поля. Совокупность указанных полей определяет структуру фильтрационных потоков и условия движения подземных вод к водозаборным сооружениям во времени и пространстве во взаимосвязи с характером водоотбора и изменением условий и величины питания и разгрузки подземных вод на внешних и внутренних границах пласта. Обоснованность объективного отражения на моделях МПВ этих полей и их последующей целевой схематизации определяет успех решаемой инженерной задачи по оценке ЭЗПВ.

Наиболее удобная форма представления информации о полях графическая: разрезы, карты, блок-диаграммы, графики и т. п. Они же являются удобной основой для последующей схематизации.

Формирование полей, прямо или косвенно характеризующих условия формирования ЭЗПВ, детерминировано, однако объективность их отражения в гидрогеологических моделях в значительной мере определяется и случайными причинами. Это связано с дискретностью и недостаточностью информации, используемой для построения различных полей, а также неполнотой (а иногда и ошибочностью) наших представлений об их генезисе и закономерностях изменчивости. Поэтому фактически модели, используемые для оценки ЭЗПВ, практически всегда имеют вероятностно-детерминированный характер, и при

определении их количественных характеристик используются и статистические оценки.

Различные гидрогеологические и физические поля между собой взаимосвязаны, и структура каждого из них в той или иной степени связана со структурой другого. Однако их одни и те же изменения могут быть вызваны разными причинами. Простейшая взаимосвязь — увеличение градиента напора при уменьшении коэффициента фильтрации и неизменном расходе потока, но аналогичная картина может быть связана с увеличением расхода потока при неизменном коэффициенте фильтрации. Такая конвергентность гидрогеологических полей, когда одна и та же их структура и одинаковые изменения могут определяться действием различных факторов, является прямым следствием многофакторности условий их формирования. Поэтому повышение однозначности отражения на модели причинно-следственных связей, определяющих характер и структуру различных полей, связано прежде всего с выявлением их генетических закономерностей.

Таким образом, имеющаяся в распоряжении гидрогеолога информация должна позволить: 1) выполнить качественное и количественное картирование гидрогеологических полей, характеристика которых необходима для решения целевой задачи разведки подземных вод в данных природных условиях; 2) выявить и обосновать генетические закономерности формирования этих полей; 3) выявить факторы, определяющие возможность нарушения сплошности потока подземных вод (например, экранирующие тектонические зоны без нарушения сплошности распространения водоносного горизонта или гидравлические «окна» в глинах); 4) установить характер взаимосвязей различных полей между собой.

Поэтому при схематизации и обобщении получаемой информации при последовательном переходе от дискретной (в точках наблюдения) к непрерывной (на картах, моделях, разрезах, геофильтрационных или расчетных моделях или схемах) особое внимание должно уделяться выявлению генетических закономерностей формирования изменчивости картируемых показателей, выбору и обоснованию на их основе принципов *интерполяции и экстраполяции опорных исходных данных*.

Основой информационной обеспеченности гидрогеологических моделей является характеристика условий залегания, распространения, строения и состава развитых в пределах МПВ водоносных и слабопроницаемых пластов, их фильтрационных и емкостных параметров, пьезометрических и гидрохимических полей в естественных и нарушенных эксплуатацией условиях.

**Опорная и формация,** получаемая в процессе разведки по данным буровых, геофизических, опытно-фильтрационных, водно-балансовых и других видов работ, должна обеспечить необходимую достоверность принимаемых по их результатам исходных расчетных показателей, поскольку от них зависит обоснованность количественной характеристики всего того или иного картируемого поля. В первую очередь это относится к гидрогеологическим параметрам (коэффициенты фильтрации, пористости и др.), которые практически не могут быть непосредственно измерены и их опорные значения определяются по данным

опытно-фильтрационных работ (ОФР) исходя из модельных представлений о гидрогеологических условиях участка опробования.

Поэтому вопросам интерпретации ОФР при различном строении водовмещающей среды и разнообразных граничных условиях (определение параметров водоносных горизонтов и слабопроницаемых пластов, параметров взаимосвязи подземных и поверхностных вод и увязки их результатов с геофизической, геолого-структурной, литолого-фациальной, гидрологической информацией) уделяется особое внимание при обосновании исходных данных для оценки ЭЗПВ.

Вопросы определения гидрогеологических параметров и интерпретации данных ОФР освещены в специальной литературе (Б. В. Боревский, Б. Г. Самсонов, Л. С. Язвин, 1973, 1979; В. А. Мироненко, В. М. Шестаков, 1976 и др.), рассматриваются в специальных учебных курсах.

Схематизация геолого-гидрогеологического разреза является основой для построения природной гидрогеологической модели и перехода от нее к геофильтрационной модели МПВ. Количество картируемых и отражаемых на модели водоносных и слабопроницаемых пластов (комплексов, горизонтов, слоев) определяется как геолого-гидрогеологическими условиями, так и целевым назначением решаемой задачи. Применительно к требуемой детальности и содержанию решения различных задач схематизация одного и того же разреза может быть совершенно различной. Так, на Шадринском МПВ продуктивный водоносный горизонт в трещиноватых опоках схематизировался в виде одного пласта для решения задач, связанных с расчетом производительности водозаборного сооружения (рис. 20, *а*). Но в связи с заметным изменением минерализации по глубине для прогноза качества подземных вод он схематизировался тремя пластами с различной минерализацией (рис. 20, *б*), а в последующем на геофильтрационной модели более упрощенно — двумя (Б. В. Боревский, Т. А. Плугина, Ю. В. Нечаев, С. В. Палкин, 1985).

В общем случае при построении разреза должны быть первоначально выделены все основные водоносные и разделяющие их слабопроницаемые пласты, имеющие выдержанное распространение по площади. Водоносные пласты, имеющие четкую стратиграфическую привязку, могут быть подразделены на отдельные слои в связи с резким изменением их фильтрационных свойств по глубине, при наличии выдержанной гидрохимической зональности и т. п.

Наибольшие трудности возникают обычно при схематизации разрезов слоистых толщ, что связано как с незакономерным чередованием по глубине невыдержанных по площади водоносных и слабопроницаемых пластов, так и с изменениями с глубиной напоров. Такие толщи на гидрогеологических и в последующем геофильтрационных моделях представляются обычно системой выдержанных водоносных и слабопроницаемых пластов. Поэтому надо учитывать, как отразится на результатах прогнозных расчетов такое упрощение реального строения разреза и распределения напоров по глубине. Такое строение наиболее характерно для предгорных артезианских бассейнов. Здесь возможны самые разнообразные варианты схематизации от сведения

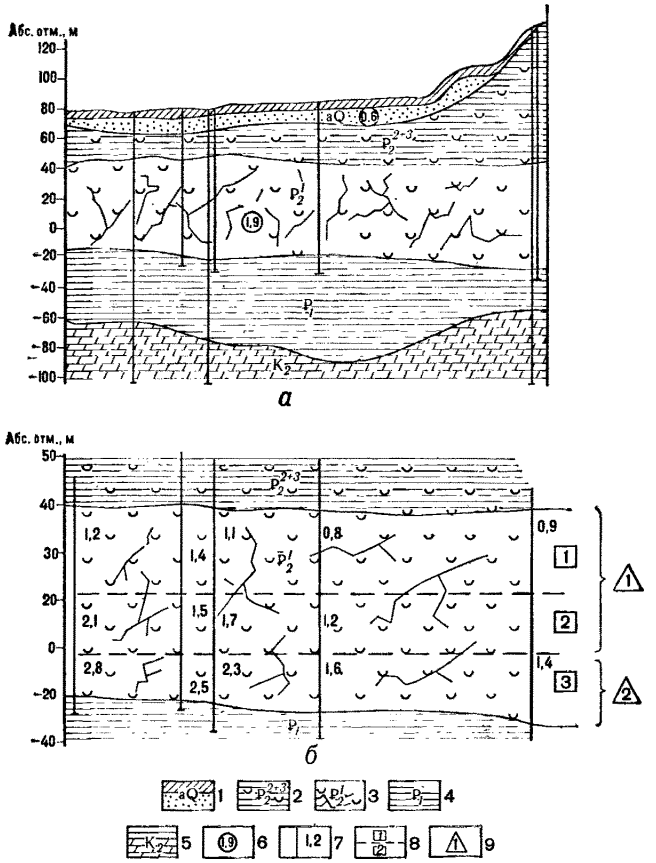



Рис. 20. Геолого-гидрогеологический разрез Шадринского месторождения подземных вод (*а*) и его схематизация для прогноза изменения качества на природной гидрогеологической модели (*б*):

*1* — четвертичные аллювиальные отложения (*aQ*); *2* — эоценовые диатомитовые глины ($P_2^{2+3}$); *3* — эоценовые трещиноватые опоки ($P_2^1$); *4* — палеоценовые глины ($P_1$); *5* — верхнемеловые глины и мергели ($K_2$); *6* — средняя минерализация подземных вод в водоносном горизонте, г/л; *7* — минерализация подземных вод в опробованном по скважине интервале разрезе, г/л; *8* — граница между пластами с различной минерализацией и номер пласта; *9* — номер пласта при геофильтрационной схематизации для целей прогноза изменения качества воды

всей толщи в единый водоносный пласт при региональных оценках прогнозных ресурсов до выделения конкретных эксплуатационных интервалов разреза, на которые предполагается оборудование эксплуатационных скважин, без учета стратиграфических границ: при оценке мелиоративного эффекта в верхнем интервале разреза необходимо учитывать даже маломощные суглинистые прослои (рис. 21).

Характерными особенностями отличается детальность расчленения той части слоистого разреза, которая отделяется от продуктивного эксплуатируемого горизонта выдержанным слабопроницаемым

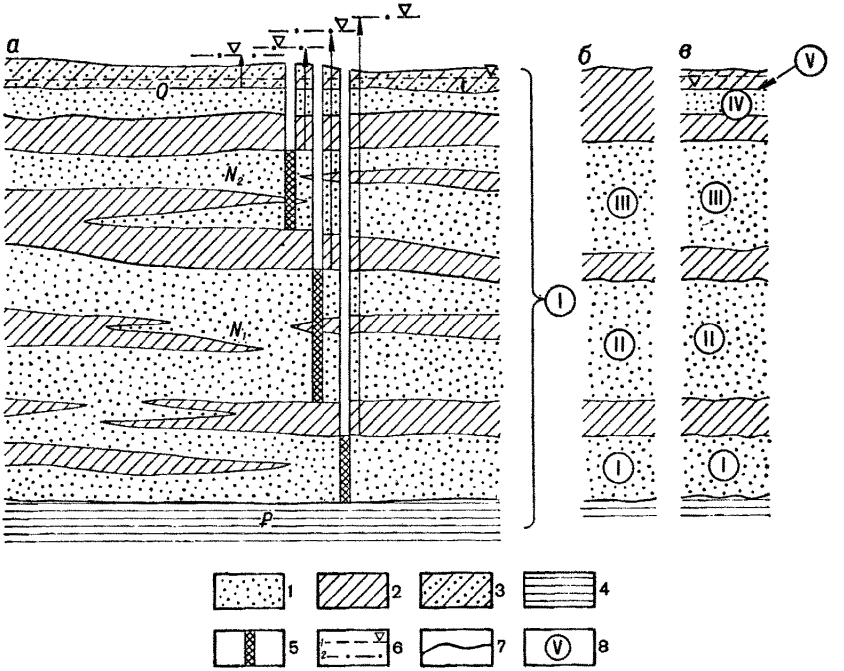



Рис. 21. Схематизация геолого-гидрогеологического разреза сложно-слоистой водоносной толщи для оценки ЭЗПВ:

*а* — тремя водоносными горизонтами для регнональной оценки; *б* — применительно к эксплуатации водоносного комплекса трехъярусным водозаборным сооружением; *в* — для прогнозирования мелиоративного эффекта при снижении уровня грунтовых вод *1* — пески; *2* — суглинки; *3* — покровные суглинки и супеси; *4* — глины; *5* — интервал оборудования фильтрами эксплуатационных скважин; *6* — уровень грунтовых вод (*1*) и напорных (*2*) вод; *7* — стратиграфическая граница; *8* — номер водоносного пласта при различной схематизации разреза

пластом. Такие условия характерны, например, для Московского артезианского бассейна, где продуктивные каменноугольные горизонты отделены от слоистого мезо-кайнозойского чехла регионально распространенным пластом юрских глин (см. рис. 19). Анализ опыта эксплуатации действующих водозаборных сооружений в районе исследований здесь показал, что основным источником формирования эксплуатационных запасов подземных вод эксплуатируемого клязьминско-ассельского горизонта являются ресурсы, образующиеся вследствие перетекания подземных вод из четвертичных отложений через разделяющие глинистые толщи. Эти привлекаемые ресурсы, в свою очередь, формируются за счет привлечения поверхностного стока. Переток из горизонтов волжско-альбских и касимовских отложений, связанный со сработкой их упругих запасов при снижении уровня при эксплуатации, имеет подчиненное значение, так как упругая водоотдача этих горизонтов намного меньше гравитационной водоотдачи четвертичных отложений.

Если учесть, что по данным опыта эксплуатации уровень грун-

товых вод практически не снижается, то для оценки ЭЗПВ клязьминско-ассельского горизонта основное значение для последующей геофильтрационной схематизации в мезо-кайнозойской толще будет иметь грунтовый горизонт, уровни которого подлежат специальному картированию, в то время как меловому и волжско-альбскому горизонту могло бы быть уделено второстепенное внимание. Для прогноза снижения уровня грунтовых вод и изменения качества требуется гораздо более дробная разбивка разреза и как минимум учет пласта верхнеальбских глин ($K_1al_3$), их размыва в долине р. Пекша, а также валанжин-волжского водоносного горизонта ($J_3v - K_1v$) и емкостных запасов юрско-пермской глинистой толщи ($J_3 - P_1t$), играющей важную роль в солевом балансе подземных вод.

Схематизация разреза, кроме того, должна учитывать информационную обеспеченность характеристик параметров и напоров каждого выделенного пласта опорными данными, а система поинтервального изучения реального разреза МППВ должна строиться с учетом его предварительной схематизации.

Каждый выделенный при схематизации разреза водоносный пласт должен быть охарактеризован параметрами водопроводимости ($km$), а слабопроницаемый — вертикальной гидропроводимостью ($k_0/m_0$) с учетом закономерностей их площадной изменчивости, которые наиболее полно могут быть отражены на соответствующих картах.

Схематизация изменчивости и картирование полей фильтрационных параметров должно базироваться на выявлении генетических закономерностей формирования проницаемости горных пород.

При построении карт фильтрационных параметров должны учитываться палеогеографические фациальные обстановки осадконакопления, направление сноса, процессы последующего литогенеза, тектонического и неотектонического развития территории месторождения и области формирования запасов, а также геоморфология и современный рельеф.

Карты водопроводимости водоносных горизонтов обычно строятся интерполяцией частных значений $km$, определяемых преимущественно по данным опытных одиночных и кустовых откачек. Обоснованность таких карт существенно зависит от качества и методики опробования скважин, их конструкции и технического состояния, а также полноты изученности основных факторов, определяющих площадную изменчивость значений водопроводимости.

Имеющийся опыт построения карт водопроводимости показал, что наиболее обоснованные результаты могут быть получены только в тех случаях, когда при составлении карты данные опытных работ увязываются с литолого-фациальными и структурно-тектоническими факторами, т. е. когда в комплексе учитывается генетическая природа формирования фильтрационных свойств водовмещающих пород.

При построении карт водопроводимости водоносных горизонтов, сложенных рыхлыми отложениями, основное внимание следует уделять учету изменчивости литолого-фациального и гранулометрического состава водовмещающих отложений и их эффективной мощности

с учетом общих закономерностей их формирования. Примером может служить уменьшение проницаемости пролювиальных отложений от верхней части конусов выноса к их основанию, связанное с замещением гравийно-галечниковых отложений песчано-глинистыми.

В таких случаях построение карты водопроводимости рекомендуется проводить в такой последовательности. Прежде всего, выделяются различные литолого-фациальные разности водовмещающих пород и границы их распространения. На карту наносятся изолинии мощностей водоносного горизонта, а для сложнослоистых песчано-глинистых толщ — эффективных мощностей. Далее, для каждой выделенной литолого-фациальной разности по данным кустовых опытных откачек определяется коэффициент фильтрации. Умножением этого коэффициента на мощность находится коэффициент водопроводимости.

Для неоднородных разностей рыхлых пород (особенно с неоднородным составом заполнителя) существенную помощь в определении водопроводимости могут оказать вспомогательные графики зависимости коэффициента фильтрации от гранулометрического состава или от количества глинистого материала.

При построении карт водопроводимости необходимо обязательно учитывать более высокую достоверность параметров, определяемых по данным кустовых откачек по сравнению с одиночными. В тех случаях, когда количество кустовых откачек невелико, для построения карты водопроводимости следует построить график связи значений коэффициента водопроводимости, определенных по данным кустовых откачек (по наблюдательным скважинам), со значениями, рассчитанными по центральным скважинам этих же опытных кустов. При наличии такой связи этот график может быть использован для введения соответствующих корректив в параметры, рассчитанные по результатам одиночных откачек.

В рыхлообломочных водоносных горизонтах основные направления изменчивости их фильтрационных свойств зависят, прежде всего, от условий осадконакопления, определяющих их гранулометрический состав и особенно содержание глинистых фракций в заполнителе. Однако существенное значение могут иметь и процессы уплотнения пород, связанные с последующим геологическим развитием территории, условиями залегания в настоящее время, особенностями современного рельефа. Даже стратиграфическая приуроченность пласта, которая на протяжении многих лет рассматривалась гидрогеологами-разведчиками как несущественный фактор с гидродинамических позиций, в монотонных по составу разрезах может влиять на изменчивость фильтрационных свойств в связи с увеличением времени, а следовательно, и степени уплотнения, а в валунно-галечных отложениях — длительности процессов кольматации и декольматации порового пространства. Последние зависят от направления потока подземных вод в разрезе, определяющего привнос или вынос из пласта глинистого материала.

Изменение фильтрационных свойств рыхлообломочных пород в зависимости от глубины залегания и нагрузки на кровлю пласта обычно не учитывается, хотя может быть значительным. Так, на Пуш-

кинском МППВ в Южном Приморье (по данным Б. В. Боревского и А. А. Труфанова, 1983) коэффициент фильтрации усть-суйфунских песчано-гравийно-галечных отложений на участках, где они перекрыты стометровой толщей покровных базальтов, снижается в два раза по сравнению с долинами рек, где эти базальты эродированы.

Особенно сложные задачи возникают при оценке параметров сложнослоистых толщ, так как в них должны быть охарактеризованы опорными значениями и прослежены по площади различные фации водовмещаемых пород в разрезе картируемого горизонта. Например, при картировании водопроводимости водоносного горизонта континентальных отложений средней юры в юго-западной части Днепровского артезианского бассейна (1972), представленного толщей переслаивающихся песков и глин общей мощностью от 20 до 100 м, учитывалось, что он сформировался в условиях развивающихся речных долин при частой смене эрозионных и аккумулятивных циклов и включает в себя русловые, пойменно-старичные и дельтовые фации. На основе литолого-фациального анализа было выделено 5 циклов осадконакопления, а в пределах каждого цикла установлено достаточно постоянное соотношение в разрезе различных фаций независимо от суммарной мощности. Расходометрией была установлена идентичность фильтрационных свойств одних и тех же фаций различных циклов. Это позволило, по данным ОФР, определить усредненное значение коэффициента фильтрации пород одной пачки, соответствующей одному циклу осадконакопления и, таким образом, перейти к картированию водопроводимости с учетом количества и суммарной мощности таких пачек (рис. 22).

При построении карт водопроводимости трещинно-карстовых водоносных горизонтов надо учитывать следующие основные закономерности, определяющие изменение фильтрационных свойств водовмещающих пород: 1) уменьшение интенсивности трещиноватости в направлении от долин к водоразделам (связь с рельефом) и по мере увеличения глубины залегания водовмещающих пород (связь с нагрузкой на кровлю горизонта); 2) усиление интенсивности трещиноватости на периклиналях и крутых крыльях поднятий по сравнению с отрицательными структурными элементами (связь со структурным положением массива); 3) изменение интенсивности трещиноватости при изменении литологического, минералогического и петрографического состава водовмещающих пород (связь с составом), так как литологические контакты часто являются наиболее резко выраженными границами фильтрационной неоднородности; 4) различную степень трещиноватости зон разломов, связанную с разным составом заполнителя и неотектонической активностью нарушений, в соответствии с чем выделяются высокопроводящие, экранирующие и слабопроницаемые разломы; 5) повышение интенсивности закарстованности массивов, перекрытых хорошо проницаемыми породами, по сравнению с залегающими под глинистыми и суглинистыми осадками; 6) повышение закарстованности пород с более высокой растворимостью.

Для нахождения связи между коэффициентом водопроводимости и указанными факторами целесообразно строить графики зависимости

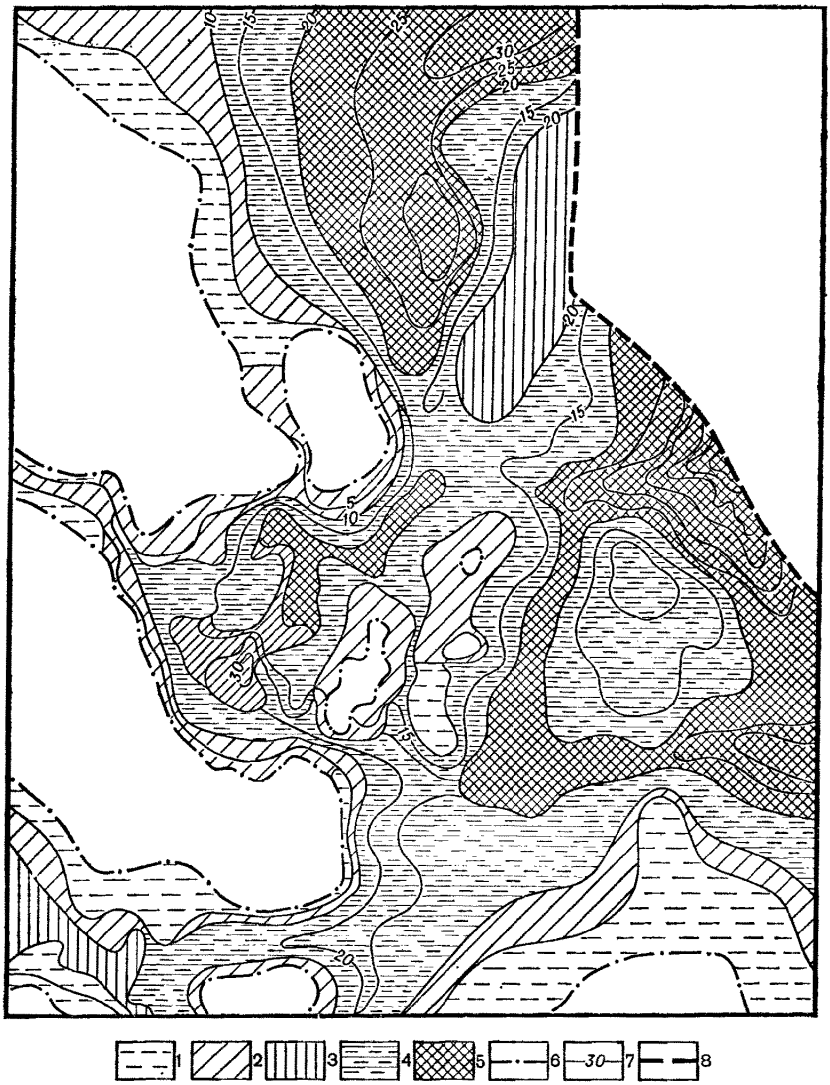



Рис. 22. Карта водопроводимости байосского водоносного горизонта (юго-западная часть Днепровского артезианского бассейна):

Площади со средним значением водопроводимости: *1* — 60 м²/сут; *2* — 120 м²/сут; *3* — 200 м²/сут; *4* — 300 м²/сут; *5* — 500 м²/сут; *6* — граница распространения водовмещающих пород; *7* — изолинии мощности водовмещающих пород; *8* — тектоническое нарушение

между ними (например, между коэффициентом водопроводимости и высотой точки опробования над базисом эрозии, коэффициентом водопроводимости и мощностью перекрывающих отложений и т. п.). Как и для рыхлых пород, коэффициенты водопроводимости трещиноватых и закарстованных водовмещающих пород должны определять-

ся по данным кустовых откачек или по графикам связи между водопроводимостью, рассчитанной по наблюдательным скважинам и по центральной скважине того же опытного куста. Например, на Пожняель-Седьюском МППВ (северо-восточный склон Тимана) зоны повышенной водопроводимости были установлены на участках развития вторичной доломитизации, а максимальной — там, где эти породы перекрыты маломощными четвертичными породами, определяющими благоприятные условия инфильтрации и инфлюации атмосферных осадков (Б. В. Боревский, 1972). В мергельно-меловых отложениях Предкарпатья была установлена четкая корреляционная зависимость водопроводимости от превышения точек опробования над уровнем водотока в долинах малых рек и ручьев (Г. Г. Лютый, 1975). В долине р. Северской Донец четко дифференцируются по водопроводимости ее пойма, террасы и водоразделы, а в Южном Приморье жерловые и потоковые фации базальтов значительно более проницаемы, чем покровные, и т. п.

При построении карт водопроводимости широко используются данные площадных геофизических работ (электроразведки, методом ВЭЗ ВП и сейсморазведки). На основе корреляционных связей соответствующих геофизических параметров с фильтрационными могут быть получены значения коэффициентов фильтрации, водопроводимости в точках, охарактеризованных данными геофизики (Н. Н. Шарапанов, Б. В. Боревский, 1986). Н. Н. Шарапановым установлено, что фильтрационные параметры имеют наиболее тесную корреляционную связь с комплексным параметром $A^*$, представляющим собой отношение вызванной поляризуемости $A$ к кажущемуся электрическому сопротивлению $\rho_к$.

На рис. 23 представлен фрагмент карты водопроводимости клязминско-ассельского горизонта в трещинно-карстовых доломитах и известняках на Средне-Клязьминском МПВ в центральной части Московского артезианского бассейна, построенной с широким использованием результатов наземной геофизики.

Повышению достоверности картирования водопроводимости служат и данные электрокаротажа. Поскольку фильтрами оборудуются не все водоносные прослои, а при откачках возбуждается и опробуется только часть водоносного комплекса, корреляционная связь между суммарным и поперечным электрическим сопротивлением $\sum_{i=1}^{n} \rho_к$ с водопроводимостью позволяет уточнить значение последней в точках некачественного опробования.

Большое значение в формировании поля фильтрационных параметров имеют высокопроводящие или экранирующие тектонические нарушения, приводящие к нарушению сплошности потока подземных вод или наличию линейных зон с аномальными параметрами. Хорошие результаты даже при малоамплитудных смещениях дают данные наблюдений за уровнями подземных вод при мощных откачках или на эксплуатирующихся месторождениях. По анализу опыта эксплуатации таким способом была выделена серия экранирующих тектонических нарушений в Центральной Молдавии в продуктивном водоносном

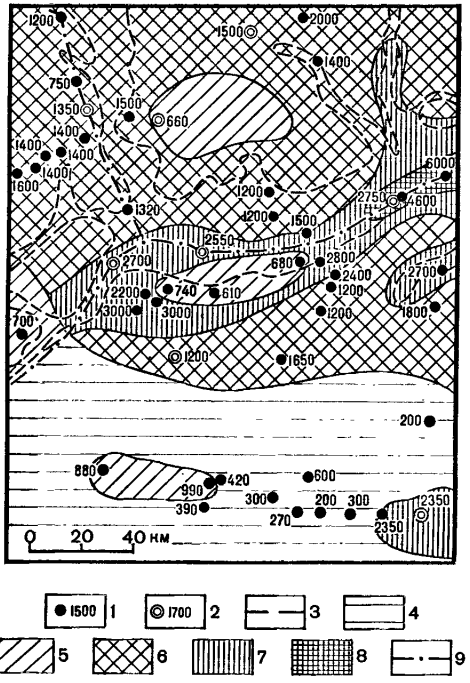






Рис. 23. Фрагмент карты водопроводимости клязьминско-ассельского водоносного горизонта Средне-Клязьминского МПВ в Московском артезианском бассейне (по Б. В. Боревскому, М. В. Кочеткову, Т. А. Плугиной, Н. Н. Шарапанову, 1981):

*1* — точка ВЭЗ, цифры — значение водопроводимости по геофизическим данным, м²/сут; *2* — гидрогеологическая скважина, цифра — значение водопроводимости по опытным откачкам, м²/сут; *3* — границы современных речных долин; *4* — *8* — зоны с различной водопроводимостью (м²/сут): *4* — до 500, *5* — 500—1000, *6* — 1000—2000, *7* — 2000—3000, *8* — более 3000; *9* — линия проектного водозаборного сооружения

горизонте сарматских органогенных известняков, а их фильтрационные характеристики обоснованы при моделировании. В зонах этих нарушений типа надвигов коэффициенты фильтрации снижаются в 10 — 100 раз по сравнению с примыкающими блоками вследствие уплотнения пород лежащего бока. Основным признаком для первоначального выделения тектонических нарушений послужило резкое несоответствие воронок депрессии на примыкающих участках водоносных горизонтов.

По данным длительных откачек, малоамплитудные слабопроницаемые экранирующие нарушения в слабоуплотненных неогеновых песчано-галечных отложениях были выявлены на Пушкинском МПВ в Южном Приморье (Б. В. Боревский, В. С. Рынков, А. А. Труфанов, 1973). В этих зонах при моделировании для согласования полей водопроводимости и напоров пришлось уменьшить исходные значения водопроводимости на 2 — 3 порядка. Наличие в таких условиях экранирующих и полуэкранирующих фильтрационных барьеров можно объяснить наличием большого количества глинистого материала в составе вмещающих пород, вследствие уплотнения которого в зонах тектонических нарушений и происходит снижение фильтрационных свойств пород. По этим зонам разнонаправленные подвижки, видимо, происходят и в настоящее время. Наличие таких нарушений приводит к разделению водоносного горизонта на отдельные блоки с затрудненной гидравлической связью между собой, что существенно влияет на условия формирования ЭЗПВ. Роль тектонических зон с аномально высокой проводимостью комментариев не требует.

В ряде случаев тектонические нарушения хорошо фиксируются по гидрохимическим, изотопным, гелиевым, температурным аномалиям на картах соответствующих полей.

Если водоносный пласт характеризуется хаотической неоднород-

ностью, т. е. бессистемным расположением точек и зон с различными гидрогеологическими параметрами, то для последующей схематизации принимаются средние эффективные параметры пласта, определенные для всей области прогнозного возмущения.

Схематизация фильтрационных свойств в разрезе. В реальных природных условиях водовмещающие породы характеризуются неоднородностью фильтрационных и емкостных свойств не только по площади, но и в разрезе. Характерными примерами неоднородности в разрезе могут служить сложнослоистые толщи, представленные незакономерным чередованием песчаных и глинистых слоев; пласты, представленные трещиноватыми и закарстованными породами, в которых происходит заметное уменьшение фильтрационных свойств от кровли к подошве; пласты, представленные рыхлыми зернистыми осадками различных фаций (например, русловый, пойменный, старичный аллювий) и т. д.

Во всех этих случаях для целей схематизации реальный неоднородный в вертикальном разрезе пласт может схематизироваться системой однородных пластов либо приводиться к условно однородному с суммарной водопроводимостью

$$km = \sum_{i=1}^{n} (km)_i, \tag{5.1}$$

где $(km)_i$ — водопроводимость (произведение коэффициента фильтрации на мощность) $i$-го ($i = 1, 2, \ldots, n$) слоя в оцениваемом водоносном пласте.

Реальная неоднородность учитывается при выборе интервала установки фильтра в эксплуатационных скважинах.

Схематизация изменчивости и картирование фильтрационных параметров слабопроницаемых пластов (вертикальной проводимости или гидропроводимости) базируется, прежде всего, на выявлении природы формирования их проницаемости. Поскольку полевые определения трудоемки и недостаточно однозначны, достоверные опорные значения параметров могут, как правило, быть получены лишь в единичных точках. Их поле восстанавливается обычно при воспроизведении на математических моделях полей напоров в естественных и нарушенных условиях. Следует иметь в виду, что используемая при этом для подбора разность напоров в двух смежных горизонтах является лишь гидродинамической предпосылкой перетекания, сам факт которого должен быть обоснован независимыми методами (Б. В. Боревский, 1979).

До сих пор многие авторы обращают внимание на неоднозначность природы формирования проницаемости глинистых пород и понятия «начальный градиент фильтрации», базируясь преимущественно на результатах лабораторных работ. На этой основе указанные работы наиболее детально обобщены В. М. Гольдбергом и Н. П. Скворцовым (1986).

Многолетние исследования лаборатории ресурсов пресных подземных вод ВСЕГИНГЕО (Б. В. Боревский, Т. А. Плугина, Л. А. Субботина, А. Г. Черняк) в содружестве с гидрогеологами территориаль-

ных производственных геологических объединений и управлений геологии союзных республик (Д. Р. Литвак, Л. П. Шараевский, С. В. Палкин, Ю. В. Нечаев, М. В. Кочетков, В. И. Реутов и др.) однозначно показали, что при решении этих вопросов следует прежде всего ориентироваться не на лабораторные определения, а на полевые исследования перетекания через слабопроницаемые пласты и на выявление основных закономерностей изменчивости их проницаемости при разведке конкретных месторождений и региональных исследованиях ресурсов, считая эти исследования наиболее достоверными.

Комплексные исследования, выполненные на ряде крупных МППВ в Тобольском, Московском, Причерноморском, Днепровском артезианских бассейнах, однозначно свидетельствуют о наличии перетекания через глинистые слои при относительно небольших градиентах фильтрации (значительно меньше единицы). Это было установлено как по гидродинамическим данным, так и по специальным гидрогеотермическим, водно-гелиевым и гидрохимическим исследованиям, в том числе по содержанию в подземных водах радиоуглерода и трития, рассматривающихся как естественные индикаторы для прямого доказательства фильтрации через глины. На Шадринском МППВ фильтрация в диатомитовых глинах в натурных условиях была зафиксирована экспериментально при запусках индикаторов и их регистрации в скважинах, оборудованных непосредственно на глинистый пласт.

В Ельдигинском карьере (Московская область) фильтрация через глины мелового возраста наблюдалась визуально — в виде грифонов в дне карьера цепочками по линейным системам трещин различного простирания.

Сравнение коэффициентов фильтрации, определенных полевыми и лабораторными методами, показывает, что первые на 2 — 3 порядка выше, а при градиентах, соответствующих натурным, в лабораторных условиях фильтрация, как правило, не наблюдается.

Обобщение результатов проведенных исследований позволило сделать вывод, что в верхней гидродинамической зоне на глубинах до 100 — 200 м и более трещиноватость глин является определяющей в формировании их фильтрационных свойств, а фильтрация в глинах в природных условиях преимущественно происходит по схеме гетерогенной среды с «двойной пористостью». Действительно, в верхнеюрских глинах на полигоне «Петушки» при детальном описании керна выделяются три системы трещин с характерной густотой 10 — 20 1/м; определенный по данным ОФР коэффициент фильтрации равен $10^{-4}$ м/сут, по лабораторным данным — $10^{-6}$ м/сут. Это свидетельствует о том, что проницаемость глин на этом участке определяется их трещиноватостью.

Наибольшая проницаемость глинистых пород наблюдается в эрозионных понижениях рельефа и, прежде всего, в речных долинах, где раскрытие тектонических и диагенетических трещин существенно возрастает под влиянием эрозионной разгрузки пластов. Так, в центральной части Московского артезианского бассейна в направлении от долин к водоразделам коэффициент фильтрации юрских глин уменьшается на один-два порядка. Отмечается также возрастание

фильтрационных свойств слабопроницаемых пластов на участках активных неотектонических поднятий. В районе г. Полтавы в сводах соляных куполов было зафиксировано (по данным термометрии скважин) и подтверждено при моделировании возрастание коэффициента массивных мергельно-меловых пород на порядок и более по сравнению с окружающей территории.

При картировании параметров слабопроницаемых пластов перечисленные факторы формирования их фильтрационных свойств обычно учитываются качественно, а их количественные характеристики в характерных зонах устанавливаются по данным решения обратных задач методом моделирования.

При разведке Среднеклязьминского месторождения было проведено непосредственное картирование коэффициента фильтрации юрских глин на основе районирования территории с учетом геоморфологических и геоструктурных особенностей месторождения, изменчивости литологического состава и мощности глин, а также результатов наземных геофизических работ и прямого определения параметров слабопроницаемых отложений по данным откачек из специализированных опытных кустов. При картировании учитывались также данные термометрии и площадного водно-гелиевого опробования (Б. В. Боревский, М. В. Кочетков, Т. А. Плугина, Н. Н. Шарапанов, 1981). Полученные значения распространялись по площади с учетом выполненного районирования и значений удельного электрического сопротивления, изменяющегося от 5 до 80 Ом · м. По данным выполненных работ, величина $k_0$ в различных зонах изменяется от $10^{-3}$ до $10^{-6}$ м/сут. Фрагмент карты представлен на рис. 24. Окончательное уточнение его значений по площади выполнено методом моделирования на ЦВМ.

Приведенные примеры иллюстрируют возможности получения количественных характеристик поля параметров слабопроницаемых пластов в природных условиях.

Фильтрационные параметры как водоносных, так и слабопроницаемых пластов могут испытывать временные изменения под влиянием снижения гидростатических напоров при эксплуатации, но вопросы, касающиеся учета и прогноза этих изменений, в настоящее время практически не разработаны.

Поля емкостных параметров, характеризующих упругую и гравитационную водоотдачу водоносных и слабопроницаемых пластов, обычно имеют меньшее информационное обеспечение результатами полевых исследований по сравнению с полями фильтрационных параметров, что определяет в этом случае большое значение лабораторных исследований. При прочих равных условиях емкостные параметры, определяющиеся пористостью и сжимаемостью пород, менее изменчивы в пространстве, чем фильтрационные, что облегчает их картирование. Поэтому, установив по данным ОФР или лабораторных работ значения гравитационной и упругой водоотдачи в безнапорной, субнапорной и напорой зонах, можно распространить эти значения на большие площади распространения водоносных горизонтов.

В отличие от фильтрационных, емкостные параметры, особенно глинистых пластов, значительно более изменчивы во времени под

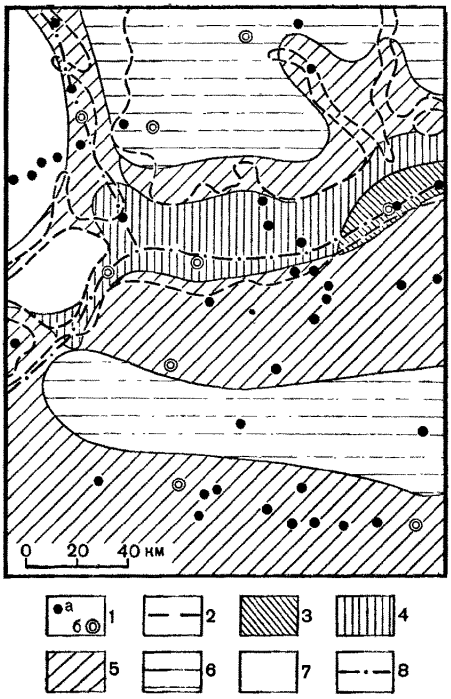



Рис. 24. Фрагмент карты вертикального коэффициента фильтрации верхнеюрских глин Средне-Клязьминского месторождения подземных вод (по Б. В. Боревскому, М. В. Кочеткову, Т. А. Плугиной, Н. Н. Шарапанову, 1981):

*1* — опорные точки, данные по которым использовались для картирования: точка ВЭЗ (*а*) и гидрогеологические скважины, опробованные опытными откачками (*б*); *2* — границы современных речных долин; зоны с различными средними значениями вертикального коэффициента фильтрации верхнеюрских глин (м/сут): *3* — $10^{-3}$ м/сут, *4* — $10^{-4}$ м/сут, *5* — $10^{-5}$ м/сут, *6* — $10^{-6}$ м/сут; *7* — литологические окна; *8* — линия проектного водозаборного сооружения

влиянием процессов уплотнения и разуплотнения горных пород вследствие снижения напоров, что затрудняет выбор их прогнозных значений. Поэтому при обосновании гидрогеологических моделей следует учитывать, что прогнозные значения емкостных параметров могут существенно отличаться от определенных по данным ОФР и должны корректироваться с учетом лабораторных определений и опыта эксплуатации.

Большое внимание на режим эксплуатации имеет упругое отжатие воды из глинистых пород (В. А. Мироненко, В. М. Шестаков, 1976). Исследования, выполненные по ВСЕГИНГЕО, показали, что со временем упругая водоотдача глин определяется предельным значением коэффициента их уплотнения, полученного в диапазоне нагрузок от бытовых в период исследований до проектных с учетом прогнозируемого снижения уровней (Т. А. Плугина, 1979).

Общеизвестен факт увеличения «обобщенной емкости» со временем в процессе эксплуатации. Обычно это связывают с процессами перетекания. Однако в ряде случаев процессы увеличения «обобщенной емкости» при эксплуатации могут быть связаны с упругими свойствами самого пласта. Вследствие различной сжимаемости песчаных и глинистых прослоев упругая емкость последних имеет гораздо большее значение. Поэтому при наличии в сложнослоистой толще даже 10 — 20 % глинистых прослоев суммарная упругая водоотдача пласта может возрастать на порядок, что обычно в процессе ОФР не проявляется и часто интерпретируется впоследствии как перетекание.

Аналогичное изменение может наблюдаться и за счет уплотнения глинистого заполнителя и разрушения глинистого цемента. Для изменения упругой емкости на порядок достаточно 10—20% глинистых частиц в песчаном пласте. Ощутимое проявление указанных процессов при откачках, даже длительных, не наблюдается вследствие относительно

небольших изменений напора и малой продолжительности опыта, но начинает существенно проявляться уже в первые годы эксплуатации.

Поля гидродинамических напоров (уровней) определяются полями параметров водоносных и слабопроницаемых пластов, характеризующих фильтрационные сопротивления в потоке подземных вод, и расходами на их внутренних и внешних границах. По сравнению с полями гидрогеологических параметров, они характеризуются наиболее высокой динамичностью во времени, что связано прежде всего с суточными, сезонными и многолетними изменениями питания подземных вод за счет естественных и антропогенных источников, а в условиях эксплуатации — и неравномерностью водоотборов, водоотливов, дренажей.

Характер и степень динамичности напоров подземных вод зависит и от величины емкости рассматриваемой водоносной системы, поскольку она может существенно нивелировать неравномерность питания и разгрузки. При большой емкости сезонные и многолетние колебания напоров выражены слабее, при маленькой — сильнее. В общем случае фильтрационные потоки в пределах каждого водоносного горизонта и соответствующие им поля напоров являются пространственными, но на гидрогеологических моделях обычно сводятся к плановым. Отражением усредненной плановой структуры полей напоров являются карты пьезо- и гидроизогипс и гидродинамические профили, а динамичности напоров — графики их изменения во времени (графики режима подземных вод). При высокой динамичности напоров их картирование производится на разные периоды времени (маловодные и многоводные различные этапы эксплуатации или изменения величины питания подземных вод под влиянием водохозяйственных мероприятий и т. п.). Соотношение напоров между различными горизонтами анализируется по гидрогеологическим разрезам и гидродинамическим профилям.

Схематизация полей напоров обычно производится при следующих основных допущениях:

1) в пластах, схематизируемых как водоносные и слабопроницаемые, выполняется предпосылка Мятиева — Гиринского о возможности рассматривать движение в водоносных горизонтах как горизонтальное (т. е. пренебрегать изменением напора по глубине), а в слабопроницаемых пластах — как вертикальное;

2) наличие градиента напора всегда обеспечивает движение подземных вод по линейному закону Дарси (в том числе при фильтрации через глинистые пласты), что обеспечивает возможность линейной интерполяции между точками с измеренными напорами;

3) разрывы сплошности потока в пределах отдельных водоносных пластов отсутствуют, за исключением случаев резкого смещения пласта по тектоническим нарушениям;

4) изменения напоров связаны лишь с изменениями условий питания и разгрузки (естественными и антропогенными), в том числе водоотбором, что полностью находит свое отражение в естественном и нарушенном режиме подземных вод и определяет сезонные и многолетние изменения напоров;

5) поровое пространство рассматривается как упругодеформируемое, т. е. возможностью изменения напоров, связанных с реологическими свойствами горных пород, пренебрегают.

Анализируя систему факторов, определяющих структуру полей напоров и их временные изменения, следует учитывать, что по мере освоения МПВ, особенно при крупном водоотборе, структура фильтрационных потоков приобретает более резко выраженный пространственный характер вследствие их резкой деформации, а воздействие изменения гидростатического напора на водовмещающие породы резко возрастает.

Отметим, что практика гидрогеологической разведки и анализ опыта эксплуатации показал, что принятие перечисленных допущений без специального анализа во многих случаях может привести не только к существенным погрешностям в прогнозных расчетах, но и к ошибочным представлениям об условиях формирования запасов.

Покажем это на примере необходимости учета пространственной структуры потока. Схематизация геолого-гидрогеологического разреза МПВ является основой выбора объектов картирования полей параметров и напоров и построения гидрогеологических моделей. Известно, что достаточно часто в пределах водоносных комплексов сложенных сложнослоистыми, трещиноватыми и трещинно-карстовыми, и даже неоднородными рыхлообломочными породами и рассматриваемых при схематизации как единый водоносный пласт, наблюдается существенное изменение напоров по глубине, что имеет место как в естественных, так и нарушенных условиях. Вопрос о возможности схематизации таких водоносных горизонтов и комплексов в виде единого водоносного пласта или разделения на несколько расчетных решается в зависимости не только от реального строения разреза, соотношения напоров по глубине, но и от системы водоотбора и характера решаемой задачи.

Влияние пространственной структуры потока на изменения напоров с глубиной в пределах единого водоносного горизонта достаточно характерны для долин горных рек, русла которых характеризуются слабым врезом в достаточно мощные водоносные горизонты, сложенные относительно монотонными толщами валунно-галечных отложений. При работе водозаборных сооружений, опытных откачках и даже в естественных условиях это приводит к существенной дифференциации величин напоров и понижений уровня с глубиной.

На рис. 25 представлена гидродинамическая сетка, характеризующая структуру потока в аллювиальном водоносном горизонте при эксплуатации подземных вод несовершенными скважинами. Как видно, с глубиной происходит заметное увеличение понижения уровня. Если для определения понижения уровня в водозаборных скважинах такой характер потока не имеет принципиального значения, то для расчета пропускной способности русла реки это весьма существенно (см. гл. 13).

Геофильтрационные модели таких потоков представляются системой водоносных слоев, разделенных фиктивными пластами, в которых реализуется вертикальная фильтрация через проводимость, соответствую-

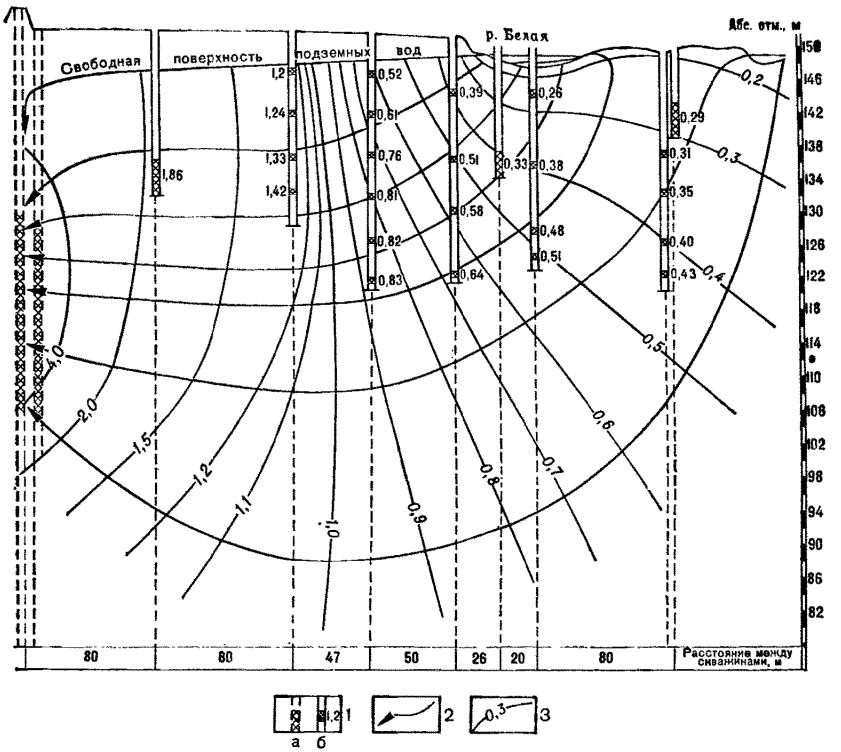



Рис. 25. Схематическая гидродинамическая сетка при работе водозаборного сооружения в долине р. Белой (по П. И. Аверкову и М. С. Верзакову, 1976):

*1* — эксплуатационные (*а*) и наблюдательные (*б*) скважины: цифры справа — понижение уровня, м; *2* — линии тока; *3* — линии равных понижений

щую вертикальному коэффициенту фильтрации и полусумме мощностей смежных расчетных слоев. Такая схематизация позволяет более реально охарактеризовать взаимосвязь подземных и поверхностных вод и построить трехмерную гидродинамическую сетку под руслом реки.

Таким образом, правомерность применения схемы Мятиева-Гиринского и сведения пространственного потока в водоносном горизонте к плоскому должна быть обоснована. При решении задач прогноза качества подземных вод в условиях сложного гидрохимического разреза его расчетная схематизация может существенно отличаться от принимаемой при фильтрационных расчетах, а пренебрежение вертикальной составляющей потока на участке водозаборных скважин неправомерно.

Наличие градиента напора, как уже отмечалось, является лишь предпосылкой для фильтрации воды. В реальных природных условиях при наличии градиента напора может наблюдаться: линейная зависимость между градиентом и расходом потока; нарушение линейной зависимости; практически отсутствие движения.

Отсутствие движения может быть: 1) при разрыве сплошности потока, например, тектоническим нарушением, что в естественных условиях практически не отражается на форме пьезометрической поверхности; 2) при различных напорах на кровле и подошве практически непроницаемого глинистого пласта; 3) при изменении напоров вследствие вторичной консолидации и уплотнения горных пород; 4) вследствие отражения на форме пьезометрической поверхности неотектонических движений. Во всех этих случаях наличие или отсутствие фильтрационных потоков должно обосновываться независимыми методами.

Решая вопросы совместного анализа полей фильтрационных параметров и напоров, необходимо иметь в виду, что различные факторы, осложняющие строение фильтрационного поля, в том числе малоамплитудные неотектонические нарушения, слабо проявляются на фоне естественного поля напоров и возможности их выявления и картирования значительно увеличиваются при резкой деформации в пьезометрической поверхности при эксплуатации и мощных опытных откачках.

**Информационная характеристика условий питания и разгрузки** выражается в установлении их расходных характеристик и участков пространственной локализации. Их высокая динамичность требует принципиального решения вопроса о возможности принятия величин питания и разгрузки с постоянными усредненными характеристиками или с учетом их временных изменений. В общем случае учитываются временные изменения расходов как естественных, так и антропогенных источников, в том числе действующих водозаборных сооружений, водоотливов и дренажей. Это требует дополнительного информационного обеспечения на основе изучения режима изменчивости инфильтрации атмосферных осадков, стока рек, изменения водохозяйственной обстановки, расхода родников, водоотбора и водоотлива и т. п. Эти характеристики, полученные в период исследований, не являются исчерпывающими и требуют получения более длительных временных рядов либо принятия некоторых усредненных характеристик заданной обеспеченности, которые определяются вероятностно-статистическими методами для естественных источников, а для антропогенных — восстановлением истории их функционирования.

Важнейшим способом уточнения этих характеристик является оценка водного баланса месторождения, а также уточнение его при решении обратных задач на математических моделях. Особенно это касается недостаточно изученных параметров ( например, величины инфильтрации атмосферных осадков и ирригационных вод, перетекания, потерь стока и разгрузки в реки и т. п.), к изменению которых естественные потоки мало чувствительны ввиду небольших градиентов напоров.

**Информационная характеристика качества подземных вод и полей миграционных параметров** необходима для обоснования прогнозных расчетов возможных изменений качества и границ зон санитарной охраны. Жесткие нормативные требования вызывают необходимость достаточно надежного изучения качества подземных вод про-

дуктивных и питающих водоносных горизонтов, а также поверхностных вод, если они могут служить источником питания подземных, пространственные и временные изменения показателей качества воды. Обоснованность прогнозирования изменения качества подземных вод зависит от правильного раскрытия генетической обстановки формирования гидрохимических полей, выявления антропогенных источников изменения качества воды (например, загрязнения или опреснения), а также от времени их существования. При этом надо учитывать, что существенные различия между естественными и антропогенными источниками формирования качества подземных вод и всей гидрохимической обстановки заключаются не только в их компонентном составе, но и в существенно различной длительности протекания процессов воздействия этих источников. Поэтому на природной гидрогеологической модели должны найти отражение все естественные и антропогенные источники изменения качества подземных вод.

Действительная скорость движения подземных вод значительно меньше скорости изменения напоров и уровней. Поэтому гидрохимическая обстановка во времени значительно более консервативна, чем гидродинамическая, а размеры зоны, оказывающей влияние на изменение качества воды в водозаборных сооружениях, оказываются несоизмеримо меньше размеров зоны гидродинамического воздействия. Это позволяет ограничить собственно контуром месторождения размеры площади, в пределах которой должна быть дана характеристика полей миграционных параметров (см. гл. 1).

При схематизации полей миграционных параметров особенно важно дифференцировать пласт по проницаемости и пористости в разрезе для выделения интервалов максимальных скоростей. Это особенно актуально для трещинно-карстовых водоносных горизонтов с большой дисперсией скоростей как в разрезе водоносного горизонта, так и по площади воронки депрессии.

Несмотря на исключительно сильное влияние миграционных параметров на результаты прогнозных оценок и даже обоснование границ самих МППВ, их изучению при разведке не уделяется должного внимания. Информацию о миграционных параметрах водоносных пластов получают в натурных условиях лишь в единичных случаях, принимая расчетные значения по аналогии, литературным данным или лабораторным определениям (для рыхлых пород). Принципы построения и параметрического обоснования миграционных моделей разработаны недостаточно, хотя в этом направлении ведутся продуктивные исследования (В. А. Мироненко, В. Г. Румынин, 1986).

Обоснование миграционных моделей, которое в целом может ограничиваться лишь собственно контуром месторождения, потребует значительной детализации информации о неоднородности пластов, особенно в разрезе.

В сложных условиях обоснованные прогнозы изменения качества воды могут быть выполнены лишь при раскрытии генетической стороны формирования гидрохимического облика подземных вод. Эффективное решение этих вопросов возможно на основе изучения

различных компонентов химического, газового и изотопного состава природной системы подземных вод.

Такие данные совместно с гидродинамическим анализом позволяют не только дать обоснованный прогноз, но и восстановить естественную гидрохимическую обстановку, нарушенную на период исследований в результате эксплуатации.

Таким образом, при обосновании моделей, определяющих условия возможного изменения качества подземных вод и размеры зон санитарной охраны, следует иметь в виду два обстоятельства:

а) сложность гидрохимических моделей по сравнению с гидродинамическими еще более возрастает;

б) площадь гидрохимической модели, требующей информационного обеспечения, существенно уменьшается.

В весьма сложных гидрогеологических условиях информационная характеристика полей, определяющих условия формирования ЭЗПВ, в количественном отношении часто не может быть обозначена достаточно разумным объемом работ. В этом случае природная модель частично характеризуется лишь качественно или полукачественно, приближенно, применительно к возможностям использования для оценки запасов метода гидрогеологических аналогий или гидравлического метода. Информационная характеристика модели должна обеспечить возможность эффективного применения этих методов путем построения на базе природной соответствующей расчетной модели.

Для целей оценки ЭЗПВ гидродинамическим методом природная модель в общем случае преобразуется в геофильтрационную.

Модель МППВ, обоснованная совокупностью физических и гидрогеологических полей, всегда *является только определенным приближением к реальным природным условиям* и отражает лишь уровень информации, полученной при разведке, поэтому принципиально нельзя оценить ее точность. Можно говорить лишь о непротиворечии этой модели имеющейся информации и нашим представлениям об условиях формирования ЭЗПВ и достоверности этой модели для использования в рамках решаемой задачи.

Достоверность гидрогеологической модели, используемой для прогнозных расчетов, определяется ее сбалансированностью относительно всех факторов формирования ЭЗПВ, с учетом характера взаимосвязей между ними. Поэтому физические и гидрогеологические поля, используемые для обоснования модели, также должны строиться и схематизироваться в тесной увязке между собой.

Картирование полей гидрогеологических параметров осуществляется на основе комплекса вспомогательных карт, характеризующих условия залегания и распространения водоносных и слабопроницаемых пластов (литолого-фациальные и структурно-тектонические карты), геоморфологию, различные геофизические показатели с учетом информации о химическом, газовом и изотопном составе подземных вод, на основе которых выполняются районирование и блокировка территории и т. д. Переход к количественным оценкам основывается на опорных значениях, полученных по данным ОФР для каждого района, блока или фации пород, а их интерполяция — по площади — на основе

корреляционных связей с формирующими факторами или геофизическими параметрами. При построении полей напора интерполяция измеренных в отдельных точках значений должна базироваться на картах параметров, а гидрохимические поля должны строиться на основе гидродинамических. Следует подчеркнуть важное значение совместного анализа гидродинамической и гидрохимической информации при обосновании моделей МППВ.

Окончательная корректировка и увязка использованных при обосновании моделей полей наиболее эффективно может быть выполнена на математических моделях путем воспроизведения полей напоров в естественных и нарушенных эксплуатацией условиях. Обязательным является комплексный анализ модели, относительно ее непротиворечия всей имеющейся информации как с математических, так и эвристических позиций. При этом иногда результат, формально наиболее близко отражающий моделируемую картину, может быть отвергнут, если он противоречит реальной генетической природе тех или иных факторов формирования ЭЗПВ. Критерием правильности принятых для прогнозов моделей является опыт эксплуатации действующих водозаборных сооружений.

Состав и объем необходимой информации определяются условиями формирования запасов, характером решаемой задачи, требованиями к детальности ее решения.

### 5.3. ГЕОФИЛЬТРАЦИОННАЯ СХЕМАТИЗАЦИЯ

Для оценки эксплуатационных запасов подземных вод гидродинамическими методами природная гидрогеологическая модель преобразуется в геофильтрационную, которая в зависимости от степени сложности затем может быть представлена в виде расчетной схемы для выполнения аналитических расчетов либо приведена путем вычислительной схематизации к расчетной математической модели или системе расчетных математических моделей. Расчетная схема представляет собой элемент реализации гидрогеологических прогнозов теми или другими из охарактеризованных в гл. 4 методами.

Естественно, что чем полнее геофильтрационная модель будет отражать природную гидрогеологическую обстановку, тем выше будет достоверность оценки ЭЗПВ. Под достоверностью следует здесь понимать соответствие режима эксплуатации выполненным при оценке запасов гидрогеологическим прогнозам. В то же время при составлении геофильтрационной модели должны учитываться возможности последующей реализации гидрогеологических прогнозов путем применения аналитических решений либо на математических моделях, а также состав и объем информационной характеристики различных факторов формирования ЭЗПВ, использованной при обосновании природной модели. В связи с этим при переходе от природной схематизации к геофильтрационной необходимо учитывать только основные факторы, определяющие закономерности формирования эксплуатационных запасов подземных вод в условиях их отбора. Второстепенными факто-

рами пренебрегают. При схематизации следует также учитывать, к каким погрешностям приводит исключение из рассмотрения того или иного фактора относительно требуемого результата.

Во всех случаях должна быть обеспечена надежность прогнозируемого результата. Например, могут быть несколько завышены прогнозируемые понижения в оцениваемом водоносном горизонте либо радиус депрессии от работы водозаборного сооружения. Но всегда желательно знать, в какую сторону (больше или меньше) может быть допущена ошибка, и по возможности оценивать масштабы возникающих погрешностей.

При оценке эксплуатационных запасов подземных вод это достигается в результате пренебрежения некоторыми источниками их формирования (например, слабопроницаемые породы на границах пласта, в которых протекают процессы фильтрации, принимаются как абсолютные водоупоры и т. д.); с этой же целью прогнозное понижение уровней на водозаборных сооружениях рекомендуется отсчитывать от их наиболее низкого положения (обычно в межень).

При обосновании геофильтрационной модели в ней учитываются и схематизируются следующие элементы геолого-гидрогеологических условий, естественных и антропогенных факторов формирования ЭЗПВ:

1) геолого-гидрогеологический разрез рассматриваемой области фильтрации;

2) поля фильтрационных и емкостных параметров водоносных горизонтов;

3) поля фильтрационных и емкостных параметров слабопроницаемых пластов;

4) геометрические очертания области фильтрации в целом и каждого моделируемого пласта в отдельности;

5) поля напоров, реализуемые как начальные условия;

6) источники питания и разгрузки подземных вод, реализуемые как внутренние и внешние граничные условия;

7) структура фильтрационного потока (одномерные, плановые, пространственные потоки);

8) система расположения водозаборных сооружений и режим водоотбора;

9) схематизация полей миграционных параметров и гидрохимической обстановки.

Возможность упрощения или отказ от учета в геофильтрационной модели тех или иных элементов природной гидрогеологической модели и динамики их временны́х изменений принципиально должна обосновываться предварительными оценками или факторно-диапазонным анализом.

**Схематизация гидрогеологического разреза** оцениваемой области фильтрации сводится к сведению реального геолого-гидрогеологического разреза к однопластовой, двухпластовой или многопластовой системе водоносных горизонтов, разделенных между собой слабопроницаемыми пластами. Каждый водоносный пласт должен быть охарактеризован значениями водопроводимости и емкости. Причем

значения емкости реализуются и задаются только при решении задач нестационарного режима фильтрации.

Слабопроницаемые пласты характеризуются значениями вертикальной проводимости $\left(\frac{k_0}{m_0}, \text{ 1/сут}\right)$ или вертикального фильтрационного сопротивления $\left(\frac{m_0}{k_0}, \text{ сут}\right)$. В случае, если в раздельном слое принимается не жесткий, а упругий режим фильтрации, то он также должен быть охарактеризован параметрами упругой емкости.

В случае, если выделяемые водоносные горизонты не разделены слабопроницаемыми пластами, вертикальная проводимость (фильтрационное сопротивление) между ними принимается исходя из значений вертикальных коэффициентов фильтрации водоносных горизонтов и половины их суммарной мощности. Аналогичная ситуация возникает при представлении одного водоносного горизонта для реализации вертикальной составляющей фильтрационного потока в нем в виде системы взаимосвязанных между собой водоносных пластов.

Последние случаи наиболее актуальны при прогнозировании качества подземных вод и в мощных пластах с выраженной вертикально-горизонтальной анизотропией.

При схематизации разреза на геофильтрационной модели выделяются только те водоносные горизонты и слабопроницаемые пласты, которые оказывают определяющее влияния на конечный результат выполняемого прогноза. Поэтому при решении различных задач оценки запасов, как уже отмечалось выше, один и тот же разрез может быть схематизирован различным образом.

На рис. 26 представлен один из вариантов геофильтрационной схематизации природной гидрогеологической модели Кольчугинского месторождения подземных вод. Схематизация выполнена для целей воспроизведения опыта эксплуатации Кольчугинского водозаборного сооружения и учитывает неизменность уровней в четвертичном водоносном горизонте. Подошва клязьминского подгоризонта принята непроницаемой, т. е. ввиду низких фильтрационных свойств касимовского горизонта водообменом через нижнюю границу модели можно пренебречь. Остальные условия геофильтрационной схематизации ясны из рис. 19 и 26.

При воспроизведении на этой модели опыта эксплуатации действующего водозаборного сооружения большое значение имела величина перетока из клязьминского водоносного подгоризонта ($C_3kl$) в продуктивный клязьминско-ассельский ($C_3kl - P_1a$).

Это связано с тем, что при небольшой абсолютной величине этого перетока, высокой жесткости и минерализации воды его влияние на качество отбираемой воды исключительно велико. Поскольку за время эксплуатации снижение уровня грунтовых вод не наблюдалось, этот горизонт на модели специально не рассматривался, а его поверхность задавалась постоянными абсолютными отметками.

При проектируемом увеличении водоотбора важно оценить возможное снижение уровня грунтовых вод. Для этого грунтовый горизонт должен найти отражение на модели как водоносный пласт

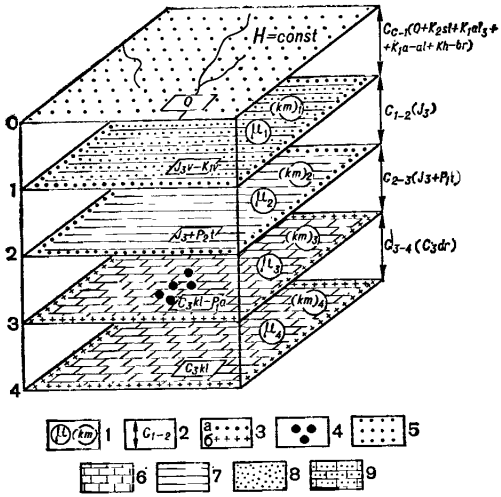



Рис. 26. Геофильтрационная модель Кольчугинского месторождения подземных вод для воспроизведения опыта эксплуатации:

*1* — коэффициенты емкости и водопроводимости водоносных пластов; *2* — вертикальная проводимость между двумя водоносными пластами; *3* — граница I рода ($a$ — $H$ = const, $б$ — $H = f(t)$; *4* — водозаборное сооружение; *5* — поверхность грунтовых вод ($H$ = const). Литологические разности пород: *6* — известняки; *7* — глины; *8* — пески; *9* — моренные суглинки (на рис. 27). Геологические индексы водовмещающих пород соответствуют приведенным на рис. 19

с заданными параметрами. Наоборот, роль клязьминского горизонта в общем балансе водоотбора настолько незначительна, что он может быть из модели исключен. Геофильтрационная модель с учетом этих изменений, использованная для прогноза снижения уровня грунтовых вод, приведена на рис. 27.

Важно подчеркнуть, что во всех случаях при геофильтрационной схематизации в параметрах, характеризующих условия взаимосвязи выделенных водоносных горизонтов или их отдельных интервалов (при разделении горизонта на несколько слоев) должны найти отражение и те водоносные и слабопроницаемые пласты, которые исключены из геофильтрационной модели.

**Схематизация полей гидрогеологических параметров** водоносных горизонтов по площади в пределах рассматриваемой области фильтрации путем приведения каждого реального неоднородного пласта (слоя), выделенного на природной гидрогеологической модели, к кусочно-однородному или условно-однородному. Выбор одной из этих схем учета изменчивости гидрогеологических параметров зависит от типа неоднородности, которая может быть закономерной (упорядоченной) или хаотической.

Основой такой схематизации служат карты водопроводимости, методика построения которых подробно рассмотрена в предыдущем параграфе. Причем если реальные элемен-

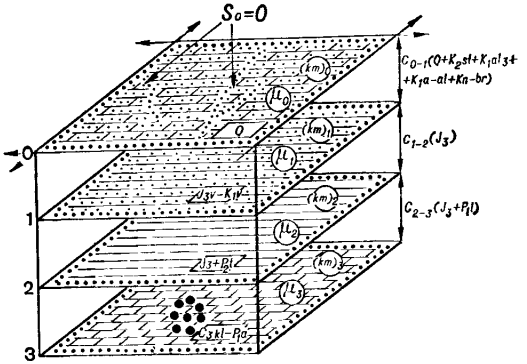



Рис. 27. Геофильтрационная модель Кольчугинского месторождения подземных вод для прогнозирования снижения уровня грунтовых вод (по Г. Е. Ершову, 1986). Условные обозначения см. рис. 26.

ты неоднородности по своим размерам значительно меньше предполагаемой области влияния от работы водозаборного сооружения, то такая неоднородность может рассматриваться как хаотическая. По М. В. Рацу, это допустимо при соотношении элементов неоднородности и области влияния как 1 : 10. В этих случаях реальная неоднородность учитывается только при существенном отличии водопроводимости в точке заложения эксплуатационных скважин от средней.

Учет неоднородности водоносных горизонтов в разрезе. Поскольку в каждом водоносном горизонте, нашедшем свое отражение в геофильтрационной модели, фильтрация рассматривается как плоская плановая, то при выборе расчетных значений водопроводимости должна быть учтена реальная неоднородность водоносного пласта в разрезе.

Если на геофильтрационной модели объединяются два или несколько выделенных ранее водоносных горизонта, то их расчетная водопроводимость определяется суммированием частных значений водопроводимости отдельных пластов в пределах рассматриваемого элемента области фильтрации.

В условиях неупорядоченной неоднородности область фильтрации представляется кусочно-однородной. Градации зон с различными заданными значениями водопроводимости принимаются обычно в геометрической прогрессии в соответствии с тем, что на точность прогнозных расчетов влияет не абсолютная, а относительная погрешность определения водопроводимости. Например, при изменении водопроводимости пласта от 50 до 5000 м²/сут можно принять следующие градации водопроводимости: до 100, 100 — 200, 200 — 500, 500 — 1000, 1000—2000, 2000 — 5000 м²/сут. Среднее значение в пределах каждой зоны выбирается в зависимости от объема имеющихся материалов либо как среднестатическое из всех частных определений в пределах данной зоны, либо как среднеарифметическое из крайних значений для данной градации.

Зоны с разной водопроводимостью, выделяемые на карте водопроводимости, обычно характеризуются различными значениями пьезопроводности и параметров емкости.

Как кусочно-однородная, область фильтрации для аналитических расчетов может быть принята только в случае возможности представления ее в виде простейших схем: а) «полуограниченного пласта» — пласта с прямолинейной границей раздела двух зон с различными гидрогеологическими параметрами; б) «кругового пласта» — с круговой границей. Во всех случаях расчеты могут быть выполнены методами математического моделирования, при использовании которых ограничения на схематизацию фильтрационного поля по гидрогеологическим параметрам практически не накладываются.

Хаотическая неоднородность характеризуется бессистемным расположением зон с различными гидрогеологическими параметрами. Этот тип неоднородности связан с сингенетичными различиями формирования осадков, а также целым рядом эпигенетических проявлений в водовмещающей среде, закономерности которых не выявлены.

В пластах с хаотической неоднородностью реальный неоднородный пласт приводится к однородному с использованием так называемых эффективных значений гидрогеологических параметров, которые распространяются на всю область эксплуатационного возмущения.

Эффективными считаются значения водопроводимости и пьезопроводимости такого условно однородного пласта, в котором расчетные величины понижений в зоне квазистационарного режима на определенные моменты времени близки к понижениям в реальном неоднородном пласте.

Эффективные значения гидрогеологических параметров могут быть рассчитаны по данным кустовых длительных откачек. В этом случае параметры обобщенно учитывают всю сложность распределения элементов неоднородности по всей области возмущения, причем разброс параметров, рассчитанных по разным кустам, в условиях хаотической неоднородности оказывается настолько незначительным, что в качестве эффективного может быть принято значение по любому кусту и необходимость в осреднении практически отпадает.

По данным кратковременных откачек, когда размеры области возмущения оказываются соизмеримыми с размерами зон реальной неоднородности, эффективные гидрогеологические параметры рассчитываются как статистические величины соответствующих выборок с учетом установленного закона распределения. При этом для нормального распределения следует принимать среднеарифметическое значение водопроводимости, а для логнормального — среднегеометрическое.

Для пластов с $\sigma \lg km < 0{,}3$ в качестве эффективного можно принять среднеарифметические значения и при логнормальном распределении. При большом разбросе параметров, рассчитанных по отдельным откачкам, нельзя заменять реальный неоднородный пласт однородным пластом с эффективными параметрами.

В пределах отдельных зон водоносного пласта, схематизируемого в виде кусочно-однородного, неоднородность также можно рассматривать как хаотическую, применяя аналогичный подход для выбора расчетных значений в этих зонах.

**Схематизация полей фильтрационных и емкостных параметров слабопроницаемых пластов** производится по тем же принципам, что и для водоносных горизонтов. Однако при сведении нескольких реальных слабопроницаемых пластов, выделенных на природной модели, к одному на геофильтрационной модели, суммируются не вертикальные проводимости каждого пласта, а их фильтрационные сопротивления:

$$A_{0\text{сум}} = \sum_{i=1}^{n} (A_{0i}) \text{ или } \frac{1}{\chi_{\text{сум}}} = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{\chi_i}; \qquad (5.2)$$

$$A_{0i} = \frac{m_{0i}}{k_{0i}}; \quad \chi = \frac{k_{0i}}{m_{0i}}, \qquad (5.3)$$

где $A_{0i}$ — фильтрационное сопротивление $i$-го пласта, сут; $\chi$ — вертикальная проводимость $i$-го пласта, 1/сут.

При задании значений емкости в случае необходимости следует учитывать возможность ее временных изменений при снижении напора.

Слабопроницаемые пласты в плане рассматриваются как однородные либо как кусочно-однородные, хаотическая неоднородность обычно не рассматривается. При схематизации особое внимание следует обращать на изменение мощности слабопроницаемого слоя, так как увеличение мощности часто сопровождается уменьшением коэффициента фильтрации.

**Схематизация геометрических очертаний области фильтрации** производится в соответствии с границами распространения водоносных горизонтов или слабопроницаемых слоев. Реальные границы сложной конфигурации заменяются при этом более простыми: прямолинейными либо ступенчатыми. Первая замена практикуется при аналитических расчетах, вторая — при моделировании.

При решении вопроса о необходимости учета при схематизации тех или иных границ предварительно должны быть оценены размеры области, в пределах которой имеющиеся границы могут влиять на величину понижения и режим работы водозаборных сооружений, определено, какие из этих границ следует учитывать в прогнозных расчетах.

Возможность влияния какой-либо границы на закономерности изменения уровня или расхода во времени зависит от расстояния водозаборного сооружения до границы, продолжительности расчетного периода, размеров водоотбора и пьезопроводности (уровнепроводности) водоносного горизонта.

Приближенно можно считать, что в расчетной фильтрационной схеме должны быть учтены те границы, которые удовлетворяют условию

$$R_r \leqslant 3\sqrt{at}, \tag{5.4}$$

где $R_r$ — расстояние до соответствующей границы пласта; $a$ — пьезопроводность (уровнепроводность) пласта; $t$ — расчетный срок работы водозаборного сооружения.

Метод моделирования на форму и количество границ ограничений практически не накладывает. При схематизации границ из рассмотрения могут быть исключены краевые площади с весьма низкими водопроводимостями или незначительными мощностями, если эти зоны не оказывают существенного влияния на режим работы водозаборных сооружений.

При геофильтрационной схематизации применительно к аналитическим расчетам конфигурация границ сводится к одной из следующих типовых схем:

*неограниченный (безграничный) пласт* — пласт, природные границы которого находятся за пределами возможного влияния водозаборного сооружения, что позволяет их рассматривать как границы, находящиеся в бесконечности;

*полуограниченный пласт* — водоносный пласт, одна из границ которого оказывает влияние на режим водозаборного сооружения,

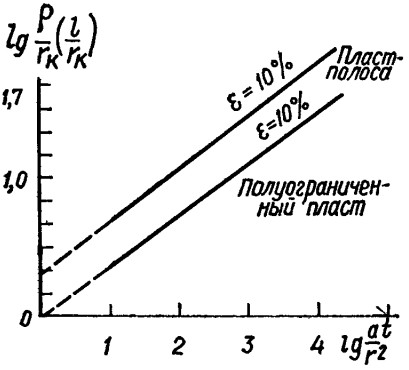



Рис. 28. График для определения условий, в которых расчеты в пласте-полосе и полуограниченном пласте можно вести с ошибкой 10 % по формулам для неограниченного пласта

остальные же границы удалены от водозаборного сооружения в «бесконечность»;

*ограниченный пласт* — водоносный пласт, границы которого оказывают влияние на водозаборные сооружения с нескольких сторон. Среди ограниченных пластов различают: полосообразный пласт (пласт-полосу) — водоносный пласт, имеющий две более или менее параллельные границы, влияющие на работу водозаборного сооружения; полуполосообразный пласт (пласт-полуполоса) — водоносный пласт, три внешние границы которого, оказывающие влияние на режим работы водозаборного сооружения, расположены П-образно; угловой пласт (пласт-угол) — водоносный пласт, который имеет две прямолинейные границы, влияющие на режим работы водозаборного сооружения и пересекающиеся под определенным углом; разновидность пласта-угла — пласт-квадрант, границы которого взаимоперпендикулярны; круговой пласт (пласт-круг) — водоносный пласт сравнительно небольших размеров с замкнутой границей, которая повсеместно оказывает влияние на работу водозаборного сооружения.

Во многих случаях расчетная схема полосового или полуограниченного пласта может быть упрощена до схемы неограниченного пласта. Принимая во внимание допустимую ошибку ε в расчетах, которая может составить не более 10 %, для обоснования такого упрощения удобно воспользоваться графиком (рис. 28), составленным Л. В. Боревским. Если фактическая точка попадает слева от линии графика, то для оценки эксплуатационных запасов подземных вод целесообразно принимать схему неограниченного пласта. Такие графики позволяют оценить целесообразность учета тех или иных границ при схематизации.

**Схематизация начальных и граничных условий на внутренних и внешних границах области фильтрации.** При схематизации начальных и граничных условий на границах рассматриваемой области фильтрации следует исходить из того, что ее гидродинамическое состояние характеризуют величины напоров и расходов на внутренних и внешних границах пластов и их изменения во времени.

Обоснованная схематизация начальных и граничных условий является важнейшим элементом геофильтрационной схематизации.

Начальные условия характеризуют закономерности распределения напоров и расходов на границах и в пределах области фильтрации в природной (бытовой) гидрогеологической обстановке (до начала эксплуатации).

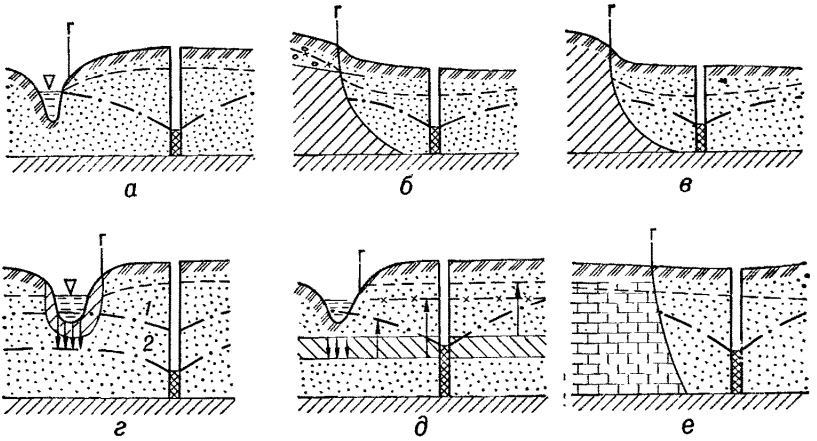



Рис. 29. Условия на границах водоносных пластов в плане:
Г — граница; граничные условия: *а* — I рода; *б* — II рода ($q = \text{const} \neq 0$); *в* — II рода ($q = 0$); *г* и *д* — III рода, *е* — IV рода

При построении геофильтрационной модели возможны два принципиально различных варианта задания начальных условий:

1) задание в отметках уровней (напоров) и величинах расходов на внутренних и внешних границах области фильтрации;

2) задание нулевых начальных условий.

В первом случае в качестве начальных принимаются условия на какой-либо характерный период времени, например, глубокую межень. При этом сезонными и многолетними колебаниями уровней часто пренебрегают, учитывая их малость по сравнению с изменениями уровней при эксплуатации. В тех случаях, когда такими колебаниями напоров и расходов пренебречь нельзя (например, в приречных районах), они находят отражение в граничных условиях.

Во втором случае, исходя из возможности применения принципа суперпозиции при фильтрационных расчетах, начальное распределение уровней и расходов принимается нулевым, задача решается в понижениях и при этом рассматриваются только изменения напорных и расходных характеристик.

Г р а н и ч н ы е у с л о в и я (на внешних и внутренних границах) области фильтрации определяют наиболее важные принципиальные особенности режима подземных вод в естественных и нарушенных условиях.

Принципиально выделяются четыре типа граничных условий (рис. 29), характеризующих условия на внешних плановых границах водоносного горизонта, верхней и нижней границах области фильтрации и в отдельных фрагментах и точках внутри ее.

**Граничное условие I рода,** выражающее зависимость напора от координат области фильтрации и времени:

$$\text{ГУ-I},\ H = f(x, y, t).$$

**Граничное условие II рода** — зависимость расхода от времени и координат:

$$\text{ГУ-II},\ q = f(x, y, t).$$

Это наиболее важные и распространенные граничные условия на внешних границах моделей. В частных достаточно распространенных случаях принимается неизменность напоров и расходов:

$$H(x, y) = \text{const} \text{ и } q(x, y) = \text{const},$$

а при задании нулевых начальных условий

$$H(x, y) = 0 \text{ и } q(x, y) = 0.$$

Последнее условие отражает собой непроницаемую границу (граница выклинивания, экранирующее тектоническое нарушение и т. п.).

Частным случаем является отсутствие граничных условий на контурных границах пласта, т. е. задание условий бесконечности или неограниченности пласта. В этих случаях депрессия до границ не распространяется.

ГУ-II задается обычно на эксплуатационных скважинах и дренажах, родниках, при реализации инфильтрации на поверхность водоносных горизонтов и испарения с уровня грунтовых вод, реализации притока из-за пределов области фильтрации к границам модели и оттока за ее пределы.

ГУ-I задается на внешних границах моделей, самоизливающих скважинах, водопонизительных установках, работающих при постоянном понижении уровня на поверхностных водотоках при совершенной гидравлической связи подземных и поверхностных вод.

**Граничное условие III рода** выражает зависимость между расходом и градиентом напора: $q(x, y) = \Delta H$ или в частном случае $q_L = \alpha(H_0 - H)$, где $H_0$ — постоянный напор на контуре питания.

Граничное условие III рода характеризует перетекание через слабопроницаемые пласты, а также условия затрудненной взаимосвязи подземных и поверхностных вод.

**Граничное условие IV рода** выражает неразрывность течения на границе неоднородности фильтрационных свойств или равенство напоров и расходов:

$$q_{L+0} = q_{L-0} \text{ или } H_{L+0} = H_{L-0}.$$

Граничные условия IV рода, как правило, не задаются, а учитываются непосредственно в расчетной схеме.

На верхней границе геофильтрационной модели обычно реализуются условия II или III рода.

На поверхности грунтовых вод могут быть заданы либо питание или разгрузка — как ГУ-II, либо неизменность уровня — как ГУ-I, либо поверхностные водные источники — как ГУ-III или ГУ-I.

Из изложенного следует, что схематизация на геофильтрационной модели поверхностных водных объектов (естественных и антропогенных) имеет первостепенное значение.

На рис. 30 представлены различные варианты граничных условий I и II рода на поверхности грунтовых вод.

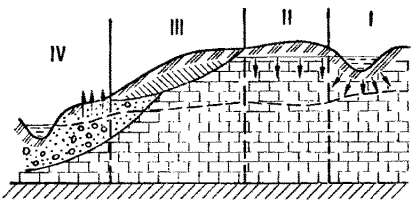



Рис. 30. Схема возможных условий на верхней границе безнапорного водоносного горизонта:

I — питание за счет поверхностных вод; II — питание за счет инфильтрации атмосферных осадков; III — отсутствие питания и испарения; IV — испарение с уровня грунтовых вод

Схематизируя природные условия для целей оценки эксплуатационных запасов подземных вод, следует учитывать, что при эксплуатации водозаборного сооружения в результате значительного понижения уровня воды в эксплуатируемом водоносном горизонте его питание за счет перетекания усиливается. На участках, где в естественных условиях происходит отток, он при этом или уменьшается, или заменяется питанием. Последнее будет иметь место в том случае, когда пьезометрические отметки уровней в пределах депрессионной воронки окажутся ниже отметок уровней в смежном водоносном горизонте.

В некоторых гидрогеологических условиях в процессе эксплуатации может происходить изменение граничных условий. Так, при работе водозаборного сооружения в пласте, гидравлически связанном с поверхностными водотоками через слабопроницаемый слой, в первый период эксплуатации может быть принято граничное условие III рода $q = f(\Delta H)$, где $\Delta H$ — разность между уровнем в реке и уровнем подземных вод под рекой. Если в процессе эксплуатации произойдет понижение уровня ниже подошвы слабопроницаемого слоя, дальнейшее увеличение расхода на границе по мере увеличения $\Delta H$ происходить не будет. Величина расхода будет ограничена пропускной способностью слабопроницаемых отложений. В связи с этим граничное условие III рода перейдет в граничное условие II рода. Изменение граничных условий имеет также место при инверсии источников, прекращении самоизлива скважин, инверсии или снятии испарения.

Участки задания граничных условий I, II и III рода должны быть выделены на геофильтрационных моделях. Задаваемые изменения уровней и расходов на этих участках схематизируются в виде ступенчатых графиков или задаются по линейному либо другому любому функциональному закону.

**Схематизация структуры потока.** В реальных природных условиях все потоки являются пространственными. На геофильтрационных моделях они обычно схематизируются как одномерные, двухмерные или (реже) трехмерные — в зависимости от характера схематизации области фильтрации и граничных условий. Поэтому схематизация структуры потока непосредственно не производится, а необходимость учета тех или иных особенностей структуры потока, рассмотренных в параграфе 5.2, реализуется при схематизации строения рассматриваемой водоносной системы.

**Схематизация системы расположения водозаборных сооружений и режима водоотбора.** Водозаборные сооружения, как правило, состоят из большого числа скважин, беспорядочно расположенных по

площади месторождения в виде одиночных скважин, групп дискретно расположенных скважин, линейных, кольцевых или площадных систем. На геофильтрационных моделях реальные группы скважин схематизируются в виде укрупненных «больших колодцев» с приведенным радиусом (см. гл. 7), контурных систем или укрупненных галерей.

Реальное изменение водоотбора чаще всего схематизируется ступенчатым графиком либо изменением по заданному закону (прямолинейному, параболическому, экспоненциальному). В частном случае расход водозаборного сооружения принимается неизменным и задается его средним значением.

На самоизливающих скважинах, водопонизительных установках и дренажах, где поддерживается заданный уровень, расход не задается. Вместо него принимается условие I рода ($H = \text{const}$ или $H = f(t)$). Последний случай имеет место при планируемом увеличении глубины водопонижения.

**Схематизация полей миграционных параметров и гидрохимической обстановки** производится в тех случаях, когда гидрогеологические прогнозы выполняются для оценки изменения качества подземных вод и обоснования зон санитарной охраны. Эти прогнозы чаще выполняются аналитическими и реже — методом математического моделирования. Ограниченное применение последнего связано с недостаточной разработанностью программного обеспечения и слабостью информационного обеспечения полей миграционных параметров.

В простейшем случае при использовании для прогнозов схем поршневого вытеснения или полного перемешивания, которые удовлетворяют в большинстве случаев требования практики к надежности прогнозов, в геофильтрационную модель вводится дополнительно параметр активной пористости ($n_a$). Область фильтрации, в которой задаются ее значения, по сравнению со всей рассматриваемой областью фильтрации ограничивается контуром месторождения. Этот параметр чаще всего принимается постоянным, реже значения активной пористости задаются как кусочно-однородные.

Гидрохимическая обстановка схематизируется выделением в пределах области фильтрации, охарактеризованной значениями активной пористости водовмещающих пород, границ некондиционных вод или вод с различной минерализацией и компонентным составом. Выделяются участки с различной минерализацией или другими компонентами, лимитирующими качество подземных вод с заданными средними значениями их концентраций. Другими словами, геофильтрационная модель дополняется характеристиками качества подземных вод, характеризующими начальные условия распределения концентраций.

Концентрации отдельных компонентов на участках задания гидродинамических границ могут быть заданы в соответствии с качеством воды источников питания подземных вод на этих границах.

Принципы реализации расчетных гидрогеохимических моделей и схем на базе геофильтрационных моделей приведены в гл. 7 и 8, посвященных аналитическим расчетам и расчетам методами математического моделирования.

### 5.4. ПРИНЦИПЫ ВЫБОРА МЕТОДА ОЦЕНКИ ЭЗПВ

С учетом особенностей рассмотренных ранее различных методов оценки эксплуатационных запасов подземных вод и приведенных примеров можно дать следующие основные рекомендации относительно выбора метода оценки эксплуатационных запасов подземных вод.

1. Гидродинамические методы являются основными методами оценки эксплуатационных запасов и должны быть использованы во всех случаях, когда имеется возможность представить гидрогеологическую обстановку обоснованно в виде расчетной фильтрационной схемы. Их можно использовать, когда в процессе разведки или эксплуатации подземных вод могут быть выявлены источники формирования эксплуатационных запасов и получены параметры для их количественной оценки, установлены границы области фильтрации и условия на этих границах, определены закономерности изменения фильтрационных свойств водовмещающих и слабопроницаемых пород и качества подземных вод по площади и в разрезе. При относительно простых гидрогеологических условиях (сравнительно однородные фильтрационные и емкостные свойства, прямолинейные границы водоносных пластов, неизменяющиеся условия на границах) могут быть использованы аналитические методы, обеспечивающие в таких условиях требуемую точность расчетов. В более сложных гидрогеологических условиях, которые характеризуются существенной неоднородностью гидрогеологических параметров, сложной конфигурацией границ и контуров вод некондиционного состава, изменяющимися во времени источниками формирования эксплуатационных запасов, наиболее целесообразен метод математического моделирования.

2. Гидравлические методы следует использовать в основном в сложных гидрогеологических условиях, и прежде всего при невыясненных до конца источниках формирования эксплуатационных запасов и при невозможности представления реальной гидрогеологической обстановки в виде расчетной фильтрационной схемы. В условиях обеспеченного питания подземных вод этот метод рекомендуется использовать при весьма существенной неоднородности водовмещающих отложений и при известных источниках формирования запасов. Характерным для этого случая является расчет береговых водозаборных сооружений в долинах рек с неоднородным строением водовмещающей среды.

3. Балансовые методы целесообразно применять как основные при оценке эксплуатационных запасов подземных вод отдельных замкнутых структур и конусов выноса, в пределах которых происходит и питание, и разгрузка подземных вод. Кроме того, они являются основными при оценке эксплуатационных запасов подземных вод по родниковому стоку.

4. Методы гидрогеологических аналогов можно использовать в любых гидрогеологических условиях, и прежде всего при наличии данных эксплуатации водозабора-аналога. Наиболее целесообразно их использование в сложной гидрогеологической обстановке, когда отдельные факторы, определяющие величину эксплуатационных

запасов, не могут быть количественно оценены по данным разведочных работ.

Более подробно эти вопросы будут рассмотрены в гл. 13 при характеристике особенностей оценки эксплуатационных запасов различных типов месторождений подземных вод.

Особенности анализа гидрогеологических условий с целью выбора метода оценки эксплуатационных запасов подземных вод рассмотрим только на двух конкретных примерах.

**Пример 1.** Для водоснабжения г. Щучинска (Северный Казахстан) в блюдцеобразном понижении в рельефе были разведаны подземные воды на участке 15 × 15 км (данные В. Г. Склярова). Воды приурочены к весьма неравномерно трещиноватым, сильно метаморфизированным породам архея, представленным слюдисто-кварцевыми сланцами, кварцитами, амфиболитами, гранито-гнейсами (рис. 31). Водовмещающие породы перекрыты суглинками и глинами мощностью до 40—50 м. Питание подземных вод осуществляется за счет инфильтрации атмосферных осадков на обрамляющих блюдцеобразное понижение приподнятых элементах рельефа, где трещиноватые породы выходят на поверхность или покрыты маломощным чехлом дресвяно-щебенистых отложений. Их основная разгрузка происходит восходящей фильтрацией через глинистые отложения и проявляется на поверхности земли в виде мочажин, небольших заболоченностей и солончаков.

Проведенные на участке опытно-фильтрационные работы показали, что водовмещающие породы характеризуются исключительно неоднородными фильтрационными свойствами. На общем фоне слаботрещиноватых пород, где дебиты скважин изменяются от десятых долей до 1—2 л/с, встречаются отдельные зоны с повышенной трещиноватостью, где дебиты достигают 5—20 и даже 80 л/с. Эти зоны связаны с тектоническими нарушениями. На периферии участка часть скважин вообще оказались безводными, причем некоторые вскрыли разломы барьерного типа, выполненные глинистыми образованиями. Большой неравномерностью характеризуется изменение фильтрационных свойств и в разрезе. В большинстве случаев в скважинах, по данным расходометрии, основные зоны водопритока приурочены к интервалам глубин 30—60 м, в то же время по отдельным скважинам эти притоки получены на глубинах 80—90 м и более.

Анализ охарактеризованной природной гидрогеологической обстановки позволяет сделать следующие выводы:

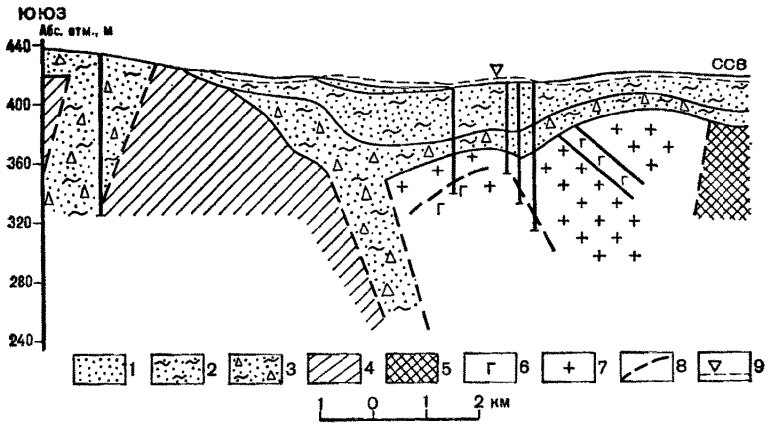



Рис. 31. Гидрогеологический разрез (район г. Щучинска, Казахстан):

*1* — песок; *2* — суглинок; *3* — щебенисто-глинистые отложения коры выветривания; *4* — глина; *5* — сланцы; *6* — кварциты; *7* — амфиболиты; *8* — тектонические нарушения; *9* — уровень подземных вод

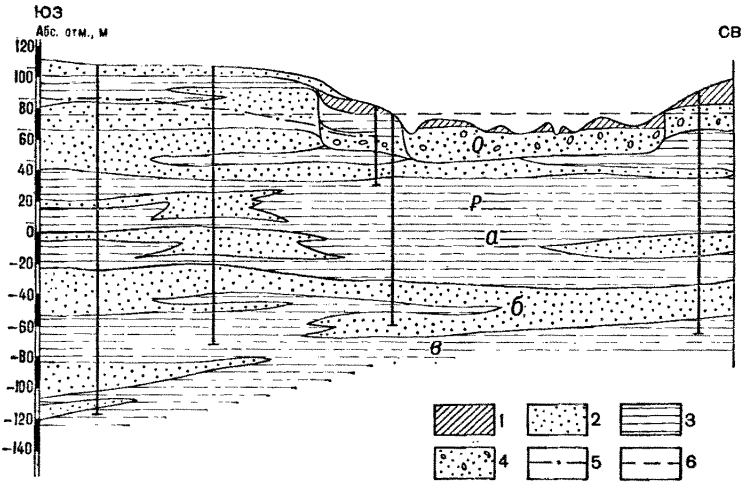



Рис. 32. Схематический гидрогеологический разрез водозаборного участка в районе г. Томска:

*1* — суглинки; *2* — пески; *3* — глины; *4* — песчано-гравийные отложения; *5* — уровень подземных вод в четвертичных отложениях (*Q*); *6* — уровень подземных вод палеогеновых отложений (**P**)

1. На разведанном участке подземные воды приурочены к ограниченной структуре типично трещинно-жильных вод.

2. Основными источниками формирования эксплуатационных запасов здесь являются динамические ресурсы подземных вод, разгрузка которых происходит восходящей фильтрацией, через слабопроницаемые отложения, а также емкостные запасы перекрывающих и водовмещающих пород. Отмеченные выше особенности разгрузки подземных вод определяются лишь приближенной ее количественной оценкой.

3. В связи с наличием разломов барьерного типа строение массива водовмещающих пород носит блоковый характер, причем расположение разломов, а следовательно, и положение границ всех блоков по данным геофизических и буровых работ определить практически невозможно.

4. Водовмещающие породы характеризуются весьма неоднородными фильтрационными свойствами, к тому же каких-либо закономерностей в распределении фильтрационных свойств в плане и разрезе не выявлено.

Из приведенной характеристики следует, что природную гидрогеологическую обстановку рассматриваемого участка представить в виде расчетной фильтрационной схемы невозможно.

В связи с этим оценка эксплуатационных запасов здесь может быть проведена лишь гидравлическим методом по данным длительных опытно-эксплуатационных откачек. Обеспеченность эксплуатационных запасов, в том числе возможность экстраполяции данных опытно-фильтрационных работ на прогнозный водоотбор в таких условиях, должна быть подтверждена балансовыми расчетами (в данном случае приближенными).

**Пример 2.** Для водоснабжения г. Томска разведаны подземные воды в краевой части Западно-Сибирского артезианского бассейна в междуречье рек Томь — Обь. В пределах междуречья повсеместно развиты водоносные четвертичные и палеогеновые отложения. Четвертичные отложения представлены разнозернистыми песками мощностью до 20 м, перекрытыми супесчано-глинистыми образованиями или тонкозернистыми песками. Четвертичные отложения подстилаются сложно чередующимися в плане и разрезе слоями песка и глин различных свит палеогена (рис. 32). Участок водозаборного сооружения расположен в северо-восточной части междуречья в четырех километрах от реки Томь. Общая мощность отложений палеогена здесь составляет 100—120 м, в том числе песчаных прослоев — 60—80 м. В верхней части палеогенового разреза преобладают глины (пласт *а*) с подчиненными включениями линз

и прослоев песчаных образований. В средней части прослеживается выдержанный пласт водоносных песков с прослоями глин (пласт *б*), подстилаемых в нижней части толщей глин (пласт *в*).

Анализируя разрез в изучаемом районе, можно выделить: 1) безнапорный водоносный горизонт в четвертичных отложениях; 2) слабопроницаемый пласт глин в верхней части палеогеновых отложений; 3) напорный водоносный комплекс в палеогеновых отложениях; 4) слабопроницаемый пласт глин в нижней части палеогеновой толщи.

По данным разведочных работ установлено, что наиболее продуктивным для организации централизованного водоснабжения является водоносный комплекс в палеогеновых отложениях, который характеризуется высокими и однородными фильтрационными свойствами, значительными глубинами допустимого снижения уровней.

Анализ уровенных поверхностей водоносного комплекса палеогеновых отложений и водоносного горизонта четвертичных отложений показал, что в естественных условиях повсеместно подземный поток направлен к р. Томь. Соотношение уровней в вертикальном разрезе позволяет предполагать, что на водораздельных пространствах происходит нисходящая фильтрация подземных вод четвертичных отложений через пласт палеогенных глин в водоносный комплекс в палеогеновых отложениях, в долине реки происходит разгрузка подземных вод палеогена в водоносный горизонт четвертичных отложений, который, в свою очередь, дренируется р. Томь.

В то же время эти соображения могут быть приняты только как гипотеза, так как разность уровней является необходимым, но недостаточным условием для обоснования наличия перетекания. Правда, уклон пьезометрической поверхности к реке свидетельствует о дренирующей роли последней, однако интенсивность перетекания при очень низких фильтрационных свойствах разделяющих отложений может быть неосущественна.

Поэтому взаимосвязь подземных вод палеогенных и четвертичных отложений устанавливалась по данным опытно-фильтрационных работ и эксплуатации действующего водозаборного сооружения. При проведении опытных откачек снижение уровня воды в четвертичных отложениях зафиксировано не было. Однако этот факт еще не свидетельствует об отсутствии взаимосвязи подземных вод через глинистую кровлю палеогеновых отложений, так как откачки были кратковременными, с недостаточным водоотбором для проявления процессов перетекания. Опыт эксплуатации действующего водозаборного сооружения показал наличие взаимосвязи подземных вод четвертичных и палеогеновых отложений.

Из анализа приведенных данных следует, что, несмотря на сложнослоистое строение разреза, гидрогеологические условия участка Томского водозаборного сооружения могут быть представлены в виде типовой расчетной схемы, в которой основной водоносный комплекс в палеогеновых отложениях можно представить в виде однородного пласта, ограниченного сверху и снизу слабопроницаемыми пластами. Поскольку фильтрационные свойства разделяющих слабопроницаемых пород однозначно установлены не были, при подсчете эксплуатационных запасов эта расчетная схема может быть принята в двух вариантах: 1) водоносный пласт в палеогеновых отложениях практически изолирован от вышележащего водоносного горизонта; основным источником формирования эксплуатационных запасов являются упругие запасы пласта; 2) водоносные пласты в палеогеновых и четвертичных отложениях взаимосвязаны через слабопроницаемый пласт глин; основными источниками формирования эксплуатационных запасов являются динамические и привлекаемые ресурсы.

Очевидно, расчет по первому варианту дает наиболее гарантированные запасы, по второму — более реально учитывает природные гидрогеологические условия.

Переходя к выбору метода оценки эксплуатационных запасов, отметим, что в рассмотренном примере имеется возможность представления гидрогеологических условий в виде типовой расчетной схемы: источники формирования эксплуатационных запасов установлены, параметры, необходимые для их количественного определения, могут быть получены по результатам опытно-фильтрационных работ и наблюдений за режимом подземных вод; фильтрационные параметры водосодержащих пород характеризуются относительной однородностью. В этих условиях для оценки запасов наиболее целесообразно применение гидродинамического метода.

**Контрольные вопросы.** 1. Что такое схематизация гидрогеологических условий и для чего она проводится? 2. Что представляет собой природная гидрогеологическая модель и что является основой для ее построения? 3. Чем отличается геофильтраци-

онная модель от природной гидрогеологической модели? 4. Каким требованиям должна отвечать расчетная фильтрационная схема? 5. Как осуществляется схематизация геолого-гидрогеологического разреза при составлении природной модели? 6. Какие генетические закономерности используются при картировании полей фильтрационных параметров? 7. Почему использование фильтрационных параметров слабопроницаемых пород, определенных по лабораторным данным, во многих случаях приводит к ошибкам при расчетах эксплуатационных запасов подземных вод? 8. С какими полями должно корректироваться поле гидродинамических напоров? 9. Что такое граничные условия водоносных пластов и как они используются при оценке ЭЗПВ? 10. Какие схемы пластов выделяются по конфигурации их границ в плане? 11. Какова роль схематизации природной обстановки в выборе метода оценки эксплуатационных запасов подземных вод?

# ГЛАВА 6. ОЦЕНКА ОБЕСПЕЧЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

## 6.1. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ОЦЕНКИ

Как уже отмечалось, расчет обеспеченности эксплуатационных запасов подземных вод является первым этапом их оценки, при которой устанавливается верхний предел возможного отбора подземных вод. Эта оценка необходима для определения масштабов использования подземных вод в пределах разведуемого месторождения и правильного учета в геофильтрационной модели отдельных источников формирования эксплуатационных запасов.

Обеспеченность эксплуатационных запасов подземных вод оценивается балансовым методом, сущность которого заключается в составлении баланса подземных вод в районе эксплуатации водозаборных сооружений. При этом определяется расход подземных вод, который может быть получен водозаборными сооружениями в пределах разведуемого месторождения в течение заданного срока эксплуатации за счет привлечения отдельных источников формирования, входящих в уравнение (1.6). Возможные источники формирования оцениваются раздельно, а затем суммируются. При этом необходимо учитывать, что природные ресурсы (запасы) подземных вод не могут быть полностью привлечены к водозаборным сооружениям.

Применение балансовых методов заключается в оценке всех составляющих баланса подземных вод на площади подсчета эксплуатационных запасов. Приходные и расходные статьи баланса определяются с учетом естественных и нарушенных эксплуатацией условий. На основании балансовых расчетов можно дать оценку обеспеченности эксплуатационных запасов, подсчитанных отдельно и независимо гидродинамическими или гидравлическими методами. Критерием обеспеченности является баланс проектного дебита водозаборного сооружения $Q_э$ и составляющих его формирования за счет емкостных запасов $V_е$ и динамических ресурсов $Q_д$, а также ресурсов $Q_{пр}$, привлекаемых в процессе эксплуатации подземных вод из поверхностных водотоков, водоемов, смежных водоносных горизонтов и т. д. Обеспеченными следует считать эксплуатационные запасы при соблю-

дении равенства (1.6), которое может быть записано в следующем сокращенном виде:

$$Q_э = \alpha_1 Q_д + \alpha_2 \frac{V_e}{t_э} + Q_{пр}, \qquad (6.1)$$

где $\alpha_1$ — доля использования динамических ресурсов; $\alpha_2$ — доля использования емкостных запасов; $t_э$ — время, на которое рассчитываются эксплуатационные запасы.

При оценке эксплуатационных запасов подземных вод на неограниченно долгий срок ($t_э \to \infty$) балансовое уравнение будет иметь вид

$$Q_э = \alpha_1 Q_д + Q_{пр}. \qquad (6.2)$$

В условиях искусственного пополнения запасов подземных вод в балансовых расчетах необходимо учитывать также величины искусственных запасов и ресурсов.

Для определения составляющих баланса можно использовать методы, рассмотренные в гл. 2 и 3. Для расчетов принимаются усредненные их значения для всего балансового района, охватывающего площадь формирования эксплуатационных запасов.

Когда эксплуатационные запасы подземных вод в многолетнем разрезе формируются за счет динамических ресурсов, при оценке их обеспеченности этими ресурсами могут приниматься среднегодовые, среднемеженные или среднемесячные значения. Использование тех или иных характеристик динамических ресурсов определяется возможностью регулировать обеспечение водоотбора другими источниками формирования эксплуатационных запасов во внутригодовом или многолетнем разрезе (прежде всего, емкостными запасами).

Сказанное выше относится и к тем случаям, когда эксплуатационные запасы формируются за счет привлекаемых ресурсов из поверхностных водоемов и водотоков. Так, в долинах рек, где отсутствует какая-либо регулирующая емкость водосодержащих пород (например, в трещиноватых породах, маломощном аллювии), обеспеченность эксплуатационных запасов подземных вод оценивается по минимальному 30-дневному стоку рек.

В тех случаях, когда регулирующая емкость водовмещающих пород позволяет обеспечить водоотбор в течение меженного периода (например, при мощности аллювиального водоносного горизонта 20—40 м) с последующим восполнением сработанной емкости в периоды с более высокой водностью, в расчет обеспеченности эксплуатационных запасов подземных вод может приниматься среднемеженная или среднегодовая величина динамических и привлекаемых ресурсов. При большой регулирующей емкости водоносных горизонтов, например в артезианских бассейнах, конусах выноса, межгорных впадинах и т. д., обеспеченность эксплуатационных запасов может оцениваться с учетом среднемноголетней величины динамических и привлекаемых ресурсов подземных вод.

Вероятность превышения расчетных величин динамических ресурсов подземных вод и расходов поверхностных водотоков прини-

мается в зависимости от категории водозаборного сооружения по надежности подачи воды.

СНиП 2.04.02-84 предусмотрено разделение систем централизованного водоснабжения по степени обеспеченности подачи воды на три категории:

I категория — допускается снижение подачи воды на хозяйственно-питьевые нужды не более 30 % расчетного расхода, на производственные — до предела, установленного аварийным графиком предприятия; длительность снижения не должна превышать 3 суток. Перерыв в подаче не более 10 мин. К этой категории относятся водозаборы населенных пунктов с населением более 50 тыс. человек.

II категория — величина допустимого снижения подачи воды та же, что и при I категории; длительность снижения не должна превышать 10 сут. Перерыв в подаче не более 6 ч. Водозаборы населенных пунктов с населением от 5 до 50 тыс. человек.

III категория — величина допускаемого снижения подачи воды та же, что и при I категории; длительность снижения не должна превышать 15 сут. Перерыв в подаче не более 24 ч. Водозаборы населенных пунктов с населением менее 5 тыс. человек.

Категорию сельскохозяйственных групповых водозаборов следует принимать по населенному пункту с наибольшим числом жителей.

Для каждой категории водозаборного сооружения при обеспечении эксплуатационных запасов подземных вод только поверхностным или родниковым стоком принимается следующая вероятность превышения (обеспеченность) расходов поверхностных водотоков и родников:

| Категория | Обеспеченность, % |
|---|---|
| I | 95 |
| II | 90 |
| III | 85 |

Для поверхностных вод принимается обеспеченность среднемесячных расходов воды, для родниковых — при непосредственном каптаже родников — среднесуточных. При наличии других источников формирования эксплуатационных запасов (например, емкостных запасов) могут учитываться и другие расходы (среднегодовые) указанной в таблице обеспеченности (либо принимаются как среднемноголетние величины).

При сопоставлении производительности водозаборных сооружений с емкостными запасами и восполняемостью подземных вод важно установить площадь балансового района, т. е. площадь распространения водоносного горизонта, в пределах которой линии тока при эксплуатации будут направлены к водозаборному сооружению. Если площадь питания водозаборного сооружения включает территорию в пределах всех боковых границ водоносного горизонта, то балансовый район для оценки эксплуатационных запасов выделяется довольно

точно по контурам этих границ. Это возможно, например, в условиях малых артезианских бассейнов (мульд) и ограниченных структур. Для водоносных горизонтов, находящихся в зоне влияния местной речной сети, иногда удобно выделять балансовые районы исходя из соответствующей площади стока речного бассейна. Однако во многих случаях площадь стока подземных вод к водозабору не распространяется до тех или иных границ пласта, и тогда контуры балансовых районов устанавливаются приблизительно.

Применяя балансовые методы, можно оценить только некоторую среднюю величину снижения уровня воды в пределах изучаемой территории. Естественно, что эксплуатационные понижения уровня воды в отдельных скважинах водозаборного сооружения при помощи этих методов рассчитывать нельзя.

### 6.2. ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ПО ДЕБИТАМ РОДНИКОВ

Разновидностью балансовых методов является оценка эксплуатационных запасов подземных вод по дебитам родников. Применять этот метод целесообразно в условиях, где возможен отбор подземных вод каптажем родников. Расчеты в этом случае сводятся к определению обеспеченности дебитов родников при эксплуатации исходя из данных о гидрогеологических условиях питающего водоносного горизонта, условий выхода и режима родников.

При оценке запасов подземных вод по дебитам родников учитываются следующие факторы: изменчивость дебита во времени, продолжительность наблюдений за режимом родников, наличие хорошо изученных родников-аналогов, режим водопотребления. При этом важнейшими характеристиками дебита родников являются: норма расхода, минимальный и максимальный расходы, коэффициент неравномерности и модульный коэффициент. *Норма расхода* — это среднемноголетний дебит родников. *Минимальный* и *максимальный расходы* соответствуют наибольшему $Q_{max}$ и наименьшему $Q_{min}$ дебитам родника, устанавливаемым при режимных наблюдениях. Коэффициент неравномерности $\alpha_н$ представляет собой отношение максимального расхода к минимальному, т. е.

$$\alpha_н = \frac{Q_{max}}{Q_{min}}. \tag{6.3}$$

*Модульный коэффициент* $\alpha_м$ — это отношение расхода родника $Q_t$ в любой момент времени к норме расхода $Q_н$:

$$\alpha_м = \frac{Q_t}{Q_н}. \tag{6.4}$$

Оценка эксплуатационных запасов подземных вод по дебитам родников проводится по величине их минимального среднесуточного дебита при вероятности превышения (обеспеченности) 85, 90 или 95 %. Назначение той или иной вероятности превышения определяется категорией водозаборного сооружения по надежности водо-

подачи. Если предусматривается режим водоотбора, соответствующий режиму изменчивости родникового стока по сезонам года, то эксплуатационные запасы оцениваются по среднегодовому расходу родников той же вероятности превышения.

Определение расходов родников с заданной вероятностью превышения при наличии длинного ряда наблюдений (минимум 10 точек) производится построением эмпирической и аналитической кривых обеспеченности (см. гл. 3).

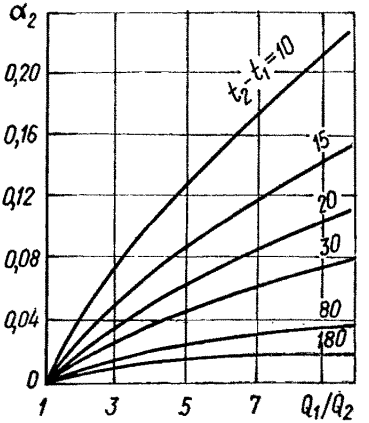


Рис. 33. График для определения параметра $\alpha_2$ в формуле (6.9)

Если цикл наблюдений за режимом родников непродолжителен, то для оценки эксплуатационных запасов в таких условиях может быть применен метод аналогии. В качестве аналогов принимаются родники с длительными рядами наблюдений, если они и исследуемые родники находятся примерно в одинаковых гидрогеологических условиях. Перенос характеристик родника-аналога следует производить при помощи поправочных коэффициентов. В частности, для этого можно воспользоваться уравнением Н. А. Плотникова

$$M_x = \alpha M_a, \tag{6.5}$$

где $M_x$ — искомая характеристика за многолетний период (например, среднегодовая норма расхода родника); $M_a$ — та же характеристика родника-аналога за многолетний период; $\alpha$ — поправочный коэффициент:

$$\alpha = \frac{m_x}{m_a}, \tag{6.6}$$

где $m_x$ — характеристика исследуемого родника за короткий срок наблюдений (например, средний минимальный или максимальный расход); $m_a$ — характеристика родника-аналога за тот же период наблюдений.

В качестве аналога можно использовать также величины атмосферных осадков или поверхностного стока. В этих случаях следует установить корреляционную связь между расходом родников и осадками или поверхностным стоком (если он имеется) и на основании этой связи построить длинный ряд наблюдений.

Минимальный расход родника при отсутствии замеров в межень можно определить по формулам Буссинеска — Майэ:

$$Q_{min} = Qe^{-\varphi_1(t-t_0)}; \tag{6.7}$$

$$Q_{min} = \frac{Q_0}{[1+\varphi_2(t-t_0)]^2}, \tag{6.8}$$

где $Q_{min}$ — искомый минимальный расход в момент времени $t$; $Q_0$ — расход в начальный период времени $t$; $\varphi_1$ — постоянная для каждого

родника, определяемая по зависимости

$$\varphi_1 = \frac{\ln Q_1 - \ln Q_2}{t_2 - t_1}; \qquad (6.9)$$

$\varphi_2$ — постоянная для родника, определяемая по графику (рис. 33).

Расходы родника $Q_1$ и $Q_2$ устанавливаются во время отсутствия питания водоносного горизонта соответственно в некоторые начальный $t_1$ и конечный $t_2$ моменты времени периода равномерного спада расходов. Формула (6.7) применима при значительной мощности водоносного слоя. При небольшой мощности водоносного горизонта рекомендуется формула (6.8).

### 6.3. ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ ОБЕСПЕЧЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В РАЗЛИЧНЫХ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Методика оценки обеспеченности эксплуатационных запасов подземных вод будет различной для различных типов месторождений, так как входящие в уравнение (1.6) коэффициенты $\alpha$ зависят от условий формирования эксплуатационных запасов подземных вод.

Для месторождений подземных вод, расположенных на территории ограниченного балансового района, в пределах которого происходит полная разгрузка поступающей в этот район воды, и при условии, что депрессионная воронка достигает границ района, динамические ресурсы могут быть полностью привлечены к водозаборным сооружениям.

В этих случаях коэффициенты $\alpha_1$ и $\alpha_3$ могут быть приняты равными единице. Коэффициенты $\alpha_2$ и $\alpha_4$ определяются принятым допустимым понижением уровня подземных вод. Такие условия характерны прежде всего для ограниченных структур с трещинно-карстовыми водами, небольших межгорных впадин, конусов выноса.

Для месторождений подземных вод, в которых воронка депрессии не доходит до границ балансового района, к водозаборным сооружениям может быть привлечена только та часть динамических ресурсов, разгрузка которых до эксплуатации происходила в зоне развития будущей депрессии. В этих условиях коэффициенты $\alpha_1$ и $\alpha_3$ всегда меньше единицы, поэтому при проведении балансовой оценки нужно ориентировочно установить возможную зону развития депрессии при принятом сроке эксплуатации и при оценке обеспеченности учесть только часть динамических ресурсов. Такие условия характерны для крупных межгорных впадин, конусов выноса, бассейнов трещинных грунтовых вод, отдельных артезианских бассейнов и т. д. В этих случаях к водозаборным сооружениям могут быть привлечены динамические ресурсы, разгрузка которых происходит путем родникового стока, испарением, фильтрацией в речную сеть, расположенную в пределах будущей воронки депрессии. Ту часть динамических ресурсов, которая уходила за пределы структуры, в оценку обеспеченности принимать нельзя.

Для месторождений подземных вод в речных долинах, где основным источником формирования является поверхностный сток, оценка обеспеченности выражается в определении самой величины поверхностного стока и пропускной способности русловых отложений. При этом в расходе поверхностного водотока необходимо учитывать и поступление в реку уже использованных вод.

В зависимости от категории водозаборного сооружения должна приниматься вероятность превышения от 95 до 85 %. Для месторождений в речных долинах, в которых в меженный период эксплуатационные запасы подземных вод в определенной степени формируются за счет сработки емкостных запасов, при оценке обеспеченности необходимо доказать, что общий объем поверхностного стока в год достаточен для обеспечения проектируемого отбора и восполнения осушенной в меженный период емкости и что пропускная способность русловых отложений позволяет перехватить необходимую часть паводкового стока.

Для месторождений подземных вод, где эксплуатационные запасы формируются только за счет сработки емкостных (гравитационных или упругих) запасов, отдельной оценки обеспеченности эксплуатационных запасов проводить не следует. В этих случаях необходимо только убедиться в том, что в геофильтрационной модели правильно приняты параметры, характеризующие емкостные свойства водовмещающих пород. В то же время в тех случаях, когда оценка эксплуатационных запасов проводится в районах действующих водозаборов и воронка депрессии может быть оконтурена по фактическим данным, используемые емкостные запасы при известной величине водоотдачи могут быть подсчитаны по объему депрессионной воронки. Так же могут быть определены емкостные запасы по объему депрессионной поверхности, если последняя устанавливается по геологическим границам (небольшие структуры хорошо проницаемых отложений, окруженные со всех сторон слабопроницаемыми породами). Устанавливать прогнозную воронку расчетным путем не рекомендуется, так как практически невозможно определить величину радиуса этой воронки.

При расчете водозаборных сооружений гидродинамическим методом условия на внешних и внутренних границах геофильтрационной модели должны приниматься с обязательным учетом рассчитанных при оценке обеспеченности источников формирования. Баланс источников формирования дебитов водозаборных сооружений, полученный по данным математического моделирования, должен сопоставляться с данными по этим источникам, полученными при оценке обеспеченности эксплуатационных запасов подземных вод независимыми методами.

Количественная оценка отдельных источников формирования может быть выполнена как по непосредственным замерам, так и путем гидродинамических и балансовых расчетов и с использованием метода аналогии.

При оценке эксплуатационных запасов подземных вод для целей орошения в общем балансе их обеспеченности при непосредственном

расположении водозаборных сооружений на орошаемых массивах или вблизи их необходимо учитывать обратное поступление части отбираемых подземных вод в водоносный горизонт за счет фильтрации из оросительной сети и дополнительного инфильтрационного питания на площадях орошения.

Высокая динамичность подземных вод определяет изменчивость их питания во внутригодовом и многолетнем разрезе. Поэтому периодически меняется и соотношение динамических ресурсов и емкостных запасов в общем балансе водоотбора, что надо учитывать при оценке обеспеченности ЭЗПВ.

При уменьшении динамических ресурсов возрастает доля сработки емкостных запасов. По мере сработки емкостных запасов увеличивается доля поступления в водозаборное сооружение динамических и привлекаемых ресурсов. Коэффициент использования динамических ресурсов может быть в разные по водности годы постоянным (в том числе равным единице), но их абсолютная величина — различной. Это же относится и к привлекаемым ресурсам за счет поверхностного стока рек.

Таким образом, если динамические и привлекаемые ресурсы, обеспечивающие водоотбор, переменны во времени, то их изменения должны либо компенсироваться изменением доли сработки емкостных запасов, либо при незначительной емкости водоносной системы и даже при коэффициенте использования, равном 1, их абсолютная величина, как уже указывалось, принимается в соответствии с требованиями к обеспеченности надежности работы различных категорий водозаборных сооружений 95, 90 или 85 %.

Как уже отмечалось, при практически полном отсутствии емкостных запасов принимаются соответствующие среднесуточные расходы для родниковых вод, при обеспечении эксплуатационных запасов только поверхностным стоком — 30-суточные либо среднемесячные.

При наличии емкостных запасов вопрос о том, какая величина восполняемых ресурсов (динамических и привлекаемых), какого уровня обеспеченности и по отношению к какому периоду может быть положена в основу оценки обеспеченности ими эксплуатационных запасов, решается в каждом случае индивидуально, в зависимости от амплитуды изменчивости величины восполняемых запасов и возможности ее компенсации усилением сработки емкостных запасов в тот или другой период времени.

При этом возможны следующие варианты:

1. Емкостные запасы легко компенсируют возможную изменчивость восполняемых как во внутригодовом, так и в многолетнем разрезе. В этом случае в основу оценки обеспеченности эксплуатационных запасов может быть положена величина среднемноголетних восполняемых ресурсов.

2. Емкостные запасы компенсируют указанную изменчивость во внутригодовом разрезе. В этом случае принимается величина среднегодового питания года 95 % обеспеченности (или соответственно требованиям 85 и 90 %).

3. Емкостные запасы компенсируют указанную внутригодовую

или сезонную изменчивость в течение цикла маловодных лет. В этом случае рассчитывается величина среднегодовой обеспеченности ресурсов за лимитирующий маловодный период. В этих случаях емкостные запасы могут компенсировать многолетнюю изменчивость восполняемых ресурсов не полностью, а лишь частично. Тогда подбором по соотношению возможной сработки емкостных запасов и их восполнения восполняемыми ресурсами определяется, какая обеспеченность последних может быть положена в основу оценки эксплуатационных запасов.

4. Емкостные запасы, срабатываемые в меженные маловодные периоды, компенсируются в многоводные. В этом случае определяются максимальная продолжительность критического меженного периода и соответствующие этому периоду восполняемые ресурсы 95 %-й обеспеченности. К этому случаю относятся также водозаборные сооружения в долинах полностью пересыхающих и перемерзающих рек, когда в критический период сток полностью отсутствует, а затем происходит восполнение запасов в течение паводочного или многоводного периодов.

Задача оценки обеспеченности эксплуатационных запасов подземных вод в режиме периодической сработки-восполнения наиболее актуальна для месторождений, приуроченных к речным долинам, а также в условиях, где сток рек является важнейшим источником формирования ЭЗПВ. Поэтому в таких случаях часто расчетный срок эксплуатации водозаборного сооружения определяется продолжительностью водно-критического периода, который может быть приурочен к сезонной межени или циклу маловодных лет.

В районах Сибири и Крайнего Севера таким водно-критическим периодом является период перемерзания русел рек, продолжающийся до 250—300 сут; аналогичные по продолжительности периоды пересыхания рек характерны для засушливых районов. Водно-критический период здесь может охватывать цикл маловодных лет, продолжающийся в Центральном Казахстане до 5—7 лет.

Во всех этих случаях после расчета водозаборного сооружения на срок работы, соответствующий водно-критическому периоду, обязательно должна быть выполнена оценка восполнения запасов в многоводные периоды за счет привлечения паводочного стока при его инфильтрации через русла и в условиях выхода воды на пойму.

Расчеты восполнения производятся в следующей последовательности:

1. С учетом гидрологических характеристик реки оценивается объем стока, который может участвовать в восполнении через русло.
2. Оценивается предельная пропускная способность русла при различном режиме стока.
3. Оценивается объем возможного восполнения через русло.

При выходе воды на пойму дополнительно оценивается:

4. Периодичность выхода воды на пойму.
5. Площадь и высота затопления в годы различной водности.
6. Объем инфильтрации через пойменные отложения.

В отдельных случаях эксплуатационные запасы лимитируются не возможностью сработки емкости, а возможностью восполнения сработанных запасов.

Величина восполнения запасов может быть оценена также применительно к фактически наблюдаемому циклу чередования многоводных и маловодных лет за длительный период наблюдений.

В условиях действующих водозаборов может быть оценена в течение многолетнего цикла величина фактической сработки и восполнения запасов в годы различной водности.

Такой подход был реализован при оценке эксплуатационных запасов Мало-Кизильского месторождения подземных вод на Южном Урале (Б. В. Боревский, Г. А. Никитина, С. В. Палкин, 1976). Оценка обеспеченности эксплуатационных запасов на этом месторождении в условиях периодической сработки емкостных запасов аллювия и их последующего восполнения поверхностным стоком реки выполнена балансовым методом на основе изучения опыта эксплуатации действующего водозаборного сооружения.

Мало-Кизильское месторождение подземных вод приурочено к Мало-Кизильской синклинальной структуре, ядро которой площадью около 30 км$^2$ сложено сильно-трещиноватыми и раскарстованными нижне-каменноугольными известняками (рис. 34). В гидрогеологическом отношении эта часть структуры представляет собой бассейн трещинно-карстовых вод, так как окружающие структуру терригенные эффузивные породы обладают весьма низкой проницаемостью и по отношению к известнякам могут рассматриваться как безводные. Структура пересекается долиной р. Малый Кизил, которая выполнена довольно мощной толщей аллювиальных отложений, залегающих непосредственно на известняках (см. рис. 34).

Водопроводимость известняков в долине реки достигает первых десятков тысяч м$^2$/сут. Аллювий реки имеет мощность до 30—40 м, средняя мощность в пределах развития интенсивно трещиноватых известняков — 18 м. Состав аллювия: преимущественно пески и гравийно-галечники с песчаным заполнителем.

У южного замыкания структуры расположен водозабор, эксплуатирующийся с 1934 г. В результате работы водозаборного сооружения отмечается периодическое снижение уровня в межень по всей структуре как в известняках, так и в аллювиальных отложениях и последующее восполнение их в паводок — полное или частичное (рис. 35). Степень восполнения определяется характером, величиной и продолжительностью паводка, а также высотой выхода воды на пойму, площадью и периодом ее затопления.

Режим стока реки неравномерен, отличается низкой зимней и летней меженью, коротким и высоким весенним половодьем, наличием довольно частых осенних паводков. В годы различной водности сток реки сильно меняется.

Сведений о режиме стока реки, условиях разгрузки подземных вод и положения их уровня до начала эксплуатации практически нет. Известно только, что на участке выхода реки из структуры ранее имелись крупные родники. В результате работы водозаборного сооружения сток реки существенно нарушен вследствие поглощения его через русло реки. Объем поглощения зависит от величины водоотбора, пропускной способности русла и величины расхода реки.

В период разведки месторождения в 1973—1976 гг. были проведены наблюдения за режимом уровней подземных вод и стока в пределах всей структуры. По одной скважине, расположенной в 2 км от водозаборного сооружения, имеются данные наблюдений за уровнем подземных вод в известняках, начиная с 1960 г. Водоотбор в этот период составлял 800—1000 л/с.

Наблюдения за режимом стока реки дали следующие результаты. При расходах реки до 700 л/с на входном по отношению к структуре створе речной сток полностью поглощается. При увеличении расхода до 4—5 тыс. л/с величина поглощения увеличивается незначительно и лимитируется пропускной способностью русла реки. При дальнейшем увеличении расхода реки вода выходит на пойму, и характер поглощения стока меняется, а объем его становится функцией площади и времени затопления поймы. Графики связи величиины поглощения от расхода реки на входе в структуру приведены на рис. 36.

По данным наблюдений за режимом работы водозаборного сооружения, основные источники обеспеченности эксплуатационных запасов ($Q_э$) могут быть представлены

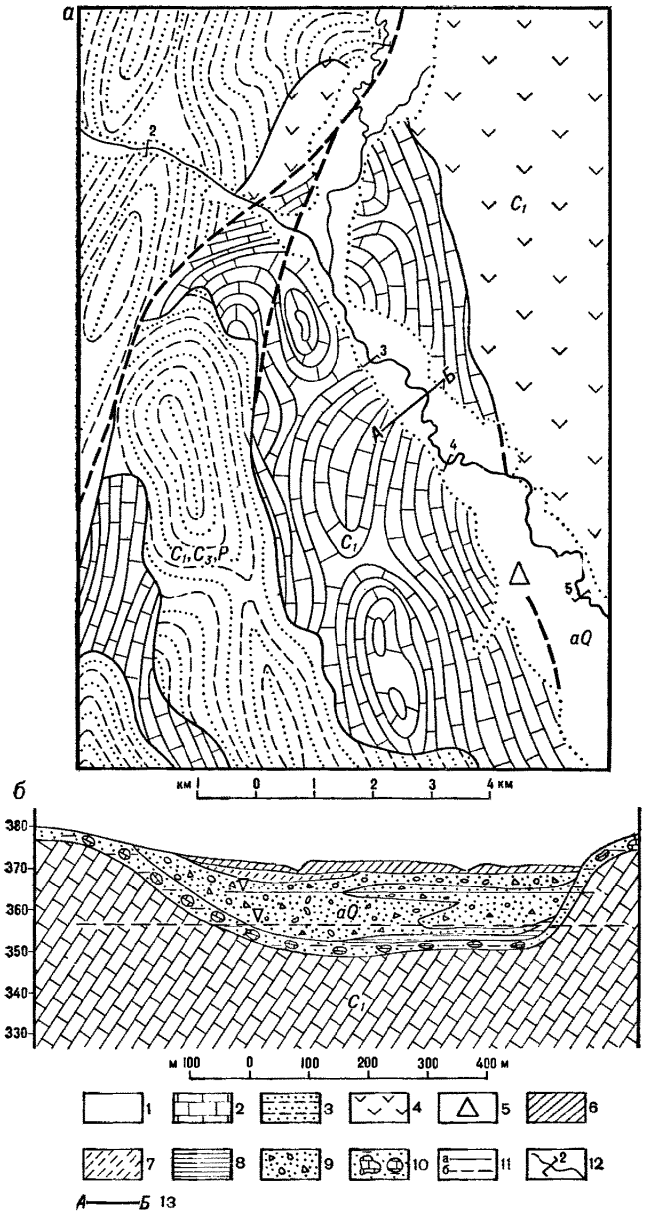



Рис. 34. Гидрогеологическая карта (*а*) и разрез (*б*) Мало-Кизильского месторождения подземных вод (по Г. А. Никитиной, 1976):

*1* — долина р. Малый Кизил; *2* — известняки; *3* — терригениая осадочная толща; *4* — вулканогенно-осадочиая толща; *5* — водозаборное сооружение; *6* — суглинок; *7* — супесь; *8* — глина; *9* — песчано-гравийно-галечниковые отложения; *10* — дресвяно-глыбовые отложения коры выветривания известняков; *11* — уровень подземных вод после окончания восполнения запасов (*а*) и в конце глубокой межени (*б*) в маловодный 1976 г.; *12* — гидрометрический пост; *13* — линия разреза

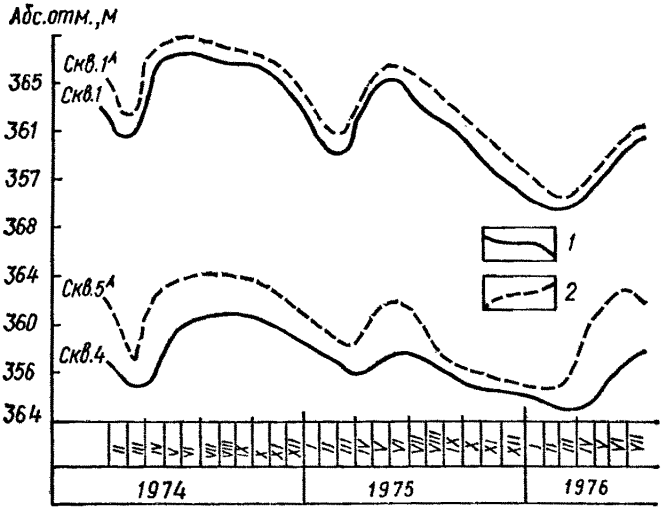



Рис. 35. Графики режима уровней подземных вод на Мало-Кизильском месторождении:

*1* — уровень трещинно-карстовых вод; *2* — уровень грунтовых вод в аллювиальных отложениях

следующим образом:

$$Q_э = Q_д + \frac{V_{e.al}}{T} + Q_{пр.тр},$$

где $Q_д$ — динамические естественные ресурсы, формирующиеся на площади месторождения между входным и замыкающим створами (составляют около 130 л/с); $V_{e.al}$ — емкостные запасы аллювиальной толщи, срабатываемые за период $T$, когда водоотбор $Q_э$ не обеспечен суммой $Q_д + Q_{пр.тр}$ и восполняемые полностью в периоды, когда $(Q_д + Q_{пр.тр}) > Q_э$; $Q_{пр.тр}$ — поглощение транзитного стока — привлекаемые ресурсы.

Из приведенного балансового уравнения видно, что не только составляющие баланса водоотбора, но и сама величина $Q_э$ могут быть различными для лет разной водности.

В рассматриваемых условиях величина обеспеченности эксплуатационных запасов подземных вод может быть оценена следующим образом.

На первом этапе на основе изучения режима работы водозаборного сооружения и комплекса полевых гидрогеологических и гидрологических работ определяются балансовые составляющие фактического водоотбора и необходимые для оценки этих составляющих параметры (обратная задача).

На втором этапе на основе известных параметров и балансовых составляющих определяется максимально возможная производительность водозаборного сооружения, соответствующая величине обеспеченности эксплуатационных запасов при заданных условиях эксплуатации (например, при оптимальной сработке емкости аллювия). Для этого на основе данных об объеме сработанной емкости аллювия за период отсутствия транзитного поверхностного стока и о суммарном водоотборе за этот же период определяется величина эффективной водоотдачи. В рассматриваемых условиях по материалам наблюдений за 4 меженных периода она составила в среднем 0,14 при колебаниях частных значений от 0,13 до 0,16. Эта величина позволила оценить суммарные емкостные запасы аллювия, составившие $35 \cdot 10^6$ м$^3$, и удельные емкостные запасы, составившие на один метр мощности $1{,}96 \cdot 10^6$ м$^3$.

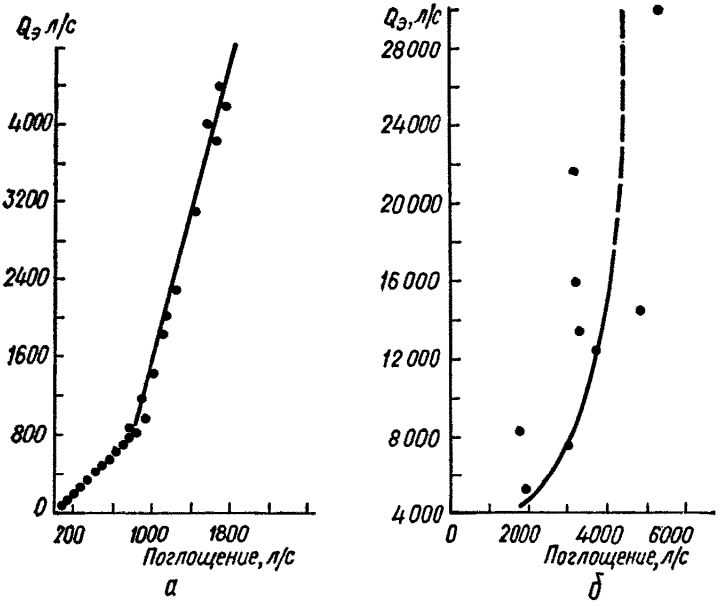



Рис. 36. Графики зависимостей величины поглощения поверхиостного стока от суммарного расхода на входных створах *1* и *2*:

*а* — при расходах рекн до 4,5 м³/с; *б* — при расходах рекн от 4,5 до 30 м³/с н выходе воды на пойму

Максимальные привлекаемые ресурсы за счет поглощения транзитного стока могут быть определены по приведенным на рис. 36 графикам для любых значений стока.

Учитывая, что при заливе поймы определение поглощения по графику (см. рис. 36) осуществляется весьма приближенно, поглощение в этих условиях может быть также определено расчетным путем. Зная фактическую величину $Q_{пр.тр}$, можно определить суммарный объем поглощенного стока и соответствующие ему параметры, характеризующие пропускную способность русловых и пойменных отложений.

Чтобы оценить достоверность полученных исходных данных, в табл. 6.1 приведено сравнение фактических и расчетных данных за гидрологический 1974/75 год.

Как видно из таблицы, в период с ноября 1974 г. по ноябрь 1975 г. произошла сработка емкостных запасов, соответствующая уменьшению уровня на 4,03 м (графа 5). При этом среднегодовое значение разности между расходом водоотбора и привлекаемыми и динамическими ресурсами составило 247 л/с (графа 9). Рассчитывается, какое понижение уровия при установленной величине удельных емкостных запасов обеспечит получение расхода 247 л/с в течение года:

$$S = \frac{247 \cdot 86{,}4 \cdot 365}{1{,}96 \cdot 10^6} = 3{,}65 \text{ м}.$$

Таким образом, фактическое понижение отличается от расчетного на 0,38 м, что составляет менее 10 %. Для дальнейших расчетов может быть откорректирована величина водоотдачи (вместо 0,14 можно принять 0,125).

Полученные материалы позволяют, принимая вероятное распределение стоковых характеристик реки, оценить обеспеченность эксплуатационных запасов по приведенной выше балансовой зависимости за любой по водности цикл лет. При этом расчет ведется последовательно с учетом положения статических уровней на начало расчета, определяя за каждый расчетный год результирующую разницу к концу этого периода.

## 6.1. Сопоставление фактических и расчетных данных об источниках формирования ЭЗПВ

| Месяц, год | Фактические данные | | | | Расчетные данные | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Среднемесячный водоотбор, л/с | Среднемесячный расход рек на входных створах, л/с | Поглощение транзитного стока, л/с | Сработка (—), восполнение (+) уровня в аллювии (за месяц среднее по площади), м | Поглощение транзитного стока (с графика на рис. 36), л/с | Динамические ресурсы, л/с | Сумма поглощения динамических ресурсов | Разница между суммой динамических ресурсов и величиной поглощения и водоотбором, л/с | Сработка (—), восполнение (+) уровня в аллювии |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| XI, 1974 | 804 | 1119 | 445 | —0,322 | 870 | 130 | 1000 | — | — |
| XII, 1974 | 806 | 110 | 104 | —1,02 | 130 | 130 | 240 | — | — |
| I, 1975 | 812 | 0 | 0 | —1,13 | 0 | 130 | 130 | — | — |
| II, 1975 | 855 | 0 | 0 | —0,90 | 0 | 130 | 130 | — | — |
| III, 1975 | 867 | 27 | 27 | —0,76 | 27 | 130 | 157 | — | — |
| IV, 1975 | 885 | 3680 | 2785 | +2,92 | 1540 | 130 | 1670 | — | — |
| V, 1975 | 971 | 4470 | 1066* | +0,332 | 1750 | 130 | 1880 | — | — |
| VI, 1975 | 926 | 503 | 327 | —0,71 | 503 | 130 | 633 | — | — |
| VII, 1975 | 921 | 245 | 105 | —1,01 | 245 | 130 | 375 | — | — |
| VIII, 1975 | 847 | 173 | 173 | —0,73 | 173 | 130 | 303 | — | — |
| IX, 1975 | 826 | 176 | 173 | —0,71 | 173 | 130 | 303 | — | — |
| X, 1975 | 748 | 365 | 365 | 0 | 365 | 130 | 495 | — | — |
| Сумма | 10 268 | | | | | | | | |
| Среднее | 856 | | 464 | —4,03 | 479 | 130 | 609 | 247 | —3,65 |

* получена расчетом

Эксплуатационные запасы в таких условиях прямо зависят от водности периода, для которого они оцениваются. Поэтому становится очень важным обоснованно подойти к продолжительности расчетного периода и чередованию внутри него многоводных и маловодных лет. Эта задача может быть решена гидрологическим путем на основе вероятностного прогноза из многолетних характеристик изменений водности либо принятием цикла лимитирующих по водности лет, выявленных за предшествующий период наблюдений.

**Контрольные вопросы, задания.** 1. Охарактеризуйте сущность балансового метода оценки обеспеченности эксплуатационных запасов подземных вод. 2. Почему несмотря на то, что в дифференциальных уравнениях фильтрации одновременно учитываются сопротивление движению и баланс подземных вод, результаты расчетов гидродинамическим методом должны быть сопоставлены с оценкой обеспеченности? 3. Чем определяется нормируемая вероятность превышения (обеспеченность) эксплуатационных запасов подземных вод при их формировании путем привлечения родникового или поверхностного стока? 4. Как выделяются балансовые районы при оценке обеспеченности эксплуатационных запасов подземных вод? 5. К чему сводится оценка эксплуатационных запасов подземных вод по дебитам родников? В каких случаях возможна эта оценка? 6. Какие данные необходимо иметь для определения минимального расхода родников? 7. В каких гидрогеологических условиях динамические ресурсы подземных вод могут полностью участвовать в формировании их эксплуатационных запасов? 8. В каких случаях при оценке обеспеченности эксплуатационных запасов подземных вод могут учитываться среднегодовые значения расходов поверхностных водотоков?

# ГЛАВА 7. ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ВОДОЗАБОРНЫХ СООРУЖЕНИЙ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ОЦЕНКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

## 7.1. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ РАСЧЕТА

Расчеты водозаборных сооружений при оценке эксплуатационных запасов подземных вод заключаются либо в определении возможной производительности этих сооружений при заданной величине понижения уровня воды, либо в определении понижения уровня при принятом значении производительности (расхода) водозаборных сооружений.

В практических расчетах обычно используются обе модификации — для установления возможности удовлетворения заданной потребности искомой величиной является понижение уровня, а при определении максимально возможного отбора воды обычно задаются понижением уровня. Если расчеты проводятся при принятом значении расхода, то последний принимается либо постоянным, либо изменяющимся по определенному закону. При заданной величине понижения ее значение обычно принимается постоянным, равным допустимому понижению на конечный срок эксплуатации. При постоянном понижении оценивается производительность водозаборов также в тех случаях, когда постоянство понижения определяется режимом или способом эксплуатации (самоизлив скважин, использование центробежных насосов с ограниченной величиной подъема воды и др.). В то же время иногда расчеты могут производиться и при условии заданного изменения во времени понижения уровня.

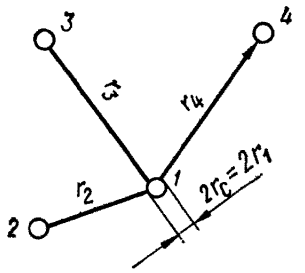



Рис. 37. Схема к расчету взаимодействующих скважин в неограниченном пласте

Таким образом, условия расчета водозаборных сооружений могут быть представлены в следующем виде:

1) $Q = f(t)$, в частном случае $Q = \text{const}$;

2) $S = f(t)$, в частном случае $S = \text{const}$.

Водозаборные сооружения в подавляющем большинстве случаев представляют собой системы водозаборных скважин, в связи с чем в настоящем разделе рассматриваются расчетные зависимости именно для скважинных систем водозаборных сооружений. При этом рассмотрены два случая: а) водозаборное сооружение — одиночная скважина; б) водозаборное сооружение — группа взаимодействующих скважин. В последнем случае расчет может быть проведен как с учетом работы каждой конкретной скважины, так и путем замены реальной системы расположения скважин обобщенной системой («большим колодцем») с последующим использованием с определенными изменениями зависимостей для одиночных скважин.

Для расчета водозаборных сооружений при заданном постоянном их дебите с учетом действия каждой конкретной скважины основной является обобщенная формула:

$$S_p = \frac{Q_{сум}}{4\pi km} \sum_{i=1}^{n} \beta_i R_{0i}, \tag{7.1}$$

где $S_p$ — расчетное понижение уровня; $Q_{сум}$ — суммарный дебит водозаборных сооружений; $km$ — водопроводность пласта; $\beta_i = \frac{Q_i}{Q_{сум}}$ ($Q_i$ — дебит $i$-й скважины, $i = 1, 2, 3, 4, \ldots, n$) (рис. 37); $R_{ci}$ — фильтрационное (гидравлическое) сопротивление, зависящее от геометрии границ пласта, условий на границах, расстояния между скважинами и других факторов.

Формула (7.1) справедлива для напорных водоносных горизонтов, но может использоваться и при расчетах водозаборов в безнапорных и напорно-безнапорных пластах, если расчетное понижение уровня не превышает 20 % мощности водоносного горизонта. В этом случае водопроводимость безнапорных пластов принимается равной величине $kh_e$ ($h_e$ — первоначальная мощность безнапорного пласта). В общем случае от приводимых в данном параграфе формул для напорных пластов можно перейти к формулам для безнапорной и напорно-безнапорной фильтрации с использованием следующей замены:

для безнапорной

$$2mS_p = h_e^2 - h^2; \tag{7.2}$$

для напорно-безнапорной

$$2mS_p = m(2H_e - m) - h^2, \tag{7.3}$$

где $m$ — мощность напорного горизонта; $S_р$ — расчетное понижение; $h_е$ — первоначальная мощность безнапорного горизонта; $h$ — остаточная мощность безнапорного или напорно-безнапорного горизонта; $H_е$ — первоначальный напор для напорно-безнапорного пласта, отсчитываемый от его подошвы (рис. 38).

С учетом формул (7.2) и (7.3) расчетные зависимости для понижения уровня будут иметь вид:

а) для безнапорного пласта

$$S_р = h_е - \sqrt{h_е^2 - \frac{Q_{сум}}{2\pi k}\sum_{i=1}^{n}\beta_i R_{ci}}; \qquad (7.4)$$

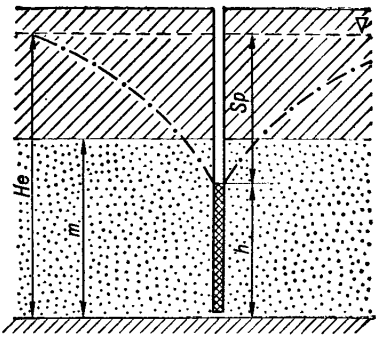



Рис. 38. Схема к расчету понижения уровня в одиночной скважине в условиях напорно-безнапорной фильтрации

б) для напорно-безнапорного пласта

$$S_р = H_е - \sqrt{m(2H_е - m) - \frac{Q_{сум}}{2\pi k}\sum_{i=1}^{n}\beta_i R_{ci}}. \qquad (7.5)$$

Формулы (7.1), (7.4) и (7.5) для расчета взаимодействующих скважин получены на основе известного из курса динамики подземных вод принципа суперпозиции. Как видно из этих формул, при учете взаимодействия складываются величины гидравлических сопротивлений ($R_{ci}$). В практических расчетах принцип суперпозиции обычно используется в другой модификации, когда производится сложение понижений, рассчитанных от действия каждой скважины при работе ее без учета взаимодействия. При этом используется следующая формула:

$$S_р = \sum_{i=1}^{n} S_i, \qquad (7.6)$$

где $S_i$ — понижение в расчетной скважине от работы скважины с номером 1, 2, 3, ..., $n$ (в том числе и от самой расчетной скважины).

Величины $S_i$, входящие в формулу (7.6), в этих случаях рассчитываются по формулам (7.1), (7.4) и (7.5), которые принимают соответственно вид:

$$S_i = \frac{Q_i}{4\pi k m} R_{ci}; \qquad (7.7)$$

$$S_i = h_е - \sqrt{h_е^2 - \frac{Q_i}{2\pi k} R_{ci}}; \qquad (7.8)$$

$$S_i = H_е - \sqrt{m(2H_е - m) - \frac{Q_i}{2\pi k} R_{ci}}, \qquad (7.9)$$

где $Q_i$ — дебит скважины, от работы которой рассчитывается срезка уровня в рассматриваемой скважине.

Необходимо отметить, что использование формулы (7.6) правомерно только для напорных горизонтов. Для безнапорных и напорно-безнапорных горизонтов ее использование, т. е. непосредственное суммирование понижений от действия каждой скважины, может привести к серьезным ошибкам, так как при этом не учитывается уменьшение мощности водоносного горизонта.

В связи с этим, как уже указывалось, необходимо использовать формулы (7.4) и (7.5), где суммируются гидравлические сопротивления. Расчетные зависимости для определения гидравлических сопротивлений в различных гидрогеологических условиях приведены в последующих разделах.

### 7.2. РАСЧЕТ ВОДОЗАБОРНЫХ СООРУЖЕНИЙ В ОДНОРОДНОМ НЕОГРАНИЧЕННОМ ПЛАСТЕ ПРИ ПОСТОЯННОМ ДЕБИТЕ СКВАЖИН

Гидравлическое сопротивление $R_c$ от действия каждой скважины, входящее в формулы (7.1), (7.4) и (7.5), определяется по зависимости Тейса:

$$R_{ci} = -E_i\left(-\frac{r_i^2}{4at_i}\right), \tag{7.10}$$

где $r_i$ — расстояние от скважины, вызывающей понижение уровня, до рассматриваемой точки (см. рис. 37); $t_i$ — время работы этой скважины до конца расчетного периода; $a$ — коэффициент пьезопроводности (уровнепроводности).

Как известно из курса динамики подземных вод, при $r^2/4at \leqslant 0{,}1$ функция $-E_i\left(\frac{r_i^2}{4at_i}\right)$ может быть заменена своим логарифмическим приближением. Тогда

$$R_{ci} = \ln\frac{2{,}25at_i}{r_i^2}. \tag{7.11}$$

При определении гидравлического сопротивления для рассматриваемой скважины, из которой производится откачка, $r_i = r_c$ ($r_c$ — радиус скважины).

Подставив величину гидравлического сопротивления по формуле (7.11) в формулу (7.7) для одиночной скважины, получим:

$$S_p = \frac{Q}{2\pi km}\ln\frac{2{,}25at}{r_c} = \frac{Q}{2\pi km}\ln\frac{R_п}{r_c}, \tag{7.12}$$

$$R_п = 1{,}5\sqrt{at}. \tag{7.13}$$

Величина $R_п$ получила название приведенного радиуса влияния. Формула (7.12) аналогична формуле Дюпюи для установившегося движения. Их отличие состоит в том, что в формуле Дюпюи принимается постоянным во времени значение радиуса влияния, а в формуле (7.12) эта величина зависит от времени. В связи с этим при выполнении условия $r^2/4at \leqslant 0{,}1$ для расчета водозаборов может использо-

ваться формула Дюпюи для установившегося движения с подстановкой приведенного радиуса влияния, рассчитанного по формуле (7.13). При этом следует учитывать, что величина $R_п$ является только расчетным показателем, а не характеризует действительный радиус влияния скважины.

Таким образом, для расчета взаимодействующих скважин при соблюдении условия $\frac{r^2_{max}}{4at} \leqslant 0{,}1$ можно использовать следующую модификацию формулы (7.1):

$$S_р = \frac{Q_{сум}}{4\pi km} \sum_{i=1}^{n} \beta_i \ln \frac{2{,}25at_i}{r_i^2}. \qquad (7.14)$$

Если дебиты всех скважин одинаковы и равны $Q_{скв}$, то $\beta_i = \frac{1}{n}$. Тогда

$$S_р = \frac{Q_{скв}}{4\pi km} \sum_{i=1}^{n} \ln \frac{2{,}25at_i}{r_i^2}. \qquad (7.15)$$

Приведенные зависимости справедливы для совершенных скважин.

При расчете несовершенных скважин в величине гидравлического сопротивления необходимо учесть дополнительное сопротивление за счет несовершенства. Последнее может быть определено по формуле

$$R_{н.с} = \beta_1 \xi, \qquad (7.16)$$

где $R_{н.с}$ — дополнительное гидравлическое сопротивление, обусловленное несовершенством скважины; $\beta_1 = \frac{Q_1}{Q_{сум}}$ ($Q_1$ — дебит скважины, в которой определяется понижение); $\xi$ — показатель гидравлического сопротивления за счет несовершенства скважины.

С учетом (7.16) формула (7.14) для расчета понижения будет выглядеть следующим образом:

$$S_р = \frac{Q_{сум}}{4\pi km} \left( \sum_{i=1}^{n} \beta_i \ln \frac{2{,}25at_1}{r_i^2} + \beta_1 \xi \right). \qquad (7.17)$$

Как известно из динамики подземных вод, показатель гидродинамического несовершенства является суммой двух показателей — несовершенства скважины по степени вскрытия ($\xi_1$) и несовершенства скважины по характеру вскрытия ($\xi_2$).

Показатель несовершенства скважины по степени вскрытия $\xi_1$ зависит от длины рабочей части фильтра скважины, из которой проводится откачка ($l_ф$), мощности пласта ($m$), расстояния ($r$) от откачиваемой скважины до точки, в которой рассчитывается понижение, а также от положения фильтра откачиваемой скважины по отношению к кровле и подошве пласта. Таким образом,

$$\xi_1 = f\left(\frac{l_ф}{m}; \frac{m}{r}\right).$$

7.1. Значения $\xi_1$

| $l_ф/m$ | $m/r$ | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1,0 | 3,0 | 10 | 30 | 100 | 200 | 500 | 1000 | 2000 |
| 0,1 | 0,12 | 2,04 | 10,4 | 24,4 | 42,8 | 53,8 | 69,5 | 79,6 | 80,3 |
| 0,3 | 0,09 | 1,29 | 4,79 | 9,2 | 14,5 | 17,7 | 21,5 | 24,9 | 28,2 |
| 0,5 | 0,05 | 0,66 | 2,26 | 4,2 | 6,5 | 7,9 | 9,6 | 11,0 | 12,4 |
| 0,7 | 0,02 | 0,23 | 0,88 | 1,7 | 2,1 | 3,2 | 4,0 | 4,6 | 5,2 |
| 0,9 | — | 0,02 | 0,13 | 0,3 | 0,5 | 0,7 | 0,8 | 1,0 | 1,1 |

При определении показателя несовершенства откачиваемой скважины за величину $r_i$ принимается радиус скважины $r_c$.

Значение $\xi_1$ для напорных пластов, когда фильтр примыкает к кровле или подошве пласта, при $\frac{l_ф}{m} \geqslant 0{,}1$, может быть найдено из табл. 7.1.

При определении величины $\xi_1$ для безнапорных горизонтов вместо $m$ используется расчетная величина $m_р$, а вместо $l_ф$ (при незатопленном фильтре) ее расчетное значение $\overline{l}_р$:

$$\left.\begin{aligned} m_р &= h_e - 0{,}5S_0 \\ \overline{l}_р &= l_ф - 0{,}5S_0 \end{aligned}\right\}, \tag{7.18}$$

где $S_0$ — понижение в скважине, из которой проводится откачка.

Если фильтр расположен в средней части пласта, приведенные в табл. 7.1 значения $\xi$ необходимо уменьшить при $m/r > 10$. Это уменьшение при $l_ф/m = 0{,}3$ составляет 1,5, при $l_ф/m = 0{,}5$ равняется 0,7.

При $m/r \leqslant 10$ и размещении фильтра в средней части пласта сопротивление за счет несовершенства по степени вскрытия может не учитываться.

Если $l_ф/m < 0{,}1$, значение $\xi_1$ следует определять по формуле

$$\xi_1 = \frac{2m}{l_ф} \ln \frac{0{,}73l_ф}{r_c}. \tag{7.19}$$

Показатель несовершенства скважины по характеру вскрытия ($\xi_2$) зависит от конструкции фильтра (его скважности), состояния пород в призабойной зоне, степени турбулентности потока и т. д. Эта величина в настоящее время определяется только по опытным данным. Если по данным откачки независимым путем определены коэффициенты водопроводимости и пьезопроводности пластов, суммарное сопротивление за счет несовершенства может быть рассчитано по формуле

$$\xi = \frac{4\pi kmS_0}{Q_{скв}} - \ln \frac{2{,}25at}{r_c^2}, \tag{7.20}$$

где $S_0$ — опытное понижение уровня воды в скважине.

При отсутствии опытных данных учитывается только показатель несовершенства степени вскрытия пласта $\xi_1$.

Учет несовершенства скважины может быть выполнен в соответствии с рекомендацией В. М. Шестакова путем замены реального ра-

диуса скважины на ее приведенный радиус $\bar{r}_c$, определяемый по формуле

$$\bar{r}_c = r_c e^{-\xi}. \qquad (7.21)$$

Дальнейшие расчеты проводятся по формулам для совершенных скважин с использованием значения приведенного радиуса.

Если водозабор состоит из большого количества скважин, то для расчета он может быть заменен обобщенной системой («большим колодцем»), дебит которой равен суммарному дебиту всех входящих в систему скважин.

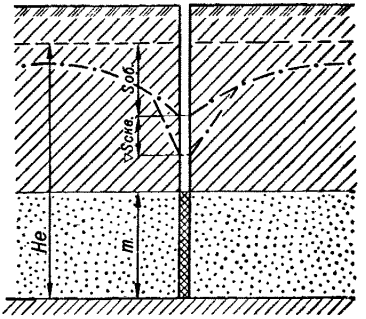



Рис. 39. Схема к расчету понижения в водозаборной скважине методом обобщенных систем

В зависимости от реальной схемы расположения скважин (линейный ряд, кольцевая батарея, площадная система) используются различные формулы для определения радиуса «большого колодца», заменяющего реальные группы скважин:

линейный ряд скважин

$$r_к = 0{,}2l; \qquad (7.22)$$

площадная система

$$r_к = 0{,}16P; \qquad (7.23)$$

кольцевая батарея

$$r_к = R_0, \qquad (7.24)$$

где $r_к$ — радиус «большого колодца»; $l$ — длина ряда скважин; $P$ — периметр площади размещения скважин при площадной системе; $R_0$ — радиус кольца, по которому расположены скважины при кольцевой системе.

Расчет понижения уровня подземных вод в скважине при использовании метода «обобщенных систем» проводится по формуле

$$S_р = \frac{Q_{сум}}{4\pi km}(R_{с.вн} + \beta_1 R_{скв}), \qquad (7.25)$$

где $Q_{сум}$ — суммарный дебит системы; $\beta_1 = \frac{Q_1}{Q_{сум}}$ ($Q_1$ — дебит скважины, в которой определяется понижение); $R_{с.вн}$ — внешнее гидравлическое сопротивление обобщенной системы, независящее от количества скважин; $R_{скв}$ — гидравлическое сопротивление скважины, определяемое в зависимости от расположения скважин внутри системы, расстояния между скважинами, степени и характера несовершенства скважины.

Таким образом, суммарное понижение уровня в обобщенной системе складывается из двух составляющих: понижения ($S_{об}$), зависящего только от суммарного дебита этой системы и не характеризующего истинного положения в водозаборной скважине, и дополнительного понижения, вызванного действием самой скважины ($\Delta S_{скв}$) (рис. 39).

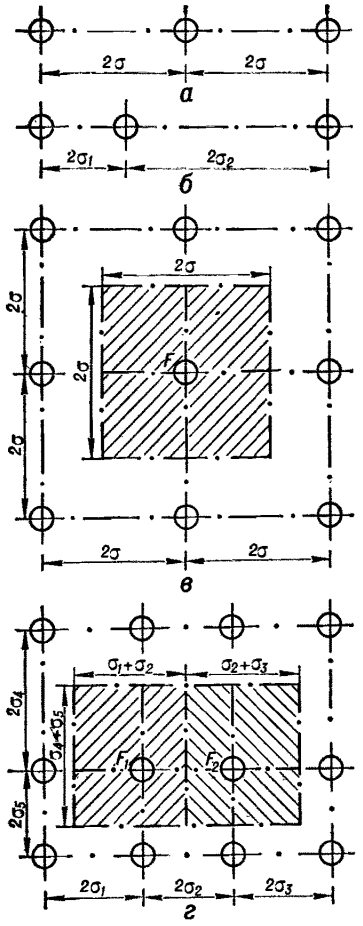



Рис. 40. Схема расположения скважин в обобщенных системах: линейной при равных расстояниях между скважниами (*а*) и разных (*б*); площадной (*в* и *г*)

По аналогии с (7.10) $R_{\text{с.вн}}$ может быть рассчитано по формуле

$$R_{\text{с.вн}} = -E_i\left(-\frac{r_{\text{к}}^2}{4at}\right) \qquad (7.26)$$

при выполнении условий

$\frac{at}{r_{\text{к}}^2} \geqslant 25$ — для линейной системы;

$\frac{at}{r_{\text{к}}^2} \geqslant 4$ — для площадной системы;

$\frac{at}{r_{\text{к}}^2} \geqslant 3{,}5$ — для кольцевой системы.

При $\frac{r_{\text{к}}^2}{4at} \leqslant 0{,}1$

$$R_{\text{с.вн}} = \ln\frac{2{,}25at}{r_{\text{к}}^2}. \qquad (7.27)$$

Гидравлическое сопротивление скважины ($R_{\text{скв}}$) рассчитывается по следующей формуле:

$$R_{\text{скв}} = 2\left(\ln\frac{r_{\text{пр}}}{r_{\text{с}}} + 0{,}5\xi\right), \qquad (7.28)$$

где $\xi$ — показатель несовершенства; $r_{\text{пр}}$ — приведенный радиус условной области влияния данной скважины. Величина $r_{\text{пр}}$ определяется по формулам:

а) для линейной и кольцевой систем при равных расстояниях между скважинами $2\sigma$ (рис. 40)

$$r_{\text{пр}} = \frac{\sigma}{\pi}; \qquad (7.29)$$

б) для линейной и кольцевой систем при разных расстояниях между скважинами $2\sigma_1$ и $2\sigma_2$

$$r_{\text{пр}} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2\pi}; \qquad (7.30)$$

в) для площадной системы

$$r_{\text{пр}} = 0{,}47\sqrt{\frac{F_0}{\pi}}, \qquad (7.31)$$

где $F_0$ — площадь области, ограниченной линиями, проходящими посредине между соседними скважинами.

Если при оценке эксплуатационных запасов рассматривается не одна, а несколько обобщенных систем, то расчеты проводятся так же, как и для группы взаимодействующих скважин [формула (7.1)], при этом каждая обобщенная система рассматривается как отдельная скважина.

### 7.3. РАСЧЕТ ВОДОЗАБОРНЫХ СООРУЖЕНИЙ В ОДНОРОДНОМ НЕОГРАНИЧЕННОМ ПЛАСТЕ ПРИ ИЗМЕНЯЮЩЕМСЯ ДЕБИТЕ

Дебит водозаборных скважин в процессе эксплуатации может изменяться в результате периодической их остановки и включения, замены насосного оборудования, уменьшения или увеличения водоотбора в связи с изменением потребности в воде, постепенного изменения пропускной способности фильтра и прифильтровой зоны и т. д. Типичными водозаборными сооружениями, работающими с переменным дебитом, являются сооружения для орошения земельных массивов. Основное количество воды отбирается здесь в вегетационный период. В остальное время года водозаборные сооружения или не работают, или эксплуатируются с минимальным расходом для удовлетворения хозяйственных нужд, предотвращения заиления фильтра и т. д.

Как и при постоянном дебите, расчет группы взаимодействующих скважин при изменяющемся дебите выполняется на основе метода наложения течений, т. е. в соответствии с зависимостями (7.1) и (7.2). Однако в этом случае понижение уровня воды в любой точке на расстоянии $r$ от скважины в момент времени $t$ следует рассматривать как функцию переменного дебита $Q(t)$.

Все случаи изменения дебита водозаборных сооружений можно схематизировать в виде скачкообразного, линейного, параболического или экспоненциального законов. Тот или иной закон принимается в соответствии с проектируемым режимом эксплуатации подземных вод.

При скачкообразном изменении дебита предполагается, что весь расчетный период эксплуатации скважины («большого колодца») может быть разбит на $n$ $j$-х интервалов, в течение которых дебит сохраняется постоянным и равным $Q_j$ (рис. 41), т. е.

$$\begin{aligned} 0 < t_j < t_1 \quad & Q_j = Q_1 \\ t_1 < t_j < t_2 \quad & Q_j = Q_2 \\ \cdots\cdots\cdots \quad & \cdots\cdots \\ t_{n-1} < t_j < t_n \quad & Q_j = Q_n \end{aligned}$$

В отдельных случаях $Q_j$ может быть равным нулю.

Скачкообразное изменение расхода вызывает соответствующие изменения уровня воды. В этом случае величина понижения уровня в любой момент времени $t$ от начала работы водозаборного сооружения согласно методу наложения течений будет равна алгебраической сумме понижений, вызываемых скачками дебита $Q_j - Q_{j-1}$ в течение

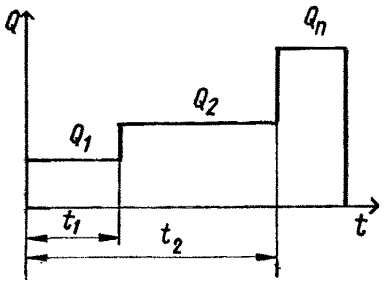



Рис. 41. График скачкообразного изменения дебита скважины

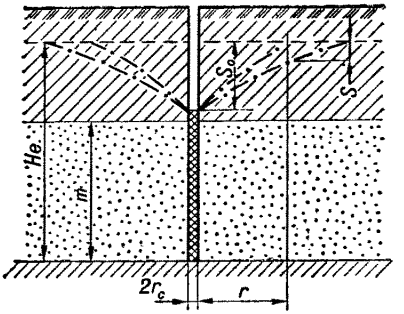



Рис. 42. Схема к расчету скважины при откачке с постоянным понижением уровня

соответствующего времени $t - t_{j-1}$:

$$S_p = \frac{Q_n}{4\pi km} R_c; \tag{7.32}$$

$$R_c = -\sum_{i=1}^{n} \beta_j E_i \left[ -\frac{r^2}{4a(t - t_{j-1})} \right]; \tag{7.33}$$

$$\beta_j = \frac{Q_j - Q_{j-1}}{Q_n}, \tag{7.34}$$

где $Q_n$ — расход скважины («большого колодца») в течение последнего периода эксплуатации; $R_c$ — гидравлическое сопротивление при скачкообразном изменении дебита скважины («большого колодца»).

При определении понижения $S_p$ в расчетной скважине или в пределах обобщенной системы значение $r$ в формуле (7.33) принимается равным соответственно радиусу скважины $r_c$ или «большого колодца» $r_к$.

Если $\frac{r^2}{4a(t - t_{j-1})} \leqslant 0{,}1$, зависимость гидравлического сопротивления от времени будет логарифмической, что можно выразить следующим образом:

$$R_c = \ln\left(\frac{2{,}25a}{r^2}\right)^{\Sigma\beta_j} t_{пр}; \tag{7.35}$$

$$t_{пр} = (t - 0)^{\beta_1} (t - t_1)^{\beta_2} \ldots (t - t_{n-1})^{\beta_n}. \tag{7.36}$$

Формулы для расчетов водозаборов при других законах изменения дебита, которые встречаются значительно реже, рассмотрены в работе Ф. М. Бочевера (1968) и др.

### 7.4. РАСЧЕТ ВОДОЗАБОРНЫХ СООРУЖЕНИЙ В НЕОГРАНИЧЕННОМ ОДНОРОДНОМ ПЛАСТЕ ПРИ ПОСТОЯННОМ ПОНИЖЕНИИ УРОВНЯ ВОДЫ В СКВАЖИНАХ

При эксплуатации подземных вод с постоянным понижением уровня воды в скважине неустановившиеся процессы фильтрации в неограниченном пласте характеризуются непрерывным увеличением во вре-

мени воронки депрессии, сопровождающимся уменьшением напорного градиента (рис. 42). В результате дебит скважины будет постепенно уменьшаться во времени. Поэтому при оценке эксплуатационных запасов подземных вод расчет водозаборных сооружений в этом случае сводится к определению динамики дебита скважин и, в случае необходимости, к определению понижения уровня воды в той или иной точке водоносного пласта.

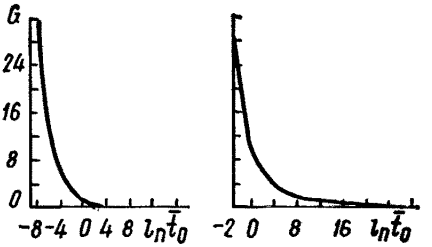


Рис. 43. График для определения функции $G(\bar{t}_0)$

Решение задачи о неустановившемся притоке воды к скважине при заданном постоянном понижении в ней $S_0$ получено Ф. М. Бочевером. Согласно этому решению дебит одиночной скважины или обобщенной системы $Q(t)$ в любой момент $t$ после начала эксплуатации может быть рассчитан по формуле

$$Q(t) = 2\pi km S_0 G(\bar{t}_0), \tag{7.37}$$

где $\bar{t}_0$ — безразмерное время;

$$\bar{t}_0 = \frac{at}{r_c^2}, \tag{7.38}$$

$r_c$ — радиус скважины или «большого колодца».

Значения функции $G(\bar{t}_0)$ приведены на графике (рис. 43).

Понижение уровня $S$ на расстоянии $r$ от скважины может быть вычислено по формуле

$$S = S_0 R_r, \tag{7.39}$$

где $R_r$ — безразмерное сопротивление, которое при $\bar{t}_0 > 500$ может быть выражено следующим образом:

$$R_r \approx -\frac{E_i\left(-\frac{r^2}{4at}\right)}{\ln\frac{2{,}25at}{r_c^2}}. \tag{7.40}$$

Из (7.39) и (7.40) следует, что в рассматриваемом случае соотношение между понижением в любой точке пласта и скважине формально такое же, как и при откачке с постоянным дебитом. Поэтому формула (7.39) может быть представлена в виде

$$S = -\frac{Q(t)}{4\pi km} E_i\left(-\frac{r^2}{4at}\right), \tag{7.41}$$

где $Q(t)$ — расход скважины, определяемый по формуле (7.37).

При $\frac{r^2}{4at} < 0{,}1$

$$S = \frac{Q(t)}{4\pi km} \ln\frac{2{,}25at}{r^2}. \tag{7.42}$$

Для расчета взаимодействующих скважин при условии заданного постоянного уровня (понижения), в отличие от условия заданного дебита, нельзя прямо воспользоваться методом наложения течений. Дело в том, что работой каждой новой скважины будет вызвана срезка уровня в остальных скважинах и тем самым нарушено заданное условие его постоянства. Поэтому если в каждой из взаимодействующих скважин заданы понижения $S_{01}$, $S_{02}$, ..., $S_{0n}$, расчет водозаборных сооружений производится решением системы уравнений, записываемых относительно каждой $i$-й ($i = 1, 2, 3, \ldots, n$) скважины. При $\frac{r^2}{4at} \leqslant 0{,}1$ систему уравнений можно записать следующим образом:

$$\left.\begin{aligned} S_{01} &= \frac{Q_1(t)}{2\pi km}\ln\frac{R_п}{r_{c1}} + \frac{Q_2(t)}{2\pi km}\ln\frac{R_п}{r_{2-1}} + \cdots + \frac{Q_n(t)}{2\pi km}\ln\frac{R_п}{r_{n-1}} \\ S_{02} &= \frac{Q_1(t)}{2\pi km}\ln\frac{R_п}{r_{1-2}} + \frac{Q_2(t)}{2\pi km}\ln\frac{R_п}{r_{c2}} + \cdots + \frac{Q_n(t)}{2\pi km}\ln\frac{R_п}{r_{n-2}} \\ S_{0n} &= \frac{Q_1(t)}{2\pi km}\ln\frac{R_п}{r_{1-n}} + \frac{Q_2(t)}{2\pi km}\ln\frac{R_п}{r_{2-n}} + \cdots + \frac{Q_n(t)}{2\pi km}\ln\frac{R_п}{r_{cn}} \end{aligned}\right\}, \quad (7.43)$$

где $Q_1(t)$, $Q_2(t)$, ..., $Q_n(t)$ — неизвестные дебиты скважин, относительно которых решается система уравнений; $r_{c1}$, $r_{c2}$, ..., $r_{cn}$ — радиусы скважин; $r_{1-2}$, ..., $r_{1-n}$ — расстояние между скважинами.

Если водозаборное сооружение состоит из большого количества скважин, то систему уравнений (7.43) целесообразно решать с помощью вычислительных машин или производить расчет по методу обобщенных систем скважин.

### 7.5. РАСЧЕТЫ ВОДОЗАБОРНЫХ СООРУЖЕНИЙ В ОГРАНИЧЕННЫХ ПЛАСТАХ

В однородных пластах в качестве плановых границ, оказывающих влияние на работу водозаборных сооружений, чаще всего могут быть контуры рек или контакты водосодержащих пород с непроницаемыми. Граница по реке, как правило, рассматривается как граница с ГУ-I ($H = \text{const}$), граница с непроницаемым контуром — как граница с ГУ-II ($q = 0$). Как известно из курса динамики подземных вод, учет влияния прямолинейных границ на работу водозаборных скважин основан на применении метода зеркальных отображений. С помощью этого метода реальный полуограниченный или ограниченный пласт заменяется условным неограниченным пластом, в котором по контуру границы сохраняется реальное граничное условие. Последнее достигается введением в расчет отображенных скважин с дебитами, равными дебитам реальных и противоположными по знаку в случае границы с ГУ-I ($H = \text{const}$), одинаковыми — с ГУ-II ($q = 0$).

Полуограниченный пласт (ГУ-I, $H = \text{const}$). При расчете системы взаимодействующих скважин с учетом действия каждой скважины величина понижения уровня определяется по формуле,

аналогичной формуле (7.1):

$$S_p = \frac{Q_{сум}}{2\pi km} \sum_{i=1}^{n} \beta_i R_{ci}, \qquad (7.44)$$

$$R_{ci} = \ln \frac{\rho_i}{r_i}, \qquad (7.45)$$

где $r_i$ — расстояние между расчетной скважиной и скважиной, имеющей номер $i$ (для расчетной скважины $r_i = r_c$ — радиус скважины); $\rho_i$ — расстояние от расчетной скважины до отображения скважины номер $i$ относительно границы постоянного напора (рис. 44).

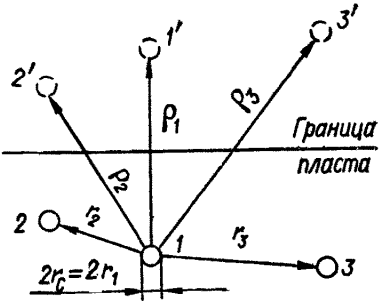


Рис. 44. Схема к расчету скважин в полуограниченном пласте

Как следует из формулы (7.45), при наличии контура постоянного напора движение подземных вод стабилизируется и понижение не зависит от времени. Формула (7.45) действительна при

$$\frac{r_{i\,max}^2}{4at} \leqslant 0{,}1 \quad \text{и} \quad \frac{\rho_{i\,max}}{4at} \leqslant 0{,}1.$$

Все приводимые в настоящем параграфе формулы для контура постоянного напора могут быть использованы только при условии подпертого режима фильтрации.

При большом количестве водозаборных скважин для расчета можно воспользоваться методом «обобщенных систем».

При использовании этого метода для расчета понижения уровня в скважине может применяться следующая формула:

$$S_p = \frac{Q_{сум}}{2\pi km} \left(R_{с.вн} + \frac{1}{2} \beta_1 R_{скв}\right). \qquad (7.46)$$

В полуограниченных пластах с контуром постоянного напора схема водозабора чаще всего представляет собой линейный ряд скважин, расположенный параллельно этому контуру. В зависимости от соотношения длины ряда ($l$) и расстояния ($l_0$) до контура постоянного напора (с учетом величины дополнительного сопротивления русловых отложений $\Delta L$) расчеты $R_{с.вн}$ рекомендуется проводить по следующим формулам:

при $\frac{l_0 + \Delta L}{l} \geqslant 0{,}5$

$$R_{с.вн} = \ln \frac{10\,(l_0 + \Delta L)}{l}; \qquad (7.47)$$

при $0{,}5 > \frac{l_0 + \Delta L}{l} > 0{,}1$

$$R_{с.вн} = \pi F\left(\frac{l_0 + \Delta L}{l}\right); \qquad (7.48)$$

при $\frac{l_0 + \Delta L}{l} \leqslant 0{,}1$

$$R_{с.вн} = 2\pi \frac{l_0 + \Delta L}{l}. \qquad (7.49)$$

7.2. Таблица функции $F\left(\frac{l_0+\Delta L}{l}\right)$

| $\frac{l_0+\Delta L}{l}$ | $F\left(\frac{l_0+\Delta L}{l}\right)$ |
|---|---|
| 0,1 | 0,18 |
| 0,2 | 0,31 |
| 0,13 | 0,40 |
| 0,4 | 0,48 |
| 0,5 | 0,55 |

В формуле (7.48) $F\left(\frac{l_0+\Delta L}{l}\right)$ — функция для расчета ряда ограниченной длины, значения которой приведены в табл. 7.2. Впервые зависимость для выражения этой функции была предложена В. М. Шестаковым.

Формулы (7.47) — (7.49) справедливы на моменты времени, определяемые из соотношения:

для (7.47) $$-t \geqslant \frac{10\,(l_0+\Delta L)^2}{a}; \quad (7.50)$$

для (7.48) $$-t \geqslant \frac{5\,(l_0+\Delta L)^2}{a}; \quad (7.51)$$

для (7.49) $$-t \geqslant \frac{2-2{,}5\,(l_0+\Delta L)^2}{a}. \quad (7.52)$$

Входящая в формулу (7.46) величина $R_{\text{скв}}$ определяется по формуле (7.28) с учетом (7.29) или (7.30).

Формула (7.47) используется для случая, когда линейный ряд скважин может быть заменен «большим колодцем», а формулы (7.48) и (7.49) — соответственно галереей ограниченной и неограниченной длины. Как видно из приведенных ограничений, использование формулы для неограниченной галереи целесообразно в том случае, если ее длина в 10 и более раз превышает расстояние от галереи до реки. В этом случае при равных дебитах скважин формула (7.46) с учетом (7.49) и (7.28) переходит в известную формулу Маскета — Лейбензона (без учета несовершенства):

$$S_{\text{р}} = \frac{Q_{\text{сум}}}{2\pi km}\left(2\pi\frac{l_0+\Delta L}{l}+\frac{1}{n}\ln\frac{\sigma}{\pi r_{\text{с}}}\right), \quad (7.53)$$

где $n$ — количество скважин (остальные обозначения прежние).

Применение формулы (7.47), когда реальная система скважин заменяется «большим колодцем» радиусом $r_{\text{к}}$, возможно при выполнении следующих ограничений:

для линейной системы $L_{\text{г}} > 2{,}5r_{\text{к}}$; (7.54)

для площадной системы $L_{\text{г}} > 1{,}6r_{\text{к}}$; (7.55)

для кольцевой системы $L_{\text{г}} > r_{\text{к}}$, (7.56)

где $L_{\text{г}}$ — расстояние от границы пласта до ближайшей водозаборной скважины.

Полуограниченный пласт (ГУ-II, $q = 0$). Понижение уровня воды при работе системы взаимодействующих скважин рассчитывается по формуле (7.44). Входящая в эту формулу величина $R_{ci}$ определяется по следующей зависимости:

$$R_{ci} = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}\left[-E_i\left(-\frac{r_i^2}{4at_1}\right)-E_i\left(-\frac{\rho_i^2}{4at_i}\right)\right]. \quad (7.57)$$

Здесь, как и ранее, $r_i$ — расстояние между расчетной скважиной и скважиной, имеющей номер $i$ (для расчетной скважины — радиус скважины $r_c$); $\rho_i$ — расстояние от расчетной скважины до отображения скважины номер $i$. При $\frac{r_{i\,\max}^2}{4at} \leqslant 0{,}1$ и $\frac{\rho_{i\,\max}}{4at} < 0{,}1$ формула преобразуется следующим образом:

$$R_{ci} = \ln \frac{2{,}25at_i}{r_i\rho_i}. \qquad (7.58)$$

Как следует из формулы (7.58), в условиях непроницаемого контура полуограниченного пласта установившееся движение не наступает. Здесь, как и в условиях неограниченного пласта, понижение уровня во времени возрастает.

В тех случаях, когда для расчета применяется метод «обобщенных систем», определение понижения уровня проводится по формуле (7.46), где величина $R_{с.вн}$ устанавливается по следующей зависимости:

$$R_{с.вн} = \ln \frac{1{,}13at}{L_r r_к}. \qquad (7.59)$$

Эта зависимость может быть использована при соблюдении критериев (7.50) и (7.54) — (7.56).

Ограниченные полосовые пласты. Гидрогеологические условия, которые могут быть отражены в виде пласта-полосы, распространены достаточно широко. Это могут быть долины, где аллювиальный водоносный горизонт ограничен двумя более или менее параллельными границами, одна из которых проходит по реке, прорезающей этот горизонт, вторая — по контакту водосодержащих пород с непроницаемыми породами коренного берега. Схема полосового пласта может быть также между двумя непроницаемыми сбросами, в сравнительно нешироких междуречьях и т. д.

При выводе расчетных аналитических формул на границах пласта-полосы могут быть приняты условия постоянства напора ($H = \text{const}$) или постоянства расхода ($q = 0$).

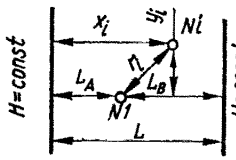
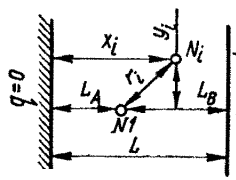
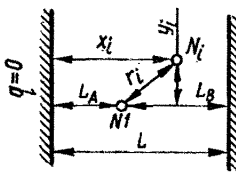
Для аппроксимации двух параллельных границ пласта-полосы зеркально отображенными скважинами необходимо бесконечное множество отображений. При этом, как и в полуограниченных пластах, знак отображения определяется условием на границе: при отображении от контура постоянного напора дебит отображенной скважины имеет противоположный знак, а при отображении от непроницаемого контура — тот же знак, что и дебит реальной скважины.

Если на одной из границ пласта-полосы может быть поставлено условие постоянства напора, движение через определенное время стабилизируется, и расчеты водозаборов рекомендуется проводить по формулам стационарной фильтрации. Время от начала эксплуатации, при котором расчеты можно проводить по зависимостям стационарной фильтрации, определяется из соотношения

$$\frac{at}{L^2} > 0{,}5, \qquad (7.60)$$

где $L$ — ширина пласта-полосы.

### 7.3. Формулы для определения $R_c$ в полосовых пластах

| Схема пласта | Расчетная формула | Номер формулы |
|---|---|---|
|  | $R_{C1}=2\ln\dfrac{0{,}64L\sin\frac{\pi L_A}{L}}{r_C}$<br>$R_{Ci}=\ln\dfrac{ch\frac{\pi y_i}{L}-\cos\frac{\pi(x_i+L_A)}{L}}{ch\frac{\pi y_i}{L}-\cos\frac{\pi(x_i-L_A)}{L}}$ | 7.62<br>7.63 |
|  | $R_{C1}=2\ln\dfrac{1{,}27L\,ctg\frac{\pi L_A}{2L}}{r_C}$<br>$R_{Ci}=\ln\dfrac{\left[ch\frac{\pi y_i}{2L}+\cos\frac{\pi(x_i+L_A)}{2L}\right]\left[ch\frac{\pi y_i}{2L}+\cos\frac{\pi(x_i-L_A)}{2L}\right]}{\left[ch\frac{\pi y_i}{2L}-\cos\frac{\pi(x_i+L_A)}{2L}\right]\left[ch\frac{\pi y_i}{2L}-\cos\frac{\pi(x_i-L_A)}{2L}\right]}$ | 7.64<br>7.65 |
|  | $R_{C1}=\dfrac{7{,}1\sqrt{at}}{L}+\dfrac{0{,}16L}{r_C\sin\frac{\pi L_A}{L}}$<br>$R_{Ci}=\dfrac{4\pi\sqrt{at}}{L}\,ierfc\dfrac{y_i}{2\sqrt{at}}+\dfrac{e^{\frac{2\pi y_i}{L}}}{4\left[ch\frac{\pi y_i}{L}-\cos\frac{\pi(x_i+L_A)}{L}\right]\left[ch\frac{\pi y_i}{L}-\cos\frac{\pi(x_i-L_A)}{L}\right]}$ | 7.66<br>7.67 |

Общая зависимость для определения уровня в полосообразных пластах имеет вид

$$S_p=\frac{Q_{сум}}{4\pi km}\left(\beta_1 R_{c1}+\sum_{i=2}^{n}\beta_i R_{ci}\right), \qquad (7.61)$$

где $\beta_1=\dfrac{Q_1}{Q_{сум}}$ ($Q_1$ — дебит скважины, в которой определяется понижение); $\beta_i=\dfrac{Q_i}{Q_{сум}}$ ($Q_i$ — дебит скважины, откачка из которой оказывает влияние на расчетную; $i=2, 3, \ldots, n$); $R_{c1}$ — гидравлическое сопротивление расчетной скважины; $R_{ci}$ — гидравлическое сопротивление от работы скважины, имеющей номер $i$.

Формулы для расчета гидравлических сопротивлений приведены в табл. 7.3. Все приведенные в таблице формулы используются для расчета при соблюдении критерия (7.60).

В условиях пласта-полосы с разнородными границами при $\frac{L_B}{L} \leqslant \frac{1}{3}$ влиянием непроницаемого контура можно пренебречь и расчеты выполнять по формулам полуограниченного пласта с условием I рода ($H = \text{const}$) на границе.

Расчеты групповых водозаборов в полосовых пластах могут быть существенно упрощены, если использовать метод «обобщенных систем» с применением формулы (7.25). Входящая в эту формулу величина $R_{\text{с.вн}}$ должна определяться по формулам (7.52), (7.64) и (7.66) с заменой $r_{\text{с}}$ на $r_{\text{к}}$ (радиус «большого колодца») и с учетом критерия (7.60). Кроме того, должны учитываться ограничения (7.54)—(7.56).

В полосообразных пластах с непроницаемыми границами водозаборы часто располагаются в виде линейных рядов, ориентированных поперек полосы. В этом случае величина $R_{\text{с.вн}}$ может быть определена по формуле

$$R_{\text{с.вн}} = \frac{7{,}1\sqrt{at}}{L}. \qquad (7.68)$$

Ограниченные угловые пласты. Схема углового пласта принимается в том случае, когда две границы пласта пересекаются под определенным углом. Эта расчетная схема может быть принята в излучине реки, вблизи пересекающихся контактов водосодержащих пород с непроницаемыми, в местах пересечения под определенным углом реки с непроницаемым сбросом и т. д.

Для аппроксимации границ углового пласта применение метода зеркальных отображений имеет некоторые отличительные черты. Дело в том, что замена реального углового пласта условным неограниченным достигается отображением не только скважин, но и границ пласта относительно друг друга. При этом тип отображенной и отображаемой границ во всех случаях сохраняется.

В настоящем параграфе приведены только формулы для пластов-квадрантов (границы пласта пересекаются под прямым углом). В этих случаях расчеты понижения уровня проводятся по формуле, аналогичной формуле (7.1):

$$S_{\text{р}} = \frac{Q_{\text{сум}}}{4\pi km} \sum_{i=1}^{n} \beta_i R_{\text{с}i}.$$

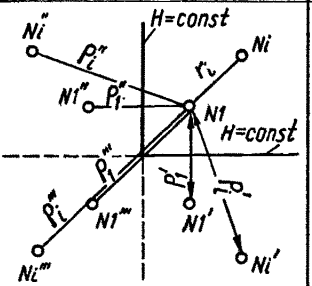
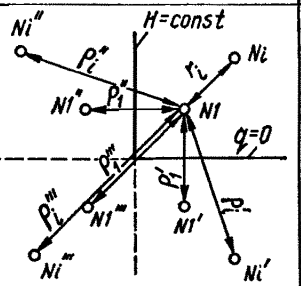
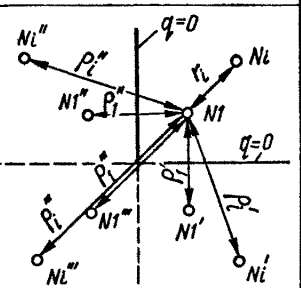
Формулы для определения величин $R_{\text{с}}$ при различных условиях на границах пласта приведены в табл. 7.4.

Как видно из приведенной таблицы, при наличии хотя бы одной границы постоянного напора расчеты можно проводить по формулам стационарной фильтрации. Время, по истечении которого можно использовать приведенные формулы, определяется из соотношения

$$t \geqslant \frac{2{,}25\rho_{i\,\max}^2}{a}. \qquad (7.75)$$

При использовании метода «обобщенных систем» расчет величины $R_{\text{с.вн}}$ может проводиться по формулам (7.69), (7.71), (7.73) с заменой

### 7.4. Формулы для определения $R_c$ в угловых пластах

| Схема пласта | Расчетная формула | Номер формулы |
|---|---|---|
|  | $R_{c1} = 2\ln\frac{\rho_1'\rho_1''}{\rho_1'''r_c}$ | 7.69 |
| | $R_{ci} = 2\ln\frac{\rho_i'\rho_i''}{\rho'''r_i}$ | 7.70 |
|  | $R_{c1} = 2\ln\frac{\rho_1''\rho_1'''}{\rho_1'r_c}$ | 7.71 |
| | $R_{ci} = 2\ln\frac{\rho_i''\rho_i'''}{\rho_i'r_i}$ | 7.72 |
|  | $R_{c1} = 2\ln\frac{(2{,}25at)^2}{\rho_1'\rho_1''\rho'''r_c}$ | 7.73 |
| | $R_{ci} = 2\ln\frac{(2{,}25at)^2}{\rho_i'\rho_i''\rho_i'''r_i}$ | 7.74 |

радиуса скважины $r_c$ на радиус «большого колодца». В этом случае, как и для других ограниченных пластов, необходимо учитывать ограничения (7.54)—(7.56).

Ограниченные круговые пласты. Такие условия характерны для небольших островов, мульд, ограниченных слабопроницаемыми породами, и др. В зависимости от гидрогеологических условий на круговой границе могут быть заданы условия постоянства напора или нулевого расхода.

**Граница с постоянным напором** ($H$ = const). В этом случае при откачке из скважины движение стабилизируется и расчеты понижения можно проводить по формуле установившегося движения (форму-

ла Дюпюи) в случае расположения скважины в центре круга:

$$S_p = \frac{Q}{2\pi km} \ln \frac{r_{кр}}{r_c}, \tag{7.76}$$

где $r_{кр}$ — радиус пласта-круга, определяемый из соотношения

$$r_{кр} = \sqrt{\frac{F}{\pi}}, \tag{7.77}$$

$F$ — площадь приводимого к кругу пласта.

При использовании метода обобщенных систем расчет проводится по формуле

$$S_p = \frac{Q_{сум}}{2\pi km}\left(\ln \frac{r_{кр}}{r_к} + \frac{1}{2}\beta_1 R_{скв}\right), \tag{7.78}$$

где $R_{скв}$ рассчитывается по зависимости (7.28).

**Граница с постоянным расходом** ($q = 0$). В отличие от пласта-круга с границей постоянного напора, где эксплуатация осуществляется при стационарной фильтрации, при откачке от скважины в круговом пласте с непроницаемой границей будет происходить постоянное во времени снижение уровня. Понижение уровня в этом случае для скважины, расположенной в центре круга, может быть определено по формуле

$$S_p = \frac{Q}{2\pi km}\left(\frac{2at}{r_{кр}^2} + \ln \frac{r_{кр}}{r_c}\right). \tag{7.79}$$

При наличии внутри пласта-круга нескольких водозаборных скважин расчет понижения уровня может быть выполнен по формуле

$$S_p = \frac{Q_{сум}}{2\pi km}\left(\frac{2at}{r_{кр}^2} + \sum_{i=1}^{n} \beta_i \ln \frac{r_{кр}}{r_i}\right). \tag{7.80}$$

Эти формулы могут использоваться для расчета при выполнении условия $t \geqslant \frac{r_{кр}^2}{a}$.

При использовании метода «обобщенных систем» понижение может быть рассчитано по формуле

$$S_p = \frac{Q_{сум}}{2\pi km}\left(\frac{2at}{r_{кр}^2} + \ln \frac{r_{кр}}{r_к} + \frac{1}{2}\beta_1 R_{скв}\right). \tag{7.81}$$

В том случае, когда $\ln \frac{r_{кр}}{r_c} \ll \frac{2at}{r_{кр}^2}$, формула (7.79) может быть преобразована следующим образом:

$$S_p = \frac{Q}{\pi km}\frac{at}{r_{кр}^2} = \frac{Qt}{\frac{km}{a}\pi r_{кр}^2}. \tag{7.82}$$

Учитывая, что $\frac{km}{a} = \mu$, а $\pi r_{кр}^2 = F$, имеем

$$\mu F S_p = Qt. \tag{7.83}$$

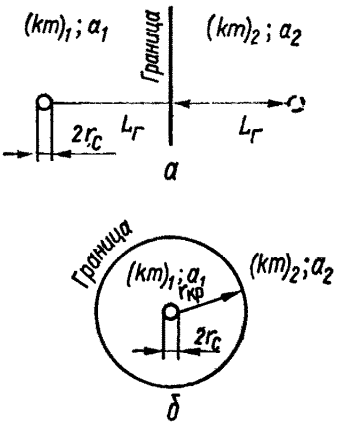



Рис. 45. Схема к расчету скважины в неоднородных пластах с прямолинейной (*а*) и круговой (*б*) границей раздела

Из формулы (7.83) видно, что расход водозабора в круговом пласте формируется путем сработки емкостных запасов подземных вод и что при выполнении условия $\ln \frac{r_{кр}}{r_c} \ll \frac{2at}{r_{кр}^2}$ понижение можно определять из балансового соотношения (7.83).

**Круговая граница с учетом внешнего притока (инфильтрация, боковой приток).** В тех случаях, когда в пределы кругового пласта поступает питание ($Q_{доп}$), расчет понижения уровня проводится по формуле

$$S_p = \frac{Q - Q_{доп}}{\pi km} \frac{at}{r_{кр}^2} + \frac{Q}{2\pi km} \ln \frac{r_{кр}}{r_c} \qquad (7.84)$$

или для «большого колодца»

$$S_p = \frac{Q_{сум} - Q_{доп}}{\pi km} \frac{at}{r_{кр}^2} + \frac{Q_{сум}}{2\pi km} \left( \ln \frac{r_{кр}}{r_к} + \frac{1}{2} \beta_1 R_{скв} \right). \qquad (7.85)$$

### 7.6. РАСЧЕТ ВОДОЗАБОРНЫХ СООРУЖЕНИЙ В НЕОДНОРОДНЫХ В ПЛАНЕ ПЛАСТАХ

В неоднородных в плане пластах процессы фильтрации отличаются большой сложностью, а аналитическое решение задачи о притоке воды к скважинам наталкивается на огромные математические трудности. Поэтому в настоящее время при оценке эксплуатационных запасов подземных вод в условиях таких пластов гидродинамическими методами наиболее целесообразно использовать метод математического моделирования. Однако при необходимости в ряде случаев расчеты могут быть выполнены и аналитически. К таким случаям, в частности, могут быть отнесены условия неограниченных неоднородных пластов с прямолинейной или круговой границей раздела разнородных зон.

**Прямолинейная граница раздела разнородных зон.** В этой схеме неоднородный неограниченный пласт в плане состоит из двух зон с различными значениями водопроводимости и пьезопроводимости, которые разделены прямолинейной границей (рис. 45, *а*). Условие на этой границе рассматривается как условие IV рода.

Для длительных откачек $\left( \frac{a_1 t}{L_г^2} \geqslant 100; L_г \text{ — расстояние от границы} \right)$ понижение уровня в скважине, расположенной в зоне I, может быть рассчитано по формуле

$$S_p = \frac{Q}{4\pi (km)_{ср}} \left[ \ln \frac{2{,}25 a_1 t}{2L_г r_c} + \nu \ln \frac{2L_г}{r_c} + \frac{(1+\nu)\lambda}{2} \right]; \qquad (7.86)$$

$$(km)_{\text{ср}} = \frac{(km)_1 + (km)_2}{2}; \tag{7.87}$$

$$\nu = \frac{(km)_2}{(km)_1}. \tag{7.88}$$

В формулах (7.86)—(7.88) приняты следующие обозначения: $(km)_1$ и $a_1$ — водопроводимость и пьезопроводность зоны, в которой расположена откачиваемая скважина: $(km)_2$ и $a_2$ — водопроводимость и пьезопроводность второй зоны; $\lambda$ — функция, зависящая от соотношения пьезопроводностей. При $a_1 = a_2$ $\lambda = 0$, а при $(km)_1 = (km)_2$

$$\lambda = 1 + \frac{\beta \ln \beta}{1 - \beta}; \tag{7.89}$$

$$\beta = \frac{a_1}{a_2}. \tag{7.90}$$

Величину $\lambda$ целесообразно учитывать при расположении водозаборов в краевой зоне артезианских бассейнов, где происходит смена напорных условий безнапорными и водозаборные скважины расположены в напорной зоне.

**Круговая граница раздела разнородных зон.** Схема этого пласта представляет собой сочетание двух максимальных зон с различными параметрами (рис. 45, *б*): внутренней с водопроводимостью $(km)_1$, пьезопроводностью $a_1$, радиусом $r_{\text{кр}}$ и внешней, простирающейся до бесконечности, с водопроводимостью $(km)_2$, пьезопроводностью $a_2$.

При действии скважины во внутренней зоне решение относительно понижения уровня воды при $\frac{a_2 t}{r_{\text{кр}}^2} > 1$, согласно В. Н. Щелкачеву, представляется в таком виде:

$$S = \frac{Q}{4\pi (km)_1}\left(2 \ln \frac{r_{\text{кр}}}{r} + \frac{(km)_1}{(km)_2} \ln \frac{2{,}25 a_2 t}{r_{\text{кр}}^2}\right). \tag{7.91}$$

Из выражения (7.91) видно, что с течением времени определяющую роль в формировании дебита скважины и динамике снижения уровня в обеих зонах играют параметры внешней зоны. Это объясняется ограниченностью размеров внутренней зоны и безграничностью внешней.

### 7.7. РАСЧЕТ ВОДОЗАБОРНЫХ СООРУЖЕНИЙ В СЛОИСТЫХ ПЛАСТАХ

Слоистое строение водосодержащей системы обусловливается чередованием в разрезе слоев с различными гидрогеологическими параметрами. В зависимости от степени различия водопроницаемости отдельных слоев слоистая система для расчетов водозаборных сооружений может быть представлена в виде схемы однородно- и неоднородно-слоистого пласта.

В качестве однородно-слоистого схематизируется водоносная система с небольшими отличиями отдельных слоев по водопроницаемос-

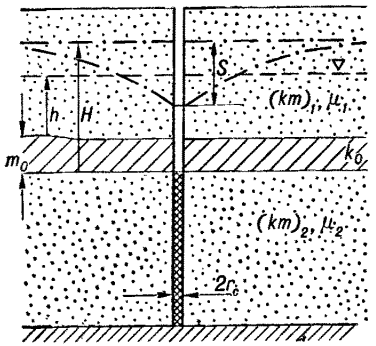


Рис. 46. Схема к расчету скважины в трехслойном пласте

ти (не более чем в 10—20 раз). В неоднородно-слоистых пластах имеет место существенное отличие проницаемости слоев, что обусловливает в разрезе чередование хорошо и слабопроницаемых слоев.

При расчете водозаборных сооружений в однородно-слоистых пластах последние осреднением фильтрационных характеристик можно представить в виде условно однородных, для которых применимы в соответствии с их фильтрационной схемой те или иные аналитические зависимости.

Как показывает опыт эксплуатации водозаборных сооружений в неоднородно-слоистых пластах, отдельные водоносные горизонты, приуроченные к хорошо проницаемым слоям, имеют гидравлическую связь за счет перетекания воды из одного горизонта в другой через разделяющий или слабопроницаемый слой. Это обусловливает формирование сложного фильтрационного потока, характеризующегося в основном горизонтальным направлением в хорошо проницаемых слоях и вертикальным — в слабопроницаемых.

Для многослойных водоносных горизонтов (включая и двухслойные) аналитические методы целесообразно применять только для неограниченных в плане пластов. В этих случаях для расчетов понижения уровня могут быть использованы следующие зависимости.

**Трехслойный пласт** (два водоносных горизонта, разделенных слабопроницаемым слоем, рис. 46) **с постоянным уровнем** в горизонте, из которого происходит перетекание. Такие условия характерны для водоносных систем, когда водозабор расположен у реки, прорезающей питающий горизонт, либо когда этот горизонт характеризуется весьма высокой водопроводимостью и водоотдачей, либо когда в пределах формирующейся воронки депрессии в естественных условиях происходит разгрузка подземных вод с уровня питающего горизонта путем испарения.

В этих условиях понижение рассчитывается по формуле (7.1). Величина $R_{ci}$ при этом находится по зависимости

$$R_{ci} = W\left(\frac{r_i^2}{4at_i};\ \frac{r_i}{B}\right), \qquad (7.92)$$

где $W\left(\frac{r_i^2}{4at};\ \frac{r_i}{B}\right)$ — функция Хантуша, значение которой приведено в прил. 1; $B$ — параметр перетекания, определяемый по формуле

$$B = \sqrt{\frac{kmm_0}{k_0}}, \qquad (7.93)$$

где $km$ — коэффициент водопроводимости пласта, из которого происходит откачка; $m_0$ и $k_0$ — соответственно мощность и коэффициент фильтрации слабопроницаемого раздельного слоя.

С увеличением времени функция Хантуша стремится к постоянной величине:

$$W\left(\frac{r_i^2}{4at};\ \frac{r_i}{B}\right)\approx 2K_0\left(\frac{r_i}{B}\right), \tag{7.94}$$

где $K_0$ — функция Бесселя второго рода от мнимого аргумента нулевого порядка. Значения этой функции приведены в прилож. 2. При $\frac{r_i}{B} < 0{,}4$ с точностью до 10 %

$$K_0\left(\frac{r_i}{B}\right) = \ln\frac{1{,}12B}{r_i}. \tag{7.95}$$

Если условие (7.95) выполняется, величина гидравлического сопротивления может быть найдена по зависимости

$$R_{ci} = 2\ln\frac{1{,}12B}{r_i}. \tag{7.96}$$

**Трехслойный пласт с изменяющимся уровнем** в горизонте, из которого происходит перетекание. В этих условиях понижение уровня при

$$t \geqslant \frac{10r_i^2}{a} \quad \text{и} \quad \frac{r_i}{B} < 0{,}4$$

рассчитывается так же, как и для изолированных пластов, при этом должны приниматься следующие значения параметров:

$$(km) = (km)_1 + (km)_2; \tag{7.97}$$

$$a = \frac{(km)_1 + (km)_2}{\mu_1^* + \mu_2^*} e^{2\nu \ln\frac{1{,}12B}{r_i}}; \tag{7.98}$$

$$\nu = \frac{(km)_1}{(km)_2}, \tag{7.99}$$

где $(km)_1$ и $(km)_2$ — соответственно водопроводимости горизонта, из которого происходит перетекание, и горизонта, из которого проводится откачка; $\mu_1^*$ и $\mu_2^*$ — коэффициенты упругой водоотдачи этих горизонтов (если один из горизонтов безнапорный — вместо упругой водоотдачи принимается гравитационная); в этом случае $B$ определяется по формуле

$$B = \sqrt{\frac{m_0(km)_1(km)_2}{k_0[(km)_1 + (km)_2]}}. \tag{7.100}$$

Как видно из (7.98), для каждого значения $r_i$ нужно определять величину обобщенного коэффициента пьезопроводности.

При использовании рекомендуемого приема не учитывается упругая водоотдача раздельных слоев, что при больших периодах эксплуатации вполне допустимо.

**Двухслойный пласт.** В тех случаях, когда основной водоносный горизонт перекрыт другим водоносным горизонтом, характеризующим-

ся меньшей водопроводимостью, но существенно большей водоотдачей (безнапорный водоносный горизонт с гравитационной емкостью), расчеты понижения также могут быть выполнены по формулам для изолированных пластов. В этом случае для расчетов может применяться значение коэффициента пьезопроводности, определяемое по формуле

$$a = \frac{(km)_н}{\mu_в}, \qquad (7.101)$$

где $(km)_н$ — водопроводимость нижнего горизонта; $\mu_в$ — гравитационная водоотдача верхнего горизонта.

### 7.8. РАСЧЕТ ВОДОЗАБОРНЫХ СООРУЖЕНИЙ В БЕЗНАПОРНЫХ ПОТОКАХ НА НАКЛОННОМ ВОДОУПОРЕ

При расчете водозаборных сооружений как в напорных, так и в безнапорных пластах широко используются формулы, основанные на принципе суперпозиции, предполагающем независимость величины понижения уровня от расхода, уклона и направления потока подземных вод (гл. 6). Эти формулы, приведенные в предыдущих параграфах этой главы, применяются для расчета дебитов скважин и понижений уровня в них в условиях как бассейна, так и потока подземных вод (параграф 7.8 подготовлен с помощью Т. А. Плугиной).

При этом предполагается, что в условиях потока, как и бассейна, при однородном строении водовмещающей среды, изолинии понижений уровня представляют собой концентрические окружности, а наблюдаемая асимметрия депрессионной воронки является следствием сложения двух течений — естественного потока и потока к скважине, формирующегося под влиянием откачки. В таких случаях в неограниченных водоносных пластах и в пластах с непроницаемыми границами неустановившийся режим фильтрации должен наблюдаться в течение всего периода эксплуатации как в водозаборных скважинах, так и во всей области развития депрессии.

Однако если для напорных потоков применение принципа суперпозиции является строго обоснованным (Н. Н. Биндеман, 1963), то в безнапорных потоках возникают более или менее существенные погрешности в величинах расчетных понижений уровня, связанные с перехватом части расхода подземного потока и уменьшением при этом мощности водоносного горизонта, неодинаковом в различных направлениях по отношению к направлению потока подземных вод. Величина понижения уровня в пределах области депрессии становится существенно зависимой от направления и уклона безнапорного потока.

Расчеты водозаборных сооружений в безнапорных пластах без учета потока подземных вод приводят вследствие этого к завышению расчетных понижений и занижению ЭЗПВ. Особенно существенные различия возникают, например, при расчете водозаборов в безнапорных потоках в полосообразных долинах рек, выполненных аллювиальными отложениями, вложенными в практически безводные вмещающие породы.

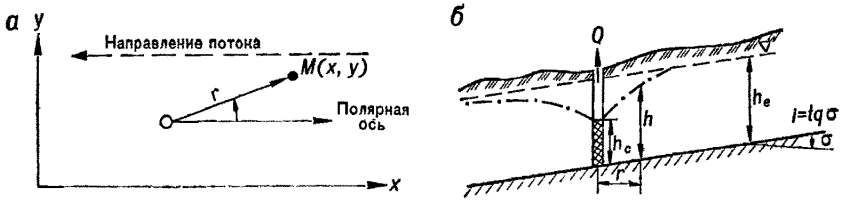



Рис. 47. Схема к расчету скважины в безнапорном пласте на наклонном водоупоре (по М. Хантушу, 1962):
*а* — план; *б* — разрез

В простейшем случае безнапорный поток подземных вод может быть представлен в виде равномерного потока на наклонном водоупорном основании, так как при отсутствии инфильтрации и удалении контуров питания и разгрузки в равномерно-проницаемом пласте уровенная поверхность (линии тока) должна быть параллельна водоупорному основанию. При этом вместо уклона потока в расчетах можно рассматривать уклон наклонного водоупора. Анализ притока воды к скважине в такой постановке рассматривался М. Хантушем (1962), П. Я. Полубариновой-Кочиной (1976), В. В. Насоновым (1971). Расчетная схема потока в плане и разрезе приведена на рис. 47.

Согласно М. Хантушу (1962), в таком потоке уравнение фильтрации имеет вид:

$$\frac{\partial^2 h^2}{\partial x^2} + \frac{2}{\beta}\frac{\partial h^2}{\partial x} + \frac{\partial^2 h^2}{\partial y^2} = \frac{1}{a}\frac{\partial h^2}{\partial t}; \qquad (7.102)$$

$$\beta = \frac{2h_c}{i}, \qquad (7.103)$$

где $h_c$ и $h$ — мощность безнапорного потока в центральной скважине и произвольной точке пласта; $i$ — уклон водоупорного основания (или уровенной поверхности); $a_y$ — коэффициент уровнепроводности.

Согласно М. Хантушу, это уравнение практически применимо при уклоне $i < 0{,}2$ и понижении уровня $S$, не превышающем половины исходной мощности горизонта $\left(\frac{S}{h_e} \leqslant 0{,}5\right)$.

Для скважины, работающей с постоянным дебитом в неограниченном в плане пласта на наклонном водоупоре, уравнение (7.102) для расчета понижения в произвольной точке пласта будет иметь следующее решение:

$$S = h_e - \sqrt{h_e^2 - \frac{Q}{2\pi k}\exp\left(-\frac{r}{\beta}\cos\theta\right) W\left(\frac{r^2}{4a_y t}; r/\beta\right)}, \qquad (7.104)$$

где $h_e$ — начальная мощность водоносного горизонта; $r$ — расстояние от центральной скважины; $\theta$ — угол между расчетным направлением и осью потока (см. рис. 47, *а*); $W\left(\frac{r^2}{4a_y t}; r/\beta\right)$ — функция М. Хантуша для горизонта с перетеканием, значения которой приведены в прил. 2.

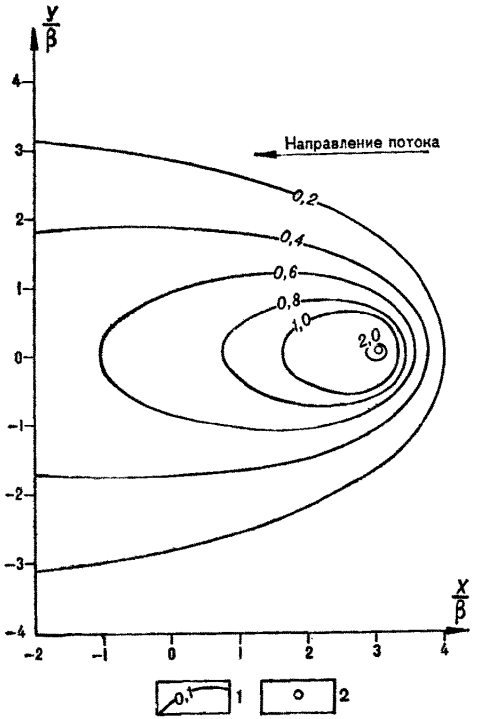



Рис. 48. Схема воронки депрессии в безнапорном потоке на наклонном водоупоре в изолиниях безразмерного понижения уровня $\frac{S}{4\pi k h_e} = \exp\left(-\frac{r}{\beta}\cos\theta\right) K_0\left(\frac{r}{\beta}\right)$:

*1* — изолинии безразмерных понижений; *2* — водозаборная скважина

Со временем понижение в безнапорном горизонте на наклонном основании становится в значительной степени отличающимся от понижения в условиях бассейна подземных вод и постепенно в районе центральной скважины движение практически стабилизируется.

С точностью до 10 % можно принять, что стационарный режим фильтрации наступает в окрестности водозаборной скважины по достижении времени $t$ при следующих условиях:

$$t \geqslant 2{,}3\frac{\beta^2}{a_y} \quad \text{и} \quad \frac{r}{\beta} \geqslant 0{,}3. \tag{7.105}$$

При этих ограничениях уравнение притока к скважине в безнапорном потоке имеет вид:

$$h_e^2 - h^2 = \frac{Q}{\pi k}\exp\left(-\frac{r}{\beta}\cos\theta\right) K_0\left(\frac{r}{\beta}\right); \tag{7.106}$$

$$S = h_e - \sqrt{h_e^2 - \frac{Q}{\pi k}\exp\left(-\frac{r}{\beta}\cos\theta\right) K_0\,(r/\beta)}\,. \tag{7.107}$$

Для центральной скважины

$$S_c = h_e - \sqrt{h_e^2 - \frac{Q}{\pi k}\ln\frac{1{,}12\beta}{r_c}}\,. \tag{7.108}$$

Как видно из рис. 48, на котором приведены изолинии безразмерных понижений уровня, воронка депрессии имеет асимметричную форму и вытянута в направлении вниз по потоку подземных вод. На одних и тех же расстояниях от центральной скважины минимальные понижения отмечаются вверх по потоку, максимальные — вниз, в направлении нормальном потоку понижения уровня соответствуют понижениям в бассейне подземных вод в условиях перетекания.

На рис. 49 показаны изменения безразмерного понижения во времени для разных значений $r/\beta$ в сопоставлении с решением Тейса для

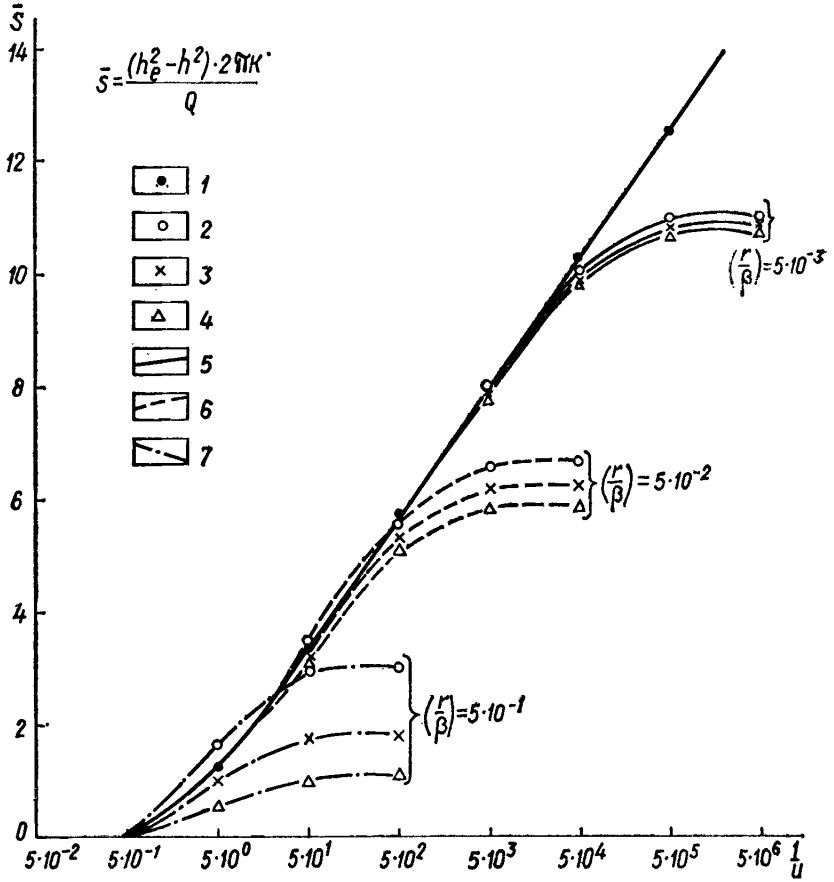



Рис. 49. Графики безразмерного понижения уровня в безнапорном потоке на наклонном водоупоре $\bar{S}=f\left(\lg\frac{1}{u}\right)$ при $u=\frac{r^2}{4at}$:

Безразмерное понижение: 1 — в условиях бассейна подземных вод с горизонтальной подошвой; 2 — вниз по потоку; 3 — вкрест потоку; 4 — вверх по потоку; 5 — $r$ = = 10 м; 6 — $r$ = 100 м; 7 — $r$ = 1000 м

условий бассейна подземных вод. Как видно, с увеличением уклона водоупора (потока) отклонения от решения Тейса возрастают (так же, как с увеличением расстояния от водозаборной скважины) в сторону уменьшения понижения.

Максимальные отклонения отмечаются вверх по потоку, минимальные — вниз, причем эти расхождения существенно возрастают при увеличении расстояния от центральной скважины. Вниз по потоку радиус депрессии максимальный.

В качестве примера рассмотрим соотношение понижений в потоке и бассейне подземных вод для потока с большим расходом при характерных значениях параметров: $h_e$ = 40 м; $k$ = 50 м/сут; $\mu$ = 0,2; $a$ = $10^4$ м$^2$/сут; $i$ = 0,02; $\beta$ = 2 · $10^3$ м; $t$ = = $10^4$ сут.

При этих исходных данных на расстоянии 10 м от водозаборной скважины предельное понижение уровня (при $t = 10^4$ сут) в бассейне подземных вод больше, чем в потоке, в 1,4 раза; на расстоянии 100 м вниз по потоку —в 1,9 раза, вверх — в 2,1 раза, вкрест потока — в 2 раза, а на расстоянии 1000 м — соответственно в 2,6, 7,0 и 4,3 раза. Как видно, особенно большие различия отмечаются с увеличением расчетного расстояния, что приводит к резкому завышению срезок уровней при расчетах взаимодействующих скважин.

При принятых значениях параметров на расстоянии 1000 м от водозаборной скважины понижения уровня вверх и вниз по потоку различаются почти в 3 раза.

В таких условиях наиболее эффективны водозаборные сооружения в виде линейных рядов, вытянутых вкрест потока подземных вод, что обеспечивает равномерное снижение уровня в водозаборных скважинах при одинаковых дебитах.

Для ориентировочной оценки необходимости учета потока подземных вод в безнапорном пласте можно сопоставить параметры $a_y$ и $\beta$.

Как видно из формулы (7.108), $R = 1{,}12\ \beta$. В условиях же бассейна подземных вод при принятых выше параметрах $R = 1{,}5\sqrt{a_y t} = 1{,}5\sqrt{10^4 \cdot 10^4} = 1{,}5 \cdot 10^4$ м. Близкие значения радиуса влияния в потоке подземных вод будут наблюдаться при уклоне $i \approx 0{,}003$, т. е. при уклоне потока, равном первым тысячным, его можно не учитывать при расчетах понижения уровня в центральных скважинах. Однако при расчете понижений вверх и вниз по потоку для расстояний порядка 1000 м и более для больших периодов времени различия в прогнозных понижениях уровня могут становиться заметными. Поэтому необходимость учета потока подземных вод в каждом конкретном случае требует предварительной оценки.

**Контрольные вопросы, задания.** 1. В чем заключается расчет водозаборных сооружений для целей оценки ЭЗПВ гидродинамическими аналитическими методами? 2. Можно ли суммировать понижения уровня при расчетах взаимодействующих скважин в безнапорных пластах? 3. В чем суть использования метода фильтрационных сопротивлений при расчете понижений уровня в водозаборных скважинах? 4. Чем различаются расчеты водозаборных скважин с постоянным расходом и постоянным понижением? 5. В каких случаях и как учитывается при расчетах несовершенство водозаборных скважин? 6. Как осуществляются расчеты водозаборных сооружений с использованием обобщенных систем скважин и какие ограничения существуют для применения этого метода? 7. Как учитываются в расчетах границы водоносных горизонтов? 8. В каких случаях и как при расчетах водозаборных сооружений в замкнутых круговых пластах следует учитывать дополнительное питание? 9. Оцените роль влияния положения границы раздела в неоднородных по фильтрационным свойствам в плане пластах на величину понижения уровня в водозаборных скважинах. 10. Проанализируйте основные предпосылки, принимаемые для расчетов водозаборных сооружений в слоистых водоносных пластах. 11. В чем заключается физический смысл параметра перетекания? В каких случаях он может использоваться в расчетах как аналог радиуса влияния? 12. В чем заключаются особенности расчета водозаборных сооружений в безнапорных потоках на наклонном водоупоре? 13. Чем определяется форма и глубина воронки депрессии в безнапорном потоке на наклонном водоупоре?

# ГЛАВА 8. ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

## 8.1. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ОЦЕНКИ ЗАПАСОВ НА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ

Природные месторождения подземных вод обычно характеризуются сложным многопластовым строением, существенной неоднородностью фильтрационных свойств водоносных и разделяющих их слабопроницаемых пластов, сложной взаимосвязью их между собой и с поверх-

ностными водотоками, сложными, разнообразными и динамическими краевыми условиями.

Математическое моделирование на аналоговых (АВМ), цифровых (ЦВМ) и аналого-цифровых (гибридных) вычислительных машинах позволяет (по сравнению с аналитическими методами) при расчетах по оценке эксплуатационных запасов подземных вод достаточно полно учесть реальную сложность гидрогеологических условий, их возможные изменения во времени, взаимодействие между собой водоносных горизонтов и водозаборных сооружений в условиях неоднородных многопластовых водоносных систем, сложность и разнообразие граничных условий, неравномерность водоотбора, их изменения во времени.

Главным достоинством моделирования, выполняемого обычно на основе консервативных конечно-разностных схем, является возможность получения не только пространственно-временны́х полей напоров в любом из моделируемых водоносных горизонтов, но и сбалансированной картины питания и разгрузки вод как для изучаемой области в целом, так и для любых ее частей. Анализ изменчивости полей напоров и отдельных составляющих водного баланса системы в пространстве и времени и сопоставление модельных данных с натурной пространственно-временной структурой потоков, величинами питания и разгрузки, установленными независимыми методами (балансовыми, гидрометрическими и др.), по существу является принципиальным доказательством адекватности модели реальным природным условиям.

Поэтому моделирование позволяет путем решения обратных и инверсных задач существенно уточнить основные факторы формирования эксплуатационных запасов подземных вод в пределах моделируемой области фильтрации (гидрогеологические параметры водоносных горизонтов и слабопроницаемых пластов, условия и параметры взаимосвязи подземных и поверхностных вод, величину питания и разгрузки, другие граничные условия области фильтрации), т. е. уточнить геофильтрационную модель месторождения, обоснованную результатами разведочных работ.

Применение методов математического моделирования позволяет избежать излишне грубой схематизации, приводящей, как правило, к занижению величины эксплуатационных запасов, завышению расчетных понижений, искажению характера снижения уровней во взаимодействующих водоносных горизонтах, и тем самым дать более реальную их количественную оценку и более обоснованный прогноз режима эксплуатации и его влияния на окружающую среду.

Поясним сказанное на простейшем примере. Так, использование известной формулы Тейса предполагает безграничность пласта, однородность его фильтрационных и емкостных свойств, постоянство во времени дебита откачки, отсутствие источников питания и т. п. В реальных природных условиях указанные предпосылки практически не выполняются.

Поэтому результаты расчетов по формуле Тейса являются в большей или меньшей степени приближенными. При этом степень этого приближения во многих случаях оценить очень трудно. Применение

моделирования не требует введения большинства ограничений, необходимых при аналитических расчетах.

В практику оценки эксплуатационных запасов подземных вод математическое моделирование начало внедряться в начале 60-х годов. Первоначально наибольшее распространение получило моделирование на аналоговых электрических моделях ($R$ — $R$ и $R$ — $C$ сетках).

Преимущественное использование аналогового моделирования было связано прежде всего с простотой реализации геофильтрационных моделей, быстродействием, возможностью оперативного перебора вариантов при решении обратных и инверсных задач в условиях диалогового режима, возможностью непосредственного контроля результатов решения.

По мере быстрого развития средств вычислительной техники, повышения возможностей и быстродействия ЦВМ, объема их оперативной памяти, внедрения диалогового режима работ с использованием дисплеев, разработки и расширения программного обеспечения для решения задач по оценке ЭЗПВ в различных гидрогеологических условиях цифровые вычислительные машины постепенно вытеснили аналоговые.

В настоящее время большая часть задач по оценке ЭЗПВ решается на ЦВМ. Разработанные и широко используемые системы программного обеспечения для реализации многослойных геофильтрационных моделей TOPAS (А. А. Плетнев и Л. В. Семендяева, ВСЕГИНГЕО), MIF (В. А. Лившиц, ИМР КГУ «Укргеология»), INFORS (А. А. Полшков, И. А. Полшкова, ВСЕГИНГЕО) и др. позволяют с достаточной для практики точностью выполнять оценку запасов в весьма широком диапазоне гидрогеологических условий. Имеющиеся программы позволяют реализовать на ЦВМ многопластовые водоносные системы (до 10 слоев и более) в области фильтрации, разбитой на несколько тысяч блоков с большим числом граничных условий, причем ограничения в этом отношении все время уменьшаются по мере появления более мощных средств вычислительной техники.

Автоматизация процесса решения задач, выдачи результатов решения, в том числе текущего баланса подземных вод для всей области фильтрации, отдельных горизонтов, заданных блоков детального анализа, автоматизированное графопостроение результатов решения и возможность их визуального контроля определяют несомненные преимущества цифровых вычислительных моделей перед аналоговыми, что и нашло отражение на практике.

Еще большими возможностями обладает система программного обеспечения, разработанная А. А. Рошалем в ПГО «Центргеология» для автоматизированной информационной системы постоянно действующей модели Московского градопромышленного комплекса (АИС ПДМ МГПК). Принципиальное отличие этой системы от других систем программного обеспечения связано с наличием автоматизированного банка данных, непосредственно используемого для построения расчетных моделей и последующих расчетов.

В этой системе программного обеспечения область фильтрации

может быть разбита на 20 и более слоев и несколько десятков тысяч расчетных блоков.

Гибридные машины помимо быстродействия не имеют существенных преимуществ перед ЦВМ. Ввиду большой сложности и высокой стоимости они не нашли достаточно широкого применения в практике подсчета запасов. Она ограничена моделированием нескольких месторождений на АЦВК «Сатурн-2» во ВСЕГИНГЕО (И. И. Крашин и др.).

Методика и технология математического моделирования рассматривается в специальных курсах.

Методика оценки ЭЗПВ методом моделирования рассмотрена наиболее детально в специальных монографических работах И. И. Крашина и Д. И. Пересунько (1976), И. К. Гавич (1972, 1980). Этому вопросу посвящены также многочисленные публикации, как по методике моделирования для оценки эксплуатационных запасов, так и результатам оценки запасов конкретных месторождений подземных вод в различных гидрогеологических условиях методами математического моделирования.

Поэтому в данной главе кратко рассмотрены лишь основные особенности оценки эксплуатационных запасов подземных вод методами математического моделирования.

При оценке эксплуатационных запасов многопластовой системы на математических моделях обычно рассматривается трехмерная фильтрация, соответствующая схеме Мятиева — Гиринского, согласно которой в хорошо проницаемых пластах учитывается только горизонтальная составляющая (двухмерный плановый поток), а в слабопроницаемых — вертикальная (одномерный поток при жестком режиме фильтрации).

Инфильтрационное питание (разгрузка), поступающее на первый от поверхности водоносный горизонт, принимается в виде результатирующей балансовой величины, осредненной за определенный расчетный интервал времени.

При соблюдении указанных предпосылок фильтрация во взимодействующих этажно расположенных основных горизонтах описывается следующей системой уравнений:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x h_1 \frac{\partial H_1}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k_y h_1 \frac{\partial H_1}{\partial y}\right) + \frac{k_{0,1}}{m_{0,1}}(H_1 - H_2) + \varepsilon = \mu \frac{\partial H_1}{\partial t};$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(km)_{x2}\frac{\partial H_2}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y}(km)_{y2} + \frac{k_{0,1}}{m_{0,1}}(H_2 - H_1) + \frac{k_{0,2}}{m_{0,2}}(H_3 - H_2) =$$

$$= \mu_2^* \frac{\partial H_2}{\partial t}; \qquad (8.1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(km)_{xn}\frac{\partial H_n}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y}(km)_{yn}\frac{\partial H_n}{\partial y} + \frac{k_{0,n-1}}{m_{0,n-1}}(H_n - H_{n-1}) +$$

$$+ \frac{k_{0,n+1}}{m_{0,n+1}}(H_n - H_{n+1}) = \mu_n^* \frac{\partial H_n}{\partial t},$$

где $k_x$, $k_y$ — коэффициенты фильтрации горизонта грунтовых вод в направлениях осей координат; $h_1$ — мощность грунтового водоносного горизонта; $k_{0,1}$, $m_{0,1}$, ..., $k_{0,n}$, $m_{0,n}$ — коэффициенты фильтрации и мощности разделяющих слоев (1, 2, ..., $n$ — номера слоев); $(km)_{x2}$, $(km)_{y2}$, ..., $(km)_{xn}$, $(km)_{yn}$ — коэффициенты водопроводимости хорошо проводимых слоев в направлениях осей координат (1, 2, 3, ..., $n$ — номера слоев); $\mu_1$, $\mu_2^*$, ..., $\mu_n^*$ — коэффициенты гравитационной и упругой водоотдачи хорошо проницаемых слоев; $\varepsilon$ — инфильтрационное питание первого от поверхности водоносного горизонта.

Фильтрационный процесс, описываемый приведенной системой уравнений, определяется параметрами и граничными условиями области фильтрации.

При решении задач стационарной фильтрации правая часть уравнений системы (8.1) будет равна нулю.

Первое уравнение в системе (8.1) является нелинейным. Однако при рассмотрении задач оценки запасов в расчет, как правило, принимаются средние значения проводимости за определенный интервал времени, вследствие чего это уравнение становится линейным.

Аналогичным образом может быть реализована напорно-безнапорная фильтрация при частичном осушении водоносных горизонтов — как питающих, так и эксплуатируемых.

Решение приведенной системы уравнений (8.1) при заданных краевых условиях и параметрах геофильтрационной модели может быть осуществлено на ЦВМ либо АВМ.

При необходимости может быть учтена горизонтальная фильтрация в слабопроницаемых слоях, разделяющих водоносные горизонты, и емкость представлением их в виде системы взаимосвязанных между собой горизонтальных пластов, т. е. увеличением числа уравнений в системе (8.1).

В частном случае горизонтальная проводимость может быть принята нулевой, тогда в разделяющих слабопроницаемых пластах реализуется упругий режим при схеме вертикальной фильтрации.

Может быть также учтено изменение гидрогеологических параметров водоносных горизонтов и слабопроницаемых пластов (водопроводимости, вертикальной гидропроводимости, емкости) путем задания их осредненных значений за определенный интервал времени в соответствии с заданным законом их изменения.

Взаимосвязь подземных вод с поверхностными реализуется граничными условиями первого и третьего рода, водоотбор и другие антропогенные источники возмущения (водоотливы, дренажи и т. п.) реализуются как источники и стоки условиями второго рода, а при заданном (постоянном или переменном) напоре — первого.

Решение системы уравнений (8.1) позволяет рассчитать положение уровня (понижения уровня) в любой точке области фильтрации в заданный момент времени, а также приходные и расходные статьи баланса подземных вод для системы в целом, отдельных моделируемых горизонтов и выделенных элементарных фрагментов, а

также блоков, моделирующих заданные источники и стоки, в том числе водозаборные скважины, поверхностные водотоки и т. п.

Таким образом, в результате решения системы уравнений (8.1) могут быть не только определены понижения уровня в водозаборных сооружениях или других точках эксплуатируемого водоносного горизонта, характеризующих депрессионную поверхность и взаимодействие водозаборных сооружений, но и охарактеризованы пространственно-временная структура фильтрационных потоков во всех моделируемых пластах и баланс обеспеченности водоотбора различными источниками формирования.

Математическое моделирование позволяет по существу одновременно выполнить решение трех задач оценки эксплуатационных запасов, перечисленных в гл. 4 (оценка обеспеченности или баланса водоотбора, расчет производительности водозаборного сооружения, расчет взаимодействия с другими водозаборными сооружениями). Кроме того, моделирование позволяет дать оценку изменений во времени величины и соотношения балансовых составляющих водоотбора, а также получить исходные данные для прогноза изменения качества подземных вод и влияния эксплуатации подземных вод на окружающую среду.

В настоящее время практикуется два способа решения задач по оценке эксплуатационных запасов на математических моделях: 1) с бытовыми начальными условиями распределения напоров, уровней, питания и разгрузки подземных вод (решение в напорах); 2) с нулевыми начальными условиями (решение в понижениях уровня).

*Первый способ* сложнее в реализации и требует более полного всестороннего информационного обеспечения, особенно в отношении характеристики структуры потока подземных вод, различных элементов их питания и разгрузки, характеристики их пространственно-временных изменений. Однако его несомненные преимущества заключаются в возможности:

а) оценки сбалансированности всех элементов геофильтрационной модели между собой (полей параметров с полями напоров и источниками питания и разгрузки) и непротиворечивости информационной характеристики основных факторов формирования запасов, использованной при построении модели;

б) непосредственного получения реальной гидродинамической структуры потока в результате решения;

в) отражения в балансе модели реальной структуры источников формирования эксплуатационных запасов подземных вод и их количественных характеристик, что не допускает необоснованного упрощения модели;

г) решения задач прогноза изменения качества непосредственно на основе полученного гидродинамического решения.

*Второй способ* основан на использовании метода суперпозиции; он более прост в реализации, не требует всесторонней характеристики условий формирования эксплуатационных запасов, допускает существенное упрощение модели, которое хотя и может приводить к определенным погрешностям в решениях, но позволяет при недоста-

ся меньшей водопроводимостью, но существенно большей водоотдачей (безнапорный водоносный горизонт с гравитационной емкостью), расчеты понижения также могут быть выполнены по формулам для изолированных пластов. В этом случае для расчетов может применяться значение коэффициента пьезопроводности, определяемое по формуле

$$a = \frac{(km)_н}{\mu_в}, \qquad (7.101)$$

где $(km)_н$ — водопроводимость нижнего горизонта; $\mu_в$ — гравитационная водоотдача верхнего горизонта.

### 7.8. РАСЧЕТ ВОДОЗАБОРНЫХ СООРУЖЕНИЙ В БЕЗНАПОРНЫХ ПОТОКАХ НА НАКЛОННОМ ВОДОУПОРЕ

При расчете водозаборных сооружений как в напорных, так и в безнапорных пластах широко используются формулы, основанные на принципе суперпозиции, предполагающем независимость величины понижения уровня от расхода, уклона и направления потока подземных вод (гл. 6). Эти формулы, приведенные в предыдущих параграфах этой главы, применяются для расчета дебитов скважин и понижений уровня в них в условиях как бассейна, так и потока подземных вод (параграф 7.8 подготовлен с помощью Т. А. Плугиной).

При этом предполагается, что в условиях потока, как и бассейна, при однородном строении водовмещающей среды, изолинии понижений уровня представляют собой концентрические окружности, а наблюдаемая асимметрия депрессионной воронки является следствием сложения двух течений — естественного потока и потока к скважине, формирующегося под влиянием откачки. В таких случаях в неограниченных водоносных пластах и в пластах с непроницаемыми границами неустановившийся режим фильтрации должен наблюдаться в течение всего периода эксплуатации как в водозаборных скважинах, так и во всей области развития депрессии.

Однако если для напорных потоков применение принципа суперпозиции является строго обоснованным (Н. Н. Биндеман, 1963), то в безнапорных потоках возникают более или менее существенные погрешности в величинах расчетных понижений уровня, связанные с перехватом части расхода подземного потока и уменьшением при этом мощности водоносного горизонта, неодинаковом в различных направлениях по отношению к направлению потока подземных вод. Величина понижения уровня в пределах области депрессии становится существенно зависимой от направления и уклона безнапорного потока.

Расчеты водозаборных сооружений в безнапорных пластах без учета потока подземных вод приводят вследствие этого к завышению расчетных понижений и занижению ЭЗПВ. Особенно существенные различия возникают, например, при расчете водозаборов в безнапорных потоках в полосообразных долинах рек, выполненных аллювиальными отложениями, вложенными в практически безводные вмещающие породы.

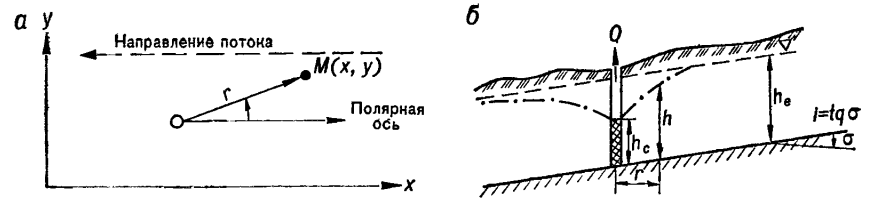



Рис. 47. Схема к расчету скважины в безнапорном пласте на наклонном водоупоре (по М. Хантушу, 1962):
*а* — план; *б* — разрез

В простейшем случае безнапорный поток подземных вод может быть представлен в виде равномерного потока на наклонном водоупорном основании, так как при отсутствии инфильтрации и удалении контуров питания и разгрузки в равномерно-проницаемом пласте уровенная поверхность (линии тока) должна быть параллельна водоупорному основанию. При этом вместо уклона потока в расчетах можно рассматривать уклон наклонного водоупора. Анализ притока воды к скважине в такой постановке рассматривался М. Хантушем (1962), П. Я. Полубариновой-Кочиной (1976), В. В. Насоновым (1971). Расчетная схема потока в плане и разрезе приведена на рис. 47.

Согласно М. Хантушу (1962), в таком потоке уравнение фильтрации имеет вид:

$$\frac{\partial^2 h^2}{\partial x^2} + \frac{2}{\beta}\frac{\partial h^2}{\partial x} + \frac{\partial^2 h^2}{\partial y^2} = \frac{1}{a}\frac{\partial h^2}{\partial t}; \qquad (7.102)$$

$$\beta = \frac{2h_c}{i}, \qquad (7.103)$$

где $h_c$ и $h$ — мощность безнапорного потока в центральной скважине и произвольной точке пласта; $i$ — уклон водоупорного основания (или уровенной поверхности); $a_y$ — коэффициент уровнепроводности.

Согласно М. Хантушу, это уравнение практически применимо при уклоне $i < 0{,}2$ и понижении уровня $S$, не превышающем половины исходной мощности горизонта $\left(\frac{S}{h_e} \leqslant 0{,}5\right)$.

Для скважины, работающей с постоянным дебитом в неограниченном в плане пласта на наклонном водоупоре, уравнение (7.102) для расчета понижения в произвольной точке пласта будет иметь следующее решение:

$$S = h_e - \sqrt{h_e^2 - \frac{Q}{2\pi k}\exp\left(-\frac{r}{\beta}\cos\theta\right) W\left(\frac{r^2}{4a_y t}; r/\beta\right)}, \qquad (7.104)$$

где $h_e$ — начальная мощность водоносного горизонта; $r$ — расстояние от центральной скважины; $\theta$ — угол между расчетным направлением и осью потока (см. рис. 47, *а*); $W\left(\frac{r^2}{4a_y t}, r/\beta\right)$ — функция М. Хантуша для горизонта с перетеканием, значения которой приведены в прил. 2.

результаты прогноза. Поэтому для удовлетворения сформулированного выше условия удаления границ на необходимое расстояние может производиться значительное увеличение размеров краевых блоков модели с распространением на всю их площадь параметров этой части области фильтрации либо учете их изменений при наличии соответствующих данных.

При оценке эксплуатационных запасов артезианских бассейнов платформ в результате эксплуатации действующих водозаборных сооружений или при региональных оценках запасов площадь депрессии может охватывать всю площадь артезианского бассейна (Московский, Днепровский, Азово-Кубанский артезианский бассейны). В этом случае оценке запасов конкретного месторождения методом моделирования должна предшествовать по возможности региональная оценка запасов на региональной модели с учетом фактических и проектных расходов всех действующих и проектируемых водозаборных сооружений. Тогда на границах моделируемой области фильтрации задаются при решении прогнозных задач условия $H = f(t)$, снятые с региональной модели. По существу модель отдельного месторождения представляет собой фрагмент общей региональной модели.

Если региональная оценка не выполнялась, учет влияния водозаборных сооружений на смежных с моделируемой территориях может производиться приближенно путем принятия непроницаемых границ рассматриваемого элемента региональной области фильтрации. Такой прием позволяет учитывать возможность дополнительного водоотбора за пределами моделируемой области фильтрации, но может приводить к заметным погрешностям в прогнозных расчетах. Его применение правомерно в тех случаях, когда понижения уровня в пределах моделируемой территории и за ее пределами примерно одинаковы.

2. *Фрагментирование области фильтрации* с выделением более детальных моделей производится либо с целью увязки результатов оценки запасов с региональными решениями, либо с целью детализации условий на отдельных участках модели при решении обратных задач, либо для детализации решений при прогнозных задачах.

В общем случае границы модели фрагмента детализации могут задаваться произвольно. Их увязка с общей моделью осуществляется путем задания на границах моделей-фрагментов детализации условий, соответствующих решению задачи на общей модели.

Однако следует отметить, что увязка фрагментов с произвольными границами представляет собой достаточно трудоемкую процедуру. При этом усложняется анализ результатов, полученных по всей моделируемой области в целом, и существенно возрастают трудозатраты при решении задач, требующих многократной корректировки моделей.

Процесс фрагментарного моделирования существенно упрощается, если контуры фрагментов совпадают с естественными геолого-гидрогеологическими или гидравлическими границами, на которых можно принять постоянство граничных условий во времени. Поэтому на практике стремятся выделить фрагменты по линиям водораз-

делов, рекам, границам зон с существенно различной водопроводимостью и т. п.

Одним из наиболее удобных и эффективных приемов фрагментирования является построение региональной модели всей исследуемой области и одной или нескольких более крупномасштабных моделей — врезок. При таком подходе условия на границах фрагментов задаются по результатам решений, полученным на региональной модели. Последняя должна учитывать в генерализованном виде все основные региональные закономерности изменений структуры водного баланса и уровенного режима подземных вод, в том числе и внутри выделяемых фрагментов.

При этом необходимо, чтобы в ходе фрагментарного моделирования основные балансовые составляющие внутри модели-врезки несущественно отличались от региональной модели. В противном случае может потребоваться повторное решение региональной задачи для получения уточненных условий на границах фрагмента.

При моделировании откачек или отдельных фрагментов естественного потока с целью уточнения параметров геофильтрационной модели увязка их границ с общей моделью не требуется.

3. *Дискретизация области фильтрации при моделировании на АВМ и ЦВМ* производится путем разбивки моделируемой площади на блоки, чаще всего по ортогональной сетке. Применяются и другие способы разбивки, например, треугольные сетки или сетки произвольной конфигурации.

При разбивке области фильтрации в разрезе часть пластов, выделенных на геофильтрационной модели, может объединяться, если это не влияет на результаты решения, а отдельные пласты подразделяются на несколько расчетных слоев для повышения точности решения или более правильного учета реальной структуры потока.

Такая разбивка производится при необходимости реализации вертикальной составляющей потока в водоносных горизонтах большей мощности, решения задачи о передвижении некондиционных вод в разрезе, учете упругого режима фильтрации в слабопроницаемых пластах, разделяющих водоносные горизонты.

При дискретизации области фильтрации применяются равномерные и неравномерные разбивки. Первые значительно предпочтительнее, так как вносят меньшие погрешности в решения, особенно при моделировании слоистых водоносных систем.

Выбор размеров блоков определяется масштабом модели и характером решаемой задачи. Поэтому при ограниченных возможностях программного обеспечения и технических средств в отношении числа блоков в области фильтрации чаще используются неравномерные разбивки.

Обычно расчетная фильтрационная схема составляется в масштабе, соответствующем масштабу исходных карт от 1 : 10 000 до 1 : 200 000, а на региональных моделях также и 1 : 500 000. Фрагменты врезки могут моделироваться в более крупных масштабах. Так, при моделировании откачек масштаб моделей может приниматься до 1 : (500 ... 1000). Масштаб расчетной модели может также

увеличиваться и уменьшаться по сравнению с исходными картами в зависимости от их загрузки исходной информацией, необходимой степени и характера дискретизации моделируемой области фильтрации, степени изученности территории.

Степень и характер дискретизации моделируемой области определяется гидрографическими и геоморфологическими особенностями территории, геолого-гидрогеологическими условиями, а также степенью изученности района. Кроме того, при дискретизации необходимо учитывать расположение антропогенных источников формирования запасов, оказывающих влияние на режим и баланс подземных вод, а также схемы размещения водозаборных сооружений.

При выборе направления ортогональной сетки желательно совмещать ее по возможности с направлением основных элементов геологической структуры гидрографической сети.

*При решении региональных задач* шаг сетки может изменяться от первых километров до одного-двух десятков километров. При достаточно редкой речной сети разбивку целесообразно выполнять таким образом, чтобы между двумя смежными или параллельными реками помещалось не менее трех блоков, из которых один целиком размещается в пределах выделенного геоморфологического элемента (водораздел или долина реки). Возможность такого подхода имеется не всегда. Часто блок модели включает в себя различные геоморфологические элементы, отличающиеся между собой значениями водопроводимости горизонтов и сопротивлениями раздельных слоев. В этом случае в качестве расчетных принимаются гидрогеологические параметры, средневзвешенные по площади блока.

Большие сложности при построении региональных моделей возникают в районах со значительной расчлененностью рельефа и наличием системы этажно залегающих водоносных горизонтов. К таким относятся районы в гумидных областях, отличительной чертой которых является высокая густота речной сети, достигающая 1—3 км/км$^2$ (что соответствует линейным размерам водосборов от нескольких сотен метров до первых километров). Существующая при этом тесная взаимосвязь подземных и поверхностных вод обусловливает преобладающую роль локального водообмена в балансе подземных вод, при котором большая часть питания, поступающая в пределы водосборного бассейна, разгружается в местную речную сеть.

Для детального воспроизведения локальных особенностей водообмена поверхностных и подземных вод требуется высокая степень дискретизации области, практическое осуществление которой при решении региональных задач часто оказывается нецелесообразным из-за недостаточной гидрогеологической изученности территории или вследствие ограниченных технических возможностей вычислительных средств.

В таких ситуациях при пространственной дискретизации области фильтрации в пределах расчетного блока модели может оказаться несколько рек различного порядка и соответственно площадей их водосборов. В связи с этим для каждого блока необходимо ввести средние значения уровней подземных и поверхностных вод и обобщен-

ные фильтрационные сопротивления, характеризующие степень их взаимосвязи. Эти сопротивления зависят не только от фильтрационных свойств водовмещающих пород и степени несовершенства рек, но и от густоты и извилистости речной сети. Прямой расчет этих сопротивлений сложен, поэтому они оцениваются путем решения обратных задач по подбору соответствующих статей баланса подземных вод (алгебраической суммы питания или разгрузки).

При составлении моделей применительно к указанным условиям необходимо стремиться к максимально возможному их упрощению, не приводящему, однако, к существенному увеличению погрешности решения задачи. В этом случае для обоснования минимально необходимого числа слоев модели можно производить оценочные расчеты с целью определения величины фактора перетекания «*B*».

Если эта величина оказывается в 2—3 раза меньше линейного размера блока, водовмещающая толща может условно схематизироваться как однослойная. В дальнейшем локальные особенности возмущений в отдельных горизонтах слоистой системы в пределах расчетных блоков достаточно просто учитываются методом фильтрационных сопротивлений на фоне регионального прогноза.

Проводимость такой однослойной системы ($km$) принимается эквивалентной сумме проводимостей водовмещающих пород отдельных водоносных комплексов

$$km = \sum_{i=1}^{n} (km)_i, \tag{8.2}$$

где $(km)_i$ — значение проводимости $i$-го водоносного пласта; $n$ — число водоносных пластов в данной точке.

Средний по размеру напор приведенной однопластовой системы определяется как средневзвешенная по проводимости величина между значениями напоров отдельных водоносных комплексов из соотношения

$$H = \frac{\sum_{i=1}^{n} H_i (km)_i}{\sum_{i=1}^{n} (km)_i}, \tag{8.3}$$

где $H_i$ — значение напора подземных вод $i$-го водоносного пласта.

Учитывая, что величина напора может изменяться очень значительно по направлению от водораздела к долине реки в пределах каждого блока, значение напора рассчитывается условно как средневзвешенное по площади блока.

Кроме того, при обосновании шага разбивки необходимо учитывать величину расстояний между реками, дренирующими подземные воды. Для воспроизведения на модели осредненных характеристик балансовых составляющих в пределах отдельных блоков их линейные размеры должны быть в среднем на полпорядка или порядок больше расстояний между реками-дренами.

*При решении задач на локальных детальных моделях и фрагментах-врезках детализации,* особенно при моделировании депрессий при откачках и на участках действующих водозаборных сооружений, нельзя стремиться к осреднению напоров.

В этих случаях разбивка на блоки должна обеспечить возможность отражения основных локальных источников возмущения (водозаборных сооружений и дрен), реализуемых как граничные условия I, II и III рода. Желательно, чтобы блоки, в которых заданы такие условия, были разделены между собой не менее чем одним блоком, т. е. линейные размеры блоков должны быть меньше расстояний между источниками, стоками, дренами. Эти требования не учитываются в отношении задания площадного питания и разгрузки.

Расчетная дискретизация разреза области фильтрации должна обеспечить выделение всех эксплуатируемых водоносных горизонтов, а также других горизонтов, в которых прогнозируется понижение уровней подземных вод. Дискретизация разреза тем самым должна обеспечить отражение на модели дифференциации напоров по глубине моделируемой области фильтрации. В отличие от региональной модели, на локальных моделях должна быть обеспечена возможность получения прогнозных решений применительно не только к балансу подземных вод всей слоистой системы, но и к распределению уровней во всех элементах разреза этой системы, необходимость прогнозирования которых возникает при оценке ЭЗПВ.

Размеры блоков должны также обеспечить возможность контроля изменения в них напоров и понижений уровня по имеющимся скважинам наблюдательной сети, расходов родников, разгрузки в реки и другим независимым фактическим данным.

4. *Реализация граничных условий и их временная дискретизация.* Задание граничных условий осуществляется таким образом, чтобы были отражены ступенчатыми или линейными графиками основные закономерности изменения уровней и расходов в блоках, моделирующих граничные условия I, II и III рода. Временна́я дискретизация решения определяется как техническими требованиями к реализации процесса фильтрации на модели (в данной работе не рассматриваются), так и требованиями к получению информации о характере изменения уровней, расходов и балансовых составляющих потока во времени.

При моделировании откачек должны быть получены временные графики изменения уровней и расходов в течение периода откачки (часы и сутки), а при воспроизведении работы водозаборных сооружений — месяцы и годы.

Часто возникает необходимость различной дробности схематизации граничных условий во времени. Так, при реализации работы водозаборного сооружения в течение многолетнего расчетного срока принимаются среднегодовые расходы и уровни. Но при необходимости реализации внутригодовых изменений расходов и уровней используются решения — фрагменты во времени. Например, для воспроизведения ступенчатого режима работы водозаборных сооружений, ре-

жима сработки запасов в межень и их восполнения в паводок задаются среднемесячные характеристики. Решение в таком случае может охватить годовой период или несколько характерных лет.

Взаимосвязь подземных вод водонапорной системы с поверхностными водами моделируется введением граничного условия III рода с обобщенным фильтрационным сопротивлением $\varphi^0$, характеризующим сопротивление рек и несовершенство их русел по степени и характеру вскрытия. Для оценки величины этого сопротивления достаточно знать разницу между средним напором подземных вод в блоке $H$ и средней отметкой уровня воды в реках (средней отметкой выходов родников) — $\tilde{H}$, а также величину разгрузки в пределах блока $\bar{Q}$. Тогда

$$\varphi^0 = \frac{H - \tilde{H}}{\bar{Q}}. \tag{8.4}$$

Поскольку величина сопротивления $\varphi^0$ зависит от площади блока, удобнее оперировать обобщенными параметрами водообмена $A_0$, характеризующими сопротивление, приходящееся на единицу площади. Для его определения используется зависимость

$$A_0 = \frac{H - \tilde{H}}{M \cdot 86{,}4} \cdot 10^6,$$

где $M$ — модуль подземного стока в реки, л/с · км$^2$.

Питание и разгрузка подземных вод моделируется путем задания в центр блока граничного условия II рода.

Рассмотренные выше некоторые методические приемы позволяют составить сравнительно простые региональные модели, которые вместе с тем с необходимой степенью детальности отражают реальные закономерности процессов геофильтрации.

При отсутствии достаточной информации о параметрах питающих горизонтов на верхней и нижней границах могут задаваться граничные условия III рода, реализующие уровенную поверхность питающих горизонтов в каждом блоке. Такой прием также широко применяется при фрагментировании разреза моделируемой области фильтрации. В этом случае в питающих блоках задаются функции напоров, снятые с общей модели.

### 8.3. ОСОБЕННОСТИ МЕТОДИКИ РЕШЕНИЯ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ

В общем случае в состав моделирования может входить серия обратных стационарных и нестационарных задач по воспроизведению фильтрации в естественных и естественно-антропогенных гидродинамических условиях, при эксплуатации водозаборных сооружений и опытно-фильтрационных работах.

Решение обратных задач может производиться в двух основных вариантах:

1) по заданным уровенным характеристикам производится расчет гидрогеологических параметров или величины питания подземных вод;

2) на базе исходной геофильтрационной модели путем перебора ряда вариантов решения задач по воспроизведению потоков подземных вод проводится уточнение ее параметров и граничных условий до достижения удовлетворительного соответствия натурной и модельной гидродинамических пространственно-временны́х структур потоков.

Второй вариант используется наиболее широко при решении обратных задач с целью уточнения исходной информации для оценки ЭЗПВ.

В качестве исходной информации для решения обратных задач обычно служат погоризонтные карты гидрогеологических параметров, пьезоизогипс и гидроизогипс, карты разности напоров смежных водоносных горизонтов в разрезе, условий питания и разгрузки на верхней границе области фильтрации, характеристики плановых границ моделируемой области фильтрации, графики изменения уровней при откачках и наблюдениях за естественным и нарушенным режимом подземных вод.

При решении стационарных задач уточняются преимущественно фильтрационные параметры и граничные условия (питание и разгрузка), характеризующие пространственную гидродинамическую структуру потока; при решении нестационарных задач — емкостные параметры и изменения условий на границах пласта, характеризующие временну́ю структуру потока.

При решении обратных стационарных задач могут уточняться принципиально любые параметры (кроме емкостных) исходной фильтрационной модели. Однако в практике моделирования стационарная задача сводится в основном к уточнению параметров вертикальной гидропроводности, характера взаимосвязи водоносных горизонтов между собой и с поверхностными водами, а также величины питания подземных вод. Это объясняется различной степенью достоверности соответствующей исходной информации.

Как правило, наиболее достоверными являются карты пьезоизогипс и водопроводимости водоносных горизонтов, методика построения которых изложена в гл. 5. Достаточно надежно могут быть также установлены условия в разрезе и плане на границах области фильтрации при соответствующих ограничениях ее размеров. Самая надежная характеристика может быть получена по изменениям уровней подземных вод в наблюдательных скважинах, особенно при целенаправленно проведенных откачках. Поэтому эти данные обычно являются основой подбора. Достаточно представительной в ряде случаев может быть информация по характеристике расходов водозаборных сооружений, скважин, родников, измеренной разгрузки в реки и т. п.

Решение обратных задач рекомендуется осуществлять в следующей последовательности:

1. Воспроизведение на фрагментарных детальных моделях наиболее представительных откачек в стационарной и нестационарной постановках. Эти решения входят в состав обработки результатов опытно-фильтрационных работ и используются при обосновании геофильтрационных моделей месторождений подземных вод. Как прави-

ло, при воспроизведении на моделях результатов откачки используется более дробная схематизация разреза и дискретизация области фильтрации, чем на общих моделях, что особенно важно для уточнения параметров вертикальной фильтрации, а также взаимосвязи подземных и поверхностных вод.

2. Решение стационарной задачи по воспроизведению гидродинамической структуры бытового потока подземных вод в пределах разведанного месторождения на период исследований, а на месторождениях с нарушенной эксплуатацией гидродинамической обстановкой — и на период до начала эксплуатации. Эффективно также использование метода последовательной смены стационарных состояний, позволяющего осуществлять воспроизведение потока на различные наиболее характерные периоды времени, на которые имеется достаточная информация по характеристикам распределения уровней по площади и в разрезе моделируемой территории.

3. Решение обратной нестационарной задачи по воспроизведению на модели опыта эксплуатации действующих водозаборных сооружений.

При отсутствии опыта эксплуатации полезно воспроизведение на общей модели месторождения опытных откачек, моделирование которых было выполнено ранее на моделях-врезках. Это позволяет осуществить корректировку общей модели и оценить погрешности от изменения степени дискретизации области фильтрации на детальной модели откачки и на общей модели месторождения.

При решении на одной и той же площади обратных стационарных и нестационарных задач производится взаимная корректировка и увязка их результатов между собой. Это связано с различной чувствительностью модели к изменению одних и тех же параметров и граничных условий при различных уклонах потока.

В пределах одного и того же участка модели (при неизменных фильтрационных параметрах) бóльшим уклонам соответствуют бóльшие расходы потока подземных вод, баланс которого контролирует надежность решения при подборе удовлетворительного соответствия натурного и модельного распределения напоров (уровней) подземных вод. При малых расходах их роль в общем балансе подземных вод месторождения невелика, и поэтому модель мало чувствительна к изменению исходных фильтрационных параметров на таких участках. Поэтому при близких абсолютных значениях напоров им могут соответствовать различные значения фильтрационных параметров и соответствующих им расходов потока.

Поэтому основным критерием оценки меры соответствия модели и натуры при решении обратных задач должны являться не только и не столько расхождения сопоставляемых модельных и натурных значений напоров по абсолютной величине, сколько соответствие уклонов потока в водоносном горизонте и разностей напоров в смежных водоносных горизонтах, характеризующие расход потока. Эти характеристики более чувствительны к изменению параметров. При достижении удовлетворительного соответствия плановых и вертикальных градиентов напора (уклонов потока) на модели и в натуре

обеспечивается соответствующая адекватность модельных и натурных расходов потока со значительно большей точностью, чем при подборе по абсолютным значениям напоров в отдельных блоках модели, соответствующих имеющимся наблюдательным скважинам.

Для сопоставления натурных и модельных значений уровней и уклонов потока и анализа причин получаемых расхождений между ними модельные решения для различных вариантов обратной задачи наносятся на профили, направленные преимущественно вдоль потока. Количество и направление профилей выбираются с таким расчетом, чтобы наиболее полно можно было охарактеризовать изучаемую территорию и характерные элементы потока.

При рассмотрении модельных и натурных изменений уровня во времени в наблюдательных скважинах при решении нестационарных задач сопоставляются не только абсолютные значения понижений уровней, но и темп и характерные особенности графиков их изменений во времени.

Это не значит, что можно допускать значительные отклонения модельного решения от абсолютных значений фактических понижений и уровней, но нельзя ограничиваться только их сопоставлением, так как в этом случае нельзя достигнуть удовлетворительного соответствия расходов потока.

Надежным критерием соответствия модели натуре является сопоставление измеренных значений разгрузки в реки и дренажи, водоотлива из горных выработок, дебитов самоизливающих скважин и родников с расходами, рассчитанными на модели по соответствующим блокам с граничными условиями I и III рода.

Способ контроля расхода на модели по величине разгрузки, измеренной независимыми методами в полевых условиях, дает достаточно достоверные результаты при подборе фильтрационного сопротивления между рекой и водоносным горизонтом.

Результаты решения обратных задач в конечном итоге сводятся к нахождению такого распределения фильтрационных параметров и величины питания и разгрузки подземных вод, в том числе характеризующих взаимосвязь подземных и поверхностных вод, при котором расхождение между модельными и натурными уровнями, градиентами напора между горизонтами и уклонами потока в отдельных моделируемых горизонтах будут минимальными. Величины допустимых расхождений в каждом конкретном случае принимаются в зависимости от характера и достоверности исходной информации.

В связи с неоднозначностью решения обратных задач уточнение тех или иных элементов геофильтрационной модели месторождения необходимо проводить исходя из возможного диапазона их изменений в соответствии с генетическими особенностями, определяемыми геологическим строением, физико-географическими условиями и другими естественными и антропогенными факторами формирования запасов.

Для обоснования влияния возможного диапазона изменения параметров и граничных условий (прежде всего величины питания) исходной геофильтрационной модели на результаты и достоверность

модельных решений проводится факторно-диапазонная оценка — ФДО (И. К. Гавич, 1980) чувствительности модели к этим изменениям. Эта оценка сводится к последовательной серии решений обратной задачи с заданием характеристик модели в диапазоне, соответствующем их принципиально возможным изменениям в натуре.

По результатам решения этих вариантов проводится анализ чувствительности модели, заключающийся в оценке масштаба изменений модельных значений напоров к масштабу и диапазону изменений параметров и величины питания. В дальнейшем при решении обратных задач проводится подбор только тех характеристик модели, к которым она достаточно чувствительна, т. е. значимым изменениям параметров модели и величины питания соответствуют значимые величины изменения напоров.

Подбор параметров производится последовательно повариантно, начиная с тех, к которым модель наиболее чувствительна. Не следует при переходе от варианта к варианту менять одновременно несколько показателей.

Уточненная в процессе решения обратных задач геофильтрационная модель может быть признана функционально соответствующей природной, если при воспроизведении на ней стационарных и нестационарных потоков сходимость модельных и натурных данных может быть признана удовлетворительной.

Достоверность построенной модели оценивается на основе неформального анализа модельного баланса. Это может быть достигнуто сопоставлением модельных данных и результатов независимых водно-балансовых исследований.

В целом необходимо иметь в виду, что из-за сложности природных условий и недостатка исходных данных фильтрационные модели являются только определенным приближением к реальным природным условиям и отражают лишь достигнутый уровень изученности. Степень достоверности модели существенным образом определяется представительностью комплексного анализа относительно ее непротиворечия всей имеющейся информации как с математических, так и эвристических позиций.

Применительно к ситуации, когда есть основание считать, что адекватность модели не слишком велика, очень четкая позиция приводится в работе И. И. Блехмана и др. «Прикладная математика: предмет, логика, особенности подходов» (1976): «В этих случаях центральную роль играет анализ и совершенствование модели, что же касается вычислительного метода, то желательно, чтобы он был по возможности прост, хотя и учитывал все существенные факторы. Здесь проявляется характерное для прикладной математики искусство грубого решения сложных задач, основанное на опыте, правильной интуиции и правильном понимании реальной картины».

Следовательно, при решении обратных задач содержательный неформальный анализ ситуации является главенствующим по сравнению с математическими и техническими особенностями реализации решения.

### 8.4. ОСОБЕННОСТИ РЕШЕНИЯ ПРОГНОЗНЫХ ЗАДАЧ

Прогнозные решения производятся на базе геофильтрационных моделей, уточненных в результате решения обратных задач.

В общем случае при решении задач напорной фильтрации реализация прогнозных решений трудностей не представляет. Прогнозные задачи могут так же, как и обратные, решаться как в понижениях уровней, так и в напорах. В первом случае решение упрощается, но получается искаженный баланс источников формирования водоотбора.

Основные трудности при решении прогнозных задач связаны с возможными изменениями параметров и граничных условий моделируемой области фильтрации под влиянием эксплуатации.

К таким изменениям, требующим учета при моделировании, относятся:

1) изменение водопроводимости водоносных горизонтов в результате осушения водоносных пластов;

2) разрыв сплошности вертикального потока в результате отрыва уровня от подошвы слабопроницаемого слоя (снижение уровня водоносного горизонта ниже его кровли);

3) разрыв сплошности потока под рекой в результате отрыва уровня от дна реки или подошвы слабопроницаемого слоя и снижения уровня в водоносном горизонте ниже его кровли;

4) изменение фильтрационных свойств подрусловых отложений в результате их эксплуатационной кольматации, а также изменение фильтрационных сопротивлений при изменении периметрического сечения ложа реки;

5) возможность замены граничных условий I и III рода на условия II рода при полной инверсии родников и испарения с уровня грунтовых вод;

6) усиление питания при паводках вследствие залива поймы реки;

7) изменение условий питания вследствие гидротехнического, ирригационного строительства и другой водохозяйственной деятельности;

8) учет дополнительного инфильтрационного питания за счет подземных вод, используемых для орошения (частичный возврат используемых вод);

9) возможность ввода новых водозаборных сооружений и увеличения нагрузки на действующие, взаимодействующие с оцениваемыми как в пределах моделирующей области фильтрации, так и за ее пределами.

Учет перечисленных изменений требует соответствующих изменений геофильтрационных моделей в отношении прежде всего граничных условий. Методические и технические приемы учета этих изменений в принципе достаточно разработаны и могут быть реализованы с той или иной степенью приближения.

Поэтому главным в прогнозных решениях является определение на основе анализа природной ситуации обеспеченности эксплуатационных запасов различными источниками формирования и

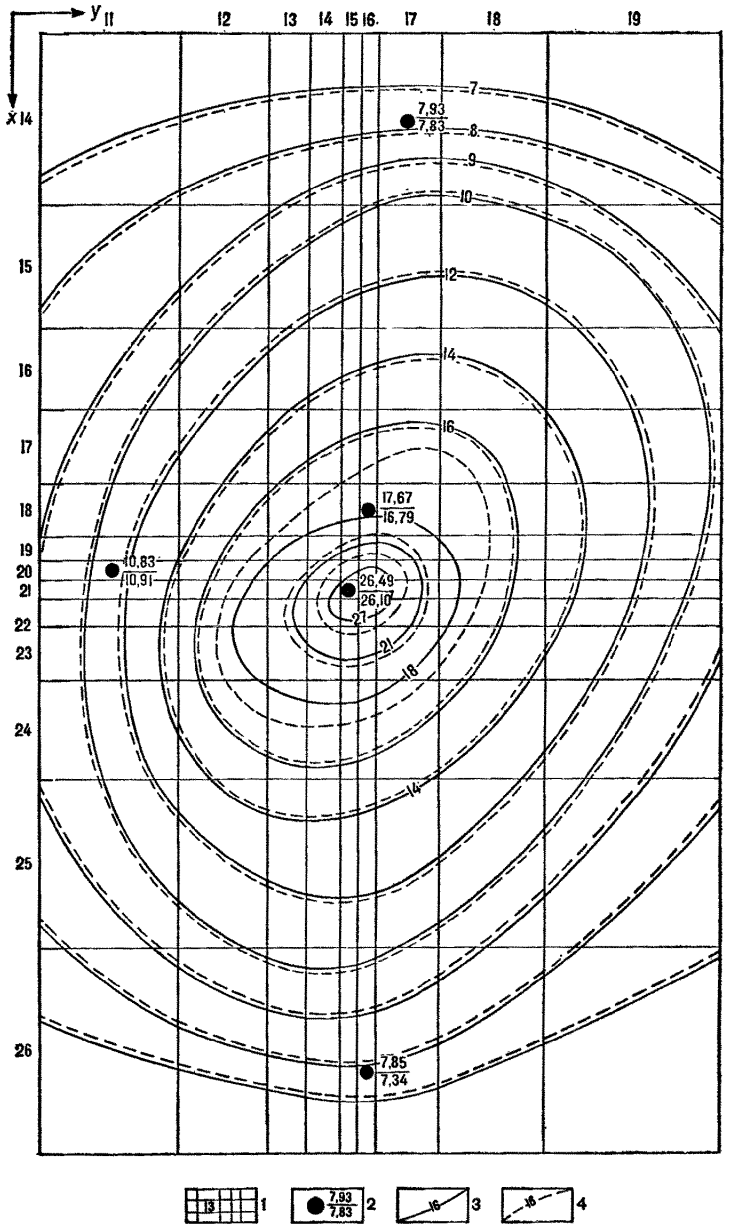



Рис. 50. Схема депрессионной воронки при откачках из опытного куста и воспроизведении ее на ЦВМ (Кольчугинское месторождение, по данным Е. Г. Ершова, 1986):

*1* — блоки модели; *2* — скважина: цифры в числителе — фактическое понижение уровня, в знаменателе — модельное, м; *3* — изолиния фактического понижения уровня, м; *4* — то же по данным моделирования

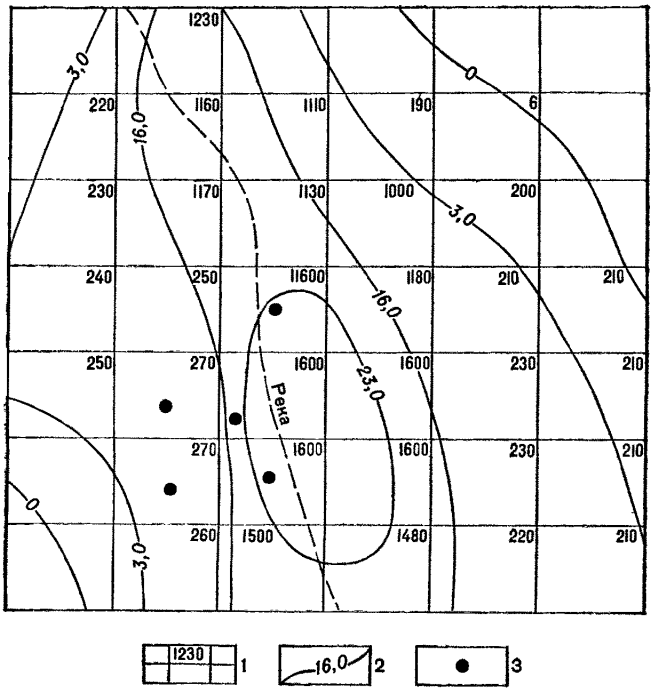



Рис. 51. Схематическая карта величин перетока через юрско-пермскую глинистую толщу в клязьминско-ассельский водоносный горизонт на фрагменте модели Кольчугинского месторождения (рис. 19) по данным моделирования на ЦВМ, водоотбор 51,8 тыс. м³/сут (по данным Г. Е. Ершова, 1986):

*1* — блок сетки модели, цифра в блоке — переток на площади блока (0,8 км²) на расчетный срок, м³/сут; *2* — изолиния модулей перетока, л/с · км²; *3* — водозаборная скважина

количественные ограничения последних. На этой основе в программу решения прогнозных задач вводятся условия и ограничения по снижению уровней и допустимого увеличения питания (например, из реки), при достижении которых требуются соответствующие изменения граничных условий, заданных на модели.

В тех случаях, когда эти ограничения наступают быстро, в прогнозную модель вносятся соответствующие изменения по сравнению с исходной, обоснованной результатами решения обратных задач, еще до начала прогнозных решений.

При оценке динамики снижения уровня грунтовых вод в связи с их возможным влиянием на окружающую среду при решении прогнозных задач особое внимание следует уделять заданию изменения граничных условий на их свободной поверхности.

Решение прогнозных задач возможно в различных вариантах при разных задаваемых величинах водоотбора на оцениваемом месторождении и динамике его изменения во времени, а также водохо-

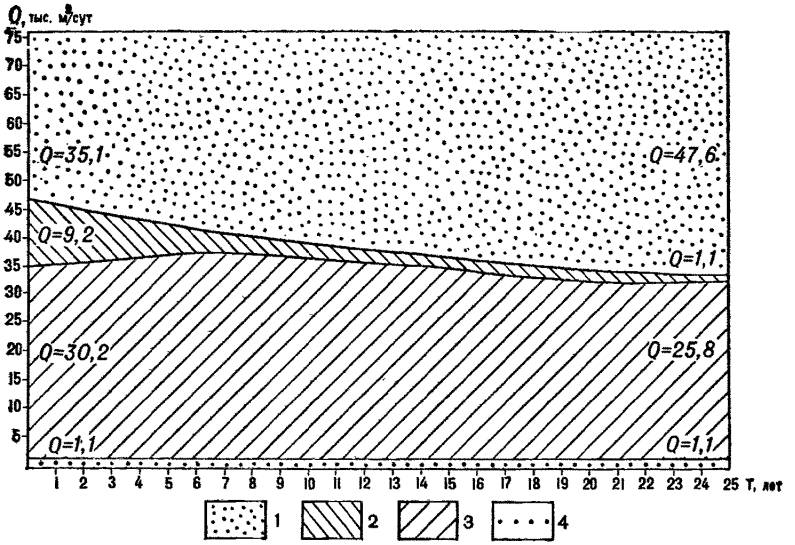



Рис. 52. График баланса прогнозного водоотбора (по фрагменту модели Кольчугинского месторождения) по результатам моделирования на ЦВМ (по данным Г. Е. Ершова, 1986):

*1* — переток сверху из мезо-кайнозойских горизонтов; *2* — переток за счет емкости юрско-пермской глинистой толщи; *3* — приток с границ выделенного фрагмента; *4* — переток снизу из клязьминского горизонта

зяйственной обстановке и ее планируемых изменениях в пределах области влияния оцениваемого месторождения.

Результаты решений обратных и прогнозных задач могут быть представлены в виде карт, схем, профилей, графиков и т. п. Примеры некоторых графических материалов результатов моделирования приведены на рис. 50—52.

**Контрольные вопросы, задания.** 1. Какими основными преимуществами характеризуется метод математического моделирования оценки ЭЗПВ перед аналитическими методами? 2. В чем заключаются основные способы оценки ЭЗПВ на математических моделях? 3. Как обосновывается выбор размеров моделируемой области фильтрации? 4. Чем различаются региональные и локальные математические модели и как они увязываются между собой? 5. Охарактеризуйте основное назначение решения обратных задач методом моделирования. 6. Чем различаются принципы решения основных типов обратных задач? 7. С какой целью оценивается чувствительность модели к изменению различных элементов геофильтрационной схемы? 8. Какие изменения могут вноситься в модель, полученную в результате решения обратных задач при прогнозных расчетах? 9. В чем заключаются возможности и преимущества результатов графического отображения оценки запасов методом моделирования?

# ГЛАВА 9. ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ВОДОЗАБОРНЫХ СООРУЖЕНИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД И МЕТОДЫ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ АНАЛОГОВ

## 9.1. ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Гидравлические методы, общая характеристика которых приведена в гл. 4, применяются для расчетов одиночных скважин и водозаборных сооружений, состоящих из небольшого числа взаимодействующих скважин. Расчеты могут выполняться в условиях как установившегося, так и неустановившегося режима фильтрации.

В первом случае для расчетов используются эмпирические зависимости между дебитом скважин и понижением уровня в них, а также данные о величинах срезок уровней во взаимодействующих скважинах; во втором — эмпирические закономерности изменения уровня во времени.

Расчеты сводятся к определению прогнозного понижения уровня при допустимой экстраполяции дебита (в пределах балансовой обеспеченности ЭЗПВ) и экстраполяции понижения уровня во времени в пределах достигнутого при опытных откачках расхода или в условиях эксплуатации.

Гидравлические расчеты одиночных и взаимодействующих скважин имеют специфические особенности, кратко рассмотренные ниже.

Расчет одиночных скважин. В обобщенном виде зависимость для расчета одиночных водозаборных скважин гидравлическим методом можно представить в следующем виде:

$$S_э^0 = S_э' + \Delta S_э(t), \tag{9.1}$$

где $S_э^0$ — расчетное понижение уровня воды в скважине при проектном (эксплуатационном) дебите $Q_э$ на конечный срок эксплуатации водозаборного сооружения; $S_э'$ — понижение уровня воды в скважине, определяемое по кривой зависимости дебита от понижения для заданного проектного расхода на момент окончания опытной откачки; $\Delta S_э(t)$ — дополнительное понижение уровня в скважине с проектным эксплуатационным дебитом при неустановившемся режиме за время от окончания опытной откачки до конца срока, на который рассчитываются эксплуатационные запасы.

Для определения $S_э'$ опытные откачки из скважины проводят минимум с двумя дебитами. По данным этих откачек строится эмпирический график (кривая дебита) $Q = f(S)$, который затем используется для графического определения понижения уровня воды в скважине при запроектированном эксплуатационном дебите путем экстраполяции полученной зависимости до проектного расхода. Экстраполяция может выполняться также по аналитическим зависимостям дебита от понижения, установленным эмпирически для различных условий.

Для напорных вод теоретическая зависимость дебита от понижения линейная:

$$Q_э = qS'_э; \quad S'_э = S_0 \frac{Q_э}{Q_0}, \tag{9.2}$$

где $Q_э$ и $Q_0$ — эксплуатационный и опытный дебиты скважины; $S'_э$ и $S_0$ — соответствующие этим дебитам понижения уровня воды; $q$ — удельный дебит скважины.

На практике линейная зависимость дебита от понижения часто нарушается, так как при откачке в стволе скважины и в прискважинной зоне может возникнуть дополнительное сопротивление движению подземных вод за счет турбулентности потока. Поэтому в общем случае связь дебита и понижения как в напорных, так и в безнапорных условиях описывается квадратичной зависимостью

$$S_э = aQ_э + bQ_э^2, \tag{9.3}$$

где $a$ и $b$ — эмпирические параметры, определяемые по кривым дебита.

При расчетах по кривым дебита первоначально по опытам данным строят график зависимости $Q = f(S)$. При линейной зависимости дебита от понижения для определения $Q_э$ используется величина $q$. При криволинейной зависимости исходя из зависимости (9.3) строят график функции $\frac{S}{Q} = f(Q)$, который должен иметь форму, близкую к линейной.

В безнапорных водоносных пластах допускаются пределы экстраполяции понижения уровня подземных вод по кривым дебита до 1,5—2,0 максимальных понижений $S_{max}$, достигнутых при опытных откачках. В напорных водах предел возможной экстраполяции составляет (2...3) $S_{max}$.

Значение $\Delta S_э(t)$, входящее в формулу (9.1), может быть рассчитано по данным опытно-фильтрационных работ аналитически или графически.

Аналитическая форма экстраполяции может использоваться при достижении квазистационарного режима фильтрации. Тогда понижение уровня на любой момент квазистационарного режима может быть определено по следующей зависимости для неограниченного пласта:

$$S_t = \frac{Q_0}{4\pi (km)_{ср}} \ln \frac{2{,}25 a_{ср} t_t}{r_c^2}, \tag{9.4}$$

где $S_t$ — понижение уровня при откачке с дебитом $Q_0$ на момент времени $t_t$; $(km)_{ср}$ и $(a)_{ср}$ — обобщенные параметры водопроводимости и пьезопроводности, совокупно учитывающие неоднородность фильтрационных свойств области фильтрации и граничные условия.

Записав уравнение (9.4) на конец откачки $t_2$, один из ее текущих моментов $t_1$ и на конечный период эксплуатации $t_э$, величина $\Delta S_э(t)$ может быть определена из решения полученной системы уравнений:

$$\Delta S_э(t) = \frac{Q_э}{Q_0}(S_{t_2} - S_{t_1}) \cdot \frac{\ln t_э/t_2}{\ln t_2/t_1}. \tag{9.5}$$

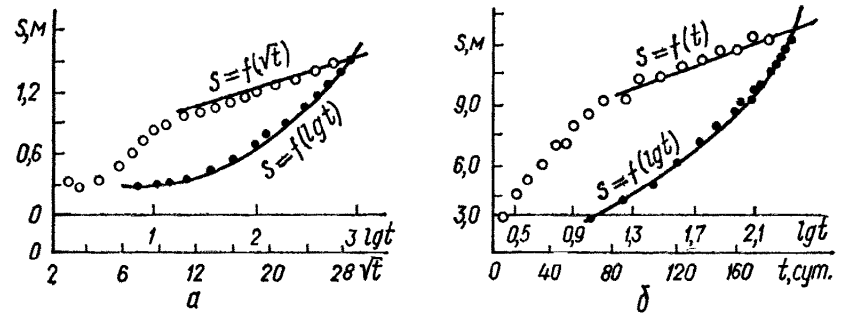



Рис. 53. Графики экспериментальных зависимостей для прогноза снижения уровня во времени гидравлическим методом:

*а* — при прямолинейной зависимости $S = f(\sqrt{t})$; *б* — при прямолинейной зависимости $S = f(t)$

Зависимость (9.4) может быть справедлива для любого типа пластов, если в прямолинейной опытной зависимости $S = f(\lg t)$ отражены все границы пластов и фильтрационной неоднородности, которые могут определять закономерности снижения уровня при эксплуатации.

В более сложных гидрогеологических условиях, например в пластах, близких к круговым, полосовым и более сложной конфигурации, эмпирическая зависимость понижений от времени может принимать прямолинейную форму в координатах $S = f(\sqrt{t})$ или $S = f(t)$. Тогда в уравнении (9.5) вместо соотношения логарифмов времени следует использовать соответственно соотношение $\sqrt{t}$ или натурных значений $t$.

Для графической экстраполяции результатов опыта при определении $\Delta S_э(t)$ используются графики $S = f(\ln t)$, $S = f(\sqrt{t})$ или $S = f(t)$. В качестве расчетного выбирается график, наиболее соответствующий прямолинейной зависимости.

На рис. 53 приведены примеры таких графиков, построенных по данным опытных откачек, проведенных в сложных гидрогеологических условиях на участках развития трещинно-карстовых и трещинно-жильных вод. Как видно из рисунка, в обоих случаях зависимость $S = f(\lg t)$ имеет четко выраженную криволинейную форму, причем кривые обращены выпуклостью вниз, что свидетельствует об отклонении гидрогеологических условий опробуемых участков от условий неограниченного пласта в сторону ухудшения условий притока воды к участку опробования вследствие влияния зон с низкими фильтрационными свойствами.

В первом случае (рис. 53, *а*) при опробировании трещинно-карстового пласта неправильной полосообразной формы, вложенного в слаботрещиноватые породы, прямолинейной зависимости соответствует график $S = f(\sqrt{t})$. Во втором при опробовании трещинно-жильных вод прямолинейный характер имеет график $S = f(t)$ (рис. 53, *б*), что характерно для замкнутого пласта. В обоих случаях вид зависимостей, характеризующихся прямолинейной формой графиков

$S = f(t)$, отвечает гидрогеологическим условиям участка опробования.

Дополнительное понижение уровня $\Delta S_э(t)$ и конечное понижение $S_э^0$, соответствующее расчетному времени эксплуатации, определяется по формулам:

$$\Delta S_э(t) = \frac{Q_э}{Q_0}\Delta S_0(t) \text{ и } S_э^0 = S_0' + \frac{Q_э}{Q_0}\Delta S_0(t), \tag{9.6}$$

где $\Delta S_0(t)$ — дополнительное понижение на расчетный срок $t$ при опытном дебите скважины, определяемое по тому или иному временному графику.

При откачках в условиях установившегося движения расчет одиночной скважины ограничивается расчетом по кривой дебита.

При переменном дебите аналогичные графики строятся для удельного понижения $S/Q$.

Расчет взаимодействующих скважин. Общая зависимость для расчета системы взаимодействующих скважин может быть представлена в следующем виде:

$$S_э = S_э^0 + \sum_{i=1}^{n-1}\Delta S_i\frac{Q_{эi}}{Q_{0i}} + \Delta S_{0j}(t)\frac{\sum_{i=1}^{n}Q_{эi}}{\sum_{j=1}^{n'}Q_{0j}}, \tag{9.7}$$

где $\Delta S_i$ — срезка уровня в расчетной скважине водозаборного сооружения на конец опытной откачки из $i$-й скважины с дебитом $Q_{0i}$; $Q_{эi}$ — проектный дебит $i$-й скважины водозаборного сооружения; $n$ — число водозаборных скважин; $\Delta S_{0j}(t)$ — суммарная временная срезка уровня в расчетной скважине на конец расчетного срока эксплуатации при суммарном дебите $\sum_{j=1}^{n'}Q_{0j}$; $n'$ — число скважин, участвовавших в опытной откачке с дебитами $Q_{0j}$.

При установившемся режиме последнее слагаемое в формуле (9.7) равно нулю, и расчет ограничивается расчетом срезок уровней, достигнутых при опытных откачках.

При неполной информации об условиях взаимодействия скважин расчет срезок уровня $\Delta S_i$ от исходной $i$-й скважины может быть выполнен по сводному графику $\frac{\Delta S_{0j}}{Q_{0j}} = f(\ln r)$, построенному по данным всех откачек, или $\Delta S = f(\ln r)$ и $\Delta S = f(r)$ — для каждой откачки. Такой прием наиболее удобен для гидравлических расчетов водозаборных сооружений в долинах рек.

Наиболее обоснованно расчет понижений при неустановившемся движении может быть выполнен, если опытный суммарный расход соизмерим проектным, а в процессе опытно-эксплуатационной откачки опробовались все скважины будущего водозаборного сооружения и был достигнут квазистационарный режим снижения уровней в условиях взаимодействия всех опробованных скважин.

Тогда уравнение (9.7) превращается в уравнение (9.1).

Величина срезки уровня во времени в этом случае может быть определена и по зависимости (9.5), но тогда вместо $Q_э$ одиночной скважины в расчетах принимается суммарный дебит водозаборного сооружения, а вместо $Q_0$ — суммарный дебит групповой откачки.

При разновременном опробовании скважин в схеме проектного водозаборного сооружения не всегда удается достичь одинакового темпа снижения уровня по отношению к единичному расходу. В таком случае общая срезка уровня во времени рассчитывается по результатам самой длительной откачки. Дополнительные срезки во времени от других откачек определяются только на период, соответствующий разнице в продолжительности откачек.

Рассмотрим пример расчета взаимодействующих скважин, опробованных при неустановившемся режиме фильтрации.

**Пример.** Для оценки эксплуатационных запасов подземных вод напорный водоносный горизонт (напор под кровлей 30 м) в трещиноватых породах вскрыт тремя разведочно-эксплуатационными скважинами, из которых произведены одиночные откачки при неустановившемся режиме фильтрации. Результаты этих откачек приведены в табл. 9.1 и 9.2.

Определим гидравлическим методом возможность получения из пробуренных скважин 5200 м³/сут воды в течение расчетного срока эксплуатации $t = 10^4$ сут.

Расчет водозаборного сооружения выполним в соответствии с зависимостью (9.7).

Для определения в каждой из трех водозаборных скважин значений $S'_э$ по данным опытных откачек строим графики зависимости $\frac{S}{Q} = f(Q)$, которая наиболее часто удовлетворяет условиям откачки из напорных водоносных горизонтов. Из табл. 9.1 следует, что для построения графиков возможно использование понижений, полученных при продолжительности откачек, равной 3 сут. Исходя из заявленной потребности в воде (5200 м³/сут), эксплуатационный дебит каждой скважины составит

$$Q_э = \frac{5200}{3} = 1400 \text{ м}^3/\text{сут} \approx 20 \text{ л/с}.$$

По графикам (рис. 54) находим значение $S'_э$ при $Q_э$ (табл. 9.3).

Определение прогнозных срезок $\Delta S_t \frac{Q_{эi}}{Q_{0i}}$ поочередно выполним, принимая опытные срезки $\Delta S_t$ на момент $t_2 = 3$ сут при дебитах 15 л/с. Результаты расчетов сведены в табл. 9.4.

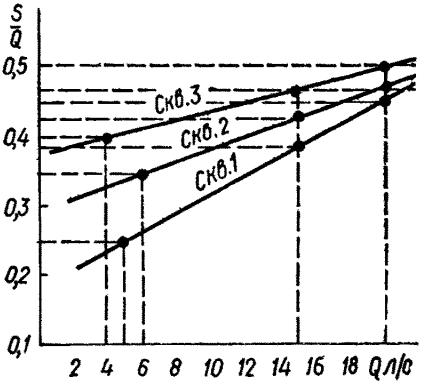
**9.1. Данные опытных откачек из пробуемых скважин**

| № скважины | Дебит скважины, л/с | Понижение уровня воды в скважинах, м | |
|---|---|---|---|
| | | $t =$ = 1,5 сут | $t =$ = 3,0 сут |
| 1 | 5 | — | 1,2 |
| | 15 | 5,4 | 5,7 |
| 2 | 6 | — | 2,2 |
| | 15 | 6,1 | 6,4 |
| 3 | 4 | — | 1,6 |
| | 15 | 6,7 | 7,1 |

**9.2. Понижения уровня воды в скважинах, вызванные откачками из других скважин (срезки уровня)**

| Время от начала откачки, сут | Понижение уровня воды в скважинах, м | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | от скв. 2 | от скв. 3 | от скв. 1 | от скв. 3 | от скв. 1 | от скв. 2 | |
| | скв. 1 | | скв. 2 | | скв. 3 | | |
| $t_1 = 1,5$ | 1,8 | 1,5 | 1,9 | 1,2 | 1,6 | 1,2 | |
| $t_2 = 3,0$ | 2,0 | 1,7 | 2,1 | 1,4 | 1,9 | 1,4 | |

Рис. 54. Графики зависимости $\frac{S}{Q} = f(Q)$ для расчета взаимодействующих скважин гидравлическим методом




Суммарные срезки:

$$\Delta S_{0j}(t)\frac{\sum_{i=1}^{n} Q_{эi}}{\sum_{j=1}^{n-1} Q_{0j}}$$

определяем, приннмая $n = n'$, а значение $\Delta S(t)$ находим, используя формулу (9.5). Результаты сведены в табл. 9.5.

Согласно (9.7) общие прогнозные уровни воды в скважинах составят: скв. 1 — 25,12 м; скв. 2 — 25,0; скв. 3 — 28,37 м.

Допустимое понижение в заданных условиях может быть принято равным напору над кровлей горизонта, т. е. $S_{доп} = 30$ м, что больше расчетных значений.

Одной из разновидностей гидравлических расчетов взаимодействующих скважин на действующих водозаборных сооружениях является метод удельных депрессионных воронок Н. А. Плотникова (1959).

По данным эксплуатации определяется удельный водоотбор $q_{ср}$ на единицу понижения уровня $\left(q_{ср} = \frac{Q_{ср}}{S_{ср}}\right)$, соответствующий фактическому водоотбору $Q_{ср}$ при понижении уровня в центре депрессионной воронки $S_{ср}$.

**9.3. Рассчитанные значения $S'_э$, м**

| Скважина 1 | | Скважина 2 | | Скважина 3 | |
|---|---|---|---|---|---|
| $\frac{S'_э}{Q_э}$ | $S'_э$ | $\frac{S'_э}{Q_э}$ | $S'_э$ | $\frac{S'_э}{Q_э}$ | $S'_э$ |
| 0,45 | 9,0 | 0,47 | 9,4 | 0,5 | 10,0 |

**9.4. Рассчитанные значения** $\sum_{i=1}^{n-1} \Delta S_i \frac{Q_{эi}}{Q_{0i}}$, м

| Скважина 1 | | Скважина 2 | | Скважина 3 | |
|---|---|---|---|---|---|
| от скв. 2 | от скв. 3 | от скв. 1 | от скв. 3 | от скв. 1 | от скв. 2 |
| 2,67 | 2,27 | 2,80 | 1,87 | 2,53 | 1,87 |

**9.5. Рассчитанные значения** $\Delta S_{0j}(t)\frac{\sum_{i=1}^{n} Q_{эi}}{\sum_{j=1}^{n'} Q_{0j}}$, м

| В скважине 1 от | | | В скважине 2 от | | | В скважине 3 от | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| скв 1 | скв. 2 | скв. 3 | скв. 2 | скв 1 | скв 3 | скв 3 | скв. 1 | скв. 3 |
| 4,72 | 3,33 | 3,13 | 4,70 | 3,10 | 3,13 | 6,27 | 4,67 | 3,03 |

Проектный водоотбор $Q_{пр}$ в пределах обеспеченности запасов определяется в соответствии с величинами допустимого понижения ($S_{доп}$) и удельного водоотбора:

$$Q_{пр} = q_{ср} \cdot S_{доп}. \qquad (9.8)$$

Основные ошибки при использовании гидравлического метода связаны: 1) с неправильным обоснованием приемов экстраполяции опытных расходов из-за недостаточности данных об обеспеченности ЭЗПВ; 2) с необоснованностью экстраполяции закона изменения уровня во времени.

При расчете водозаборных сооружений гидравлическим методом необходимо иметь в виду, что формула (9.7) принципиально является правомочной для напорных водоносных горизонтов. Поэтому в случае безнапорных или напорно-безнапорных горизонтов, когда прогнозное понижение уровня превышает 20 % их мощности, необходимо полученное по формуле (9.7) прогнозное понижение скорректировать в соответствии с зависимостями (7.2) или (7.3).

### 9.2. МЕТОДЫ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ АНАЛОГОВ

Использование метода гидрогеологических аналогов для оценки ЭЗПВ базируется на обосновании соответствия (полного или частичного) условий формирования запасов вновь разведуемого месторождения и месторождения-аналога, детально изученного по результатам эксплуатации или разведочных работ.

При обосновании подобия двух таких рассматриваемых объектов должны быть выявлены те особенности их природных гидрогеологических моделей, которые либо определяют общность условий формирования ЭЗПВ и по комплексу факторов обусловливают удельную величину запасов, либо сходны по отдельным факторам (условия питания, граничные условия, параметры слабопроницаемых пород и т. п.), которые не могут быть с необходимой достоверностью изучены в процессе разведочных работ или на такое изучение требуются неоправданно большие затраты. Поэтому при оценке ЭЗПВ методом гидрогеологических аналогов должно быть прежде всего установлено качественное сходство или количественное подобие вновь оцениваемого объекта и объекта-аналога. На этой основе выбираются те элементы информационной характеристики природной гидрогеологической модели-аналога, которые могут быть использованы при оценке ЭЗПВ оцениваемого объекта.

Степень использования гидрогеологических характеристик, полученных на объекте-аналоге, может быть частичной (аналогия по отдельным показателям или параметрам) или полной (аналогия по комплексу факторов, определяющих величину, линейный или площадной модуль ЭЗПВ).

Метод частичной аналогии предполагает перенесение на изучаемую территорию данных об отдельных факторах формирования или параметрах подсчета эксплуатационных запасов. Он может быть использован для решения следующих задач:

1) качественного доказательства процессов формирования ЭЗПВ (например, доказательства полного восполнения емкостных запасов аллювиальных отложений, срабатываемых в межпаводковый период, во время затопления поймы при паводках);

2) обоснования расчетной фильтрационной схемы;

3) принятия расчетных величин гидрогеологических параметров водоносных и слабопроницаемых пластов, которые не могут быть достоверно определены по данным разведочных работ (например, параметры перетекания, водоотдача трещиноватых и закарстованых пород и т. д.);

4) определения отдельных составляющих формирования ЭЗПВ (например, модуля инфильтрационного питания, удельного поглощения поверхностного стока, модуля динамических ресурсов и т. д.).

Окончательный подсчет запасов в этих случаях производится гидравлическими или гидродинамическими методами.

Методом полной аналогии производится:

1) непосредственный подсчет ЭЗПВ подземных вод;

2) прогноз эксплуатационных понижений в водозаборных сооружениях.

Для подсчета ЭЗПВ по аналогии обычно используется величина площадного или линейного модуля эксплуатационных запасов.

Площадной модуль $M'_э$ представляет собой расход воды (л/с), который можно получить с 1 км$^2$ площади распространения водоносного горизонта при заранее обусловленном понижении уровня подземных вод и расчетном сроке эксплуатации. Использование этого модуля целесообразно при оценке эксплуатационных запасов подземных вод водоносных горизонтов, эксплуатация которых возможна при помощи площадных систем водозаборных скважин, либо в том случае, когда формирование запасов происходит в пределах установленной водосборной площади. Величина площадного модуля на участке-аналоге определяется по формуле

$$M'_{эа} = \frac{Q_э}{F}, \tag{9.9}$$

где $M'_{эа}$ — модуль эксплуатационных запасов подземных вод, л/с × × км$^2$; $Q_э$ — эксплуатационные запасы подземных вод л/с, на площади распространения водоносного горизонта $F$, км$^2$, на объекте-аналоге.

Линейный модуль эксплуатационных запасов выражает расход линейного водозабора $Q$, л/с, приходящийся на 1 км его длины. Для участка-аналога величину этого модуля $M''_{эа}$, л/с · км, рассчитывают по данным разведочных работ или эксплуатации водозаборного сооружения, пользуясь соотношением

$$M''_{эа} = \frac{Q_э}{L}, \tag{9.10}$$

где $L$ — длина линейного ряда на объекте-аналоге, км.

Значения линейного модуля устанавливаются для береговых водозаборных сооружений в речных долинах, где в формировании эксплуа-

тационных запасов основную роль играют ресурсы, привлекаемые из поверхностных водотоков. Величина ЭЗПВ на вновь оцениваемом месторождении производится по величине $M_э$, определенной на объекте-аналоге, и фактическим величинам $F$ или $L$ вновь разведанного месторождения.

Для оценки ЭЗПВ по гидрогеологической аналогии обязательно должна быть доказана идентичность гидрогеологических условий вновь оцениваемого участка с эксплуатируемым или детально разведанным. Обоснование степени аналогии сопоставляемых месторождений может осуществляться как на основе качественного анализа, так и по величине коэффициентов или масштабов подобия. Обычно этот вопрос решается исследованием геологического строения и литологических особенностей пласта-коллектора, перекрывающих и подстилающих его пород, структурно-тектонических особенностей территории, строения зоны аэрации, условий возможного расположения водозаборных сооружений. Важно подчеркнуть, что обоснование сходства двух объектов производится не по абсолютным значениям расчетных параметров, а по закономерностям их изменения по площади и в разрезе, а также по граничным условиям. Например, если по аналогии принимается водоотдача трещиноватых и закарстованных пород, необходимо сопоставить их литологию, закономерности изменения трещиноватости и закарстованности; если по аналогии принимается перетекание через слабопроницаемые отложения, должны быть установлены сходство литологического состава этих отложений, условия распространения и восполнения запасов питающего водоносного горизонта, геолого-структурное и тектоническое строение сопоставляемых объектов и т. д.

При оценке эксплуатационных запасов по методу полной аналогии количественные критерии подобия вводятся в расчет определением соотношения тех или иных гидрогеологических показателей и соответствующей корректировкой величины площадного или линейного модуля для вновь оцениваемого участка по сравнению с участком-аналогом. В частности, коррективы могут вноситься, например, по соотношению величин коэффициента водопроводимости и эксплуатационного понижения уровня на участке оценки запасов и участке-аналоге.

Тогда для напорных вод

$$M_{эн} = M_{эа} \frac{k_н m_н S_р}{k_а m_а S_а}; \qquad (9.11)$$

для безнапорных вод

$$M_{эн} = M_{эа} \frac{k_н (2H_н - S_р) S_р}{k_а (2H_а - S_а) S_а}, \qquad (9.12)$$

где $M_{эн}$ и $M_{эа}$ — модули ЭЗПВ (площадной или линейный) соответственно на оцениваемом участке или участке-аналоге; $S_р$ — расчетное понижение уровня подземных вод в центре участка проектируемого водозаборного сооружения; $S_а$ — фактическое понижение уровня подземных вод в центре разведанного участка или участка действую-

щего водозабора, который служит аналогом; $k_a m_a$ — средняя водопроводимость ($k_a$ — коэффициент фильтрации) водоносного горизонта на участке-аналоге; $k_н m_н$ — то же, на новом участке водозаборного сооружения ($k_н$ — коэффициент фильтрации водоносного горизонта на этом участке); $H_a$ и $H_н$ — мощность безнапорного водоносного горизонта соответственно на участке-аналоге и на новом участке.

При определении модуля ЭЗПВ желательно иметь данные по нескольким водозаборам-аналогам, чтобы получить его осредненное значение.

В зависимости от конкретных условий при перенесении модуля эксплуатационных запасов с участка-аналога на оцениваемый участок кроме указанных факторов в расчетах могут быть учтены еще и мощность водоносного горизонта, ширина зоны интенсивной трещиноватости и др. Рассчитав модуль $M_{эн}$ по формулам (9.9) и (9.10), нетрудно определить величину эксплуатационных запасов подземных вод водоносного горизонта в целом или отдельных его участков:

$$Q_{пр} = M'_{эн} \cdot F_н; \tag{9.13}$$

$$Q_{пр} = M''_{эн} L_н, \tag{9.14}$$

где $F_н$ — площадь оценки ЭЗПВ на новом участке; $L_н$ — протяженность линейного водозабора на новом участке.

Прогноз эксплуатационных понижений методом гидрогеологических аналогов может быть выполнен по простым зависимостям:

для напорных вод

$$S_р = S_a \frac{Q_н k_a m_a}{Q_a k_н m_н}; \tag{9.15}$$

для безнапорных вод

$$S_р = H_н - \sqrt{H_н^2 - S_a(2H_a - S_a)\frac{Q_н k_a}{Q_a k_н}}, \tag{9.16}$$

где $Q_a$ и $Q_н$ — суммарный дебит водозаборного сооружения (эксплуатационные запасы) соответственно на участке-аналоге и на новом участке. Остальные обозначения те же, что и в формулах (9.11) и (9.12).

Уравнения (9.15) и (9.16) применимы для оценки запасов при следующих условиях: а) режим фильтрации стационарный; б) площади сопоставляемых участков и число расположенных на них скважин примерно одинаковы. При оценке эксплуатационных запасов подземных вод по методу аналогии, когда продолжительность эксплуатации водозабора-аналога $t_a$ меньше прогнозного срока работы на новом участке $t_э$, в формулах (9.16) и (9.15) необходимо учитывать дополнительное понижение $\Delta S_a(t)$, которое будет формироваться в течение времени ($t_э - t_a$). Для определения этого понижения рекомендуется использовать следующее выражение:

$$\Delta S_a(t) = \frac{Q_a}{4\pi k_a m_a} \ln \frac{t_э}{t_a}. \tag{9.17}$$

Время $t_э$ и $t_a$ отсчитывается от момента, когда водозаборное сооружение введено в действие. Если суммарный дебит водозаборного соору-

жения с течением времени существенно увеличивается, то в (9.17) вместо $Q_а$ принимается средний дебит водозаборного сооружения $Q_{ср}$ за последние 2—3 года, что дает некоторый «запас» в расчетах.

Время работы водозаборного сооружения в этом случае следует рассматривать как приведенное время, определяемое по зависимости

$$t_а = \frac{V}{Q_{ср}}, \tag{9.18}$$

где $V$ — общий объем подземных вод, отобранных из водоносного горизонта за все время работы водозаборного сооружения.

Величина дополнительного снижения $\Delta S_а(t)$ вычисляется по формуле (9.17). При оценке эксплуатационных запасов методом аналогии она вводится в расчетные формулы (9.15) и (9.16).

Применение метода гидрогеологических аналогов для оценки эксплуатационных запасов подземных вод наиболее эффективно в сложных гидрогеологических условиях, которые трудно представить в виде расчетной фильтрационной схемы. В практике обычно этот метод широко применяется для обоснования обеспеченности эксплуатационных запасов подземных вод, а проектные понижения рассчитываются другими методами.

При применении критериев подобия в формулах (9.11) и (9.12), (9.15) и (9.16) можно использовать соответствующие коэффициенты, характеризующие соотношение отдельных параметров, определяющих величину ЭЗПВ. Например, соотношение коэффициентов фильтрации — $\alpha_k = \frac{k_н}{k_а}$; водопроводимости — $\alpha_{km} = \frac{(km)_н}{(km)_а}$; водоотдачи — $\alpha_\mu = \frac{\mu_н}{\mu_а}$; расходов — $\alpha_Q = \frac{Q_н}{Q_а}$; площадей сравниваемых объектов — $\alpha_F = \frac{F_н}{F_а}$; протяженностей сравниваемых объектов — $\alpha_l = \frac{l_н}{l_а}$; градиента потока — $\alpha_I = \frac{I_н}{I_а}$.

В дальнейшем величины этих коэффициентов (или масштабов подобия — по В. С. Усенко, 1975) можно использовать при соответствующих расчетах, вводя их в расчетные зависимости в соответствии с их структурой вместо неизвестных величин. Тогда в формуле Дарси

$$\alpha_Q = \alpha_{km}\alpha_I \cdot \alpha_F. \tag{9.19}$$

Зная, например, $\alpha_Q$, $\alpha_I$ и $\alpha_F$, можно определить $\alpha_{km}$, а затем водопроводимость пласта на вновь оцениваемом участке.

Расчеты методом гидрогеологических аналогов выполняются в следующем порядке: 1) выбирается участок эксплуатации или детальной разведки, который по своим гидрогеологическим условиям может служить аналогом для разведываемого; 2) по данным разведочных работ устанавливается полная или частичная аналогия сопоставляемых участков; 3) по данным такого сопоставления определяются основные принципы оценки эксплуатационных запасов подземных вод, т. е. устанавливается, какие данные, принятые по аналогии, могут быть использованы для целей подсчета запасов; 4) рассчитывается производительность водозаборных сооружений.

**Контрольные вопросы.** 1. На чем основана возможность использования гидравлических методов оценки ЭЗПВ? 2. Что характеризуют собой кривые дебита и какие особенности гидрогеологических условий и конструктивных характеристик опробуемых скважин находят в них отражение? 3. В каких условиях для гидрогеологических расчетов может быть применен метод срезок? Какая информация нужна для его применения? 4. На чем основана возможность экстраполяции во времени экспериментальных зависимостей $S = f(\ln t)$, полученных по данным опытных откачек? 5. Какие ограничения следует учитывать при оценке ЭЗПВ гидравлическими методами? 6. Можно ли использовать гидравлические методы в комбинации с гидродинамическими? Когда и почему? 7. Как обосновать возможность использования для оценки ЭЗПВ метода гидрогеологических аналогов? 8. Почему модуль ЭЗПВ — наиболее удобная и полная характеристика для применения метода аналогии? 9. В чем преимущества метода гидрогеологических аналогов перед всеми другими методами оценки ЭЗПВ? 10. Что общего между гидравлическим методом оценки ЭЗПВ и методом гидрогеологических аналогов? 11. Как учитываются количественные различия отдельных параметров гидрогеологической модели при оценке запасов методом гидрогеологических аналогов?

# ГЛАВА 10. ПРОГНОЗ КАЧЕСТВА ПОДЗЕМНЫХ ВОД И ИХ ОХРАНА НА ВОДОЗАБОРНЫХ УЧАСТКАХ

## 10.1. ОБЩИЕ ЗАДАЧИ ИЗУЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ПОДЗЕМНЫХ ВОД ПРИ ОЦЕНКЕ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ

Одним из важнейших элементов оценки ЭЗПВ является прогноз возможных изменений качества подземных вод. Это связано с тем, что качество вод различного целевого назначения в течение всего расчетного срока должно соответствовать предъявляемым требованиям, а в процессе эксплуатации может происходить его изменение в связи с подтягиванием к водозаборным сооружениям некондиционных поверхностных и подземных вод и изменением условий протекания физико-химических процессов в системе «горные породы — вода».

Поэтому при разведке подземных вод необходимо изучить их качество (физические свойства, химический состав и санитарно-бактериологическое состояние) в естественных условиях и получить данные, позволяющие выполнить прогноз возможных его изменений в процессе эксплуатации.

Как показывает опыт эксплуатации, при работе водозаборных сооружений может происходить как улучшение качества подземных вод (например, опреснение при подтягивании речных вод), так и его ухудшение, связанное с поступлением некондиционных вод из различных естественных и антропогенных источников загрязнения. При этом под загрязнением, по В. М. Гольдбергу (1984), понимаются вызванные хозяйственной деятельностью изменения качества воды по сравнению с ее естественным состоянием, которые делают эту воду частично или полностью непригодной для использования. Выделяются две степени загрязнения подземных вод (В. М. Гольдберг, С. Газда, 1984). Первая относится к условиям, при которых содержание нормируемых компонентов превышает фоновое содержание, но остается меньше предельно

допустимой величины. Такое загрязнение не препятствует продолжению эксплуатации. Вторая степень наступает при концентрациях нормируемых компонентов, превышающих установленные требования. В этом случае необходимо проведение специальных мероприятий по охране подземных вод, доведению их качества до требуемых кондиций либо при невозможности проведения этих мероприятий (например, при подтягивании соленых вод) — прекращение эксплуатации.

Для оценки соответствия качества воды установленным требованиям и прогноза его изменения при эксплуатации на расчетный период должны быть выполнены:

1) изучение и оценка соответствия качества подземных вод предъявляемым требованиям в естественных или естественно-антропогенных условиях, сложившихся на период разведки;

2) изучение гидрогеохимической обстановки в пределах месторождения и восстановление истории ее формирования под влиянием как естественных, так и антропогенных факторов, в том числе генетические аспекты формирования химического состава подземных вод и гидрохимической обстановки;

3) изучение источников и видов возможного загрязнения и оценка их возможного влияния на качество эксплуатируемых подземных вод;

4) изучение условий возможного поступления загрязнений в водоносный горизонт;

5) изучение условий возможного изменения качества при движении воды в зоне аэрации, в водоносном горизонте;

6) прогноз продвижения контура загрязненных вод к водозаборному сооружению и изменения качества отбираемых вод;

7) обоснование мероприятий по обеспечению необходимого качества воды на весь период эксплуатации; для вод хозяйственно-питьевого назначения здесь особую роль играет организация зоны санитарной охраны вокруг водозаборных сооружений.

Требования к качеству подземных вод определяются целевым назначением их использования, при этом выделяют питьевое водоснабжение, производственно-техническое водоснабжение, орошение земель, обводнение пастбищ и др. Специфические требования предъявляются к качеству минеральных, теплоэнергетических и промышленных вод. Особо строгие требования предъявляются в СССР к качеству питьевой воды, так как от этого в значительной степени зависит здоровье населения.

### 10.2. ТРЕБОВАНИЯ К КАЧЕСТВУ ПОДЗЕМНЫХ ВОД РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

В СССР качество подземных вод питьевого назначения должно соответствовать нормам, установленным стандартом — ГОСТ 2874—82 «Вода питьевая. Гигиенические требования и контроль за качеством».

Качество воды этого назначения оценивается по органолептическим, токсикологическим и микробиологическим показателям.

К органолептическим показателям относятся запах, вкус, цветность, мутность.

Согласно ГОСТ 2874—82 запах, вкус воды при 20 °С (и нагревание ее до 60 °С при определении запаха) не должны превышать 2 баллов; цветность — 20 градусов; мутность по стандартной шкале — 1,5 мг/л. Вода не должна содержать различаемые невооруженным глазом водные организмы и иметь на поверхности пленку.

Концентрации химических веществ, влияющих на органолептические свойства воды, не должны превышать следующих нормативов:

| *Показатели* | *Норматив* |
|---|---|
| Водородный показатель, pH | 6,0—9,0 |
| Железо (Fe), мг/л | не более 0,3 |
| Марганец (Mn), мг/л | » 0,1 |
| Медь ($Cu^{2+}$), мг/л | » 1,0 |
| Полифосфаты остаточные ($PO_4^{3-}$), мг/л | » 3,5 |
| Сульфаты ($SO_4^{--}$), мг/л | » 500 |
| Хлориды ($Cl^-$), мг/л | » 350 |
| Цинк ($Zn^{2+}$) | » 5,0 |
| Жесткость общая, мг·экв/л | » 7,0 |
| Сухой остаток, мг/л | » 1000 |

Токсикологические показатели качества воды характеризуют безвредность ее химического состава.

Концентрации химических веществ, являющиеся токсикологическими показателями, определяются следующими нормативами:

| *Показатели* | *Норматив* |
|---|---|
| Алюминий остаточный (Al), мг/л | не более 0,5 |
| Бериллий (Be), мг/л | » 0,0002 |
| Молибден (Mo), мг/л | » 0,25 |
| Мышьяк (As), мг/л | » 0,05 |
| Нитраты ($NO_3$), мг/л | » 45,0 |
| Полиакриламид остаточный, мг/л | » 2,0 |
| Свинец (Pb), мг/л | » 0,03 |
| Селен (Se), мг/л | » 0,001 |
| Стронций (Sr), мг/л | » 7,0 |
| Фтор (F) (для различных климатических районов), мг/л | » 0,7—1,5 |

Содержание химических веществ, не предусмотренных ГОСТ 2874—82, не должно превышать предельно допустимых концентраций (ПДК), утвержденных Министерством здравоохранения СССР. Перечень веществ, содержание которых подлежит изучению, в каждом конкретном случае в зависимости от вероятных источников загрязнения устанавливается органами санитарно-эпидемиологической службы.

При обнаружении в воде нескольких химических веществ с лимитированным содержанием сумма отношений их концентраций в воде к ПДК должна отвечать условию

$$\frac{C_1}{ПДК_1} + \frac{C_2}{ПДК_2} + \cdots + \frac{C_n}{ПДК_n} \leqslant 1, \qquad (10.1)$$

где $C_1$, $C_2$, ..., $C_n$ — содержащиеся в воде концентрации различных веществ; $ПДК_1$, $ПДК_2$, ..., $ПДК_n$ — предельно допустимые концентрации соответствующих веществ.

Микробиологические показатели: общее количество бактерий в 1 мл неразбавленной воды (не должно превышать 100), количество бактерий группы кишечной палочки в 1 л воды (коли-индекс) не должно превышать 3, объем воды в миллилитрах, приходящийся на одну бактерию указанной группы (коли-титр), должен быть не менее 300.

Если питьевая вода не отвечает требованиям ГОСТ 2874—82, то соответствующей обработкой (осветление, опреснение, обесцвечивание, обеззараживание, обезжиривание, фторирование или обесфторивание, умягчение и т. д.) ее доводят до необходимых норм.

Целесообразность улучшения качества подземных вод должна определяться технико-экономическими расчетами.

В исключительных случаях по согласованию с органами санитарного надзора допустимо увеличение цветности воды до 35°, мутности (в паводковый период) — до 2 мг/л, жесткости — до 10 мг·экв/л, сухого остатка — до 1500 мг/л, железа — до 1 мг/л, марганца — до 0,5 мг/л.

Для орошения пригодна практически любая вода с минерализацией до 1 г/л. Однако допустимые пределы минерализации могут колебаться в зависимости от условий полива, дренажа, климатических и агротехнических факторов. Предельной допустимой нормой общего содержания солей в воде считается 5 г/л. Требование к воде для орошения в каждом конкретном случае устанавливается проектной организацией.

Вода для паросилового хозяйства не должна содержать примесей, вызывающих образование накипи, вспенивание котловой воды, унос солей с паром и коррозию металла.

Вода, используемая для технических целей, может иметь разнообразное назначение (добыча, отмывка, сортировка и обогащение полезных ископаемых, в металлургической промышленности, в хлопчатобумажной промышленности и т. д.), в связи с чем изменяются и требования, предъявляемые к ее качеству, которое также устанавливается в каждом конкретном случае проектными организациями.

Вода, используемая для заводнения нефтяных пластов, не должна снижать приемистости нагнетательных скважин. Снижению приемистости скважин способствуют содержащиеся в воде взвешенные вещества, нефть, тончайшие суспензии железа и т. п. Под их воздействием на фильтре скважины может образоваться пленка, затрудняющая закачку воды в пласт. Вода не должна также вызывать коррозию труб.

### 10.3. ВИДЫ И ИСТОЧНИКИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Загрязнение подземных вод связано с поступлением в водоносный горизонт различных загрязняющих веществ, при достижении которыми водозаборных сооружений вода становится частично или полностью непригодной для использования по целевому назначению. Известны случаи, когда в результате загрязнения подземных вод водозаборные сооружения полностью выходили из строя. По характеру проявления и последствиям различают пять видов разнообразных загрязнений под-

земных и поверхностных вод: бактериальное, химическое, радиоактивное, тепловое и механическое.

*Бактериальное* (или *микробное*) загрязнение возникает при попадании в эксплуатируемый водоносный горизонт различного рода бактерий и вирусов. О бактериальном загрязнении свидетельствует и наличие так называемых санитарно-показательных микроорганизмов, прежде всего бактерий группы кишечной палочки.

Бактериальному загрязнению подземных вод препятствуют процессы самоочищения воды в породах зоны аэрации при инфильтрации. Опытами установлено, что слой хорошо аэрируемых мелкозернистых песков мощностью 3—5 м полностью очищает воду от анаэробных бактерий (в том числе и патогенных). Если живые патогенные бактерии все же попадают в зону полного водонасыщения, то здесь они, передвигаясь вместе с подземным потоком, в зависимости от срока выживаемости могут существовать от 30 до 400 суток и более.

Большие значения характерны для трещиноватых пород, крупнозернистых песков, валунных и гравийно-галечниковых отложений, обладающих по отношению к микроорганизмам невысокой адсорбционной способностью.

Источниками бактериального загрязнения являются преимущественно хозяйственно-бытовые и сельскохозяйственные отходы, поступающие в подземные воды на участках полей фильтрации, выгребных ям, скотных дворов, поглощающих скважин и колодцев, неисправной канализационной сети и т. п. Бактериальные загрязнения могут поступать к береговым водозаборным сооружениям в результате привлечения загрязненных поверхностных вод.

*Химическое загрязнение* — наиболее распространенный вид загрязнения подземных вод. Оно вызывается проникновением в водоносные горизонты различных органических и неорганических веществ токсического и нетоксического воздействия. При отсутствии сорбции и реакции взаимодействия с вмещающими породами химическое загрязнение может быть длительным и трудноустранимым или неустранимым вообще.

Основными источниками химического загрязнения подземных вод являются промышленные стоки, поступающие в водоносные горизонты из отстойников, накопителей, шламо- и хвостохранилищ, из поверхностных водотоков и водоемов, шахтные и рудничные воды и т. д. Загрязнение может происходить также за счет распространения загрязняющих веществ из участков скопления твердых промышленных отходов (свалки, шлако- и солеотвалы и пр.), участков складирования и хранения нефтепродуктов, сырья и готовой химической продукции, сброса сточных вод в поглощающие скважины, с сельскохозяйственных угодий, обрабатываемых удобрениями и ядохимикатами или орошаемых сточными водами, и т. д. Химическое загрязнение подземных вод происходит также в результате закачивания промстоков в глубокие горизонты, привлечения к водозаборным сооружениям загрязненных поверхностных вод.

К источникам химического загрязнения пресных подземных вод относятся также природные некондиционные поверхностные и подзем-

ные воды, отличающиеся повышенной общей минерализацией, повышенным содержанием фтора, железа, сульфатов, сероводорода, урана, радия и других компонентов, а также воды с повышенной жесткостью. Некондиционные подземные воды могут находиться как в эксплуатируемом, так и смежных с ним водоносных горизонтах, подстилать и окружать кондиционные подземные воды, что характерно, например, для слоистых водоносных систем и линз пресных вод аридных зон. Типичными некондиционными поверхностными водами являются загрязненные промышленными и бытовыми стоками речные воды и морские воды, способные внедряться в горизонты пресных подземных вод при работе водозаборных сооружений в районах морских побережий.

*Радиоактивное загрязнение* связано с повышением содержания в подземных водах различных радиоактивных веществ. Эти вещества отличаются способностью к самопроизвольному распаду. Периоды полураспада для отдельных радиоактивных изотопов составляют от первых десятков часов, суток до десятков тысяч лет и более: $^{238}U$ — 4,49 × × $10^9$ лет; $^{239}Pt$ — 2,24 · $10^4$ лет; $^{14}C$ — 5,57 · $10^3$ лет; $^{226}Ra$ — 16 лет; $^{90}Sr$ — 28,4 лет; $^{137}Cs$ — 30 лет; Tr — 12,5 лет; $^{60}CO$ — 5,25 лет; $^{10}Ru$ — 360 сут; $^{210}Po$ — 138,3 сут; $^{95}Nb$ — 35 сут; $^{32}P$ — 14,5 сут; $^{131}J$ — 8,1 сут; $^{24}Na$ — 14,9 ч.

Из анализа приведенных величин периодов полураспада следует, что во многих случаях радиоактивное загрязнение подземных вод может сохраняться в течение весьма длительного времени.

Другим важным свойством радиоактивных загрязнений является их высокая сорбируемость почвами и горными породами, благодаря чему в подземных водах они в основном распространяются в ограниченных масштабах.

В зависимости от pH и состава воды радиоактивные вещества в водной среде могут находиться в виде ионов, нейтральных молекул, коллоидных частиц.

Некоторые радиоактивные элементы, такие как $^{131}J$ и $^{35}S$, почти не сорбируются породами, плохо сорбируются $^{106}Ru$, $^{238}U$, $^{137}Cs$, $^{90}Sr$. Поэтому в отношении загрязнения подземных вод эти элементы наиболее опасны, так как могут переноситься на большие расстояния.

Радиоактивное загрязнение подземных вод связано с работой предприятий атомной промышленности (прежде всего при авариях), разработкой месторождений радиоактивных элементов (водоотлив, отвалы, хвостохранилища), проведением ядерных взрывов, захоронением отходов и сбросом радиоактивных сточных вод в недра земли.

*Тепловое загрязнение* подземных вод проявляется в повышении их температуры за пределы допустимых норм. Этот вид загрязнения может сопровождаться изменением химического состава подземных вод, уменьшением содержания в воде кислорода, «цветением» воды, ростом содержания микроорганизмов. Из-за интенсивного теплообмена с горными породами тепловое загрязнение в больших масштабах проявляется редко.

Тепловое загрязнение происходит в основном под влиянием отработанных тепловых вод ГРЭС и АЭС, а также в результате привлечения к водозаборным сооружениям более нагретых поверхностных вод.

*Механическое загрязнение* проявляется при повышенном содержании в воде механических примесей — зернистых частиц, взвешенных частиц, коллоидов и др. В подземных водах оно встречается редко, так как быстро улавливается пористой средой. На значительное расстояние механическое загрязнение может мигрировать только в закарстованных породах.

Основными источниками механического загрязнения могут служить мутные поверхностные и ливневые воды.

По данным В. М. Гольдберга (1984), из общего количества водозаборных сооружений, подверженных загрязнению на территории европейской части СССР, 25 % загрязнено промышленными отходами, 15 — некондиционными природными водами, 10 — бытовыми отходами, 50 % — имеют смешанное загрязнение.

Загрязнение подземных вод происходит в результате загрязнения природной среды в целом, в частности поверхности земли, поверхностных вод, атмосферы. С поверхности земли загрязненные растворы попадают в водоносные горизонты через зону аэрации.

Загрязнение подземных вод поверхностными происходит благодаря тесной взаимосвязи этих вод. Из атмосферы загрязнения вместе с пылью и атмосферными осадками попадают на поверхность земли и в поверхностные воды, откуда затем они могут поступать в водоносные горизонты. Поэтому источником загрязнения могут быть и атмосферные осадки, состав которых должен подлежать специальному изучению. Особенно загрязненными могут быть атмосферные осадки в районах с большой концентрацией металлургической и химической промышленности.

Загрязнению подвержены преимущественно грунтовые воды, которые обычно залегают неглубоко от дневной поверхности и не имеют слабопроницаемой кровли. В напорные водоносные горизонты загрязнения могут поступать из грунтовых вод, через «литологические окна» в кровле, затрубное пространство скважин, из поверхностных водотоков и водоемов на участках питания подземных вод, за счет подтягивания некондиционных природных вод сбоку или из других горизонтов и др.

### 10.4. ПРОГНОЗ КАЧЕСТВА ПОДЗЕМНЫХ ВОД ПРИ ОЦЕНКЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ

Прогнозирование изменения качества при оценке ЭЗПВ сводится к решению следующих задач: 1) выяснение возможности захвата некондиционных вод водозаборным сооружением; 2) определение максимально возможной минерализации отбираемой воды или максимальной концентрации нормируемых и вредных компонентов при смешении кондиционных и некондиционных вод; 3) определение времени движения некондиционных вод к водозаборному сооружению или оценка длины пути, который пройдут некондиционные воды в направлении к водозаборному сооружению в течение расчетного срока эксплуатации; 4) прогноз изменения во времени качества отбираемой воды с момента поступления к водозаборному сооружению первых порций некондиционных

ционных вод до конца расчетного срока работы водозаборного сооружения. При этом изменение качества воды может оцениваться как в отдельных водозаборных скважинах, так и в смеси, подаваемой в водовод, что особенно важно для водозаборных сооружений больших размеров и состоящих из большого числа эксплуатационных скважин.

Решению этих задач посвящены работы многих советских (Ф. М. Бочевер, Н. Н. Веригин, В. М. Гольдберг, Е. Л. Минкин, В. А. Мироненко, А. Е. Орадовская, А. А. Рошаль, В. М. Шестаков и др.) и зарубежных (Р. Гловер, Р. Дей, А. Шейдеггер, Ж. Фрид и др.) исследователей.

Проведенные исследования показали, что процесс изменения качества воды является весьма сложным и многофакторным, а его прогнозы с учетом действия всех факторов при существующей степени изученности этого процесса практически невозможны. В связи с этим при решении инженерных задач часто используют приближенные решения, основанные на различного рода допущениях. Подробная характеристика моделей, используемых при прогнозах миграции, приведена в работах (А. А. Рошаль, 1981; В. А. Мироненко, В. Т. Румынин, 1986; Л. Лукнер, В. М. Шестаков, 1986). При этом под миграцией в настоящее время принято понимать «перемещение и трансформацию компонентов подземных вод, приводящие к изменению их содержания» (Л. Лукнер, В. М. Шестаков, 1986).

Миграция химических компонентов в водоносных горизонтах определяется процессами переноса и физико-химической трансформации мигрирующих веществ и их взаимодействия со скелетом породы. К процессам (переноса) относятся: собственно конвективный (фильтрационный) перенос под действием гидравлического градиента, а при наличии разноплотностных жидкостей — также под действием градиента плотности; процесс молекулярной диффузии, возникающий в связи с наличием градиента концентрации; процесс продольной гидродисперсии — рассеивание вещества в связи с различной скоростью движения отдельных струек жидкости при сохранении общего направления, что определяется неоднородностью размеров пустот порового или трещинного пространства горных пород; процесс поперечной дисперсии — рассеивание вещества в направлениях, несовпадающих с направлением вектора средней скорости фильтрации, что также определяется неоднородностью строения водовмещающей среды. Среди дисперсионных процессов различают микродисперсию, когда на переносе и рассеивании вещества гетерогенность фильтрующей среды практически не сказывается и ее можно рассматривать как гомогенную, и макродисперсию, когда на эти процессы оказывает влияние гетерогенность водоносного пласта. Макродисперсия проявляется, например, в слоистых пластах с упорядоченной неоднородностью, где массоперенос в хорошо проницаемых пластах идет конвективным путем, распространяясь в слабопроницаемые прослои путем поперечной дисперсии с преобладанием молекулярно-диффузионного режима, а также при гетерогенном строении фильтрующей среды, которую можно представить как систему с двойной емкостью, состоящую из слабопроницаемых блоков, разделенных проводящими каналами.

Основным процессом переноса вещества является конвективная фильтрация, при которой скорость движения воды (растворителя) и содержащихся в ней компонентов совпадает. При конвективной фильтрации происходит вытеснение жидкости исходной концентрации поступающей в пласт жидкостью другого состава или с другой концентрацией отдельных компонентов без их перемешивания. В этих условиях должна существовать четкая граница между вытесняющей и вытесняемой жидкостями, а сам процесс такого переноса получил название процесса поршневого вытеснения. Однако в реальных условиях процесс конвективной фильтрации осложняется протекающими одновременно с ней молекулярной диффузией и гидродисперсией.

Процессы молекулярной диффузии и гидродисперсии приводят к образованию переходной зоны, где происходит перемешивание жидкостей: по направлению потока — за счет гидродисперсии и молекулярной диффузии, поперек потока — за счет молекулярной диффузии. К различным скоростям движения жидкости по пласту приводит и наличие вод разной плотности, например, в тех случаях, когда поступающая в водоносный пласт загрязненная жидкость обладает значительно большей плотностью по сравнению с природными подземными водами.

Вторая группа процессов — это физико-химическая трансформация веществ в подземных водах и их взаимодействие с вмещающими горными породами. К этим процессам относятся сорбция и ионный обмен, растворение и выщелачивание, осаждение малорастворимых соединений, биохимические процессы (сульфатредукция, нитрификация и др.), радиоактивный распад, комплексообразование, биохимические и ряд других. Эти процессы приводят к изменению скорости переноса загрязняющих веществ, их концентрации и могут вызывать изменение скорости движения подземных вод.

В настоящее время при прогнозах массопереноса используется ряд математических моделей, применяемых при различных схемах строения водовмещающих пород. Для пористых и трещиноватых пород, достаточно однородных по фильтрационным свойствам, обычно применяется модель конвективно-дисперсионного переноса, при которой учитываются фильтрационный (конвективный) перенос, молекулярная диффузия и продольная дисперсия. В этой модели могут учитываться и физико-химические процессы. Исследования, проводимые советскими и зарубежными учеными, показали, что учет гидродисперсии при проведении прогнозных расчетов необходим только для трещиноватых пород, где размеры переходной зоны могут быть соизмеримы с размерами области переноса. Для пористых пластов при достаточно больших периодах времени переходная зона пренебрежимо мала по сравнению с зоной переноса и в таких условиях для расчета может быть использована схема конвективного переноса (поршневого вытеснения).

Для фильтрационно-неоднородных водовмещающих толщ используют модели: 1) слоистой толщи с конвективно-дисперсионным массопереносом вдоль отдельных слоев и с молекулярной диффузией между слоями; 2) квазиоднородной трещиновато-пористой среды с конвективно-дисперсионным переносом в трещинах и молекулярно-диффу-

зионным в блоках и др. В моделях неоднородных толщ также можно учитывать некоторые процессы физико-химического взаимодействия.

Подробно различные виды математических моделей рассмотрены в работах В. А. Мироненко и В. Г. Румынина (1986), Л. Лукнера и В. М. Шестакова (1986) и др.

Следует отметить, что в практических расчетах при прогнозе изменения качества подземных вод в большинстве случаев используется простейшая модель конвективного переноса (поршневого вытеснения). При достаточно больших расстояниях от водозаборного сооружения до контура некондиционных вод и очагов загрязнения (сотни метров и первые километры) длиной переходной зоны, где происходит перемешивание жидкости вследствие процессов гидродисперсии, можно пренебречь по сравнению с общим расстоянием движения загрязненных вод. Поэтому модель поршневого вытеснения в таких условиях пригодна для решения задач прогноза изменения качества подземных вод и дает, как это будет показано ниже, вполне удовлетворительные результаты (без учета изменений, вызываемых физико-химическими процессами).

В необходимых случаях в этой модели учитываются продольная макродисперсия и отдельные сорбционные процессы (равновесная сорбция).

В практических расчетах обычно рассматривается модель стационарной фильтрации. При этом принимается допущение, что скорости движения подземных вод при стационарном и квазистационарном режиме равны. Поскольку область влияния водозаборного сооружения (депрессии) всегда намного больше области, в которой происходит подтягивание подземных вод к водозаборному сооружению, последняя практически всегда находится в области квазистационарного режима. Кроме того, замедляющее действие на перемещение подземных вод оказывает сработка емкостных запасов в балансе водоотбора. Поэтому расчеты применительно к моделям стационарной фильтрации дают некоторый запас надежности.

Более сложные модели, учитывающие процессы гидродисперсии, молекулярной диффузии, сорбции и другие факторы, должны использоваться прежде всего для определения расчетных миграционных параметров при обработке результатов опытно-миграционных работ, поскольку при этом размеры зоны перемешивания вполне соизмеримы с расстоянием между опытными скважинами.

Несомненно, такие модели следовало бы использовать для прогноза передвижения некондиционных вод в неоднородных пластах (например, в трещинно-карстовых), но обычно в этих случаях необходимая информация для построения расчетных миграционных моделей оказывается недостаточной для получения надежных результатов.

Для прогноза изменения качества подземных вод при эксплуатации используются гидродинамические методы (аналитические и графоаналитические расчеты, математического моделирования), а также методы аналогии. При этом методы гидрогеологических аналогов могут быть использованы как для установления расчетной модели, так и для определения ряда миграционных параметров переноса,

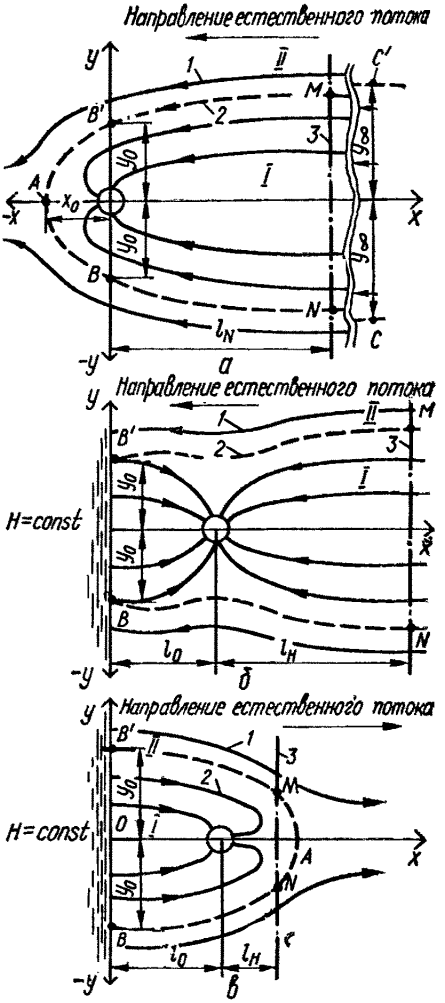



Рис. 55. Схемы к расчету нейтральной линии тока при работе одиночного водозаборного сооружения в условиях потока подземных вод в неограниченном пласте (*а*) и пласте с контуром постоянного напора, когда естественный поток направлен к реке (*б*) и от реки (*в*):

*1* — линия тока; *2* — нейтральная линия тока; *3* — граница некондиционных вод

которые не всегда могут быть определены опытным путем.

Рассмотрим методику решения перечисленных в начале настоящего раздела задач прогнозирования качества подземных вод для некоторых типовых условий применительно к простейшей схеме в виде одиночного концентрированного водозаборного сооружения.

**Оценка возможности захвата некондиционных вод водозаборным сооружением.** Поступление некондиционных подземных вод к водозаборному сооружению возможно снизу, сверху и сбоку.

Возможность подтягивания некондиционных вод снизу существует практически всегда, когда в эксплуатируемом водоносном горизонте кондиционные подземные воды залегают на некондиционных. Условие, при котором прорыв «языка» соленых вод в скважину может быть исключен, характеризуется соотношением М. Д. Миллионщикова:

$$S_{max} \leqslant (\nu_c - \nu_п)\, m_п, \qquad (10.2)$$

где $S_{max}$ — допустимое максимальное понижение уровня воды в скважине с фильтром, длина которого не более чем в 10 раз превышает его диаметр; $\nu_c$ и $\nu_п$ — плотность соответственно соленых и пресных вод; $m_п$ — мощность зоны пресных вод.

Во многих случаях существует возможность захвата некондиционных вод водозаборными сооружениями из ниже- или вышележащих водоносных горизонтов.

Возможность захвата некондиционных вод сбоку оценивается на основе построения и анализа гидродинамической сетки потока в зоне

влияния водозаборного сооружения. При наличии естественного потока подземных вод во время работы водозаборного сооружения в водоносном горизонте формируется фильтрационное поле, в пределах которого можно выделить две области (рис. 55), разделенные нейтральной линией тока.

Область I, охватывающая пространство между нейтральной линией тока и водозаборным сооружением, является областью питания водозаборного сооружения. Здесь все линии тока направлены к водозаборному сооружению. В области II все линии тока проходят мимо водозаборного сооружения. Из этого следует, что поступление сбоку некондиционных вод, находящихся за пределами области питания, невозможно. В то же время возможность подтягивания некондиционных вод к водозаборному сооружению всегда существует, если они располагаются в пределах области питания, которая вверх по потоку распространяется неограниченно.

В пределах области питания выделяется область захвата. Внутри этой области располагаются частицы воды, которые обязательно поступят к водозаборному сооружению к концу расчетного периода эксплуатации. Площадь области захвата увеличивается со временем, ее предельное положение совпадает с нейтральной линией тока.

Установление положения нейтральной линии тока в пределах изучаемой области фильтрации в зависимости от конкретных гидрогеологических условий, наличия исходной информации может быть произведено графическим, графоаналитическим, аналитическим методами и методом моделирования.

Графический метод основан на установлении границ области питания подземных вод водозаборным сооружением построением гидродинамической сетки потока с использованием детальной карты гидроизогипс (или изопьез). Применение этого метода возможно в основном на участках крупных действующих водозаборных сооружений, где имеется постоянная режимная сеть наблюдательных скважин.

Графоаналитический метод заключается в построении гидродинамической сетки фильтрационного поля в районе водозаборного сооружения наложением естественного подземного потока, заданного картой гидроизогипс (или изопьез), и потока, формирующегося под влиянием эксплуатации водозаборного сооружения. При этом понижение уровней воды под влиянием действия водозаборного сооружения рассчитывается существующими гидродинамическими методами. Графоаналитический метод может использоваться в гидрогеологических условиях, которые можно представить в виде простейших типовых расчетных схем.

Аналитический метод основан на использовании теоретических зависимостей для конкретных граничных условий эксплуатируемых водоносных горизонтов и типов водозаборных сооружений. Применение этого метода возможно только в таких гидрогеологических условиях, которые могут быть сведены к типовым расчетным схемам.

Метод моделирования целесообразно применять в

сложных гидрогеологических условиях, приведение которых к простейшим схемам может обусловливать большие ошибки. Этот метод позволяет более полно учесть реальную гидрогеологическую обстановку и получить близкую к действительной гидродинамическую сетку фильтрационного потока в районе рассматриваемого водозаборного сооружения. Однако должный эффект применения метода моделирования для определения положения нейтральной линии тока может быть обеспечен только тогда, когда реальные гидрогеологические условия достаточно хорошо изучены для обоснования геофильтрационной модели.

Графический и графоаналитический методы, а также метод моделирования применяются с использованием общеизвестных приемов построения гидродинамических сеток, которые излагаются в специальных курсах. Поэтому здесь ограничимся лишь рассмотрением основных положений расчета нейтральной линии тока аналитическим методом на примере одиночного или сосредоточенного водозаборного сооружения, которое можно рассматривать как «большой колодец».

Наиболее полно и подробно методика нахождения положения нейтральной линии тока при различных граничных условиях и для различных схем водозаборных сооружений рассмотрена в работах В. М. Гольдберга, Е. Л. Минкина, А. Е. Орадовской и Н. Н. Лапшина и др.

Одиночный водозабор, «большой колодец» в условиях потока подземных вод в неограниченном пласте (рис. 55, *а*).

В этих условиях для определения нейтральной линии тока рассчитываются координаты ее точек $A$, $B$, $B'$, $C$ и $C'$. Расчетной координатой водораздельной точки $A$ является ее расстояние до водозаборного сооружения по линии $y = 0$. Это расстояние ($x_0$) определяется по формуле

$$x_0 = \frac{Q}{2\pi q_e}, \tag{10.3}$$

где $Q$ — дебит водозаборного сооружения; $q_e = khJ$, где $k$ — коэффициент фильтрации, $h$ — мощность, $J$ — уклон потока.

Положение точек $B$, $B'$ и $C$, $C'$ находится путем определения величин $y_0$ и $y_\infty$, представляющих собой ширину зоны питания соответственно на линии водозаборного сооружения и на значительном удалении от него в верхней части потока (рис. 55, *а*). Эти величины рассчитываются по зависимостям

$$y_0 = \frac{Q}{4q_e}; \tag{10.4}$$

$$y_\infty = \frac{Q}{2q_e}. \tag{10.5}$$

Одиночный водозабор в полуограниченном пласте с условием постоянного напора на границе (рис. 55, *б* и *в*). При оценке положения водораздельной точки в случае, когда естественный поток направлен к реке, величина $x_0$ может быть определена по формуле (ось «$y$» совпадает с

рекой, ось «$x$» проходит через водозабор):

$$x_0 = l_0 \sqrt{1 - \frac{Q}{\pi l_0 q_e}}, \tag{10.6}$$

где $l_0$ — расстояние от водозаборной скважины до реки.

Как следует из (10.6), водораздельная точка будет расположена между водозаборным сооружением и рекой при соблюдении соотношения

$$\frac{Q}{\pi l_0 q_e} < 1. \tag{10.7}$$

Если $\frac{Q}{\pi l_0 q_e} \geqslant 1$, то водораздельной точки между рекой и водозаборным сооружением не существует (рис. 55, *б*) и происходит движение воды от реки к водозаборному сооружению.

Координаты $\pm y_0$ в этих условиях определяются по формуле

$$\pm y_0 = l_0 \sqrt{\frac{Q}{\pi l_0 q_e} - 1}. \tag{10.8}$$

При направлении естественного потока от контура питания в глубь берега (рис. 55, *в*)

$$x_0 = l_0 \sqrt{1 + \frac{Q}{\pi l_0 q_e}}; \tag{10.9}$$

$$\pm y_0 = \sqrt{\frac{Q l_0}{\pi q_e}}. \tag{10.10}$$

В этом случае $x_0$ отсчитывается от границы пласта.

**Определение максимальной минерализации воды или максимальной концентрации отдельных вредных компонентов при смешении кондиционных вод с некондиционными.** При поступлении некондиционных вод к водозаборному сооружению в результате смешения их с кондиционными качество откачиваемой воды может не выходить за пределы допустимой нормы. Тогда водозаборное сооружение может работать в условиях подтягивания некондиционных вод. В этом случае отпадает необходимость дальнейшего решения таких задач, как определение времени подтягивания некондиционных вод к водозаборному сооружению, оценка изменения качества эксплуатируемых вод во времени, разработка мероприятий по борьбе с подтягиванием некондиционных вод к водозаборному сооружению. Поэтому при прогнозировании качества подземных вод на водозаборных сооружениях важной задачей является определение максимально возможных значений показателей $C_{max}$, по которым оценивается качество отбираемой воды при условии смешения кондиционных вод с некондиционными.

При возможном подтягивании некондиционных вод к водозаборным скважинам снизу в однородном по фильтрационным свойствам пласте, что бывает типичным для линз пресных вод,

$$C_{max} = C_и - (C_в - C_к)\frac{m_к}{H}, \tag{10.11}$$

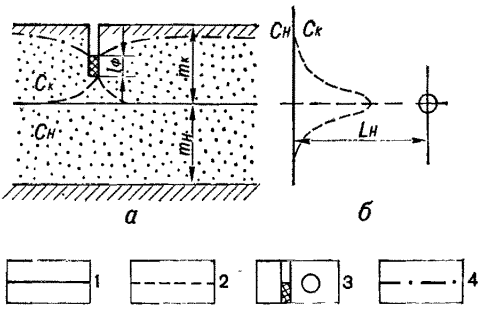



Рис. 56. Схемы положения «языка» некондиционных вод при их подтягивании к водозаборному сооружению снизу (*а*) и сбоку (*б*):

*1* — граница некондиционных вод до эксплуатации; *2* — граница некондиционных вод при эксплуатации; *3* — водозаборная скважина; *4* — уровень подземных вод при эксплуатации

где $C_н$ и $C_к$ — минерализация при концентрации отдельных компонентов соответственно в некондиционных и кондиционных водах; $H$ — общая мощность водоносного горизонта, равная сумме мощности кондиционных вод $m_к$ и мощности некондиционных вод $m_н$.

При возможном подтягивании некондиционных вод сбоку при наличии одной границы раздела

$$C_{max} = \frac{C_н + C_к}{2}. \qquad (10.12)$$

Если $C_{max}$ выходит за пределы допустимых норм, необходимо решить задачу по прогнозированию подтягивания некондиционных вод от своего первоначального контура к водозаборному сооружению.

**Определение времени движения некондиционных вод к водозаборному сооружению.** В зависимости от расположения границы между кондиционными и некондиционными водами в разрезе (рис. 56, *а*) или плане (рис. 56, *б*) решение этой задачи аналитическим методом может сводиться к оценке времени движения некондиционных вод снизу или сбоку.

При наличии некондиционных вод в нижней части водоносного горизонта эксплуатация кондиционных вод ведется с помощью несовершенных скважин.

Если мощность некондиционных вод значительно больше мощности пресных ($m_н \geqslant 0{,}7\ H$; $\frac{l_ф}{m_к} \leqslant 0{,}3$), то время $T$, через которое «язык» некондиционных вод (рис. 55, *а*) достигнет несовершенной скважины при работе ее с дебитом $Q$ в пласте с однородными фильтрационными свойствами, определяется по формуле

$$T = \frac{2\pi n_а (m_к - l_ф)^3}{3Q\left(1 - \frac{1}{\beta_н}\right)}, \qquad (10.13)$$

где $n_а$ — активная пористость водовмещающих пород; $l_ф$ — длина фильтра; $\beta_н$ — коэффициент несовершенства скважины, определяемый по табл. 10.1 в зависимости от величины $\bar{l} = \frac{l_ф}{H}$.

В пластах большой мощности с достаточной для практики точностью расчет времени $T$ целесообразно производить по упрощенной формуле

$$T = \frac{2\pi n_а m_к^3}{3Q}. \qquad (10.14)$$

**10.1. Значение коэффициента несовершенства скважин в формуле (10.13)**

| $\bar{l}$ | 0,05—0,1 | 0,1—0,2 | 0,2—0,4 | 0,4—0,6 | 0,6—0,8 |
|---|---|---|---|---|---|
| $\beta_н$ | 3 | 1,7 | 1,4 | 1,3 | 1,1 |

***Определение времени подтягивания контура некондиционных вод сбоку.*** При решении практических задач в большинстве случаев необходимо определить время движения некондиционных вод к водозаборному сооружению по кратчайшему расстоянию (время прихода первых порций некондиционных вод).

Это время может быть рассчитано по следующим зависимостям, вывод которых приводится в ряде работ, например (В. М. Гольдберг, 1980).

*Одиночная скважина («большой колодец») в неограниченном бассейне подземных вод:*

$$T = \frac{\pi h n_a L_н^2}{Q}, \qquad (10.15)$$

где $L_н$ — расстояние между источником загрязнения и водозаборным сооружением; $h$ — мощность водоносного горизонта.

*Одиночная скважина («большой колодец») в неограниченном пласте при наличии естественного потока (время подтягивания по направлению потока):*

$$T = \frac{n_a h}{q_e}\left[L_н - x_0 \ln\left(\frac{L_н}{x_0} + 1\right)\right], \qquad (10.16)$$

где $x_0$ — координата водораздельной точки, определяемая по формуле (10.3).

*Одиночная скважина («большой колодец») в полуограниченном пласте с контуром питания (при отсутствии естественного потока):*

$$T = \frac{\pi n_a h l_0^2}{3Q}\left[2 + \left(\frac{x_1}{l_0}\right)^3 - 3\frac{x_1}{l_0}\right], \qquad (10.17)$$

где $x_1$ — расстояние между источником загрязнения и контуром постоянного напора.

В тех случаях, когда контур некондиционных вод совпадает с контуром постоянного напора ($x_1 = 0$), формула (10.17) принимает следующий вид:

$$T = \frac{2\pi n_a h l_0^2}{3Q}. \qquad (10.18)$$

*Одиночная скважина («большой колодец») в полуограниченном пласте при наличии естественного потока:*

а) поток направлен к контуру питания

$$T = \frac{n_a h}{q_e}\left[\frac{l_0^2 - x_0^2}{x_0}\left(\operatorname{arctg}\frac{l_0}{x_0} - \operatorname{arctg}\frac{x_1}{x_0}\right) - x_1 - l_0\right]; \qquad (10.19)$$

б) поток направлен от контура питания

$$T = \frac{n_a h}{q_e}\left[l_0 - x_1 - \frac{x_0^2 - l_0^2}{2x_0}\ln\frac{(x_0 + l_0)(x_0 - x_1)}{(x_0 - l_0)(x_0 + x_1)}\right]. \qquad (10.20)$$

В формуле (10.19) и (10.20) $x_0$ — координата водораздельной точки, определяемая по зависимостям соответственно (10.6) и (10.9).

Формулы (10.15)—(10.20) отвечают условиям конвективного переноса, но с некоторыми изменениями могут быть использованы и при учете микродисперсии, движения разноплотностных жидкостей и процессов равновесной сорбции.

Процессы сорбции могут учитываться путем введения в расчеты вместо активной пористости $n_a$ так называемой эффективной пористости $n_э$:

$$n_э = \frac{n_a(1+\beta)}{\beta}; \quad \beta = \frac{C_0}{N_0}, \tag{10.21}$$

где $C_0$ и $N_0$ — исходное содержание вещества в растворе и породе.

Величина $\beta$ получила название коэффициента распределения. Она зависит от вида растворенного вещества и свойств пород и должна определяться экспериментально на основе лабораторных или натурных исследований.

Учет микродисперсии и влияния различных плотностей может быть произведен путем уменьшения истинного расстояния между водозаборным сооружением и источниками загрязнения на половину длины переходной зоны, определяемой по формулам

$$L_д \approx 5\sqrt{\frac{DT}{n_a}}; \tag{10.22}$$

$$L_{гр} = 1{,}5\sqrt{k_в h \Delta\bar{\gamma}\frac{T}{n_a}}, \tag{10.23}$$

где $L_д$ — длина переходной зоны, связанной с продольной микродисперсией; $L_{гр}$ — длина переходной зоны, образуемой под влиянием различий в плотности воды; $D$ — суммарный коэффициент микродисперсии;

$$\Delta\bar{\gamma} = \frac{\gamma_1 - \gamma_2}{\gamma_2}, \tag{10.24}$$

где $\gamma_1$ и $\gamma_2$ — плотность поступающей в пласт загрязненной жидкости и пластовой воды; $k_в$ — коэффициент вертикальной фильтрации водоносного горизонта.

Как уже указывалось, учитывать продольную микродисперсию целесообразно только для трещиноватых пород при весьма малом значении показателя активной пористости. При расчетах по формулам (10.22—10.23) для учета процессов сорбции вместо величины $n_a$ следует использовать величину $n_э$.

Так как в формулы (10.22) и (10.23) входит искомое значение времени, расчеты проводятся в следующей последовательности. Сначала по формулам (10.15)—(10.20) определяется время $T$ по модели поршневого вытеснения. По вычисленному значению $T$ по формулам (10.22) и (10.23) определяют длину переходной зоны (при учете обоих факторов эти длины суммируются).

Далее, входящие в формулы (10.15)—(10.20) расчетные значения $L_в$ или $x_1$ (в формуле (10.18) — $l_0$) уменьшаются на половину длины

переходной зоны, и снова проводится расчет времени $T$ по этим формулам.

Покажем возможное значение величин $L_д$ и $L_{гр}$ в реальных условиях.

Примем значение суммарного коэффициента микродисперсии $D$, учитывающего процессы молекулярной диффузии и продольной дисперсии, равным $2 \cdot 10^{-4}$ м²/сут, что близко к верхнему пределу возможных значений этой величины, и коэффициент активной пористости $n_а$ — 0,2. Тогда при $T = 10^4$ сут

$$L_д = 5\sqrt{\frac{2 \cdot 10^{-4} \cdot 10^4}{2 \cdot 10^{-1}}} \approx 15 \text{ м}.$$

В то же время длина зоны конвективной фильтрации, при тех же параметрах в неограниченном пласте, при $Q = 1000$ м³/сут и $h = 20$ м исходя из формулы (10.15), составит

$$L_н = \sqrt{\frac{1000 \cdot 10^4}{3{,}14 \cdot 20 \cdot 2 \cdot 10^{-1}}} \approx 900 \text{ м}.$$

Таким образом, длина переходной зоны составляет в данном примере менее 2 % и может не учитываться.

Если принять $\Delta\bar{\gamma} = 0{,}02$, что соответствует разности минерализаций в 20 г/л, $k_в$ (вертикальный коэффициент фильтрации) — 1 м/сут, $h$, $T$ и $n_а$ — как в предыдущем примере, то величина $L_{гр}$ составит

$$L_{гр} = 1{,}5\sqrt{\frac{1 \cdot 20 \cdot 0{,}02 \cdot 10^4}{2 \cdot 10^{-1}}} \approx 210 \text{ м}.$$

Отсюда видно, что влияние разных плотностей загрязняющей и пластовой жидкости может быть существенным и что этот фактор следует учитывать в прогнозных расчетах.

**Прогноз изменения качества отбираемой воды во времени.** При эксплуатации подземных вод изменение их качества начинается с момента, когда первые порции некондиционных вод достигают водозаборного сооружения и смешиваются с кондиционными водами. Процесс такого изменения постепенно развивается во времени.

При условии подтягивания некондиционных вод с концентрацией загрязняющих веществ снизу через дно несовершенных скважин, работающих в условиях пласта ограниченной мощности, минерализация воды или концентрация $C(t)$ отдельных компонентов в любой момент времени $t$ ($t > T$) рассчитывается по зависимости

$$C(t) = C_н - (C_н - C_к)\left[\frac{1}{\beta_н} + \left(1 + \frac{1}{\beta_н}\right)\right]\sqrt[3]{\frac{T}{t}}. \qquad (10.25)$$

В пластах большой мощности, когда влиянием подошвы пласта на движение некондиционных вод к водозаборному сооружению можно пренебречь,

$$C(t) = C_н - (C_н - C_к)\sqrt[3]{\frac{T}{t}}. \qquad (10.26)$$

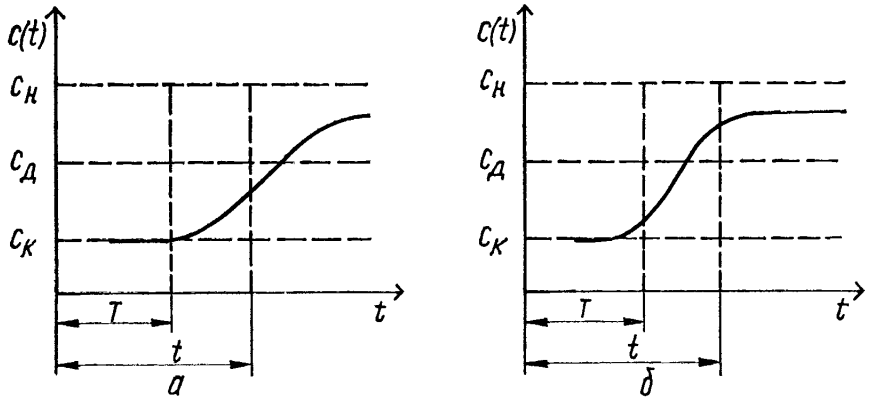



Рис. 57. Графики изменения качества воды во времени без превышения концентрации загрязняющих веществ (*а*) допустимой нормы и при формировании в течение расчетного периода эксплуатации некондиционных вод (*б*)

При подтягивании некондиционных вод сбоку прогноз изменения минерализации или концентрации отдельных компонентов может быть выполнен по формуле, которая для условий бассейна в неограниченном в плане пласте имеет вид

$$C(t) = C_н + \frac{C_н - C_к}{\pi} \arccos \sqrt{\frac{T}{t}}.$$

При изменении в ходе эксплуатации качества подземных вод могут быть два основных варианта (рис. 57):

1) к концу расчетного срока эксплуатации исходная концентрация загрязняющих компонентов повысится (рис. 57, *а*), но не выйдет за пределы допустимых норм ($C_д$);

2) к концу расчетного срока эксплуатации концентрация загрязняющих веществ превысит допустимую норму (рис. 57, *а*).

В первом случае изменение качества воды не повлияет на величину эксплуатационных запасов, во втором — может существенно их уменьшить по сравнению с запасами, подсчитанными без учета изменения качества.

Если уменьшение водоотбора недопустимо, то ставится вопрос о разведке подземных вод на других участках или обосновании защитных мероприятий, предотвращающих подтягивание некондиционных вод к водозаборному сооружению.

В данном разделе приведены аналитические зависимости решения основных задач, связанных с прогнозом изменения качества подземных вод, для простейшей схемы одиночного водозабора в однородном пласте. Эти решения позволяют наглядно проиллюстрировать основные принципы методики и последовательность расчетов при прогнозировании изменения качества подземных вод.

При прочих равных условиях, помимо одиночного часто встречаются линейные водозаборные сооружения ограниченной и неограниченной длины, в районе которых структура фильтрационного потока существенно отлична от схемы одиночного водозаборного сооружения.

Поскольку на характер гидродинамической сетки существенно влияют не только особенности гидрогеологических условий (неоднородность параметров и характер граничных условий), но и схемы водозаборных сооружений, естественно, что для других схем водозаборных сооружений и граничных условий расчетные зависимости существенно отличаются от приведенных и во многих случаях весьма сложны.

*Особенности прогнозирования изменения качества подземных вод методом математического моделирования.* Математическое моделирование позволяет более полно учесть реальное строение области фильтрации, изменчивость ее миграционных параметров, сложную пространственную конфигурацию границ распространения кондиционных и некондиционных вод, особенно в условиях пестрого и незакономерного их распространения по площади и в разрезе.

Основой применения метода математического моделирования для прогнозирования изменения качества подземных вод при эксплуатации является получение в результате гидродинамического решения обоснованных гидродинамических сеток и величин расходов фильтрационных потоков на любых участках области фильтрации и их пространственно-временны́х изменений.

Конечно-разностные схемы, используемые для решений, позволяют принципиально осуществить их требуемую детализацию на участках расположения водозаборных сооружений, чтобы более полно учесть влияние их схемы и конструкции, а также неоднородность строения области фильтрации, приводящие к деформациям гидродинамических сеток на этих участках.

Знание величины фильтрационных расходов позволяет применить методы математического моделирования к решению задач массопереноса, уравнение которого может быть представлено в виде

$$\operatorname{div}(D \operatorname{grad} C) + W_s = n_a \frac{\partial C}{\partial t} + \operatorname{div}(\vec{V}C). \tag{10.28}$$

При учете только конвективного переноса

$$n_a \frac{\partial C}{\partial t} + \operatorname{div}(\vec{V}C) = W_s, \tag{10.29}$$

где $W_s$ — удельная объемная интенсивность внешних и внутренних источников (стоков) веществ; $\vec{V}$ — вектор скорости переноса.

Значение коэффициента гидродисперсии $D$ зависит от скорости фильтрации

$$D_г = D_м + \lambda |\vec{V}|, \tag{10.30}$$

где $D_м$ — коэффициент молекулярной диффузии; $\lambda$ — параметр дисперсии, определяемый свойствами пород.

На практике в связи со сложностью и трудоемкостью решения этих уравнений часто прибегают к уменьшению мерности потока путем рассмотрения массопереноса в трубке или по линии тока, полученных в результате гидродинамических расчетов.

Подробно методика моделирования миграции подземных вод рассмотрена в монографии Л. Лукнера и В. М. Шестакова (1986).

В результате математического моделирования задач массопереноса принципиально могут быть получены следующие результаты, определяющие прогноз изменения качества воды, отбираемой как водозаборными сооружениями, так и на любом участке (блоке) моделируемой области миграции:

1) график изменения во времени концентрации $C$ любой компоненты состава подземных вод, для оценки изменения которой осуществляется прогноз;

2) распределение концентраций в пределах моделируемой области на интересующий нас момент времени;

3) баланс солей и его изменение во времени в целом и по отдельным балансовым составляющим формирования потоков подземных вод (приток от границ, емкостные запасы, вытесняемые из пласта, переток сверху и снизу и т. п.);

4) суммарный вынос вещества (солей) за расчетный период.

В упрощенном варианте для приближенных прогнозов на основе гидродинамического решения выполняется прогноз изменения качества воды по схеме полного перемешивания путем расчета концентрации солей по балансу приходных и расходных составляющих притоков воды в каждом расчетном блоке по пути движения.

Разработанная во ВСЕГИНГЕО (А. А. Плетневым и Л. В. Семендяевой) система программного обеспечения *TOPAS* позволяет осуществить решение уравнения (10.29) для расчета поля концентраций неактивного вещества (солей), переносимого фильтрационным потоком подземных вод в условиях многослойной водоносной системы с неоднородным строением области фильтрации.

Решение осуществляется на основе считывания результатов гидродинамического решения по программе TOPAS.

Для примера рассмотрим основные результаты прогнозирования изменения минерализации воды на Шадринском месторождении подземных вод, гидрогеологические и гидрохимические условия которого иллюстрируются на рис. 20.

Гидродинамические и гидрохимические прогнозные расчеты были выполнены на ЭВМ ЕС по программе TOPAS (Б. В. Боревский, А. А. Плетнев, Т. А. Плугина, Л. С. Семендяева и др., 1981) с учетом всех балансовых составляющих источников формирования гидродинамического и солевого состава подземных вод.

При решении задачи учитывалось существенное изменение минерализации оцениваемого водоносного горизонта в трещиноватых опоках эоцена по площади и в разрезе.

Решение было выполнено в двух вариантах: а) эоценовый водоносный горизонт рассматривается в виде одного пласта; б) эоценовый водоносный горизонт разделен на два слоя с различной минерализацией (см. рис. 20). В последнем варианте в аллювиальном горизонте задавались граничные условия 1 рода.

В расчетах солепереноса учитывалась только конвективная составляющая, так как диффузионная по сравнению с ней оказывалась пренебрежимо мала. Для решения уравнения солепереноса была применена конечно-разностная схема, эквивалентная схеме полного перемешивания. Для повышения точности расчетов временные шаги принимались минимальными ($\Delta t_{max} = 20$ сут; $t$ — прогнозное — $10^4$ сут), так чтобы ошибка от замены непрерывного перемешивания на режим дискретного не превышала заданную до устимую величину.

Для оценки погрешностей, возникающих при пространственной дискретизации фильтрационного потока, была решена специальная профильная задача и оценена

**10,2. Водный и солевой баланс аллювиального и нижнеэоценового водоносных горизонтов Шадринского месторождения подземных вод при эксплуатации**

| Статья баланса | Водный баланс, тыс. м³/сут | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Аллювиальный водоносный горизоит | | | Нижнеэоценовый водоносный горизонт | | |
| | приход | расход | итого | приход | расход | итого |
| Приток по границам и водоотбор | 8,0<br>7,4 | 0,0<br>0,0 | 8,0<br>7,4 | 15,0<br>16,8 | 61,3<br>86,6 | —46,3<br>—69,9 |
| Переток между горизонтами | 0,3<br>0,4 | 46,2<br>69,9 | —46,0<br>—69,4 | 46,2<br>69,9 | 0,3<br>0,4 | 46,0<br>69,4 |
| Приток из водоемов | 40,6<br>63,9 | 2,6<br>2,1 | 38,0<br>61,7 | 0,0<br>0,0 | 0,0<br>0,0 | 0,0<br>0,0 |
| Переток из мелового горизонта | 0,0<br>0,0 | 0,0<br>0,0 | 0,0<br>0,0 | 0,4<br>0,4 | 0,0<br>0,0 | 0,4<br>0,4 |
| Всего | 48,9<br>71,0 | 48,9<br>71,0 | 0,0<br>0,0 | 61,6<br>87,0 | 61,6<br>87,1 | 0,0<br>0,0 |

*Продолжение табл. 10.2*

| Статья баланса | Солевой баланс, т/сут | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Аллюинальиый водоносный горизонт | | | Нижнеэоценовый водоносный горизонт | | |
| | приход | расход | итого | приход | расход | итого |
| Приток по границам и водоотбор | 5,8<br>5,5 | 0,0<br>0,0 | 5,8<br>5,5 | 26,1<br>29,0 | 88,6<br>109,3 | —62,5<br>—80,3 |
| Переток между горизонтами | 0,3<br>0,5 | 29,4<br>43,5 | —29,1<br>—43,0 | 29,4<br>43,5 | 0,3<br>0,5 | 29,1<br>43,0 |
| Приток из водоемов | 20,3<br>32,0 | 1,4<br>1,1 | 19,0<br>30,9 | 0,0<br>0,0 | 0,0<br>0,0 | 0,0<br>0,0 |
| Переток из мелового горизонта | 0,0<br>0,0 | 0,0<br>0,0 | 0,0<br>0,0 | 3,3<br>3,2 | 0,0<br>0,0 | 3,3<br>3,2 |
| Всего | 26,4<br>38,1 | 30,8<br>44,6 | —4,4<br>—6,5 | 58,9<br>75,8 | 88,9<br>109,8 | —30,0<br>—34,0 |

Примечания: 1. В числителе — вариант I; в знаменателе — II. 2. Измененне емкости равно нулю ($n = 0{,}1$; $t = 25$ лет).

величина «размывания» фронта солевого потока. Полученные результаты подтвердили допустимость принятого алгоритма расчета.

В результате выполненного решения был получен прогноз изменения во времени минерализации воды в водозаборном сооружении и отдельных скважин, на основе которого определены время наступления максимальной величины минерализации и последующего ее снижения до кондиционных норм. Одновременно рассчитан баланс приходных и расходных статей солевого состава во всей исследуемой области фильтрации, а также его изменение во времени.

Выше приведены результаты решения при моделированин эоценового горизонта в виде одного пласта со средней по разрезу минерализацией (табл. 10.2).

Выполненный гидродинамический прогноз показал возможность необходимого водоотбора в пределах месторождения — 60 тыс. на первую очередь (вариант I) и 86 тыс. м³/сут на перспективу (вариант II). При этом за счет перетока (в конце расчетного срока) из четвертичного водоносного горизонта формируется основная часть

водоотбора: 75 % (вариант I) и 80 % (вариант II); остальная часть формируется за счет притока по нижнеэоценовому горизонту от границ.

Прогиоз изменения минерализации воды нижнеэоценового водоносиого горизонта показал следующее. Минерализация отбираемой воды увелнчивается от 1,61 до 1,68 г/л через 3 года эксплуатации за счет подтягивания по пласту более минерализованных вод, прнуроченных к днищу долины. Затем наблюдается постепенное опреснение за счет притока пресных вод из аллювиального горизонта. Минерализация достигает кондиционного значения (1,5 г/л) через 13 лет от начала эксплуатации и через 25 лет становится равной 1,43 г/л.

Полученне необходимого количества хозяйственно-питьевых вод в пределах месторождения кондициоиного качества возможно при опреснении части воды (не более 12,5 %, т. е. 10,8 тыс. м³/сут).

## 10.5. ОХРАНА ПОДЗЕМНЫХ ВОД ОТ ЗАГРЯЗНЕНИЯ НА ВОДОЗАБОРНЫХ УЧАСТКАХ

Охрана подземных вод от загрязнения предполагает проведение комплекса мероприятий, предотвращающих проникновение вредных веществ в водоносные горизонты и распространение некондиционных вод в горизонтах с кондиционными водами. Особую важность и специфику приобретают эти мероприятия на водозаборных участках.

По целевому назначению их можно подразделить на две группы:

1) мероприятия по предотвращению поступления некондиционных вод к водозаборным сооружениям;

2) мероприятия по профилактике загрязнений на водозаборных участках.

**Мероприятия по предотвращению подтягивания некондиционных вод к водозаборным сооружениям.** Эти мероприятия могут быть направлены на полную ликвидацию загрязненной области подземных вод или на ее локализацию.

Ликвидация области загрязнения выполняется путем откачки некондиционных подземных вод до практически полного их исчезновения. Проведение этого мероприятия экономически целесообразно при относительно малых размерах области загрязнения и при благоприятных для проведения этого мероприятия гидрогеологических условиях (например, при эксплуатации линз пресных вод, плавающих на соленых водах, ликвидация соленых вод без сработки пресных практически невозможна).

Мероприятия по ликвидации загрязнений являются целесообразными при внезапных одиночных утечках загрязняющих веществ в подземные воды в местах аварий.

Во всех случаях откачка загрязненной воды может проводиться только при условии решения вопроса утилизации или очистки добытой воды, так как сильно загрязненную воду нельзя сбрасывать в канализацию, водоемы и реки.

Часто специальные защитные мероприятия на водозаборных участках сводятся к локализации областей распространения некондиционных подземных вод.

Локализация некондиционных вод в случае возможного их подтягивания к водозаборным сооружениям с н и з у может быть осуществлена путем раздельного отбора кондиционных и некондиционных

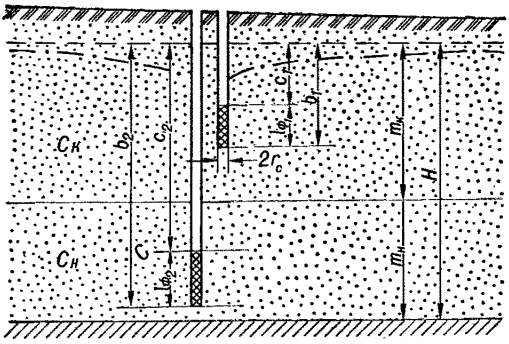



Рис. 58. Схема к расчету спаренных скважин для защиты водозаборного сооружения от подтягивания некондиционных вод снизу

вод одновременно. Наиболее типичные условия для такой защиты имеют место на участках эксплуатации линз пресных вод, которые залегают на поверхности соленых в разрезе одного водоносного горизонта.

Аналогичными будут условия, когда некондиционные воды плавают на поверхности кондиционных вод (например, в случае загрязнения подземных вод сверху нефтепродуктами).

Для предотвращения подтягивания к водозаборным скважинам некондиционных вод, залегающих ниже или выше кондиционных, широко используется метод спаренных откачек. Он основан на одновременном отборе в одной точке воды из скважины, оборудованной фильтром на кондиционные воды и, скважины с фильтром, помещеиным в интервал залегания некондиционных вод. В этом случае защита от подтягивания некондиционных вод осиована на том, что при одновременной откачке кондиционных и некондиционных вод между водоприемными устройствами формируется поверхность раздела потоков. Выше этой поверхности движение подземных вод направлено к скважине с фильтром в верхнем слое, ниже — к скважине с фильтром в нижнем слое. Подтягивание некондиционных вод будет исключено, если граница раздела потоков будет располагаться в пределах зоны кондиционных вод или совпадать с их подошвой.

Независимо от способа эксплуатации для исключения подсасывания некондиционных вод в условиях однородного в разрезе водоносного пласта должно соблюдаться соотношение

$$\frac{Q_к}{Q_н} = \lambda \leqslant \frac{m_к}{m_н}, \qquad (10.31)$$

где $Q_к$ и $Q_н$ — дебиты скважин соответственно кондиционных и некондиционных вод; $m_к$ и $m_н$ — средние мощности слоев соответственно кондиционных и некондиционных вод.

Если $\lambda > \frac{m_к}{m_н}$, то с течением времени начнется подтягивание некондиционных вод, при $\lambda < \frac{m_к}{m_н}$ произойдет подтягивание кондиционных вод к скважине с фильтром в некондиционных водах, при $\lambda = \frac{m_к}{m_н}$ происходит раздельный отбор кондиционных и некондиционных вод без их смешивания.

Дебит верхней или нижней скважины $Q$ спаренной системы в однородном по фильтрационным свойствам неограниченном в плане пласте

**10.3. Средние значения** $\xi = f\left(\frac{l_ф}{m}, \bar{e}\right)$

| $\bar{l}_ф$ | $\bar{e}$ | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0—0,05 | 0,05 —0,1 | 0,1 —0,2 | 0,2 0,3 | 0,3 0,4 | 0,4 0,5 | 0,5 —0,6 | 0,6 0,7 | 0,7 0,8 | 0,8 0,9 | 0,9 1,0 |
| 0,5 | 0,80 | 0,95 | 1,10 | 1,20 | 1,30 | 1,32 | 1,30 | 1,30 | 1,21 | 1,10 | 0,80 |
| 0,3 | 0,50 | 0,66 | 0,81 | 0,92 | 0,97 | 1,00 | 0,98 | 0,96 | 0,90 | 0,81 | 0,60 |
| 0,1 | 0,18 | 0,34 | 0,52 | 0,59 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,59 | 0,56 | 0,48 | 0,20 |

(рис. 58) определяется по формуле [14]

$$Q = \frac{4\pi k m S}{\ln \frac{2{,}25at}{r_c^2} + 2(\Phi_н + \varphi)}, \tag{10.32}$$

где $m$ — начальная суммарная мощность кондиционных и некондиционных вод; $S$ — понижение уровня воды в расчетной (верхней или нижней) скважине; $\Phi_н$ — дополнительное сопротивление на несовершенство расчетной скважины; $\varphi$ — гидравлическое сопротивление, определяемое взаимодействием спаренных скважин между собой.

Величина $\Phi_н$ определяется по формуле

$$\Phi_н = \frac{1 - \bar{l}_ф}{\bar{l}_ф}\left(\ln \frac{l_ф}{r_c} - \xi\right), \tag{10.33}$$

$$\bar{l}_ф = \frac{l_ф}{m}; \quad \xi = f\left(\frac{l_ф}{m}; \bar{b}\right), \quad \bar{b} = (m - b)(m - l_ф),$$

где $l_ф$ и $r_c$ — соответственно длина и радиус фильтра расчетной скважины; $b$ — расстояние от нижнего конца расчетной скважины до кровли пласта (до статистического уровня в условиях безнапорных вод).

При расчете скважины по формуле (10.32) в безнапорных пластах вместо $m$ принимается средняя мощность, а вместо $l_ф$ — его расчетное значение согласно (7.18). Значения $\xi$ приведены в табл. 10.3.

Гидравлическое сопротивление $\varphi_1$ и $\varphi_2$ при определении дебита соответственно верхней и нижней скважины вычисляется по формулам:

$$\varphi_1 = \frac{1{,}15}{\lambda}\left(\frac{m}{l_{ф_2}}\xi_2 + \lg \frac{R_n^2}{\beta_2}\right); \tag{10.34}$$

$$\varphi_2 = \frac{1{,}15}{\lambda}\left(\frac{m}{l_{ф_1}}\xi_1 + \lg \frac{R_n^2}{\beta_1}\right), \tag{10.35}$$

где $R_n$ — радиус влияния, равный $1{,}5\sqrt{at}$; $l_{ф_1}$ и $l_{ф_2}$ — соответственно длина рабочей части фильтра верхней и нижней скважин;

$$\xi_1 = \lg \frac{c_2^2 - b_1^2}{c_2^2 - c_1^2} + \lg \frac{2m - c_1 - c_2}{2m - b_1 + c_2}; \tag{10.36}$$

$$\xi_2 = \lg \frac{b_2^2 - b_1^2}{c_2^2 - c_1^2} + \lg \frac{2m - c_2 - b_1}{2m - b_2 - b_1}; \quad (10.37)$$

$$\beta_1 = (2m - c_2)(m + c_2); \quad (10.38)$$

$$\beta_2 = (2m - b_1)(m + b_1); \quad (10.39)$$

$$b_1 = c_1 + l_{\phi_1}; \quad (10.40)$$

$$b_2 = c_2 + l_{\phi_2}, \quad (10.41)$$

$c_1$ и $c_2$ — расстояния от кровли пласта (статического уровня в случае безнапорных вод) до верхних концов фильтра соответственно верхней и нижней скважин.

При условии $l_\phi > 0{,}2m$ вторым слагаемым в формулах (10.36) и (10.37) можно пренебречь.

Выполнив расчет дебита верхней или нижней скважин по формуле (10.32), дебит второй скважины (соответственно нижней или верхней) вычисляется из соотношения (10.31).

Приведенные формулы для отдельных пар скважин могут быть использованы и при расчете группы взаимодействующих спаренных скважин. При этом расстояние между скважинами должно превышать мощность пласта. В противном случае расчеты значительно усложняются из-за необходимости учета влияния несовершенства скважин, вызывающих срезку уровня воды в расчетной скважине.

Исходя из метода наложения течений при работе группы спаренных скважин понижение уровня $S_р$ в любой скважине с фильтром в кондиционных водах будет равно

$$S_р = \frac{1}{4\pi km}\left\{Q_0\left[\ln \frac{2{,}25at}{r_c^2} + 2(\Phi_н + \varphi)\right] + \sum_{i=1}^{n} Q_i \ln \frac{2{,}25at}{r_i^2}\right., \quad (10.42)$$

где $Q_0$ — дебит расчетной скважины, отбирающей кондиционные воды; $Q_i$ — суммарный дебит $i$-й пары скважин, взаимодействующей с расчетной скважиной; $r$ — расстояние от расчетной скважины до $i$-й взаимодействующей пары водозаборных скважин.

Как и в случае спаренных скважин, соответствующий эффект защиты от подтягивания некондиционных вод в вертикальном разрезе достигается применением одновременного отбора кондиционных и некондиционных вод лучевыми водозаборными сооружениями.

Локализация некондиционных (загрязненных) подземных вод с целью предотвращения их подтягивания *сбоку* к водозаборным сооружениям, отбирающим кондиционные воды, чаще всего достигается созданием так называемых гидравлических завес. При этом под влиянием работы защитных водозаборных или нагнетательных (наливных) скважин формируется такая гидродинамическая обстановка, в которой ограничивается распространение некондиционных вод по пласту и происходит их локализация вблизи защитного водозаборного сооружения.

Так, защита эксплуатационных скважин, расположенных вблизи прямолинейной границы кондиционных и некондиционных вод, может быть обеспечена работой симметричного относительно этой границы

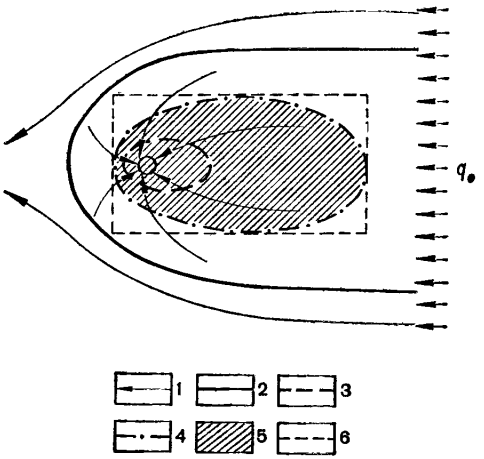



Рис. 59. Схема выделения ЗСО вокруг одиночного водозаборного сооружения:

*1* — линия тока; *2* — нейтральная линия тока; границы области захвата при расчете ЗСО (*3* — второго пояса; *4* — третьего пояса); *5* — площадь области захвата на расчетный срок; *6* — рекомендуемая граница ЗСО

другого водозаборного сооружения в зоне некондиционных вод. В однородном пласте защитное и водозаборное сооружения в этом случае должны работать с равными дебитами. При сложной конфигурации границы кондиционных и некондиционных вод защитные скважины располагают индивидуально с целью борьбы с отдельными языками некондиционных вод, внедряющихся в кондиционные.

Для предотвращения интрузии морских вод в горизонты пресных подземных вод широко используется метод отжатия соленых вод пресными. Этот метод осуществляется закачкой через специально оборудованные скважины в эксплуатируемый водоносный горизонт пресных поверхностных вод. В результате, с одной стороны, происходит искусственное подпитывание пресных подземных вод, а с другой — создается водный барьер (завеса), разделяющий пресные и соленые воды.

**Профилактика загрязнений на водозаборных участках.** При обосновании ЭЗПВ обязательно оцениваются условия защищенности водоносного горизонта от загрязнения и даются рекомендации по его предотвращению.

Одним из наиболее важных профилактических мероприятий в районах водозаборных сооружений является создание вокруг них зон санитарной охраны. В СССР в соответствии с «Положением о порядке проектирования и эксплуатации зон санитарной охраны источников водоснабжения и водопроводов хозяйственно-питьевого назначения», утвержденным главным государственным санитарным врачом СССР 18 декабря 1982 г., предусматривается организация зоны санитарной охраны (ЗСО), состоящей из трех поясов, в которых осуществляются специальные мероприятия, исключающие возможность поступления загрязнений в водоносный пласт в районе водозаборного сооружения (рис. 59).

Первый пояс ЗСО — пояс строгого режима. Он включает территорию расположения водозаборных сооружений, площадок размещения всех водопроводных и водоподводящих сооружений. Этот же пояс устанавливается для устранения возможности случайного или умышленного загрязнения воды источника в месте расположения водозаборных и водопроводных сооружений. Границы пояса строгого режима устанавливаются на расстоянии не менее 30 м от водозаборных сооруже-

ний при использовании защищенных межпластовых вод; не менее 50 м — при эксплуатации незащищенных межпластовых вод; не менее 50 м — при эксплуатации незащищенных грунтовых вод. Для береговых (инфильтрационных) водозаборных сооружений, расположенных на расстоянии менее 150 м от реки, в границы первого пояса включается вся территория между рекой и водозаборным сооружением.

Второй и третий пояса ЗСО — пояса ограничений. Они предназначены для защиты водоносного горизонта от микробного (второй пояс) и химического (третий пояс) загрязнений. Так как второй пояс расположен внутри третьего, то он служит также и для защиты от химического загрязнения.

Границы второго пояса ЗСО определяются исходя из условий, что если за его пределами через зону аэрации или непосредственно в водоносный горизонт поступает микробное загрязнение, оно не достигает водозаборного сооружения. Это условие выполняется в тех случаях, когда время движения воды от границы второго пояса до водозаборного сооружения будет превосходить время выживаемости патогенных микроорганизмов. Это расчетное время принимается равным 200—400 сут для грунтовых вод и 100—200 сут — для напорных и безнапорных межпластовых вод в зависимости от условий взаимосвязи поверхностных и подземных вод и климатических районов.

Граница третьего пояса определяется исходя из условия, что если за ее пределами в водоносный пласт поступят загрязнения, они или не достигнут водозаборного сооружения, или достигнут его не ранее расчетного времени, которое должно быть больше времени эксплуатации водозаборных сооружений принимаемого обычно равным 25 лет ($\approx 10^4$ сут). Если эксплуатация водозаборного сооружения рассчитана на неогрниченное время, границы третьего пояса устанавливаются с таким расчетом, что загрязнение не попадет в водозаборное сооружение.

Границы второго и третьего поясов ЗСО обычно устанавливаются гидродинамическим расчетом. При этом граница третьего пояса при неограниченном сроке эксплуатации устанавливается по нейтральной линии тока; при ограниченном сроке эксплуатации, как и граница второго пояса, совпадает с границей зоны захвата, положение которой рассчитывается с учетом принятого срока по приведенным выше формулам.

Методы определения границ второго и третьего поясов ЗСО подробно рассмотрены в работе [30].

Необходимо отметить, что в сложных гидрогеологических условиях, особенно когда подземные воды приурочены к весьма неравномерно трещиноватым и трещинно-карстовым породам с неясными путями фильтрации, выделение второго и третьего поясов ЗСО следует проводить по общему анализу условий питания и транзита подземных вод с учетом геологического строения и геоморфологических особенностей.

В пределах выделенных поясов ЗСО предусматриваются санитарно-оздоровительные мероприятия, которые включают как единовременные, выполняемые до начала эксплуатации водозаборного сооружения,

так и постоянные мероприятия, выполняемые в течение всего периода эксплуатации водозаборных сооружений.

Во втором и третьем поясах ЗСО предусматривается выполнение следующих мероприятий: выявление, ликвидация (или восстановление) всех бездействующих, старых и дефектных скважин; регулирование бурения новых скважин и любого нового строительства при обязательном согласовании с местными органами санитарно-эпидемиологической службы, органами геологического контроля и органами по регулированию использования и охране вод; запрещение закачки отработанных вод в подземные горизонты, подземного складирования твердых отходов и разработки недр, которая может привести к загрязнению водоносного горизонта; своевременное выполнение мероприятий по санитарной охране поверхностных водотоков и водоемов, имеющих гидравлическую связь с используемым водоносным горизонтом; запрещение размещения накопителей промстоков, складов горюче-смазочных материалов, складов ядохимикатов и минеральных удобрений (размещение таких объектов допускается в пределах третьего пояса только при использовании защищенных напорных и безнапорных межпластовых вод, а также при выполнении специальных мероприятий по защите водоносного горизонта от загрязнения и по согласованию с вышеназванными органами санитарного, геологического и водного контроля).

Во втором поясе дополнительно предусматривается запрещение размещения кладбищ, скотомогильников, полей ассенизации, земледельческих полей орошения, сооружений подземной фильтрации, навозохранилищ, силосных траншей, животноводческих и птицеводческих предприятий, а также других сельскохозяйственных объектов, обусловливающих опасность микробного загрязнения; применение удобрений и ядохимикатов; промышленной рубки леса. Кроме того, в этом поясе должны быть выполнены мероприятия по санитарному благоустройству территории (канализация, устройство водонепроницаемых выгребов и др).

В первом поясе кроме мероприятий, относящихся ко второму и третьему поясам, дополнительно должно быть выполнено следующее: проведены планировка территории для отвода поверхностного стока, озеленение и ограждение территории и обеспечена ее постоянная охрана; запрещены все виды строительства, не имеющие непосредственного отношения к эксплуатации водозаборного сооружения, осуществлена канализация всех зданий, расположенных в пределах пояса, соблюдены все санитарно-технические требования к конструкциям водозаборных и наблюдательных скважин и осуществлено их оборудование аппаратурой для систематического контроля за производительностью скважин, динамическим уровнем и качеством подземных вод.

**Контрольные вопросы, задания.** 1. Почему изучение и прогнозирование качества воды входят в состав оценки эксплуатационных запасов подземных вод для водоснабжения? 2. Какие основные задачи, касающиеся качества воды, необходимо решить при оценке эксплуатационных запасов подземных вод для водоснабжения? 3. В чем заключается прогноз качества при оценке эксплуатационных запасов

подземных вод? 4. Охарактеризуйте основные виды массопереноса вещества, которые необходимо учитывать при решении задач прогноза изменения качества подземных вод на МПВ. 5. Какие имеются методы прогноза качества подземных вод на МПВ? Оцените их преимущества и недостатки. 6. Какие основные мероприятия проводятся для охраны подземных вод от загрязнения на водозаборных участках? 7. Что собой представляет и как устанавливается зона санитарной охраны вокруг водозаборных сооружений?

# ГЛАВА 11. ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В СПЕЦИФИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ ИХ ОТБОРА И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

## 11.1. ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ОРОШЕНИЯ

Основные особенности оценки ЭЗПВ для орошения для различных режимов их использования подробно были рассмотрены С. Ш. Мирзаевым (1977). Им было показано, что главным отличием использования подземных вод для орошения от использования подземных вод для водоснабжения является режим водопотребления. Если для водоснабжения водоносный горизонт эксплуатируется круглогодично с более или менее постоянным расходом, то водозаборные сооружения для орошения эксплуатируются только в вегетационный период, причем и в этот период расход не остается постоянным.

Так, по данным С. Ш. Мирзаева (1977), для большей части территории Средней Азии усредненный график режима водопотребления схематично можно представить как показано на рис. 60.

Из рисунка видно, что в условиях Средней Азии водозаборное сооружение для орошения эксплуатируется 7,5 месяцев; с максимальным расходом — 4 месяца. Весь остальной период года происходит периодическое полное или частичное восполнение запасов. Необходимость учета прерывистого режима водозаборного сооружения и является основной специфической особенностью их расчетов при оценке ЭЗПВ для орошения.

Учет прерывистого режима эксплуатации при работе водозаборных сооружений в неограниченных пластах и пластах, ограниченных непроницаемыми контурами, где основным источником формирования эксплуатационных запасов являются емкостные запасы, целесообразно проводить с использованием следующего приближенного приема. Реальные изменения водоотбора в течение всего расчетного периода схематизируются следующим образом: принимается, что все годы, кроме последнего, водозаборное сооружение работает непрерывно с одинаковой среднегодовой производительностью, а в последний расчетный год учитывается фактический запроектированный график водоотбора. При этом конец расчетного периода совпадает с концом периода максимального водоотбора.

Например, для приведенного на рис. 60 графика изменения водоотбора основная расчетная зависимость, связывающая величину экс-

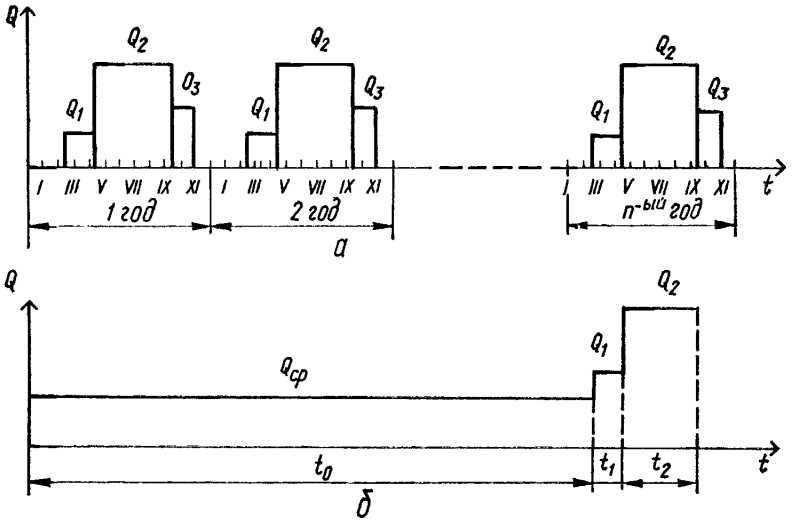



Рис. 60. График ступенчатого периодического водоотбора для орошения (*а*) и его расчетная схематизация (*б*)

плуатационных запасов подземных вод (расход водозаборного сооружения) с понижением уровня для условий неограниченного пласта при отсутствии дополнительного питания (увеличение перетекания из других горизонтов, инфильтрация оросительных вод и др.), будет иметь следующий вид:

$$S = \frac{Q_{ср}}{4\pi km} E_i\left(-\frac{r^2}{4a(t_0 + t_1 + t_2)}\right) + \frac{Q_1 - Q_{ср}}{4\pi km} E_i\left(-\frac{r^2}{4a(t_1 + t_2)}\right) + \\ + \frac{Q_2 - Q_1}{4\pi km} E_i\left(-\frac{r^2}{4at_2}\right), \qquad (11.1)$$

$Q_{ср}$ — среднегодовой дебит, м³/сут, рассчитываемый по формуле

$$Q_{ср} = \frac{\Sigma Q_i t_i}{365}, \text{ м}^3/\text{сут}, \qquad (11.2)$$

где $Q_i$ — величина дебита в течение времени $t_i$ календарного года; $t_0$ — время работы водозаборного сооружения с дебитом $Q_{ср}$, принимаемое равным $(n - 1) \cdot 365$, где $n$ — количество лет, на которое проводится расчет, сут; $t_1$ — продолжительность периода эксплуатации с дебитом $Q_1$, сут; $t_2$ — продолжительность периода эксплуатации с дебитом $Q_2$, сут; $r$ — радиус скважины или «большого колодца», для которого рассчитывается понижение уровня.

При $\frac{r^2}{4at} < 0{,}1$ экспоненциальная функция, входящая в формулу (11.1), может быть заменена ее логарифмической аппроксимацией по соотношению (7.11).

При необходимости учета непроницаемых границ пласта (полуограниченный пласт, пласт-квадрант и т. п. с условиями на границах $Q = 0$)

формула (11.1) преобразуется в соответствии с принципами учета непроницаемых границ, рассмотренными в гл. 7.

Так как дебит водозаборного сооружения не остается постоянным, к утверждению в качестве эксплуатационных запасов подземных вод представляется среднегодовой расход водозаборного сооружения при непрерывном режиме ($Q_{ср}$); кроме того, специально оговариваются величина максимального расхода ($Q_{max}$) и время, в течение которого может быть обеспечен этот максимальный расход, а также суммарный отбор за год.

Если в формировании ЭЗПВ существенную роль могут играть динамические (естественные и антропогенные) ресурсы (краевые части артезианских бассейнов, конуса выноса предгорных шлейфов и межгорных впадин), то в зависимости от размеров месторождения и размещения водозаборных сооружений могут быть даны следующие рекомендации по оценке эксплуатационных запасов подземных вод с учетом прерывистого режима:

а) для месторождений очень больших размеров, когда водозаборные сооружения расположены на значительных расстояниях от контуров разгрузки и когда при эксплуатации не возникает дополнительного питания (например, за счет инфильтрации оросительных вод), учет прерывистого режима выполняется так же, как и для неограниченных пластов (формула (11.1), т. е. без учета восполняемых ресурсов;

б) для месторождений относительно небольших размеров при расположении водозаборных сооружений вблизи зоны разгрузки подземных вод и при проектном среднегодовом дебите водозаборных сооружений, не превышающем восполняемых ресурсов, расчет водозаборного сооружения можно проводить по схеме полуограниченного пласта с контуром постоянного напора по формуле (7.44), с использованием в сложных гидрогеологических условиях методов математического моделирования; в тех случаях, когда водозаборные скважины располагаются в виде линейного ряда вдоль полосы разгрузки (родниковым стоком или испарением) и последняя схематизуется как контур постоянного напора, расчет водозаборного сооружения может быть выполнен по формулам (7.46) и (7.53) для условий стационарного режима.

Если водоотбор в вегетационный период превышает расход разгрузки, то на этот период рассчитывается дополнительное понижение, так же как для условий неограниченного и ограниченного пластов при сработке емкостных запасов, но в расчетах в каждый интервал времени эксплуатации в вегетационный период учитывается только та часть водоотбора ($\Delta Q$), которая превышает величину среднегодовой разгрузки; при расчетах по формулам стационарного режима в расчетных зависимостях используется величина среднегодового отбора;

в) при расположении водозаборных сооружений вблизи очагов разгрузки и среднегодовых дебитах, превышающих восполняемые ресурсы подземных вод, независимо от размеров месторождения оценку эксплуатационных запасов рекомендуется проводить преимущественно методом математического моделирования; приближенно расчет водозаборного сооружения может быть выполнен поэтапно: 1) для той части водоотбора, которая обеспечена среднегодовой вели-

чиной восполняемых ресурсов, расчет выполняется по схеме полуограниченного пласта с контуром постоянного напора; 2) для части водоотбора, превышающей восполняемые ресурсы, расчет выполняется так же, как и для условий сработки емкостных запасов в неограниченных и ограниченных пластах (см. п. «а»).

Кроме того, может использоваться схема взаимодействующих водозаборных и нагнетательных скважин, расход последних в которой соответствует величине инверсии в пласт разгружающихся в локализованных очагах в пределах депрессии динамических ресурсов подземных вод.

Следующая важная особенность оценки эксплуатационных запасов подземных вод характерна для тех случаев, когда площадь, на которой происходит водоотбор, совпадает с площадью, на которой проводится орошение. В этих случаях при расчетах ЭЗПВ необходимо учитывать формирование антропогенных ресурсов за счет инфильтрации ирригационных вод непосредственно на полях орошения и при инфильтрационных потерях из оросительных каналов.

В зависимости от гидрогеологического разреза эти, так называемые возвратные, воды могут поступать либо прямо в водоносный горизонт, из которого проектируется отбор подземных вод, либо, если эксплуатационным является напорный пласт, в вышележащий горизонт грунтовых вод. При оценке эксплуатационных запасов в описываемых условиях следует учитывать поступление возвратных вод к водозаборным сооружениям, а саму оценку в этих случаях рекомендуется проводить преимущественно методом математического моделирования.

Кроме расчета возможного дебита водозаборных сооружений при оценке эксплуатационных запасов подземных вод на орошаемых массивах следует также определять величину понижения уровня грунтовых вод для установления мелиоративного эффекта. В тех случаях, когда кроме водозаборных сооружений подземных вод на рассматриваемой площади проектируются специальные дренажные сооружения, необходимо учитывать взаимодействие водозаборных сооружений и дренажей.

### 11.2. ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В РАЙОНАХ РАЗВЕДЫВАЕМЫХ И РАЗРАБАТЫВАЕМЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

В настоящее время в СССР отбор шахтных и карьерных вод при добыче твердых полезных ископаемых превышает 100 м$^3$/с, причем более 80 % извлекаемых подземных вод сбрасывается без использования в поверхностные водотоки и водоемы. Подсчет и утверждение эксплуатационных запасов этих вод до 1986 г. проводились в единичных случаях, что сдерживало их использование в народном хозяйстве для водоснабжения, орошения и других целей. В то же время извлекаемые из недр при разработке твердых полезных ископаемых подземные воды могут использоваться для решения различных народнохозяйственных

задач, что будет способствовать рациональному использованию и охране водных ресурсов.

В соответствии с утвержденными ГКЗ СССР в 1982 г. «Требованиями к комплексному изучению месторождений и подсчету запасов попутных полезных ископаемых и компонентов» подземные воды, участвующие в обводнении горных выработок, если они пригодны для водоснабжения, орошения извлечения ценных компонентов или бальнеологических целей, относятся к попутным полезным ископаемым первой группы (полезные ископаемые, образующие самостоятельные пласты, залежи и т. д. в породах, вмещающих основное полезное ископаемое).

При наличии потребностей в этих водах их изучение и оценка эксплуатационных запасов производится так же, как и в районах, несвязанных с разработкой месторождений твердых полезных ископаемых.

Подземные воды, участвующие в обводнении месторождений твердых полезных ископаемых (МТПИ), которые в дальнейшем изложении будут называться «дренажными водами», формируют месторождения, пространственно совпадающие или по площади распространения превышающие месторождения основного полезного ископаемого. Оценка эксплуатационных запасов дренажных вод и гидрогеологические исследования для этих целей должны выполняться в целом в соответствии с требованиями «Классификации эксплуатационных запасов подземных вод» и «Инструкции» по ее применению (см. гл. 14) с учетом ряда специфических особенностей дренажных вод. Методика разведки и оценки эксплуатационных запасов месторождений дренажных вод, пространственно полностью или частично совпадающих с месторождением твердого полезного ископаемого, определяется как геолого-гидрогеологическими, так и горно-техническими факторами, из которых специфическую роль играют горно-технические. К последним следует отнести:

а) возможная система отбора подземных вод;

б) этап освоения месторождения основного полезного ископаемого;

в) система разведки месторождения основного полезного ископаемого.

По возможной системе отбора подземных вод все месторождения могут быть разделены на:

а) месторождения, где отбор подземных вод планируется производить из существующей или проектируемой водоприемной системы горных выработок;

б) месторождения, где отбор подземных вод проектируется осуществлять из специального водозаборного сооружения;

в) месторождения, где отбор подземных вод планируется осуществлять как из водоприемной системы горных выработок, так и из специального водозаборного сооружения.

По этапу освоения месторождения подземных дренажных вод могут быть связаны либо с разрабатываемым, либо с вновь разведуемым месторождением основного полезного ископаемого.

Месторождения подземных вод, связанные с вновь разведуемым

**11.1. Классификация месторождений дренажных подземных вод по горно-техническим факторам**

| Этап освоения | | Система водоотбора | | |
|---|---|---|---|---|
| | | Водоприемная система горных выработок | Специальные водозаборные сооружения для отбора подземных вод | Водоприемная система горных выработок и водозаборные сооружения |
| Связанные с разрабатываемыми МТПИ | | 1 | 2 | 3 |
| Связанные с разведуемыми МТПИ | С опытно-эксплуатационным водоотливом | 4 | 5 | 6 |
| | Без опытно-эксплуатационного водоотлива | 7 | 8 | 9 |

месторождением твердого полезного ископаемого, по системе разведки последнего подразделяются на:

а) месторождения, связанные с месторождениями твердых полезных ископаемых, разведка которых производится горными выработками с опытно-эксплуатационным водоотливом.

б) месторождения, связанные с месторождениями твердых полезных ископаемых, разведка которых осуществляется без проведения опытно-эксплуатационного водоотлива.

Классификация месторождений дренажных подземных вод по горно-техническим факторам приведена в табл. 11.1.

В соответствующих графах табл. 11.1 приведены номера классов месторождений подземных дренажных вод, различающихся между собой по комплексу перечисленных выше горно-технических факторов.

Всего можно выделить 9 классов месторождений дренажных подземных вод, характеризующихся определенными особенностями методики оценки ЭЗПВ и методики гидрогеологических исследований.

Оценку эксплуатационных запасов подземных дренажных вод следует проводить с учетом их целевого назначения — хозяйственно-питьевое или производственно-техническое водоснабжение, орошение земель. При оценке ЭЗПВ для хозяйственно-питьевого водоснабжения должна быть обоснована возможность организации зон санитарной охраны. Во всех случаях необходимо обосновать, что за расчетный период эксплуатации качество воды будет отвечать требованиям целевого назначения.

Оценка эксплуатационных запасов подземных дренажных вод должна выполняться применительно к системе отработки месторождения. При отсутствии проектов отработки могут быть оценены только эксплуатационные запасы, возможность отбора которых не зависит от системы отработки.

Оценка эксплуатационных запасов дренажных подземных вод может выполняться гидродинамическими (в том числе и с применением математического моделирования), гидравлическими методами и методом гидрогеологической аналогии. При расчетах необходимо учитывать взаимодействие существующих или проектируемых водоприемных систем горных выработок и специальных водозаборных сооружений для отбора дренажных вод как друг с другом, так и с имеющимися в районе другими водозаборными сооружениями и водопонизительными установками.

Оценка эксплуатационных запасов месторождений дренажных вод 1-, 2- и 3-го классов проводится либо гидравлическим методом (если система отбора подземных вод остается неизменной), либо путем совместного применения гидравлического и гидродинамического методов при изменении системы водоотбора (например, при дополнительном заложении специального водозаборного сооружения). Гидрогеологические исследования в этих случаях заключаются в проведении систематических режимных наблюдений за величиной водопритока в горные выработки, специальные водозаборные сооружения, а также за уровнем и качеством воды по эксплуатационным и наблюдательным выработкам (скважинам). Продолжительность наблюдений должна быть не менее 1—3 лет и во всех случаях достаточной для доказательства либо стабильности водопритоков, либо для установления закономерностей их изменения во времени.

При оценке эксплуатационных запасов дренажных вод 1-го и 3-го классов (а это также относится и к 4-, 6-, 7- и 9-му классам) необходимо учитывать, что водоприток к водоприемным системам зависит от времени, глубины и состава горных выработок.

При росте горных выработок по площади и глубине происходит увеличение водопритоков, значения которых впоследствии либо стабилизируются, либо уменьшаются. При этом на характер изменения водопритока кроме горно-технических факторов влияют гидрогеологические факторы, и в первую очередь источники и условия формирования водопритоков.

Так, если притоки формируются главным образом за счет емкостных запасов (осушения пласта), при неизменной площади горных выработок будет происходить уменьшение водопритоков, а при увеличении площади — их стабилизация. Если приток формируется за счет восполняемых источников, их стабилизация может произойти и при неизменных площади и глубине водоприемной системы.

Изменение во времени величины водопритоков предопределяет необходимость решения вопроса о том, какая величина водопритока должна рассматриваться и оцениваться в качестве эксплуатационных запасов. Такой величиной может быть либо минимальный водоприток на конечный расчетный срок эксплуатации, либо средний водоотбор за весь период эксплуатации, если режим водопотребления будет совпадать с режимом водопритока, что должно быть согласовано с проектной организацией.

В тех случаях, когда для месторождений 1—3 классов доказана стабильность водопритоков и качества воды во времени и отсутствуют

проекты изменения водоприемных систем или специальных водозаборных сооружений, в качестве ЭЗПВ может рассматриваться величина установленного водопритока. Если же происходит изменение водопритока и уровней подземных вод или (и) предполагается изменение системы отбора воды, необходимо произвести перерасчет водопритоков с использованием данных, полученных при проведении наблюдений.

При неизменной системе отбора воды прогноз может быть выполнен гидравлическим методом по зависимостям между притоком и временем, установленным по данным наблюдений.

При изменении водоприемной системы, а также при необходимости учета взаимодействия между водозаборными сооружениями и водопонизительными установками для прогноза должен быть использован гидродинамический метод, в том числе метод математического моделирования. При проведении прогнозных расчетов необходимо получить данные об изменении водопритоков к горным выработкам и дебитов водозаборных сооружений, находящихся во взаимодействии с оцениваемыми системами, в течение всего периода эксплуатации.

Необходимо отметить, что оценка эксплуатационных запасов дренажных вод разрабатываемых месторождений, основанная на данных эксплуатационного водоотбора, является значительно более достоверной, чем оценка запасов на вновь разведуемых месторождениях.

На месторождениях 4—6-го классов оценка эксплуатационных запасов осуществляется в основном по данным либо опытно-эксплуатационного водоотлива из горных выработок, либо опытно-эксплуатационной откачки из водозаборных скважин, либо совместных водоотлива и откачки.

На месторождениях 4-го класса, где водоотбор осуществляется из водоприемной системы горных выработок, для оценки запасов достаточно наблюдений за водоотливом.

В то же время на месторождениях 5-го и 6-го классов необходимо провести дополнительные исследования для обоснования схемы специального водозаборного сооружения, так же как при разведке месторождений подземных вод, не связанных с разработкой твердых полезных ископаемых.

Оценка эксплуатационных запасов месторождений дренажных подземных вод 7—9-го классов в простых гидрогеологических и горно-технических условиях может быть проведена гидродинамическими методами, в сложных — методом гидрогеологических аналогий по величине удельного водопритока либо по эмпирическим зависимостям, полученным на выработках-аналогах.

Такие зависимости обычно могут быть получены для отдельных месторождений твердых полезных ископаемых, разрабатываемых в течение длительного времени. Они связывают величину водопритока с площадью горных выработок и глубиной отработки.

При оценке эксплуатационных запасов месторождений подземных вод 7—9-го классов необходимо учитывать следующее обстоятельство. Обычно для вновь разведуемых месторождений определяются общие водопритоки в горные выработки. Принимать подсчитанную

величину в качестве эксплуатационных запасов подземных вод неправомерно, потому что притоки рассчитываются с определенным завышением, так как на основе этих расчетов устанавливается мощность водоотливного оборудования. При оценке водопритоков гидродинамическими методами принимаются наиболее высокие значения параметров, в то время как для оценки ЭЗПВ они не должны завышаться. При использовании метода аналогии и эмпирических зависимостей величину запасов следует рассчитывать по данным о притоках за весь период наблюдений.

На месторождениях 7—9-го классов, где основное полезное ископаемое разведуется без проведения горных работ и опытно-эксплуатационного водоотлива, разведочные работы на воду следует проводить так же, как и для обоснования водозаборных сооружений, расположенных вне зоны разработки месторождений твердых полезных ископаемых. Однако при этом следует иметь в виду, что для месторождений 7 и 9-го классов, когда отбор подземных вод будет полностью или частично осуществляться водоприемной системой, включающей дренажные горные выработки, эксплуатационные запасы подземных вод будут иметь невысокую степень достоверности.

## 11.3. ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В УСЛОВИЯХ ИХ ИСКУССТВЕННОГО ПОДПИТЫВАНИЯ

### 11.3.1. Задачи, источники и условия искусственного подпитывания запасов подземных вод

В настоящее время одним из основных методов охраны подземных вод от загрязнения и истощения является *метод искусственного подпитывания подземных вод* (ИППВ). Под искусственным подпитыванием следует понимать специальные инженерно-технические мероприятия для осуществления дополнительного питания подземных вод, направленные на увеличение производительности водозаборных сооружений при их эксплуатации. Некоторые исследователи к искусственному подпитыванию относят и случаи работы береговых (инфильтрационных) водозаборных сооружений, так как в процессе эксплуатации происходит усиление питания подземных вод поверхностными. Такое представление о формировании эксплуатационных запасов подземных вод при работе береговых водозаборных сооружений неправомерно рассматривать как результат искусственного подпитывания, так как в этих условиях никакие специальные работы для усиления питания не проводятся.

Искусственное подпитывание запасов подземных вод позволяет существенно увеличить производительность водозаборных сооружений и обеспечивает при этом возможность бесперебойной их эксплуатации в течение длительного времени.

Метод искусственного подпитывания запасов подземных вод может быть использован в следующих целях:

1) для увеличения запасов намечаемого к эксплуатации водоносного горизонта, динамические, емкостные и привлекаемые ресурсы которого недостаточны для удовлетворения заданной потребности;

2) для увеличения производительности действующих водозаборных сооружений;

3) для улучшения качества используемых поверхностных вод и доведения до требуемых норм отдельных показателей качества подземных вод смешением их с поступающими в водоносный горизонт из установок ИППВ поверхностными водами. Такими показателями могут быть общая минерализация, жесткость, содержание железа и пр.;

4) для получения на протяжении всего года воды с относительно низкой постоянной температурой;

5) для накопления в эксплуатируемом водоносном горизонте значительного количества воды в сезоны года с обильным поверхностным стоком и с последующим ее использованием в засушливые периоды (или в периоды перемерзания рек). В этих случаях водоносные горизонты используются как своего рода подземные водохранилища, регулирующие поверхностный сток в емкостях, созданных при эксплуатации подземных вод. Особенно целесообразна организация таких водохранилищ в мощных гравийно-галечниковых толщах конусов выноса и межгорных впадинах при сезонном отборе подземных вод для орошения. При этом происходит уменьшение испарения поверхностных вод, а также защита ценных земель от затопления;

6) для защиты водоносных горизонтов от загрязнения и засоления;

7) для поддержания уровня подземных вод на глубине, необходимой для сохранения требуемых экологических условий;

8) для сокращения площади отчуждения земель, связанного с размещением водозаборных сооружений, организацией зон санитарной охраны и т. п.

Искусственное подпитывание запасов подземных вод может осуществляться при наличии: 1) потребности в искусственном подпитывании для решения вышеперечисленных задач; 2) источника воды для искусственного подпитывания; 3) благоприятных гидрогеологических условий для интенсивной фильтрации воды от сооружений ИППВ к водозаборам и (или) накопления воды в пласте-коллекторе; 4) благоприятных условий для строительства и эксплуатации сооружений ИППВ (в частности, площадей для их размещения, условий для подачи воды и т. д.).

Источниками искусственного подпитывания подземных вод в основном служат поверхностные воды (воды рек, водохранилищ, озер, каналов). При соблюдении необходимых требований к качеству воды как источника подпитывания могут быть использованы различные дренажные воды, очищенные сточные воды. В некоторых случаях источником искусственного подпитывания могут служить подземные воды других водоносных горизонтов. Воды, используемые для ИППВ, могут не соответствовать по качеству требованиям к воде хозяйственно-питьевого назначения. В этом случае возможность применения этих вод для искусственного подпитывания связана с тем, что в

процессе фильтрации происходит освобождение их от взвешенных, а также некоторых растворенных веществ, понижается температура и в целом достигается улучшение качества воды без обычно применяемой дорогостоящей очистки.

Наиболее благоприятные условия для искусственного подпитывания создаются в районах с теплым и умеренным климатом при эксплуатации безнапорного водоносного горизонта, сложенного хорошо проницаемыми грунтами, при малых мощностях покровных слабопроницаемых отложений и отсутствии в разрезе выдержанных слабопроницаемых прослоев, затрудняющих фильтрацию воды от установок искусственного пополнения к водозаборным сооружениям.

### 11.3.2. Методы искусственного подпитывания запасов подземных вод

Следует различать искусственное подпитывание в районах эксплуатации действующих водозаборов и магазинирование поверхностных вод при отсутствии водозаборных сооружений (создание дополнительных емкостных запасов). В настоящее время в подавляющем большинстве случаев искусственное подпитывание производится на участках действующих водозаборных сооружений, где при небольших расстояниях между водозаборными сооружениями и сооружениями ИППВ может быть обеспечена высокая эффективность подпитывания. Магазинирование поверхностных вод при отсутствии водозаборных сооружений представляется значительно менее перспективным. Такие мероприятия могут оказаться полезными только в небольших бассейнах с мощной зоной аэрации, сложенной хорошо проницаемыми песчано-гравийными отложениями, окруженными слабопроницаемыми породами.

Для осуществления ИППВ сооружаются системы искусственного подпитывания, в состав которых входят сооружения для забора воды из источника пополнения (эта вода получила название «сырой»), сооружения для предварительной водоподготовки, сооружения, через которые производится подача воды в пласты, водозаборные сооружения.

В зависимости от типа сооружений способы искусственного подпитывания делятся на две основные группы: а) распределенной свободной инфильтрации; б) сосредоточенной напорной фильтрации. Распределенная инфильтрация осуществляется с помощью строительства сооружений открытого типа (бассейнов, инфильтрационных площадок, каналов, борозд, участков затопления); сосредоточенная — закрытых сооружений (скважин, колодцев, шахт). Открытые сооружения применяются при искусственном пополнении запасов, как правило, грунтовых вод. Для пополнения запасов напорных вод используются закрытые сооружения. Основным видом сооружений открытого типа являются инфильтрационные бассейны, представляющие собой выемки грунта длиной 200—400 м, шириной 20—30 м и глубиной до 3—4 м (рис. 61, *а*). На дне бассейна обычно устраивается песчаная засыпка. Каналы, канавы, борозды применяются в тех случаях, когда по

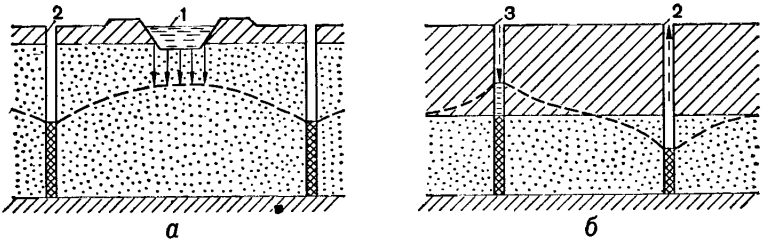



Рис. 61. Схемы сооружений искусственного пополнения подземных вод открытого (*а*) и закрытого (*б*) типов:

*1* — инфильтрационный бассейн; *2* — водозаборные скважины; *3* — нагнетательные скважины

условиям рельефа затруднительно сооружение инфильтрационных бассейнов.

В последние годы при эксплуатации подземных вод широко применяются такие способы искусственного подпитывания, как создание участков затопления и проведение инженерных мероприятий в руслах водотоков. Для затопления используются естественные или искусственные понижения рельефа. Этот метод целесообразно применять при высокой проницаемости покровных отложений и наличии достаточно больших емкостей на поверхности земли, которые при заполнении их водой могут обеспечивать требуемую производительность водозаборного сооружения в течение периода эксплуатации между двумя затоплениями. Инженерные мероприятия в русле реки проводятся для улучшения фильтрационных свойств русловых отложений, создания подпора и увеличения площади инфильтрации. С этой целью применяются расчистка, рыхление русла, его обвалование, сооружение плотин, русловых бассейнов и т. д.

Инфильтрационными сооружениями закрытого типа, как правило, являются поглощающие скважины (рис. 61, *б*), в которые производится нагнетание воды, прошедшей специальную водоподготовку. На водозаборных сооружениях с периодическим режимом эксплуатации (например, для орошения) при прекращении водоотбора в качестве нагнетательных могут быть использованы водозаборные скважины. При искусственном подпитывании подземных вод напорных горизонтов применяются также дренажно-поглощающие скважины. Они оборудуются фильтрами на смежные водоносные горизонты, что создает условия для поступления воды по стволу скважин в эксплуатируемый горизонт из соседних горизонтов под действием разности уровней. Если верхний водоносный горизонт грунтовый, то он может получать дополнительное питание через открытые инфильтрационные сооружения. Следует отметить, что закрытые сооружения ИППВ в настоящее время имеют ограниченное применение в связи с их невысокой эффективностью.

Сооружения ИППВ как открытого, так и закрытого типов могут иметь непрерывный или периодический режим работы. Непрерывный режим применяется при необходимости подачи воды в течение всего расчетного срока и при небольшой емкости водоносного горизонта,

не позволяющей обеспечить сезонное или многолетнее регулирование емкостных запасов подземных вод. Периодический режим характерен для случаев, когда источник пополнения должен обеспечивать дополнительное питание подземных вод только в отдельные периоды года и при большой регулирующей емкости водоносного горизонта. Периодический режим может быть вызван и чисто техническими причинами, например, необходимостью установок для чистки и ремонта инфильтрационных сооружений. Однако в этих случаях на практике при необходимости стремятся к сохранению непрерывного режима, что осуществляется последовательным отключением на чистку и ремонт отдельных сооружений.

### 11.3.3. Основные принципы и методы оценки эксплуатационных запасов подземных вод при их искусственном подпитывании

Методика оценки эксплуатационных запасов подземных вод с учетом их искусственного подпитывания разработана советскими учеными Ф. М. Бочевером, Н. Н. Лапшиным, Н. А. Плотниковым, Н. И. Плотниковым, К. И. Сычевым, В. С. Усенко и др., а также многими зарубежными исследователями. Основными задачами этой оценки являются прогноз производительности водозаборных сооружений при заданном понижении уровня с учетом взаимодействия водозаборных сооружений с сооружениями ИППВ и определение эффективности искусственного подпитывания.

Для оценки ЭЗПВ в условиях их искусственного подпитывания применяются главным образом гидродинамические методы (аналитические расчеты или математическое моделирование).

Значительно реже для этих целей используются гидравлические методы и метод гидрогеологических аналогов. Гидравлический метод (в сочетании с балансовой оценкой обеспеченности ЭЗПВ) применяется в основном для переоценки эксплуатационных запасов действующих водозаборных сооружений, на которых намечаются или проводятся мероприятия по ИППВ. При применении этого метода необходимо установить опытным путем влияние инфильтрационных сооружений на уровни подземных вод на участке водозаборного сооружения и дебиты эксплуатационных скважин.

Метод гидрогеологических аналогов может быть использован при наличии эталонного участка, в пределах которого условия формирования запасов, включая схему и режим искусственного подпитывания, аналогичны условиям на оцениваемом участке.

При наличии полной аналогии оценка эксплуатационных запасов может быть выполнена с использованием линейного или площадного модуля водоотбора. При частичной аналогии для оценки запасов могут быть использованы отдельные параметры, характеризующие, например, интенсивность инфильтрации воды из бассейнов (скорость инфильтрации, удельная отдача бассейна, коэффициент фильтрации илистых осадков и др.).

Эффективность мероприятий по искусственному подпитыванию

запасов подземных вод оценивается двумя параметрами: коэффициентом полезного действия ($\alpha_и$) и коэффициентом общей эффективности системы искусственного подпитывания подземных вод ($\alpha_{эф}$).

Коэффициент полезного действия представляет собой отношение расхода воды, дополнительно поступающей к водозаборному сооружению при искусственном подпитывании ($Q'_и$), к расходу «сырой» воды, поступающей из системы ИППВ ($Q_{с.в}$):

$$\alpha_и = \frac{Q'_и}{Q_{с.в}}. \qquad (11.3)$$

Коэффициент общей эффективности характеризует долю искусственно формируемых запасов в общей производительности водозаборного сооружения. Численно он равен отношению расхода воды, дополнительно поступающей к водозаборному сооружению ($Q'_и$), к общему расходу водозаборного сооружения ($Q_э$):

$$\alpha_{эф} = \frac{Q'_и}{Q_э}. \qquad (11.4)$$

Коэффициент полезного действия $\alpha_и$ теоретически может изменяться от нуля до единицы. В первом случае вся подаваемая «сырая» вода не доходит до водозаборного сооружения, во втором — она полностью расходуется на формирование ЭЗПВ. На практике величина $\alpha_и$ обычно составляет 0,7—0,9. Она зависит от параметров и режима работы сооружений ИППВ (периодический или непрерывный режим), граничных условий горизонта, расстояния от водозаборного сооружения до сооружений ИППВ, типа водозаборного сооружения, системы расположения эксплуатационных скважин и расстояний между ними.

Коэффициент общей эффективности $\alpha_{эф}$ также может изменяться от нуля, когда искусственные запасы (ресурсы) практически не участвуют в формировании ЭЗПВ, до единицы, когда дебит водозаборного сооружения полностью формируется за счет искусственно подаваемой воды. Коэффициент общей эффективности определяется теми же факторами, что и коэффициент полезного действия, а также зависит от водопроводимости водоносного горизонта, величины допустимого понижения уровня и расхода воды, поступающей из системы ИППВ в водоносный горизонт. Он уменьшается с увеличением водопроводимости и допустимого понижения уровня и увеличивается с ростом расхода поступающей в пласт воды.

Оценка ЭЗПВ с учетом их искусственного подпитывания проводится в такой последовательности:

1. В соответствии с заявленной потребностью в воде, конкретными гидрогеологическими условиями и возможными схемами размещения водозаборных скважин определяются ЭЗПВ без учета мероприятий по искусственному их подпитыванию ($Q'_э$).

2. Если ЭЗПВ без искусственного подпитывания не обеспечивают заявленной потребности, определяется необходимое количество воды ($Q'_и$), которое должно обеспечиваться системами искусственного

подпитывания:

$$Q'_{и} = Q_{потр} - Q'_{э}, \qquad (11.5)$$

где $Q_{потр}$ — заявленная потребность в воде.

3. В соответствии с гидрогеологическими условиями выбираются тип сооружения ИППВ (открытый или закрытый), параметры и режим искусственного подпитывания. Рассматриваются различные варианты расположения водозаборных сооружений и систем ИППВ. Для каждого варианта определяется коэффициент полезного действия ($\alpha_{и}$). При известных величинах $Q'_{и}$ и $\alpha_{и}$ находится необходимый расход «сырой» воды.

Расстояние между водозаборными сооружениями и сооружениями ИППВ устанавливаются по возможности минимальными, но с таким расчетом, чтобы длительность фильтрации до водозаборного сооружения была достаточной для очистки «сырой» воды от загрязнения. На практике эти расстояния принимаются равными 50—200 м.

4. Для инфильтрационных сооружений открытого типа при известных скоростях инфильтрации и расходе «сырой» воды определяются необходимая площадь инфильтрации, число и размеры инфильтрационных бассейнов. Для инфильтрационных сооружений закрытого типа с учетом возможного расхода нагнетательной скважины рассчитываются общее количество скважин и система их расположения.

5. Проводятся технико-экономическое сопоставление различных вариантов ИППВ и выбор оптимального варианта. Определяется коэффициент общей эффективности системы искусственного подпитывания.

### 11.3.4. Расчет водозаборных сооружений в условиях искусственного подпитывания запасов подземных вод

Оценка ЭЗПВ в условиях искусственного подпитывания и без него в принципе аналогична. Основные отличия связаны с необходимостью учитывать режим работы сооружений открытого типа (в частности, характер инфильтрации — свободная или подпертая, характер кольматации дна бассейнов, непрерывность или периодичность их работы и т. д.).

Рассмотрим особенности расчета водозаборных сооружений для двух наиболее распространенных случаев работы сооружений ИППВ открытого (схема 1) и закрытого (схема 2) типов при непрерывном режиме эксплуатации и подпитывания.

*Схема 1.* Сооружения открытого типа чаще всего применяются для искусственного подпитывания запасов подземных вод при работе водозаборных сооружений в речных долинах. В этом случае водозаборные сооружения обычно представляют собой линейные ряды скважин вдоль русла реки. Эксплуатируемый водоносный горизонт безнапорный, приурочен к аллювиальным отложениям. Воды аллювиальных отложений гидравлически связаны с поверхностными. Искусственное подпитывание осуществляется, как правило, свободной инфильтра-

цией («дождеванием») из системы инфильтрационных бассейнов, канав, каналов, расположенных параллельно водозаборному сооружению со стороны, противоположной реке.

В таких условиях расчетную схему пласта можно представить в виде пласта-полосы с границей I рода ($H = \text{const}$) по реке и границей II рода ($q = \text{const} \neq 0$) по линии расположения инфильтрационных сооружений. Величина расчетного понижения уровня при работе линейного ряда совершенных скважин большой протяженности $l \gg \gg L_р = l_0 + \Delta L$, $l$ — длина ряда, $l_0$ — расстояние от водозаборного сооружения до реки; $\Delta L$ — сопротивление ложа реки) без учета влияния искусственного подпитывания может быть определена по формуле Маскета — Лейбензона, преобразованной применительно к единичной производительности водозаборного ряда в безнапорном пласте:

$$S'_р = H - \sqrt{H^2 - \frac{2q}{k}\left(L_р + \frac{\sigma}{\pi}\ln\frac{\sigma}{\pi r_с}\right)}, \qquad (11.6)$$

где $q$ — единичная производительность водозаборного ряда, определяемая как отношение суммарного расхода водозаборного сооружения $Q_{сум}$ к длине ряда $l$; $\sigma$ — половина расстояния между скважинами.

Обозначим

$$\frac{\sigma}{\pi}\ln\frac{\sigma}{\pi r_с} = L_с, \qquad (11.7)$$

тогда

$$S'_р = H - \sqrt{H^2 - \frac{2q}{k}(L_р + L_с)}. \qquad (11.8)$$

Повышение уровня в скважине водозаборного ряда $\Delta h$ от работы инфильтрационных сооружений определяется по зависимости

$$\Delta h = H - \sqrt{H^2 - \frac{2q_{иф}}{k} L_р}, \qquad (11.9)$$

где $q_{инф}$ — единичный расход инфильтрационных сооружений (отношение общего расхода «сырой» воды $Q_{с.в}$ к длине инфильтрационных соружений).

Результирующее расчетное понижение уровня в водозаборных скважинах $S_р$ с учетом инфильтрации воды из бассейнов определится по формуле

$$S_р = H - \sqrt{H^2 - \left[\frac{2q_р}{k}(L_р + L_с) - \frac{2q_{иф}}{k} L_р\right]}. \qquad (11.10)$$

Отсюда величина расчетного расхода водозаборного сооружения при искусственном подпитывании составит

$$q_р = \frac{k(2H - S_р)S_р}{2(L_р + L_с)} + q_{иф}\frac{L_р}{L_р + L_с}. \qquad (11.11)$$

При определении $q_р$ величину $S_р$ принимают равной допустимому понижению уровня.

Первый член в выражении (11.11) представляет собой единичный расход водозаборного сооружения при допустимом понижении без учета искусственного подпитывания, второй — величну дополнительного расхода $q_и$, привлекаемого водозаборным сооружением при расходе воды на инфильтрацию $q_{инф}$ из бассейнов.

Следовательно

$$q_и = q_{инф} \frac{L_р}{L_р + L_с}. \tag{11.12}$$

Коэффициент полезного действия ($\alpha_и$) может быть рассчитан по формуле

$$\alpha_и = \frac{q_и}{q_{инф}} = \frac{L_р}{L_р + L_с} = \frac{1}{1 + \frac{L_с}{L_р}}. \tag{11.13}$$

Из формулы (11.13) видно, что коэффициент полезного действия зависит от отношения величины $L_с$ к расстоянию от водозаборного сооружения до реки (в свою очередь, $L_с$ зависит от расстояния между водозаборными скважинами). При $\frac{2\sigma}{L_р} > 10$ подпитывание запасов неэффективно, так как большая часть инфильтрационных вод не перехватывается скважинами водозаборного сооружения, а уходит в реку. Коэффициент общей эффективности $\alpha_{эф}$ может быть рассчитан по формуле

$$\alpha_{эф} = \frac{q_и}{q_р}. \tag{11.14}$$

При непрерывном режиме подпитывания величина $q_{инф}$ может быть рассчитана по формуле

$$q_{инф} = V_{инф} \cdot b, \tag{11.15}$$

где $V_{инф}$ — средняя скорость инфильтрации; $b$ — ширина бассейна.

Скорость инфильтрации зависит от коэффициента фильтрации, мощности заиленного слоя и глубины наполнения бассейна (канала). Ее величина обычно определяется опытным путем, а изменение во времени прогнозируется по данным о мутности воды, коэффициенте фильтрации заиленного слоя и объемном весе скелета грунта.

*Схема 2.* Сооружения закрытого типа целесообразно применять для подпитывания запасов подземных вод напорных водоносных горизонтов. В этом случае водозаборные сооружения представляют собой группы взаимодействующих водозаборных скважин, системы ИППВ — группы взаимодействующих нагнетательных скважин.

Для схемы неограниченного пласта величина понижения уровня в водозаборной скважине без искусственного подпитывания, рассчитываемая методом обобщенных систем, равна

$$S'_р = \frac{Q'_э}{2\pi km} \left( \ln \frac{R_п}{r_к} + \frac{1}{n} \ln \frac{\sigma}{\pi r_с} \right), \tag{11.16}$$

где $Q'_э$ — суммарный дебит эксплуатационных скважин без учета искусственного подпитывания; $n$ — количество скважин.

Повышение уровня $\Delta h$ в скважине от действия группы нагнетательных скважин может быть определено по формуле

$$\Delta h = \frac{Q_{\text{с.в}}}{2\pi km} \ln \frac{R_{\text{п}}}{r_{\text{н}}}, \qquad (11.17)$$

где $Q_{\text{с.в}}$ — суммарный дебит системы нагнетательных скважин; $r_{\text{н}}$ — расстояние между центрами водозаборной и нагнетательной группами скважин.

Результирующее расчетное понижение в водозаборных скважинах с учетом работы системы нагнетательных скважин составит

$$S_{\text{р}} = S'_{\text{р}} - \Delta h = \frac{Q_{\text{э}}}{2\pi km}\left(\ln \frac{R_{\text{п}}}{r_{\text{к}}} + \frac{1}{n} \frac{\sigma}{\pi r_{\text{с}}}\right) - \frac{Q_{\text{с.в}}}{2\pi km} \ln \frac{R_{\text{п}}}{r_{\text{н}}}, \qquad (11.18)$$

отсюда

$$Q_{\text{э}} = \frac{2\pi km S_{\text{р}}}{\ln \frac{R_{\text{п}}}{r_{\text{к}}} + \frac{1}{n} \ln \frac{\sigma}{\pi r_{\text{с}}}} + Q_{\text{с.в}} \frac{\ln \frac{R_{\text{п}}}{r_{\text{н}}}}{\ln \frac{R_{\text{п}}}{r_{\text{к}}} + \frac{1}{n} \ln \frac{\sigma}{\pi r_0}}. \qquad (11.19)$$

При определении $Q_{\text{э}}$ величину $S_{\text{р}}$ принимают равной допустимому понижению уровня воды.

В формуле (11.19) первый член соответствует расходу, который может быть получен без учета искусственного подпитывания, второй — дополнительному расходу $Q_{\text{и}}$, привлекаемому к водозаборному сооружению в связи с работой нагнетательной группы.

Следовательно

$$Q'_{\text{и}} = Q_{\text{с в}} \frac{\ln \frac{R_{\text{п}}}{r_{\text{н}}}}{\ln \frac{R_{\text{п}}}{r_{\text{к}}} + \frac{1}{n} \ln \frac{\sigma}{\pi r_{\text{с}}}}. \qquad (11.20)$$

Из (11.20) коэффициент полезного действия

$$\alpha_{\text{и}} = \frac{Q'_{\text{и}}}{Q_{\text{с.в}}} = \frac{\ln \frac{R_{\text{п}}}{r_{\text{н}}}}{\ln \frac{R_{\text{п}}}{r_{\text{н}}} + \frac{1}{n} \ln \frac{\sigma}{\pi r_{\text{с}}}}. \qquad (11.21)$$

Так как $\frac{1}{n} \ln \frac{\sigma}{\pi r_{\text{с}}}$ обычно намного меньше величины $\ln \frac{R_{\text{п}}}{r_{\text{к}}}$, выражение (11.21) преобразуется следующим образом:

$$\alpha_{\text{и}} = \frac{\ln \frac{R_{\text{п}}}{r_{\text{н}}}}{\ln \frac{R_{\text{п}}}{r_{\text{к}}}}. \qquad (11.22)$$

Из формулы (11.22) следует, что коэффициент полезного действия увеличивается с уменьшением расстояния между водозаборными и нагнетательными скважинами и с увеличением радиуса «большого колодца». Коэффициент общей эффективности для этого случая нетрудно рассчитать согласно (11.4).

**Пример.** В речной долине проектируется водозаборное сооружение, расположенное параллельно реке и представляющее собой линейный ряд скважин протяженностью 200 м. Безнапорный водоносный горизонт представлен среднезернистыми песками мощностью 20 м, коэффициент фильтрации в среднем составляет 15 м/сут. Расстояние от водозаборного сооружения до реки 100 м. Потребное количество воды — 30 тыс. м³/сут. Определенный опытным путем возможный дебит скважины составляет 1,5 тыс. м³/сут. Следовательно, для удовлетворения заявленной потребности требуется заложить 20 скважин с расстоянием между ними 100 м. Дополнительное фильтрационное сопротивление русловых отложений составляет 100 м. Пропускная способность русловых отложений превышает заданную потребность. Допустимое понижение уровня воды в скважине с учетом пропускной способности фильтра и обеспечения нормальной работы насоса составляет 12 м. Требуется определить необходимость искусственного подпитывания и в случае такой необходимости провести оценку эксплуатационных запасов подземных вод с учетом пополнения.

Прежде всего определим возможный расход водозаборного сооружения без искусственного пополнения. Так как $\frac{l_0 + \Delta L}{l} \approx 0{,}1$, для расчета используем формулу (11.18), приняв $S_p = 12$ м, $r_c = 0{,}1$. Получим $q = 9$ м³/сут.

Общая производительность водозаборного сооружения длиной 2000 м тогда составит $Q_э = q \cdot l = 9 \cdot 2000 = 18\,000$ м³/сут. В связи с тем, что возможная производительность водозаборного сооружения не может обеспечить заданную потребность, по формуле (11.5) определяем необходимое количество воды $Q'_и$, которое должно обеспечиваться искусственным пополнением:

$$Q'_и = 30\,000 - 18\,000 = 12\,000 \text{ м}^3/\text{сут}.$$

Исходя из гидрогеологических условий (безнапорный водоносный горизонт, приуроченный к пескам, глубина уровня — 5 м) выбираем открытый тип инфильтрационных сооружений — ряд инфильтрационных бассейнов, расположенных параллельно водозаборному сооружению. По топографическим условиям и условиям подачи воды бассейны закладываются на расстоянии 150 м от водозаборного сооружения. Приведенные опытные исследования позволили оценить скорость инфильтрации, которую можно принять равной 0,5 м/сут.

По формуле (11.13) находим, что коэффициент полезного действия $\alpha_и = 0{,}7$.

Отсюда расход «сырой» воды

$$Q_{с.в} = \frac{Q'_и}{\alpha_и} = \frac{12\,000}{0{,}7} = 17\,000 \text{ м}^3/\text{сут},$$

а единичный расход инфильтрации $q_{инф}$ при длине бассейнов, равной 2 км,

$$q_{инф} = \frac{Q_{с.в}}{l} \quad \frac{17\,000}{2000} = 8{,}5 \text{ м}^3/\text{сут} \cdot \text{м}.$$

При скорости инфильтрации $V_{инф} = 0{,}5$ м/сут, ширина бассейнов из формулы (11.15) составит $b = 17$ м.

Общая площадь инфильтрации $F_{инф} = b \cdot l = 17 \cdot 2000 = 34\,000$ м². Определим коэффициент общей эффективности

$$\alpha_{эф} = \frac{Q'_и}{Q_э} = \frac{12\,000}{30\,000} = 0{,}4.$$

Таким образом, 40 % эксплуатационных запасов будет формироваться за счет искусственного подпитывания подземных вод.

### 11.4. ОЦЕНКА ЭКСПУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В РАЙОНАХ ДЕЙСТВУЮЩИХ ВОДОЗАБОРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

В практике гидрогеологических исследований весьма часты случаи, когда разведка и оценка ЭЗПВ должны проводиться в районах, где уже имеются действующие водозаборные сооружения. В одних случаях это определяется ростом потребности в воде, в других — неподтверждением ранее подсчитанных запасов подземных вод, что вызывает необходимость их переоценки; в третьих тем, что водозаборные сооружения работают на неутвержденных запасах.

Оценка (переоценка) ЭЗПВ в районах действующих водозаборных сооружений обладает некоторыми специфическими особенностями, главной из которых является использование данных о режиме их эксплуатации. Анализ нарушенного режима подземных вод в районах действующих водозаборных сооружений позволяет получить значительно большую информацию об условиях формирования ЭЗПВ по сравнению с результатами разведочных работ, так как в этих условиях имеются значительно более мощные возмущения (концентрированный отбор подземных вод), продолжающийся в течение многих лет.

Интерпретация данных по режиму подземных вод в районах водозаборов позволяет более обоснованно выявлять и количественно оценивать те источники формирования эксплуатационных запасов, которые практически не могут быть установлены в процессе разведочных работ, и по полученным данным проводить корректировку расчетной схемы и переоценку ЭЗПВ. Использование данных эксплуатации позволяет также уточнять гидрогеологические параметры водовмещающих и слабопроницаемых отложений.

В связи с этим наблюдения за режимом подземных вод в районах водозаборных сооружений являются одной из важнейших задач гидрогеологических исследований.

В настоящее время эти исследования представляют собой основное содержание одной из стадий поисково-разведочных работ — стадии эксплуатационной разведки. Методика изучения режима подземных вод в районах действующих водозаборных сооружений и использования полученных данных для оценки ЭЗПВ рассмотрена в работах Н. Н. Биндемана и Л. С. Язвина (1970), В. С. Ковалевского (1986), Н. И. Плотникова (1973) и других авторов.

Анализ нарушенного влиянием эксплуатации режима подземных вод позволяет:

1. Выполнить оценку (переоценку) эксплуатационных запасов подземных вод на участке (участках) действующих водозаборных сооружений, результаты которой позволяют дать прогноз возможности увеличения водозаборного сооружения, его сохранения и сокращения. Данные об изменении отбора подземных вод водозаборными сооружениями, уровенном режиме, изменении отдельных компонентов химического состава подземных вод позволяют путем решения обратных задач с применением в сложных гидрогеологических условиях методов математического моделирования получить наиболее достоверную геофильтрационную модель месторождения или бассейна под-

земных вод, которая может быть использована для дальнейших прогнозов. Наиболее важным результатом решения обратных задач является количественная оценка различных источников формирования эксплуатационных запасов и их изменений во времени, а в некоторых случаях — и уточнение таких гидрогеологических параметров, как коэффициент перетекания, параметров, характеризующих условия взаимосвязи подземных и поверхностных вод, а также миграционных параметров. Использование методов математического моделирования наиболее целесообразно при наличии большого количества взаимодействующих водозаборных сооружений. При наличии одного-двух сооружений анализ режима и переоценка эксплуатационных запасов в простых гидрогеологических условиях могут быть выполнены гидродинамическими аналитическими методами (гл. 7), в сложных — могут быть использованы гидравлические методы.

Данные о режиме эксплуатации действующих водозаборных сооружений позволяют не только определить величину возможного водоотбора, но и осуществить решение других задач, входящих в оценку ЭЗПВ: оценить обеспеченность запасов различными источниками формирования; дать прогноз возможных изменений качества подземных вод и рекомендации по организации зон санитарной охраны; оценить влияние прогнозного водоотбора на другие водозаборные сооружения. Весьма важными являются данные по изучению влияния эксплуатации подземных вод на природную среду (оседание земной поверхности, понижение уровня первого от поверхности водоносного горизонта и изменения ландшафтных условий, активизация карстово-суффозионных процессов, изменение поверхностного стока).

2. Установить закономерности формирования режима подземных вод в условиях их эксплуатации и получить наиболее достоверные данные для оценки ЭЗПВ месторождений (участков), находящихся в аналогичных условиях.

Применение метода аналогии особенно целесообразно в весьма сложных гидрогеологических условиях, когда невозможно создание обоснованной геофильтрационной модели месторождения.

В этом случае оценка эксплуатационных запасов может быть выполнена по величине их модуля. Модульная оценка обычно применяется в условиях, при которых может быть надежно оконтурена воронка депрессии, а эксплуатация подземных вод происходит при установившемся режиме. В других случаях по аналогии могут применяться отдельные параметры (перетекание, сопротивление русловых отложений, эффективная пористость), которые не могут быть определены достаточно надежно по результатам разведочных работ. Опытом эксплуатации действующих водозаборных сооружений может быть обоснована также расчетная схема для оценки ЭЗПВ.

Особенно важное значение имеет использование данных по режиму эксплуатации подземных вод для оценки их эксплуатационных запасов в рассмотренных в этой главе специфических условиях — при прерывистом режиме водоотбора на орошаемых территориях, на месторождениях дренажных подземных вод, при проведении мероприятий по искусственному подпитыванию запасов.

Анализ режима в районе действующих водозаборных сооружений позволяет также оценить возможность загрязнения подземных вод или истощения их эксплуатационных запасов и разработать мероприятия по охране природной среды.

Обработка и интерпретация данных эксплуатации водозаборных сооружений в связи с изменением во времени водоотбора и большим количеством водозаборных скважин характеризуется большой сложностью. При этом наибольшую сложность представляет квалификация режима подземных вод в условиях эксплуатации, который может быть как установившимся, так и неустановившимся. Снижение уровня во времени может быть связано как со сработкой емкостных запасов подземных вод, так и с ростом водоотбора. Для выяснения причин этого снижения целесообразно провести анализ изменения удельного понижения уровня ($S/Q$) во времени.

По анализу графиков $S/Q = f(t)$ можно установить, связано ли снижение уровня только с ростом водоотбора (при отсутствии роста удельного понижения) или происходит сработка емкостных запасов подземных вод (при росте величины $S/Q$).

Прогнозные расчеты водозаборных сооружений после обоснования геофильтрационной модели эксплуатируемого месторождения (с учетом результатов обработки и интерпретации режима эксплуатации) проводятся так же, как и при оценке ЭЗПВ на вновь разведанном месторождении.

Главной особенностью этих расчетов является необходимость учета при оценке ЭЗПВ предшествующего периода эксплуатации.

При установившемся режиме эксплуатации все расчеты могут выполняться от сложившейся при эксплуатации уровенной поверхности. При этом определяется либо величина дополнительного понижения уровня при проектируемом приросте водоотбора $\Delta Q$, либо возможный прирост водоотбора в зависимости от остаточной величины допустимого понижения.

При неустановившемся режиме в расчетах следует учитывать величину и характер изменения водоотбора за предшествующий оценке ЭЗПВ период эксплуатации. Расчеты выполняются от начала эксплуатации применительно к схематизированному графику фактического водоотбора (часто ступенчатому) с его увеличением на время оценки до проектной величины.

В связи с тем, что за начальный период эксплуатации данные по величине водоотбора и его режиму обычно отсутствуют, для приближенных расчетов используется приведенное время ($t_{пр}$) или приведенный водоотбор ($Q_{пр}$).

В первом случае для расчета $t_{пр}$ принимается величина водоотбора ($Q_{кон}$) за последний, предшествующий оценке запасов период, и приближенно оценивается сумма откаченной воды за весь период эксплуатации $t$ по формуле $\Sigma Q_i \Delta t_i$. Тогда

$$t_{пр} = \frac{\Sigma Q_i \Delta t_i}{Q_{кон}}, \qquad (11.23)$$

где $\Delta t_i$ — $i$-й период эксплуатации с расходом $Q_i$.

Во втором случае определяется средний приведенный расчетный эксплуатационный расход водозаборного сооружения за весь период эксплуатации $t_0$:

$$Q_{\text{пр}} = \frac{\Sigma Q_i \Delta t_i}{t_0}. \qquad (11.24)$$

Наиболее эффективно учет предшествующего периода эксплуатации может быть выполнен при использовании для расчетов методов математического моделирования.

На крупных городских водозаборных сооружениях со стихийно складывающейся системой эксплуатации в течение длительного времени и с большим числом эксплуатационных скважин в условиях периодического выхода из строя старых и ввода новых обычно используется прием объединения отдельных, как правило, близко расположенных скважин в «большой колодец». Последние могут рассматриваться как обобщенные системы скважин с переменным расходом, а при необходимости и с переменными размерами. При этом могут учитываться в обобщенном виде все изменения характера и ситуации эксплуатации подземных вод на таком водозаборном сооружении.

**Контрольные вопросы, задания.** 1. Охарактеризуйте основные специфические особенности отбора и использования подземных вод, требующие учета при оценке их эксплуатационных запасов. 2. Как учитывается периодичность и неравномерность отбора подземных вод для орошения при различных источниках формирования ЭЗПВ? 3. Какова роль возвратных ирригационных вод в формировании ЭЗПВ и как они могут быть учтены при расчетах водозаборных сооружений. 4. В чем основная разница между оценкой водопритоков в горные выработки и их оценкой как ЭЗПВ? 5. В чем заключаются принципиальные отлнчия оценки ЭЗПВ разрабатываемых и разведуемых месторождений твердых полезных ископаемых? 6. Какие условия должны выполняться для обеспечения возможности применения методов ИППВ? 7. В чем принципиальные отличия закрытых и открытых систем ИППВ? Их основные достоинства? 8. От чего зависит эффективность систем ИППВ и как она может быть повышена? 9. Какие необходимы дополнительные данные для расчета водозаборных сооружений с ИППВ? 10. Какие трудности возникают при оценке ЭЗПВ в районах действующих водозаборов? 11. От чего зависит достоверность оценки ЭЗПВ в районах действующих водозаборов? Какими способами она может быть повышена?

## ГЛАВА 12. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА ИЗМЕНЕНИЕ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ И ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

Окружающая среда является одним из факторов, определяющих условия формирования ЭЗПВ. В свою очередь, она может претерпевать различные изменения под влиянием эксплуатации. Прогнозирование этих изменений является одной из задач оценки ЭЗПВ.

Под влиянием водоотбора и снижения уровней продуктивных эксплуатируемых водоносных горизонтов может происходить изменение гидрогеологических условий и связанных с ними различных компонентов окружающей среды в следующих основных направлениях.

1. Снижение уровня грунтовых вод, которое может вызывать:

а) угнетение растительности, осушение болот, изменение режима влагооборота в почвах;

б) улучшение мелиоративного состояния почвогрунтов;

в) осушение колодцев и уменьшение родникового стока;

г) усиление питания грунтовых вод за счет сокращения испарения с их поверхности и транспирации растительностью.

2. Оседание земной поверхности.

3. Интенсификация карстово-суффозионных процессов.

4. Изменение поверхностного стока.

Необходимость прогнозирования при оценке запасов указанных явлений требует расширения состава исходной информации, получаемой в процессе разведки, а также учета специфики этих прогнозов при построении и обосновании природных гидрогеологических и геофильтрационных моделей месторождений подземных вод.

В этой связи следует иметь в виду, что требования к точности и достоверности прогнозов сопутствующих эксплуатации явлений могут быть выше (например, к снижению уровней грунтовых вод при оценке мелиоративного эффекта под влиянием эксплуатации), чем к расчету эксплуатационных понижений в продуктивном горизонте.

В настоящее время методика оценки изменений гидрогеологических условий и связанных с ними соответствующих изменений различных элементов окружающей среды по данным разведочных работ разработана недостаточно.

Наиболее достоверные прогнозные оценки могут быть выполнены по данным эксплуатации действующих водозаборов с последующим широким использованием метода аналогии применительно к вновь разведуемым месторождениям.

Перспективным направлением следует считать создание опорных опытных полигонов в типовых гидрогеологических условиях, на которых в результате многолетних стационарных наблюдений и специальных целенаправленных исследований могут быть получены достоверные фактические данные для прогнозирования влияния эксплуатации на различные компоненты окружающей среды. Поэтому приводимые ниже рекомендации следует рассматривать как предварительные, требующие дальнейшей разработки как в плане методики проведения гидрогеологических исследований, так и выполняемых по их данным прогнозов.

Наиболее разработаны вопросы, связанные с прогнозированием изменений поверхностного стока и снижения уровня грунтовых вод.

При проведении специальных исследований, связанных с прогнозированием влияния эксплуатации на изменение гидрогеологических условий, предварительно надо оценить возможные масштабы изучаемых процессов и вероятность их проявления в процессе разведочных работ и под влиянием эксплуатации.

## 12.1. ОЦЕНКА СНИЖЕНИЯ УРОВНЯ ГРУНТОВЫХ ВОД

Принципиально расчеты снижения уровня грунтовых вод производятся на двухслойных или многослойных геофильтрационных моделях при эксплуатации одного или нескольких продуктивных водоносных горизонтов.

Для расчетов могут использоваться как расчетные схемы, принимаемые для оценки производительности водозаборов на продуктивные горизонты, так и целенаправленная геофильтрационная схематизация, выполненная с учетом особенностей решаемой задачи.

Расчеты могут выполняться:

а) аналитическими методами в простейших условиях однородных по проницаемости двухслойных или трехслойных пластов;

б) методами моделирования на аналоговых или цифровых вычислительных машинах;

в) гидравлическими методами по данным мощных групповых или кустовых откачек с нагрузкой на точки опробования, соответствующей или соизмеримой с проектной при достаточно большом количестве наблюдательных скважин на верхний горизонт, а также по данным эксплуатации действующих водозаборов на оцениваемом участке;

г) методом гидрогеологических аналогов.

Аналитические расчеты могут использоваться только для ориентировочных оценок. Наиболее точные результаты могут быть получены при расчетах на математических моделях. Особенности таких моделей применительно к задачам расчета снижения уровней грунтовых вод должны учитывать следующие обстоятельства:

1) задача должна решаться в отметках уровня с заданным, реально распределенным по площади инфильтрационным питанием (испарением и транспирацией растительностью);

2) грунтовый горизонт в большинстве случаев должен воспроизводиться как горизонт с заданной емкостью и горизонтальной проводимостью. Пренебрежение горизонтальной проводимостью допускается только при рассмотрении горизонта грунтовых вод в суглинистых и глинистых породах;

3) использование принципа суперпозиции приводит к завышению понижений уровня грунтовых вод, так как при этом не учитываются изменения баланса питания и разгрузки на их поверхности;

4) схематизация разреза водоносной толщи между грунтовым и продуктивным водоносными горизонтами должна учитывать реальное строение этой толщи относительно вертикальной фильтрационной проводимости. В частности, не допустима схематизация, исключающая выделение на модели подстилающих грунтовый горизонт слабопроницаемых пород;

5) при субнапорном характере первого от поверхности водоносного горизонта, перекрытого суглинистыми отложениями, последние следует обязательно учитывать в расчетной схеме с заданием их емкостных характеристик;

6) предварительные прогнозы снижения уровня грунтовых вод могут выполняться схематично, принимая питание во времени неиз-

менным; более точные результаты могут быть получены при учете реального изменения питания во времени, его усиления под влиянием снижения уровня грунтовых вод за счет сокращения или полного прекращения испарения, а также внутригодового регулирования питания паводковым стоком;

7) при расчетах снижения уровня грунтовых вод для оценки мелиоративного эффекта следует учитывать возможное усиление питания подземных вод на орошаемых массивах.

Упрощенная модель может быть реализована путем задания алгебраической величины суммарного инфильтрационного питания грунтовых вод непосредственно на их поверхность. Более точная реализация условий формирования уровенной поверхности грунтовых вод может быть выполнена при использовании рассмотренной в гл. 3 модели И. С. Пашковского (1985), учитывающей водообмен грунтовых вод с поверхностными, в том числе атмосферными осадками, через зону аэрации. Поскольку она требует большого объема исходной информации, целесообразность ее использования в тех или иных случаях зависит от требований к точности решения задачи.

Гидравлические расчеты целесообразно применять в случаях хорошей связи грунтовых и напорных вод, когда факт реакции грунтового горизонта на откачку из напорного может быть зафиксирован однозначно. В случае отсутствия такой реакции при затрудненных условиях взаимосвязи опираться на фактически полученные результаты можно лишь при условии проверки факта отсутствия заметной реакции на математических моделях, поскольку процесс развития депрессии по разрезу может протекать очень медленно.

Для прогноза снижения уровня грунтовых вод на математических моделях в процессе разведочных работ должна быть получена более детальная информация по характеристике:

а) уровенной поверхности грунтовых вод и глубине ее залегания;

б) водопроводимости и емкостным свойствам грунтового горизонта и вертикальной проводимости подстилающих грунтовый горизонт слабопроницаемых отложений;

в) суммарной величины питания грунтовых вод, ее распределения по площади и зависимости от глубины залегания уровня;

г) суммарной величины испарения с поверхности грунтовых вод и ее зависимости от глубины залегания уровня.

Повышение требований, предъявляемых к детальности картирования по площади указанных характеристик, вызывает целесообразность широкого применения методов наземной геофизики (электроразведки и сейсморазведки). При картировании глубин залегания уровней при больших амплитудах их изменений по площади и во времени следует проводить повторные съемки в различные по водности периоды.

Плотность разведочной сети наблюдательных скважин и пунктов геофизических наблюдений должна определяться требованиями к точности картирования изменения глубины залегания уровня и площадной изменчивостью строения разреза и параметров водоносных горизонтов и слабопроницаемых слоев.

При проведении специальных откачек, направленных на решение вопроса о снижении уровня грунтовых вод опытным путем, требуется:

а) проведение откачек с расходами, соответствующими проектным, применительно к схеме будущих водозаборных сооружений;

б) расположение наблюдательных скважин по площади применительно к специфике решаемой задачи, т. е. на участках с характерным строением разреза и глубиной залегания уровней, в том числе на участках «литологических окон», причем количество скважин на грунтовый горизонт в связи с их небольшой глубиной может быть существенно больше, чем на напорный;

в) обязательное расположение узлов ярусных наблюдательных скважин на характерных по строению разреза участках.

В зависимости от специфики решаемых вопросов, например, с целью оценки влияния снижения уровня грунтовых вод на характерные элементы ландшафта, откачки могут проводиться повторно в разные периоды года.

При решении задач, связанных с оценкой мелиоративного эффекта на массивах орошения, откачки целесообразно проводить как в естественных условиях, так и в условиях имитации орошения в эксплуатационном режиме.

При решении вопроса о необходимости проведения специальных опытных откачек целесообразна их предварительная имитация на тестовых математических моделях с целью оценки возможности получения ожидаемых результатов в ходе того или иного планируемого опыта.

При прогнозировании снижения уровней грунтовых вод во времени необходимо учитывать закономерности их сезонных и многолетних колебаний, т. е. все прогнозы должны базироваться на данных стационарных наблюдений за режимом подземных вод. Кратковременные ряды наблюдений, полученные в процессе разведки, должны удлиняться с учетом данных по региональной наблюдательной сети.

Исключительно важное значение для решения этих вопросов имеет опыт эксплуатации действующих водозаборных сооружений. Анализ режима грунтовых вод в условиях эксплуатации является наиболее реальным способом подтверждения соответствия реальным природным условиям геофильтрационной модели, используемой для прогноза снижения уровней грунтовых вод.

В районах действующих водозаборных сооружений можно также наблюдать характер влияния снижения уровня грунтовых вод на природно-ландшафтные комплексы и, в частности, угнетение растительности.

Учитывая неразработанность вопроса влияния изменения гидрогеологических условий на природно-ландшафтные комплексы, использование для оценки и прогноза снижения уровня грунтовых вод метода гидрогеологических аналогов является наиболее эффективным. В этом случае самое тщательное внимание должно быть уделено обоснованию аналогии строения разреза, геоморфологии, глубины и условий залегания зеркала грунтовых вод, наличия и характеристик

поверхностных водных объектов на участке-аналоге в районе действующего водозабора и на вновь оцениваемом месторождении.

Для оценки масштабов влияния эксплуатации на снижение уровня грунтовых вод полезно сопоставлять величины их питания (модуля питания) с величиной перетока из грунтовых вод в напорные при прогнозных понижениях в них напоров. Очевидно, что если модуль питания грунтовых вод существенно превышает модуль перетока при прогнозируемом понижении уровня напорных вод, то снижения уровенной поверхности грунтовых вод под влиянием эксплуатации практически наблюдаться не будет.

### 12.2. ОЦЕНКА ОСЕДАНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Интенсивная эксплуатация подземных вод приводит к оседанию поверхности земли, обусловленному снижением напоров подземных вод в продуктивных водоносных горизонтах, вызывающему увеличение напряжений в массиве пород. Размеры депрессионных воронок могут достигать сотен и тысяч квадратных километров при понижении напора в их центре до сотен метров, в результате чего образуются массивы пород, избыточное напряжение в которых может достигать большой величины, приводящей к уплотнению горных пород. Динамика развития возможного оседания земной поверхности при водопонижении зависит от ряда факторов: интенсивности водоотбора, величины снижения напоров, геологического строения и морфологии района, мощности и состава уплотняемых пород и их физико-механических свойств, степени первичной консолидации пород. Наиболее интенсивны оседания при снижении давлений в молодых несцементированных или полусцементированных, недоуплотненных отложениях с большой пористостью. Наиболее благоприятные условия для развития рассматриваемого процесса создаются при переслаивании хорошо проницаемых и малосжимаемых водоносных горизонтов или комплексов, из которых осуществляется водоотбор, с сильносжимаемыми высокопористыми глинистыми разделяющими пластами. Такие условия типичны для месторождений в межгорных и предгорных артезианских бассейнах, в речных долинах, в конусах выноса и т. п.

Оседание земной поверхности в ряде случаев настолько интенсивно, что приносит огромный экономический ущерб. Происходит повышение уровня грунтовых вод, подтопление и заболачивание местности, обводнение зданий и промышленных сооружений, затопление прибрежных территорий; при неравномерном оседании — разрушение зданий, дорог и подземных коммуникаций, деформации мостов, портов, набережных и других сооружений. Наиболее пагубные последствия явления оседания имеются в Японии, Мексике, США, Италии, Нидерландах, Таиланде. В СССР наиболее крупные оседания земной поверхности отмечены на ряде крупных нефтяных и газовых месторождений; небольшие оседания — в районе городов Таллин, Москва, Ленинград и др.— в зонах интенсивного отбора подземных вод. Отметим, кроме того, частичную необратимость процесса оседания даже при восстановлении напоров подземных вод, поскольку, как

уже отмечалось, оседание связано преимущественно с уплотнением и пластическими деформациями глинистых пород с высокими реологическими свойствами.

В связи со сказанным оценка ЭЗПВ крупных месторождений должна включать в себя также и прогнозирование процессов оседания земной поверхности.

Прогнозные оценки могут осуществляться как на базе экстраполяции данных об оседании земной поверхности в районе действующих водозаборных сооружений, так и расчетным путем по данным о сжимаемости пород разреза, получаемым в лабораторных условиях.

Наблюдения на действующих водозаборных участках проводятся с помощью скважинных экстензиометров или регистраторов уплотнения пород по специально оборудованным реперным постам. Принцип таких наблюдений заключается в определении смещения устья скважины относительно платформы, укрепленной на бетонном основании, т. е. поверхности земли. Скважины должны быть обсажены до более уплотненных, практически несжимаемых пород. Необходима периодическая нивелировка платформы.

Перспективными считаются наблюдения за динамикой поверхности земли с помощью спутников. В настоящее время таким путем возможна оценка интенсивности движения поверхности земли до 1 см в год.

Лабораторные определения уплотняемости пород дают возможность более дешевых, массовых и ускоренных прогнозных оценок. Однако в этом случае следует обосновывать представительность выполненных определений, зависящую от текстурно-структурных особенностей изучаемых пород. При достаточном количестве представительных определений конечная осадка может быть определена по зависимости

$$s = 0{,}8\Delta\sigma_э a_c m, \qquad (12.1)$$

где $\Delta\sigma_э$ — изменение эффективного давления, МПа; $a_c$ — коэффициент сжимаемости породы, $МПа^{-1}$; $m$ — мощность пласта, для которого производится оценка возможного оседания.

Входящие в зависимость (12.1) величины могут быть определены следующим образом.

Изменение эффективного давления $\Delta\sigma_э$ определяется величиной снижения взвешивающего гидростатического давления, т. е. изменением уровня подземных вод. Связано это с тем, что естественная нагрузка или эффективное давление $\sigma_э$ характеризуется разностью между бытовой нагрузкой $\sigma_б$, т. е. давлением массы вышележащих пород, и взвешивающим гидростатическим давлением $\sigma_г$:

$$\sigma_э = \sigma_б - \sigma_г. \qquad (12.2)$$

Так как бытовое давление неизменно, то изменение эффективного давления будет определяться снижением уровня подземных вод. Снижению уровня на 100 м соответствует изменение эффективного давления приблизительно на 1 МПа.

Коэффициент сжимаемости пород $a_c$ определяется по данным компрессионных испытаний грунтов в ненарушенном состоянии. Для

недоуплотненных глин коэффициент сжимаемости может быть равен $n \cdot 10^{-1} \ldots n \cdot 10^{-2}$ МПа$^{-1}$, для переуплотненных глинистых пород его значения уменьшаются на один-два порядка. Следовательно, конечная осадка при снижении уровня на десятки метров при наличии глинистой толщи мощностью несколько десятков метров может составлять от миллиметров до нескольких десятков сантиметров.

Следует, однако, учитывать длительность процесса уплотнения глинистых пород, а значит, и оседания земной поверхности. Осадка на расчетный момент времени может быть определена по кривым ползучести, полученным при лабораторных исследованиях и характеризующим развитие деформаций во времени при различных напряжениях.

Более надежно эффективная величина коэффициента сжимаемости $a_c$ может быть определена на действующих водозаборах, а затем использована для прогнозных оценок в аналогичных условиях.

В СССР наиболее детальное и целенаправленное изучение оседания земной поверхности под влиянием эксплуатации проводится в районе действующих водозаборных сооружений г. Таллина.

Несмотря на наличие в настоящее время достаточно разработанных методов оценки возможного оседания поверхности земли в районах интенсивной эксплуатации подземных вод, измерения и соответствующие прогнозы, как правило, начинают проводить только после возникновения опасных явлений. При этом забывают, что ликвидация последствий требует значительно больших затрат.

Предварительная оценка возможных величин оседания земной поверхности при проектировании водозаборных сооружений позволяет определить допустимые масштабы эксплуатации.

### 12.3. ОЦЕНКА АКТИВИЗАЦИИ КАРСТОВО-СУФФОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

Интенсификация карстово-суффозионных процессов происходит при эксплуатации трещинно-карстовых водоносных горизонтов. На участках, где карстующиеся породы перекрыты несцементированными песчано-глинистыми породами, она приводит к образованию провальных воронок и деформации земной поверхности. Провальные явления могут быть связаны с выносом в результате механической суффозии твердых частиц породы по трещинам из карстовых полостей, заполненных вторичными образованиями (например, доломитовой мукой из полостей палеокарста). Механический вынос песчано-глинистых пород может происходить и из перекрывающих карстующиеся породы пластов. Усиление карстообразования связано с расширением существующих трещин и карстовых полостей за счет растворения карбонатных пород под влиянием интенсификации карстового процесса или возобновления его вследствие усиления скорости движения подземных вод и поступления в пласт вод с повышенной растворяющей способностью из современных областей питания (параграф 12.3 подготовлен с помощью В. А.Полякова).

Количественный прогноз интенсификации карстово-суффозионного процесса и его конкретных последствий по данным разведки в

настоящее время не представляется возможным. Однако можно принципиально оценить вероятность и масштаб возможной активизации этих процессов под влиянием эксплуатации.

По сравнению с карстообразованием суффозионный процесс развивается значительно интенсивнее. Масштабы механической суффозии можно оценить экспериментально по выносу твердого стока. Эта задача может быть приближенно решена на основании детального изучения состава заполнителя карстовых пустот и трещин, покрывающих карст пород, объема и состава твердого стока с выделением в нем карбонатной составляющей.

Следует иметь в виду, что хотя суффозионный вынос обычно преобладает над выносом растворенного карбоната, сам процесс суффозии интенсифицируется и под влиянием активизации карстового процесса.

Достаточно эффективно оценка активности карста может быть выполнена по материалам изучения изотопов карбонатной системы подземных вод по разработанной во ВСЕГИНГЕО В. А. Поляковым методике.

Процесс карстования массивов карбонатных пород в общем виде можно представить как растворение кальцита и доломита под действием агрессивной углекислоты. В общем виде этот процесс может быть описан простейшим химическим уравнением

$$CaCO_3 + {}^*CO_2 + H_2O = Ca\begin{matrix} H{}^*CO_3 \\ HCO_3 \end{matrix}, \qquad (12.3)$$

где $^*CO_2$ — биогенный углекислый газ, с которым связана радиоактивность углерода $^{14}C$.

В естественных условиях генерация углекислого газа происходит главным образом в гипергенных условиях (в почвенном слое) за счет корневого дыхания растений и микробиологической деятельности. Интенсивность выноса сравнительно хорошо растворимого гидрокарбоната кальция, в свою очередь, является функцией интенсивности водообмена. Безусловно, на интенсивность карстования карбонатных пород кроме динамики подземных вод оказывают влияние литологические особенности пород, температура, химический состав и ионная сила раствора и другие факторы; однако их влияние, в свою очередь, также связано с динамикой подземных вод.

Изотопы углерода являются наиболее информативными показателями процесса карстования карбонатных пород.

Как известно (В. А. Поляков, 1981), карбонатные породы и биогенный углекислый газ значительно различаются по изотопному составу углерода. Среднее значение $\delta^{13}C$ карбонатных пород морского генезиса близко к 0 $^0/_{00}$, $\delta^{13}C$ пресноводных карбонатов в среднем составляет 11$^0/_{00}$, $\delta^{13}C$ биогенного (почвенного) углекислого газа равно 25 $^0/_{00}$. Таким образом, растворимые карбонатные компоненты в соответствии с уравнением (12.3) должны иметь характерные изотопные метки, позволяющие определять долю $HCO_3$, образовавшейся в результате растворения карбонатных пород.

По идеальной схеме, представленной уравнением (12.3), в карбонатной системе подземных вод половина гидрокарбонат-ионов всегда обусловлена растворением карбонатных пород. Однако в реальных условиях этот идеальный случай является чаще исключением, чем правилом, так как кроме растворения в естественных гидрогеологических системах происходит также переосаждение карбонатов в пласте в результате изменения термодинамических и химических условий (давления, температуры, ионной силы раствора, концентрации ионов кальция и т. д.).

Если увеличение содержания карбонатных компонентов в воде в условиях подземной циркуляции происходит в результате растворения карбонатах пород, то, имея данные по относительному содержанию изотопов $^{13}C$ в карбонатных породах ($\delta^{13}C_{кп}$), в растворенных карбонатах подземных вод ($\delta^{13}C_{рк}$) и в почвенном углекислом газе ($\delta^{13}C_{CO_2}$) можно определить долю карбонатных компонентов в подземных водах, связанных с карбонатными породами. Относительное содержание $\delta^{13}C$ определяется как отношение разности между содержанием $^{13}C$ и общим содержанием углерода в соответствующей среде к этому общему содержанию.

Если принять также, что водоносный горизонт приурочен к известнякам морского генезиса ($\delta^{13}C_{кп} = 0$) и учесть фракционирование изотопов $^{13}C$ при растворении $CO_2$ с образованием гидрокарбонат-ионов, можно получить следующую зависимость, связывающую концентрацию карбонатов, сформировавшуюся при растворении карбонатных пород ($\overline{M}$), с общей концентрацией карбонатных компонентов ($H_2CO_3$, $HCO_3$, $CO_3$) в исследуемой воде ($M$):

$$\overline{M} = M\left(1 + \frac{\delta^{13}C_{рк}\ ‰}{18\ ‰}\right). \qquad (12.4)$$

Интенсивность выноса карбонатных компонентов из карстующегося массива карбонатных пород, а следовательно, интенсивность карстовых процессов будет в значительной степени определяться и временем пребывания воды ($\tau$) в изучаемом массиве пород. Это время зависит от величины емкостных запасов подземных вод ($V_e$) и их динамических ресурсов ($Q_д$):

$$\tau = \frac{V_e}{Q_д}. \qquad (12.5)$$

Тогда с использованием уравнений (12.4) и (12.5) можно получить уравнение, связывающее время пребывания воды с содержанием изотопа $^{13}C_{рк}$ в растворенных карбонатах подземных вод.

$$Q_д\overline{M} = \frac{V_e}{\tau} M\left(1 + \frac{\delta^{13}C_{рк}}{18\ ‰}\right). \qquad (12.6)$$

Среднее время пребывания (или возраст) воды может быть определен также по космогенному радиоактивному изотопу углерода $^{14}C$, который попадает в карбонатную систему подземных вод главным образом из почвенного углекислого газа. В подземных водах его количество убывает в результате радиоактивного распада и частично

**12.1. Химический и изотопный состав подземных вод некоторых водопуиктов г. Москвы и Московской области**

| Район исследования и номер скважины | Глубина скважины, м | Геологический индекс водовмещающих пород | Σ карбоиатов (М), мг/л | $\delta^{13}C_{рк}$, ‰ | Коицентрация $(A_{рк})$ $^{14}C$, % | Относительиая интенсивность карста $\frac{\varkappa_i}{\varkappa_{max}}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| г. Москва, скв. 937 | 119 | $C_1$ | 248 | —13,8 | 62 | 0,56 |
| » » 938 | 250 | $C_1$ | 202 | —9,7 | 13 | 0,15 |
| » » 1369 | 141 | $C_2$ | 209 | —15,4 | 69 | 0,30 |
| » » 953 | 100 | $C_{3+2}$ | 230 | —16,5 | 90 | 1,00 |
| » » 1593 | 250 | C | 190 | —12,0 | 37 | 0,24 |
| г. Лыткарино, » 7ц | 100 | C | 164 | —11,1 | 25 | 0,16 |
| г. Щелково, » 189 | 164 | C | 110 | —9,4 | 15 | 0,09 |
| г. Балашиха, » 4757 | 95 | C | 230 | —12,2 | 21 | 0,14 |
| пос. Зеленый, » 4663 | 98 | C | 141 | —12,0 | 42 | 0,22 |

за счет процессов взаимодействия растворенных углеродсодержащих компонентов с карбонатными вмещающими породами. Среднее время пребывания по изотопу $^{14}C$ может быть связано с содержанием изотопа $^{13}C$ зависимостью, учитывающей удельное содержание радиоуглерода $^{14}C$ ($A_{рк}$) в карбонатной системе исследуемых вод, выраженное в ‰ от стандарта современного углерода, значение которого принимается равным 0,95 стандарта *NBS*. С учетом этой зависимости и выражения (12.6) В. А. Поляковым получен следующий показатель, который назван им показателем интенсивности карстового процесса (ИКП):

$$\varkappa = M\left(1 + \frac{\delta^{13}C_{рк}}{18\ ‰}\right)/8033 \ln \frac{-5{,}7\delta^{13}C_{рк}}{A_{рк}}. \qquad (12.7)$$

При таком подходе оценку интенсивности развития карста в пространстве и времени можно производить путем изучения изменения величины $\varkappa$ по площади исследуемой территории или во времени. Последнее обстоятельство важно при изучении активности техногенного карста в результате эксплуатации подземных вод. В табл. 12.1 приведены данные по изучению химического и изотопного состава карбонатной системы подземных вод на территории г. Москвы и Московской области в водоносных горизонтах, сложенных каменноугольными карбонатными породами.

В последнем столбце таблицы приведена в относительных единицах оценка интенсивности карстования пород каменноугольных отложений в некоторых пунктах Московского региона. Относительные величины интенсивности карстования рассчитаны как отношение определенных по формуле (12.7) значений $\varkappa_i$ в подземных водах изучаемого водопункта и в водопункте с максимальным значением параметра $\varkappa$. В рассматриваемом случае таким водопунктом оказалась скважина № 953 г. Москвы. С учетом принятых допущений можно сделать,

например, вывод о том, что карстовые процессы протекают в отложениях верхнего карбона в районе г. Балашихи в 7 раз менее интенсивно, чем на участке расположения скважины № 953.

Влияние техногенного воздействия на интенсификацию карстовых процессов можно оценивать, определяя параметр $\varkappa$ в процессе эксплуатации водоносного горизонта. Так, для касимовского водоносного горизонта верхнего карбона в процессе его эксплуатации для водоснабжения пос. Зеленого для различных лет получены следующие значения химического и изотопного состава подземных вод:

| Год | 1972 | 1978 | 1983 |
|---|---|---|---|
| $M$, мг/л | 152 | —13,9 | 141 |
| $\delta^{13}C$, ‰ | —11,8 | —12,0 | —12,0 |
| $^{14}C$, ‰ | 21 | 35 | 42 |
| $\frac{\varkappa_i}{\varkappa_{max}}$ | 0,47 | 0,72 | 1,00 |

Из приведенных данных видно, что интенсивность карстового процесса неуклонно возрастает во времени, что связано с увеличением поступления в эксплуатируемый водоносный горизонт «агрессивных молодых» вод из местной области питания водоносного горизонта.

Предлагаемый способ может быть использован для оценки возможной интенсификации процессов карстования пород на стадии разведки месторождений подземных вод только в тех случаях, когда время и производительность откачек позволяют получить в балансе водоотбора не менее 20 % воды, формирующейся за счет поступления из областей инфильтрационного питания или поверхностных вод, что связано с точностью оценки исходных данных.

Описываемый метод можно вполне использовать для оценки суффозионного выноса твердых компонентов из исследуемого водоносного горизонта. Для этого наряду с параметром $\varkappa$ определяют массу твердых частиц в единице объема исследуемой воды $M_s$. Доля суффозионного выноса $s_в$ вычисляется по формуле

$$s_в = \frac{M_s}{M\left(1 - \frac{\delta^{13}C,\ ‰}{18,\ ‰}\right)}, \qquad (12.8)$$

Доля карбонатной составляющей в твердом стоке может быть определена известными приемами, путем растворения карбонатных частиц 20 % соляной кислотой при нагревании в течение 30 мин.

Таким образом для реализации рассмотренного метода в процессе откачек или эксплуатации должен производиться периодический отбор проб для определения величины твердого стока и изучения карбонатных составляющих подземных вод, в том числе их изотопных компонентов.

Учитывая медленное развитие карстового процесса, на стадии разведки время и масштабы опытов могут оказаться недостаточными даже для частичного замещения емкостных запасов в районе опытного куста молодыми агрессивными водами, поступающими из областей питания.

В этом случае целесообразно изучить состав карстующихся пород и карбонатную систему подземных вод на исследуемом месторождении и дать прогноз возможного развития карстового процесса путем сопоставления величины параметра $\varkappa$ с данными по эксплуатируемому месторождению-аналогу.

При отсутствии данных об изотопном составе карбонатной системы подземных вод предварительные качественные выводы о возможности развития карстового процесса могут быть получены классическими методами, основанными на изучении растворимости карстующихся карбонатных пород и растворяющей способности движущихся в них подземных вод.

При оценке возможности интенсификации суффозионного выноса заполнителя из карстующихся пород особое внимание следует обратить на положение уровня грунтовых вод, стремясь не допускать в опасных ситуациях снижения его ниже кровли карстующихся пород.

### 12.4. ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СТОКА

Определение влияния отбора подземных вод на изменение поверхностного стока является одним из важнейших элементов оценки ЭЗПВ. Результаты этих определений необходимы как для установления допустимой величины отбора подземных вод с учетом требований к сохранению минимального речного стока, так и для оценки общих (поверхностных и подземных) водных ресурсов той или иной территории при составлении водохозяйственных балансов и схем комплексного использования и охраны водных ресурсов.

Подземные воды, являясь одной из составных частей гидросферы, находятся в тесной связи с другими природными водами. В связи с этим нарушение равновесия в балансе подземных вод, вызванное их отбором, может привести к изменению других составляющих гидросферы. Наибольшее влияние отбор подземных вод оказывает на изменение речного стока, особенно если эксплуатация водозаборных сооружений происходит в речных долинах.

В настоящее время отдельными специалистами водного хозяйства высказывается мнение, что в приходной части водохозяйственных балансов можно учитывать ЭЗПВ только водоносных горизонтов, которые гидравлически не связаны с поверхностными водотоками и, следовательно, при отборе подземных вод из этих горизонтов не происходит умеиьшение поверхностного стока. Однако такая постановка вопроса является неправомерной, так как она не учитывает всех особенностей взаимосвязи поверхностных и подземных вод в реальных природных условиях. Влияние отбора подземных вод на речной сток не является однозначным. Действительно, во многих случаях при эксплуатации подземных вод водоносных горизонтов, связанных с реками, происходит уменьшение поверхностного стока, однако его величина может варьировать в очень широких пределах, и вследствие инерционности водоносных систем прямое воздействие отбора на минимальный речной сток проявляется не в полной мере и сглаживается во времени.

В большинстве случаев, несмотря на уменьшение речного стока при отборе подземных вод, происходит увеличение располагаемых водных ресурсов и суммарных ресурсов поверхностных и подземных вод, которые можно использовать в народном хозяйстве. Это объясняется тем, что даже при отборе подземных вод, гидравлически связанных с поверхностными, дебиты водозаборов формируются не только за счет динамических ресурсов, разгрузка которых в естественных условиях происходила в реку, и привлекаемых ресурсов поверхностного стока, но и за счет других источников. К этим другим источникам относятся: а) емкостные запасы подземных вод в зоне депрессии; б) динамические ресурсы подземных вод, разгрузка которых происходила не достигая русла реки (родниковый сток, суммарное испарение с уровня грунтовых вод); в) привлекаемые ресурсы, формирующиеся за счет сброса возвратных вод непосредственно на площади эксплуатации (например, при орошении). Кроме того, следует учитывать, что обратный сброс определенной части вод после использования в реки позволяет не только компенсировать сокращение поверхностного стока, но и даже привести к его увеличению, если в формировании возвратных (сточных) вод в значительной части будут участвовать подземные воды, в естественных условиях неразгружавшиеся в реку.

В зависимости от соотношения различных источников формирования ЭЗВП (эксплуатационного водоотбора) величина возможного сокращения расхода поверхностных водотоков во времени сильно изменяется. Так, даже в тех случаях, когда подземные воды разгружаются только в реки, достаточно длительный период поверхностный сток может практически не изменяться. Продолжительность этого периода определяется расстоянием водозабора до реки, фильтрационными и емкостными свойствами водовмещающих пород и их мощностью. Так, для водоносного безнапорного горизонта с мощностью 20 м, коэффициентом фильтрации 10 м/сут и коэффициентом водоотдачи 0,2 изменение поверхностного стока при работе водозабора, расположенного на расстоянии 2 км от реки, через три года после начала эксплуатации составит всего около 16 % расхода этого водозабора. В то же время при расположении этого водозабора в 100 м от реки изменение поверхностного стока превысит 90 % дебита водозабора уже через 1,5 мес. В практических расчетах наиболее важным является определение сокращения меженного поверхностного стока. Его возможные изменения во многом будут определяться характером сезонных колебаний самого поверхностного стока. Не исключены случаи, когда в результате эксплуатации подземных вод меженный сток практически не изменится, а произойдет только уменьшение суммарного годового стока. Такие условия характерны для водоносных горизонтов с большой регулирующей емкостью, когда формирование эксплуатационных запасов подземных вод происходит в меженный период в основном за счет сработки емкостных запасов подземных вод с последующим восполнением сработанных запасов в период паводка.

Существенную роль в уменьшении сокращения поверхностного стока при отборе подземных вод может сыграть уменьшение или полное сокращение разгрузки подземных вод на испарение и транспи-

рацию, причем не только в аридных, но и гумидных условиях. По данным А. В. Лебедева (1980) и других исследователей, суммарное испарение с уровня грунтовых вод при его залегании на глубине до 1 м может составить 500—600 мм/год и более. Снижение уровня до глубины, превышающей 3—4 м, приведет к полному прекращению этой разгрузки и, если дебит водозабора не будет превышать величины разгрузки в зоне депрессионной воронки, поверхностный сток вообще не изменится.

Как уже отмечалось, при оценке возможного уменьшения поверхностного стока необходимо учитывать, что большая часть использованной воды в виде сточных вод возвращается обратно в поверхностный водоток. В связи с этим сокращение поверхностного стока будет равно разности между величиной водоотбора, формирующегося за счет привлечения поверхностного стока, и величиной обратного сброса в реки.

При этом следует иметь в виду, что качество сточных вод во многих случаях может привести к изменению качества поверхностных вод, особенно при небольших расходах последних. В связи с вышеизложенным в районах с дефицитом водных ресурсов расчету сокращения поверхностного стока должны предшествовать определение местоположения сброса и учет количества и качества сбрасываемых вод. Разумеется, учет обратного сброса использованных вод следует проводить в тех случаях, когда отобранные подземные воды не выводятся за пределы рассматриваемого бассейна.

Таким образом, оценка возможных изменений поверхностного стока под влиянием отбора подземных вод является сложной многофакторной задачей, при решении которой необходимо учитывать указанные выше особенности гидрогеологических и водохозяйственных условий. Оценка изменения поверхностного стока в настоящее время осуществляется гидрогеологическими и гидрологическими методами, а также методами аналогии.

Из гидрогеологических методов наиболее широко используется для прогноза изменения стока реки гидродинамический метод, позволяющий оценить долю поверхностного стока в суммарном дебите водозаборных сооружений. В простых гидрогеологических условиях для этих целей используются аналитические методы, в сложных — методы математического моделирования. Методика расчетов изменения поверхностного стока под влиянием эксплуатации подземных вод разрабатывались М. Хантушом, Е. Л. Минкиным, С. Я. Концебовским, И. С. Пашковским, М. М. Черепанским и другими исследователями.

В настоящее время имеются аналитические решения, позволяющие определить изменение поверхностного стока при отборе подземных вод в пластах полуограниченных, угловых и полосовых при однородных в фильтрационном отношении водовмещающих породах. В полученных решениях могут учитываться изменение водоотбора и уменьшение испарения. Наиболее подробно аналитические методы оценки изменения поверхностного стока рассмотрены С. Я. Концебовским и Е. Л. Минкиным (1986), М. М. Черепанским и др. (1985).

Рассмотрим методику расчета сокращения речного стока для

наиболее широко распространенных схем гидрогеологических условий [26].

**Полуограниченный пласт с контуром постоянного напора.** Для этих условий величина сокращения поверхностного стока ($Q_c$) может быть определена по формуле

$$Q_c = Q erfc \frac{l_0}{2\sqrt{at}}, \qquad (12.9)$$

где $Q$ — производительность водозаборного сооружения; $l_0$ — расстояние водозаборного сооружения до реки; $a$ — коэффициент уровнепроводности (пьезопроводности); $t$ — время от начала эксплуатации; $erfc$ — функция, значения которой приведены в табл. 12.2.

**12.2. Значение функции *erfc* (*z*)**

| z | erfc (z) | z | erfc (z) | z | erfc (z) |
|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 1 | 0,35 | 0,62 | 0,70 | 0,32 |
| 0,05 | 0,94 | 0,40 | 0,57 | 0,80 | 0,26 |
| 0,1 | 0,89 | 0,45 | 0,52 | 0,09 | 0,20 |
| 0,15 | 0,83 | 0,50 | 0,48 | 1,00 | 0,16 |
| 0,20 | 0,78 | 0,55 | 0,44 | 1,20 | 0,05 |
| 0,25 | 0,72 | 0,60 | 0,40 | 1,60 | 0,02 |
| 0,30 | 0,67 | 0,65 | 0,36 | 1,80 | 0,01 |
| | | | | 2,00 | 0,005 |

Формула (12.9) используется для совершенной реки. Для рек с несовершенным врезом русла, когда необходимо учитывать сопротивление русловых отложений и ширину реки, зависимость (12.9) приобретает следующий вид:

$$Q_c = Q\left[erfc \frac{l_0}{2\sqrt{at}} - \frac{1}{2} e^{-\frac{l_0^2}{4at}} \left(e^{z_1^2} erfc Z_1 + e^{z_2^2} erfc Z_2\right)\right]; \qquad (12.10)$$

$$Z_1 = \frac{l_0}{2\sqrt{at}} + \frac{\sqrt{at}}{\sqrt{kmA_0}} th \frac{b}{\sqrt{kmA_0}}; \qquad (12.11)$$

$$Z_2 = \frac{l_0}{2\sqrt{at}} + \frac{\sqrt{at}}{\sqrt{kmA_0}} cth \frac{b}{\sqrt{kmA_0}}, \qquad (12.12)$$

где $A_0 = \frac{m_0}{k_0}$ — показатель сопротивления русловых отложений; $m_0$ — мощность; $k_0$ — коэффициент фильтрации слабопроницаемых русловых отложений; $b$ — половина ширины реки.

При $b/\sqrt{kmA_0} > 1$ формула (12.10) может быть упрощена и ширина реки может не учитываться. Тогда изменение поверхностного стока может быть рассчитано по формуле

$$Q_0 = Q\left[erfc \frac{l_0}{2\sqrt{at}} - e^{\left(-\frac{l_0^2}{4at}\right)} e^{z^2} erfc(z)\right]; \qquad (12.13)$$

$$z = \frac{l_0}{2\sqrt{at}} + \frac{\sqrt{at}}{\sqrt{kmA_0}}. \qquad (12.14)$$

Сопротивлением русловых отложений можно пренебречь и использовать для расчетов формул (12.9), если выполняется следующее

условие:

$$\frac{l_0}{\sqrt{kmA_0}} + \frac{at}{kmA_0} \geqslant 10. \qquad (12.15)$$

Приведенные зависимости применимы и для расчета сокращения стока при работе нескольких водозаборных сооружений, так как их воздействие на речной сток определяется простым суммированием рассчитанных для каждого водозаборного сооружения величин изменения поверхностного стока.

В формулах (12.9), (12.10) и (12.13) не учитывается привлечение разгрузки подземных вод на испарение. Для учета испарения величину сокращения поверхностного стока, рассчитанную по этим формулам, по предложению Е. Л. Минкина следует уменьшить на расход подземных вод на испарение в пределах воронки депрессии до начала эксплуатации.

Этот расход может быть определен на основе специальных балансовых исследований. Интенсивность разгрузки подземных вод на испарение в мелиоративной практике приближенно определяется по зависимости С. Ф. Аверьянова:

$$u = u_0\left(1 - \frac{h}{h_{кр}}\right)^n, \qquad (12.16)$$

где $u_0$ — испарение с водной поверхности; $u$ — испарение при глубине залегания уровня подземных вод $h$; $h_{кр}$ — критическая глубина залегания грунтовых вод, при которой разгрузка подземных вод в зону аэрации прктически прекращается; $n$ — эмпирический коэффициент, изменяющийся от 1 до 3 (в условиях совместного эффекта испарения и транспирации обычно принимается равным единице).

Площадь, на которой происходит испарение, может быть установлена по картам глубин залегания уровня подземных вод.

Точность результатов расчетов гидродинамическими методами в ряде случаев невысока, так как определяется часто невысокой достоверностью исходных параметров и неизбежными погрешностями при схематизации сложных гидрогеологических условий.

В этой связи рекомедуется широко использовать для оценки сокращения стока, особенно в сложных гидрогеологических условиях, метод аналогии. Фактически наблюдаемые и прогнозируемые аналитическими расчетами или моделированием сокращения поверхностного стока на участках речных долин с действующими водозаборными сооружениями используются при оценке влияния водоотбора на разведуемом участке речной долины. Гидродинамические методы, а также данные гидрометрических работ применяются для внесения корректив в данные по сокращению стока реки при условии неполной аналогии.

Наиболее достоверные данные для оценки влияния водоотбора подземных вод на речной сток методом аналогии могут быть получены на участках действующих водозаборных сооружений, при разведке которых производились гидрометрические работы, продолжающиеся и при эксплуатации водозаборных сооружений.

При отсутствии таких данных на водозаборе-аналоге следует предусмотреть в период межени проведение гидрометрических

съемок. Существующая методика обработки материалов эпизодических гидрометрических съемок позволяет последовательно привести значения расходов воды за короткий период к величинам за большие промежутки времени, за характерные периоды гидрологического года и к многолетним значениям.

Оценка изменения поверхностного стока при отборе подземных вод может быть выполнена и различными гидрологическими методами (восстановления естественного стока, водно-балансовыми, гидротермическими, гидрохимическими и др.).

Анализируя возможность применения различных гидрологических методов для оценки влияния эксплуатации водозаборных сооружений на сток рек, следует отметить:

применение методов восстановления стока (по аналогии, множественной линейной корреляции, районным зависимостям расходов воды от площадей водосборов и др.) ограничено необходимостью иметь достаточно длительные ряды наблюдений за стоком рек;

среди водно-балансовых методов используется в основном метод, основанный на анализе уравнения водного баланса, которое решается относительно полученных при гидрометрических съемках величин притока и потерь на участке реки, подвергающемся воздействию эксплуатации подземных вод. Применение метода требует проведения комплекса специальных работ и ограничено низкой точностью измерений и расчета отдельных элементов водного баланса;

использование гидротермических и гидрохимических методов принципиально возможно, но сами методы еще недостаточно разработаны применительно к рассматриваемой задаче;

Гидрологические методы позволяют достаточно надежно оценить изменение стока рек на участках действующих водозаборных сооружений при водоотборе, сопоставимым со стоком реки в период наблюдений, когда точность измерения стоковых характеристик выше возможной величины их уменьшения под влиянием эксплуатации.

**Контрольные вопросы.** 1. С какими особенностями подземных вод как полезного ископаемого связана необходимость оценки влияния эксплуатации на окружающую среду? 2. В каких гидрогеологических условиях наиболее могут проявляться негативные последствия эксплуатации подземных вод? 3. Почему наиболее эффективные и достоверные прогнозы влияния эксплуатации на различные элементы окружающей среды могут быть выполнены методом гидрогеологических аналогов? 4. В чем проявляются особенности схематизации геолого-гидрогеологического разреза для прогнозирования снижения уровня грунтовых вод под влиянием эксплуатации? 5. В чем заключается мелиоративный эффект от эксплуатации подземных вод и в каких условиях он наблюдается? 6. От каких факторов зависит величина проседания земной поверхности под влиянием эксплуатации? 7. Какие методы прогнозирования величины проседания земной поверхности под влиянием водоотбора наиболее эффективны и почему? 8. С какими особенностями гидрогеологических условий связана возможность интенсификации карстово-суффозионных процессов при эксплуатации подземных вод? 9. Как можно использовать показатель интенсивности карстового процесса, определенный по изучению изотопного состава карбонатной системы подземных вод, в гидрогеологических прогнозах? 10. Какими гидрогеологическими и водохозяйственными факторами определяется величина сокращения речного стока под влиянием эксплуатации? 11. В каких условиях сокращение речного стока будет близким к величине водоотбора? 12. Как влияет в различных условиях внутригодовая изменчивость речного стока на величину его сокращения под влиянием эксплуатации?

# ГЛАВА 13. ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ И ОЦЕНКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ ПИТЬЕВЫХ И ТЕХНИЧЕСКИХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В ТИПОВЫХ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

## 13.1. ТИПИЗАЦИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Несмотря на многофакторность и сложность, формирование ЭЗПВ имеет детерминированный характер. Между основными факторами, обусловливающими формирование ЭЗПВ и режим эксплуатации, имеются четко выраженные причинно-следственные связи, находящие отражение в основных закономерностях формирования ЭЗПВ.

Это позволяет выполнить типизацию МППВ на основе совокупности факторов, определяющих принципиальные особенности формирования ЭЗПВ и их основные закономерности в различных природных гидрогеологических условиях.

Многофакторность условий формирования эксплуатационных запасов подземных вод породила многочисленные классификации и типизации месторождений подземных вод, учитывающие различные аспекты формирования запасов. Неоднозначность трактовки понятия месторождения подземных вод и принципов выделения их границ определила и различные подходы к такой типизации (Г. Н. Каменский, Н. И. Плотников, Л. С. Язвин, Б. В. Боревский, С. Ш. Мирзаев, Н. И. Дробноход, О. В. Сухопольский, Ю. М. Беликов и многие другие).

Действительно в основу типизации могут быть положены самые разнообразные признаки. Можно типизировать месторождения по источникам формирования, строению разреза, неоднородности фильтрационных свойств, гидрогеохимическим условиям, степени антропогенного воздействия и т. п. Установив иерархию признаков, принятых в качестве относительных критериев типизации, можно в последующем выделить подтипы, виды и т. д. При таком подходе, как правило, теряется совокупное представление о комплексе признаков, определяющих общность условий формирования ЭЗПВ месторождений того или иного типа.

В практике разведочных работ наиболее широкое применение нашла типизация, разработанная Л. С. Язвиным и Б. В. Боревским (1976), основанная на учете комплекса геолого-гидрогеологических и физико-географических факторов, и направленная на унификацию принципов методики поисково-разведочных работ, оценки и учета запасов, т. е. имеющая ярко выраженный целевой характер.

Жизнеспособность предложенного подхода была полностью подтверждена практикой разведочных работ последнего десятилетия, а разработанная типизация вошла в основные методические и инструктивные документы ГКЗ СССР и Мингео СССР.

В то же время эта типизация вызвала критику в связи с отсутствием единого методологического подхода при выделении различных ти-

**13.1. Основные типы месторождений питьевых и технических подземных вод**

| Индекс типа | Тип месторождения | Индекс подтипа | Подтип месторождения |
|---|---|---|---|
| I | В речных долинах (на прибрежных участках) | I-А | Равнинных рек |
| | | I-Б | Горных рек |
| II | В артезианских бассейнах | II-А | Платформенных областей |
| | | II-Б | Межгорных впадин и предгорных прогибов |
| III | В конусах выноса (субаэральных дельтах) | III-А | Предгорных шлейфов |
| | | III-Б | Внутригорных впадин |
| IV | В ограниченных по площади структурах | IV-А | В трещинно-карстовых и трещинных коллекторах |
| | | IV-Б | В рыхлообломочных коллекторах: $IV\text{-}Б_1$ — в наложенных молодых депрессиях; $IV\text{-}Б_2$ — в погребенных речных долинах |
| V | В бассейнах и потоках грунтовых вод | V-А | Трещинно-карстовых массивов |
| | | V-Б | Зон экзогенной трещиноватости |
| | | V-В | Песчаных массивов: $V\text{-}В_1$ — пустынь и полупустынь $V\text{-}В_2$ — эандровых равнин $V\text{-}В_3$ — аллювиальных и аллювиально-пролювиальных равнин (широких речных террас) |
| VI | В бассейнах субнапорных вод межморенных отложений | | |
| VII | В потоках трещинно-жильных вод | | |
| VIII | В периферийных частях лавовых потоков | | |
| IX | В таликах в области развития многолетнемерзлых пород | | |

пов МПВ. Это потребовало как разработки более убедительного обоснования принципов предложенной типизации, так и ее корректировки с учетом нового фактического материала.

В табл. 13.1 представлена усовершенствованная типизация МПВ, основанная на учете совокупности естественных физико-географических и геолого-гидрогеологических факторов.

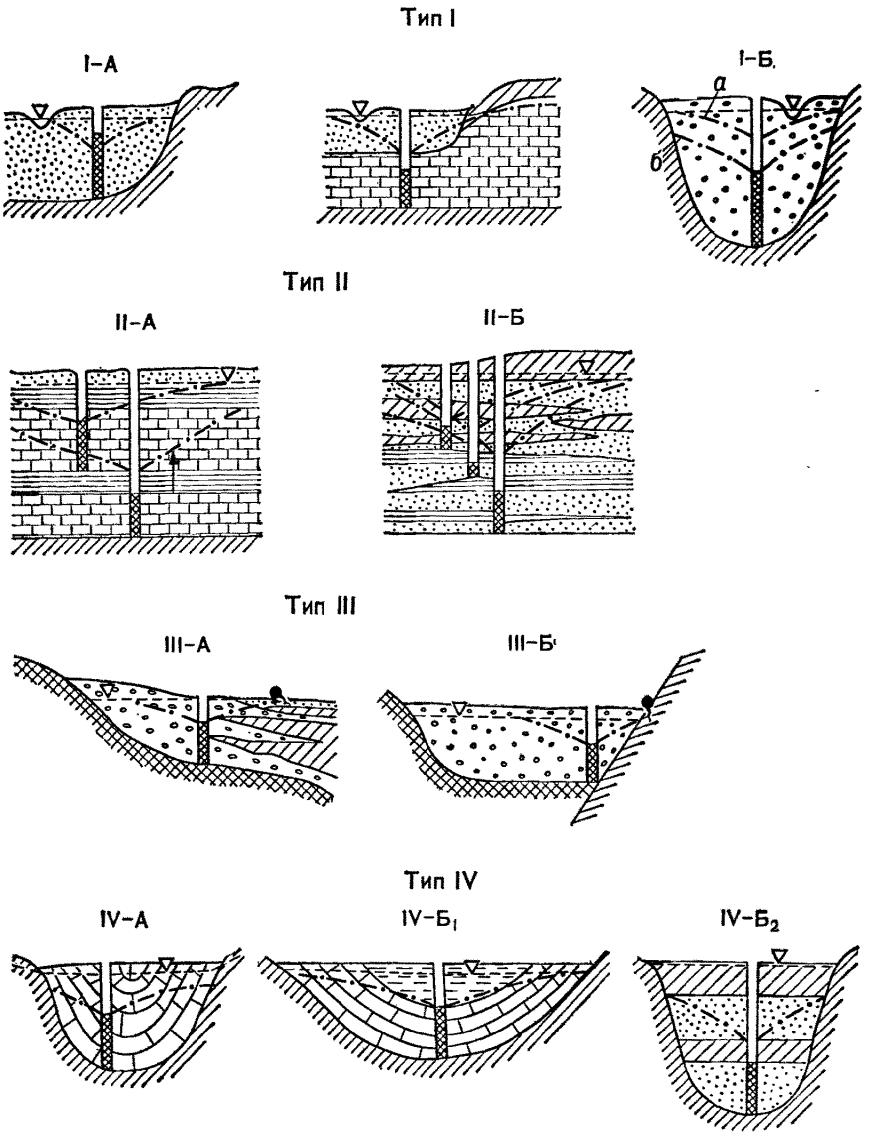
Основные особенности геолого-гидрогеологических условий выделенных типов и подтипов иллюстрируются их схематическими разрезами (рис. 62). Антропогенные факторы рассматриваются как вторичные по сравнению с естественными и могут быть учтены дополнительно.

При выделении основных типов месторождений, в той или иной мере учтены:

1) условия залегания, распространения и строения водовмещающих пластов, характеризующие их геометрические очертания;

2) особенности структуры пустотного порового или трещинного пространства, закономерности изменчивости гидрогеологических параметров, степень их неоднородности, характеризующие среду, в которой происходит движение подземных вод;

3) источники питания подземных вод, определяющие балансовую



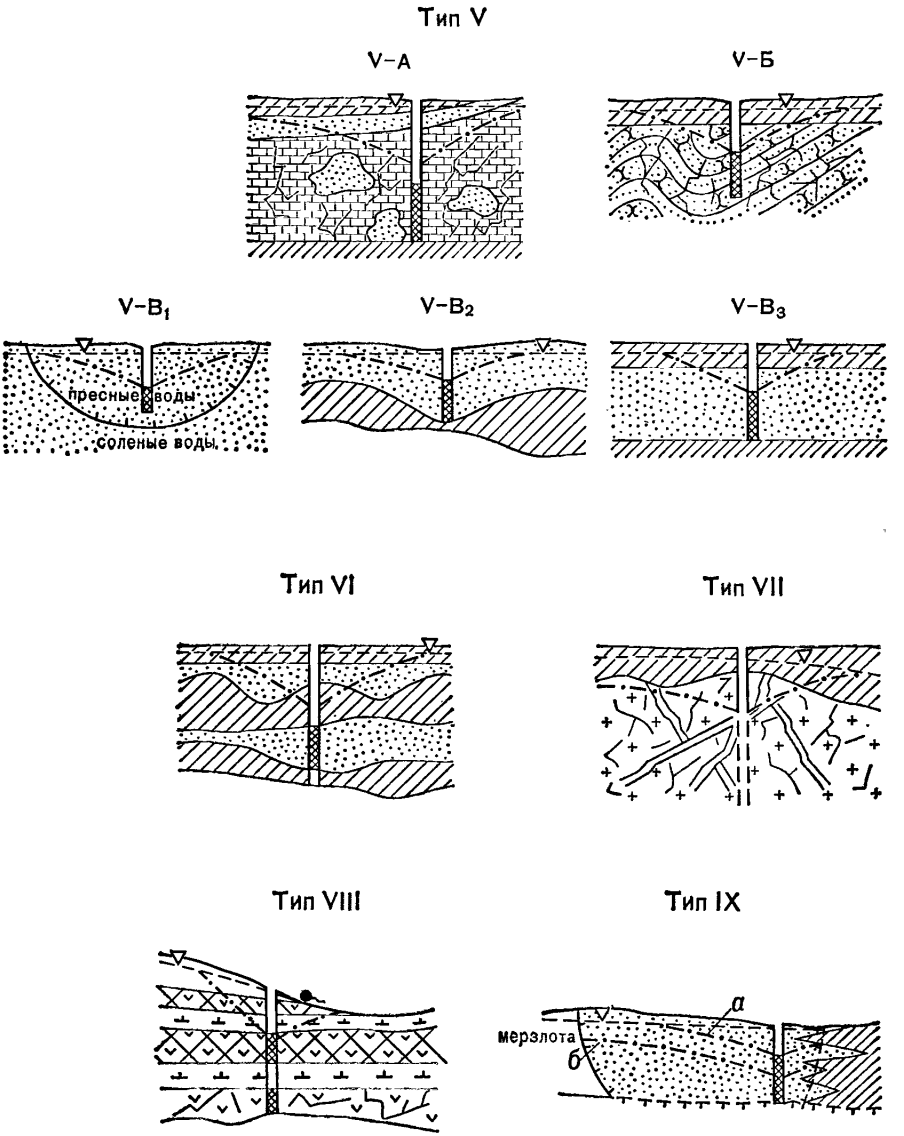



Рис. 62. Схематические разрезы основных типов месторождений подземных вод (табл. 13.1):

Уровни подземных вод: статический; динамический (для типов I-Б и IX; *а*) в паводок, *б*) в межень)

структуру ЭЗПВ и условия поступления этого питания в продуктивные пласты;

4) структура фильтрационных потоков в естественных условиях, определяемая совокупностью факторов, перечисленных в пунктах (1—3);

5) структура фильтрационных потоков, возникающая в нарушенных условиях, размеры и форма депрессионных воронок, определяемые факторами, перечисленными в п. п. (1—4) и условиями водоотбора.

Главным принципом предложенной типизации является совокупное отражение в названии общей специфики месторождений каждого типа и подтипа. При этом *общим основанием* для выделения каждого типа и подтипа является не формально-иерархическая структура учета и расстановки по относительному «удельному весу» основных факторов, определяющих закономерности и условия формирования ЭЗПВ, а их *совокупность, характеризующая главные отличительные черты месторождений.*

Такая типизация направлена на создание «образа» месторождения того или иного типа, отражающего его характерные и специфические особенности в целом. Такой подход известен в теории множеств, под которыми по определению Г. Кантора можно понимать «объединение в одно общее объектов, хорошо различаемых нашей интуицией или нашей мыслью».

При выборе названия каждого типа на первое место формально могут выдвигаться разные признаки, наиболее полно отражающие информацию о всей совокупности факторов формирования ЭЗПВ и специфике геолого-гидрогеологических и физико-географических условий МПВ.

Поэтому в названиях различных типов месторождений прежде всего отражена возможность четкого распознавания образа месторождений специалистами. При этом в самом типе могут находить отражение и характерные признаки, формально не выдвигаемые в названии как основные факторы формирования запасов (например, генезис водовмещающих пород в месторождениях конусов выноса) или, наоборот, выдвинутый в названии фактор (например, генетический для месторождений во флювиогляциальных отложениях) является второстепенным, но несет в себе целый комплекс других признаков, определяющих образ месторождения.

Предлагаемая типизация с точки зрения ее использования для целей разведки МПВ является открытой и позволяет:

1) проводить дальнейшее более дробное подразделение внутри каждого типа с учетом своеобразия геолого-гидрогеологических условий различных регионов страны и тех или иных признаков и факторов, определяющих специфику отдельных месторождений, но, не нашедших своего отражения в общем перечне факторов, положенных в основу разработанной типизации.

Кроме того, необходимо отметить, что при выделении типов по изложенным принципам не затушевываются особенности месторождений, связанные с многими факторами формирования ЭЗПВ, не отраженными в названиях отдельных типов;

2) проводить дополнительную типизацию по другим признакам, которые могут определять методику разведки (мощность продуктивных пластов, глубина разведки и т. д.);

3) выделять принципиально новые типы МПВ по мере повышения геолого-гидрогеологической изученности территории страны.

Проведенная типизация МПВ позволяет разрабатывать общие унифицированные рекомендации по методике изучения и оценки ЭЗПВ в различных гидрогеологических условиях. При этом большое значение имеет сложность этих условий, определяемая особенностями условий формирования ЭЗПВ. Сложность может быть существенно различной не только для разных типов, но и для одного и того же типа. Последнее связано с тем, что помимо типовых особенностей, каждое месторождение характеризуется неповторимой индивидуальностью условий, признаков, свойств.

Многофакторность условий формирования ЭЗПВ, их разнообразие и индивидуальность наряду с типовыми особенностями приводят к тому, что часто отдельным месторождениям свойственны черты различных типов. Поэтому могут иметь место переходные типы месторождений, при анализе особенностей формирования ЭЗПВ которых следует иметь в виду характерные черты, свойственные и тому и другому типу.

Поэтому в ряде случаев само отнесение месторождения к одному из выделенных типов вызывает затруднение. Здесь наиболее важное место занимает первоначальное обоснование природной гидрогеологической модели месторождения, которая и позволяет выявить типовые черты условий формирования ЭЗПВ.

## 13.2. ГРУППИРОВКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ПО СЛОЖНОСТИ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

Сложность гидрогеологических условий месторождений различных типов определяется характером залегания и строения водоносных горизонтов, особенностями источников формирования эксплуатационных запасов подземных вод и гидрохимической обстановки, изменчивостью мощности и фильтрационных свойств водовмещающих пород, а также геолого-техническими условиями освоения.

Для выделенных типов месторождений характерно сочетание разнообразных источников формирования их эксплуатационных запасов, достоверность оценки которых по результатам разведочных работ не может быть одинаковой. В связи с этим могут быть выделены месторождения, в которых: 1) все основные источники формирования устанавливаются надежно: 2) часть источников устанавливается надежно, а часть приближенно; 3) все источники формирования устанавливаются приближенно.

По степени изменчивости фильтрационных свойств продуктивные водоносные горизонты и комплексы могут быть разделены на условно однородные, неоднородные и весьма неоднородные. Критерием может служить величина среднеквадратичного отклонения логарифма водопроводимости или коэффициента вариации (табл. 13.2).

Для предварительной характеристики степени неоднородности пласта могут быть использованы данные по удельным дебитам скважин. При этом следует учитывать, что в условно однородных пластах максимальные и минимальные удельные дебиты однотипно оборудован-

**13.2. Степень фильтрационной неоднородности водоносных горизонтов**

| Степень неоднородности пластов | Показатели неоднородности | |
|---|---|---|
| | Среднеквадратичное отклонение логарифмов водопроводимости | Коэффициент вариации, % |
| Условно однородные | $< 0{,}2$ | $< 40$ |
| Неоднородные | 0,2—0,4 | 40—80 |
| Весьма неоднородные | $> 0{,}4$ | $> 80$ |

ных скважин различаются не более чем в 5 раз, в неоднородных — в 5—10 раз и в весьма неоднородных — более чем в 10 раз.

Однородные пласты обычно сложены песчаными, гравийно-песчаными и равномерно трещиноватыми породами со спокойными условиями залегания; неоднородные — неравномерно трещиноватыми и закарстованными породами, а также в ряде случаев валунно-гравийно-галечниковыми отложениями с разнозернистым по составу заполнителем; весьма неоднородные — крайне неравномерно трещиноватыми и закарстованными породами. Последние развиты обычно в складчатых областях и в пределах древних кристаллических щитов.

Продуктивные водоносные горизонты и комплексы месторождений с простыми гидрогеологическими условиями характеризуются однородными фильтрационными свойствами, со сложными — неоднородными, с очень сложными — весьма неоднородными.

Достоверность оценки эксплуатационных запасов определяется надежностью прогнозирования изменения качества воды во времени, зависящей от сложности естественно-антропогенной гидрохимической обстановки, которая может быть простой, сложной и весьма сложной.

В простых условиях источники изменения качества подземных вод отсутствуют, а при наличии в районе месторождения вод некондиционного состава их границы с кондиционными водами имеют простую конфигурацию в плане и в разрезе, водоносные горизонты приурочены к однородным пористым породам. В этих условиях возможные изменения качества воды в процессе эксплуатации устанавливаются достаточно надежно расчетным путем.

В сложных гидрохимических условиях границы зон с различным качеством подземных вод имеют сложную конфигурацию в плане и разрезе, а водоносные горизонты приурочены к неоднородным пористым или равномерно трещиноватым породам. В этих условиях возможные изменения качества воды в процессе эксплуатации устанавливаются приближенно расчетным путем.

На месторождениях с весьма сложными гидрохимическими условиями границы зон с различным качеством подземных вод имеют сложную конфигурацию в плане и разрезе, а водоносные горизонты приурочены к неравномерно и весьма неравномерно трещиноватым и закарстованным породам. В этих условиях возможные изменения

качества воды устанавливаются ориентировочно, на основании качественного анализа гидрогеологической обстановки в районе месторождения.

Сложность геолого-технических условий освоения связана также с применением специальных сложных конструкций водозаборных сооружений (лучевых водозаборных сооружений, систем искусственного подпитывания, скважин специальных конструкций с уникальным оборудованием), опытная проверка которых в процессе разведочных работ практически осуществлена быть не может, так как приведет к неоправданному увеличению затрат.

С учетом изложенных положений все месторождения подземных вод подразделяются на три группы сложности гидрогеологических условий, причем для каждой группы устанавливаются дифференцированные требования к возможной степени достоверности оценки эксплуатационных запасов.

К первой группе относятся месторождения с простыми гидрогеологическим условиями, характеризующиеся спокойным залеганием водоносных горизонтов, выдержанных по мощности и строению и однородных по фильтрационным свойствам водовмещающих пород. Для месторождений этой группы основные источники формирования эксплуатационных запасов могут быть надежно изучены в процессе разведочных работ и обоснованно прогнозированы изменения качества воды в процессе эксплуатации. Характерными примерами месторождений I группы являются месторождения подземных вод в речных долинах равнинных рек с обеспеченным питанием за счет поверхностных вод, месторождения в артезианских бассейнах платформенного типа, приуроченные к однородным пластам, месторождения в бассейнах грунтовых вод также в однородных пластах и другие месторождения.

Ко второй группе относятся месторождения со сложными гидрогеологическими условиями, обусловленными невыдержанностью мощности и строения водоносных горизонтов, неоднородностью фильтрационных свойств водовмещающих пород либо сложной гидрохимической обстановкой. На месторождениях этой группы часть источников формирования эксплуатационных запасов может быть изучена в процессе разведочных работ надежно, а часть — приближенно. Возможные изменения качества воды в процессе эксплуатации могут быть установлены приближённо расчетным путем.

Характерными примерами месторождений II группы являются: в речных долинах в условиях периодического восполнения запасов; в артезианских бассейнах с неоднородными и весьма неоднородными фильтрационными свойствами водовмещающих пород; в ограниченных по площади структурах или массивах трещинных и трещинно-карстовых пород, связанных с реками; в песчаных массивах пустынь и полупустынь в сложных гидрохимических условиях; в бассейнах подземных вод межморенных отложений.

К третьей группе относятся месторождения с очень сложными гидрогеологическими условиями вследствие высокой изменчивости мощности и строения водоносных горизонтов и фильтрационных

свойств водовмещающих пород или ограниченного (очагового) распространения горизонтов, а также месторождения с весьма сложной гидрохимической обстановкой. В этой группе источники формирования эксплуатационных запасов подземных вод в процессе разведочных работ могут быть изучены приближенно, а возможные изменения качества воды установлены ориентировочно.

К этой группе относятся также месторождения, эффективная разработка которых возможна при искусственном пополнении подземных вод или применении сложных систем водозаборных сооружений (например, лучевых), что требует осуществления при разведке строительства экспериментального водозаборного сооружения.

Характерными примерами месторождений III группы являются: месторождения трещинно-карстовых и трещинно-жильных вод, не связанные с реками; в краевых частях артезианских бассейнов платформенного типа в пластах с весьма неоднородными фильтрационными свойствами и с неявно выраженными источниками формирования ЭЗПВ; в сквозных таликах в области развития многолетнемерзлых пород.

Приведенные примеры не исключают того, что месторождения одного и того же типа, в зависимости от конкретных гидрогеологических условий, могут относиться к разным группам сложности. При этом основным критерием для отнесения месторождения к той или иной группе является возможная степень достоверности определения основных источников формирования эксплуатационных запасов.

Вопрос об определении степени сложности гидрогеологических условий месторождения и отнесения его к той или иной группе имеет принципиальное значение, так как определяет методику, состав и объемы работ, а также необходимую степень изученности ЭЗПВ для обоснования подготовленности месторождения к промышленному освоению.

При решении этого вопроса, следует руководствоваться следующими принципами:

1. Для отнесения месторождения к группе более высокой сложности достаточно, чтобы хотя бы один из признаков, определяющих группу сложности (условия залегания и строения, возможность определения источников формирования эксплуатационных запасов, неоднородность фильтрационных свойств, гидрохимическая обстановка), соответствовал этой группе.

2. При определении группы сложности по условиям залегания, выдержанности мощности и распространения, неоднородности фильтрационных свойств определяющими являются эти характеристики для продуктивного водоносного горизонта.

3. При наличии в пределах месторождения двух или нескольких продуктивных водоносных горизонтов они могут характеризоваться различной сложностью и квалифицироваться в разных группах. Все месторождение в целом квалифицируется по водоносному горизонту с более сложными гидрогеологическими условиями.

4. При наличии на месторождении нескольких участков с различными гидрогеологическими условиями их сложность может также соответствовать различным группам и квалифицироваться дифферен-

цированно. Группа сложности всего месторождения в целом соответствует участку с наиболее сложными условиями, а в отдельных случаях (при разнотипных участках) может не выделяться.

Антропогенные источники формирования запасов и расширение состава и целевых задач по оценке запасов могут менять наши представления о сложности месторождения.

В рассмотренных принципах практически находят отражение только существующие природные и антропогенные факторы формирования запасов, сложившиеся до начала эксплуатации в бытовых условиях. Вместе с тем большое значение при определении сложности месторождений должны иметь и факторы, которые будут вызывать изменение условий формирования ЭЗПВ в процессе эксплуатации под влиянием антропогенного воздействия, в том числе и собственно водоотбора. При учете таких факторов наши представления о сложности гидрогеологических условий месторождений могут принципиально меняться.

Так, месторождения подземных вод в горных речных долинах обычно относят к первой группе сложности, реже ко второй. В то же время их эксплуатационные запасы, прогнозные понижения уровня, условия взаимосвязи подземных и поверхностных вод прежде всего зависят от степени эксплуатационной кольматации русловых отложений, механизм и количественные показатели которой изучены недостаточно для формирования достоверной расчетной модели. По этому показателю такие месторождения должны быть отнесены к третьей группе, так как вся простота условий и простейшая модель прогноза не соответствуют реальным условиям эксплуатации.

Такая же картина будет наблюдаться при расчетах водозаборных сооружений для орошения при необходимости учета роли возвратных вод, надежности оценки мелиоративного эффекта, причем принятие «жестких» расчетных схем никак не решает указанных проблем.

Трудно провести прогнозную оценку влияния эксплуатации на окружающую среду. В частности, при этом необходимо предвидеть возможную активизацию карстово-суффозионных процессов, влияние снижения уровней подземных вод на изменение природно-ландшафтных комплексов, инженерно-геологических условий. Методика таких прогнозов разработана слабо. Поэтому даже в достаточно простых с точки зрения расчета водозаборных сооружений условиях (месторождение I группы) достоверность прогнозов влияния на окружающую среду может соответствовать II или III группам сложности.

Рассмотрение и анализ опыта разведки месторождений разной сложности за последнее десятилетие позволяет сделать вывод о том, что *в основу определения группы сложности разведанного месторождения должна быть положена степень достоверности всех прогнозных расчетов, входящих в состав оценки ЭЗПВ.*

В частности, при оценке группы сложности разведуемого месторождения, помимо факторов, положенных в основу их квалификации, должен учитываться весь комплекс задач, возникающих при оценке ЭЗПВ, в том числе:

а) степень возможного изменения основных есественных и антропогенных факторов формирования ЭЗПВ в процессе последующей эксплуатации;

б) возможность достоверного прогнозирования влияния эксплуатации на окружающую среду, в том числе мелиоративного эффекта;

в) возможность полного учета всех факторов формирования ЭЗПВ в прогнозных расчетах.

Несоответствие режима эксплуатации прогнозным расчетам в сторону их ужесточения также должно рассматриваться как неподтверждение запасов, так как ведет к неоправданному завышению затрат на использование подземных вод или к искусственному сдерживанию их освоения. Сложность условий формирования ЭЗПВ является поэтому одним из важнейших аспектов, требующих учета при их оценке.

### 13.3. МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В РЕЧНЫХ ДОЛИНАХ (ТИП I)

**Гидрогеологические условия и особенности формирования эксплуатационных запасов подземных вод.** Эти месторождения (см. рис. 62) являются одним из основных типов месторождений, используемых для водоснабжения. Производительность водозаборных сооружений достигает сотен тысяч м³/сут. В этих условиях часто встает вопрос о целесообразности отбора подземных вод взамен поверхностных, что определяется во многих случаях высокой мутностью поверхностных вод по сравнению с подземными и трудоемкостью их очистки, отсутствием условий для строительства водохранилищ при необходимости внутригодового и многолетнего регулирования поверхностного стока, значительным замедлением поступления загрязнений в водозаборные сооружения даже в условиях тесной гидравлической связи подземных и поверхностных вод.

В то же время главной отличительной чертой этих месторождений является ведущая роль поверхностного стока в формировании ЭЗПВ. Даже в условиях дефицита поверхностного стока в отдельные маловодные периоды в многолетнем разрезе его роль является определяющей. Месторождения в речных долинах, как правило, эксплуатируются береговыми (инфильтрационными) водозаборными сооружениями.

Особенности условий формирования ЭЗПВ определяются: а) геолого-гидрогеологическими условиями; б) геоморфологией долины; в) гидрологическим режимом водотоков и водоемов, обусловливающим обеспеченность отбора подземных вод.

Наиболее существенными геолого-гидрогеологическими факторами являются:

мощность, литологический состав и фильтрационные свойства водовмещающих пород и их изменение вдоль и вкрест долин, а также в разрезе (разрез — однослойный, двухслойный, многослойный);

характер водоносности водовмещающих пород на склонах долин и водоразделах (особенно для долин с двух- и многослойным строе-

нием водовмещающей среды, когда водоносный горизонт приурочен к коренным трещиноватым или трещинно-карстовым породам);

характер водоносности пород, подстилающих или перекрывающих продуктивный водоносный горизонт; условия дренирования водоносного горизонта в долине реки (полное дренирование руслом реки; частичная разгрузка в пойме испарением и транспирацией с уровня грунтовых вод в мочажинах, старицах, заболоченностях; наличие выклинивания подземных вод у тылового шва долины или отдельных террас, наличие подруслового потока, транзитного подземного стока вдоль долины реки);

условия взаимосвязи подземных и поверхностных вод, а при двух- и многослойном строении водовмещающей среды также водоносных горизонтов между собой;

характер кольматации русловых отложений (состав, мощность заиленного слоя, их изменение во времени и т. д.).

Из элементов геоморфологического строения основное значение имеют наличие пойменных и надпойменных террас, их превышение над урезом реки, ширина, характер контакта аллювиальных и коренных пород в бортовых частях долины.

Среди гидрологических факторов можно выделить:

геометрические параметры русел в характерных его сечениях (глубина, ширина, поперечный профиль русла) и изменение периметрических сечений русел при изменении режима стока;

режим уровней и расходов реки во внутригодовом и многолетнем циклах, продолжительность периодов паводков и отсутствия стока (при пересыхании и перемерзании), повторяемость этих периодов в течение года и в многолетнем разрезе, зарегулированность стока, сброс сточных вод;

продолжительность, высота и площадь затопляемости поймы и периодичность затопления;

качество поверхностных вод и их мутность в разные сезоны года, а также изменение их во времени;

руслообразующая деятельность (деформации и размыв дна и берегов, блуждание русла реки и т. д.);

степень и характер обводненности поймы реки (наличие заболоченности, стариц, проток и их взаимоотношение с уровнем грунтовых вод).

По совокупности перечисленных факторов и их влиянию на условия формирования ЭЗПВ месторождения в речных долинах подразделяются на 2 подтипа: I-А — в долинах равнинных рек и I-Б — в долинах горных рек (см. рис. 62).

Для подтипа I-А характерны широкие долины, относительно выдержанные условия залегания пластов и их фильтрационные свойства в пределах отдельных геоморфологических элементов, относительно устойчивая связь подземных и поверхностных вод, замедленная руслообразующая деятельность, разгрузка подземных вод руслом на всем протяжении месторождения.

Для подтипа I-Б характерны: узкие долины четкообразной формы; неоднородность и пространственная анизотропия фильтрационных

свойств; чередование участков разгрузки подземного стока с участками поглощения речного стока; значительная изменчивость параметров взаимосвязи подземных и поверхностных вод во времени и по долине реки; активная руслообразующая деятельность; высокая динамичность поверхностного стока за короткие периоды времени; большие продольные уклоны долин; работа водозаборных сооружений во внутригодовом разрезе в режиме сработка — восполнение прежде всего в связи с ограниченной пропускной способностью русла реки по сравнению с величиной поверхностного стока; зависимость параметров, определяющих пропускную способность русла реки, от величины стока и их заметное ухудшение при уменьшении последнего; отрыв уровня от реки в меженный период.

В долинах равнинных рек работа водозаборных сооружений в режиме сработка — восполнение происходит, как правило, в связи с пересыханием или перемерзанием русел.

Перечисленные особенности должны учитываться при построении природных гидрогеологических пространственно-временных моделей месторождений, их преобразовании в геофильтрационные.

Важнейшее значение для схематизации гидрогеологических условий месторождений в речных долинах и методики оценки ЭЗПВ имеет строение разреза под руслом реки, а в водоносных горизонтах большой мощности интервал установки фильтра.

Можно выделить следующие характерные типы строения разреза, определяющие возможности привлечения поверхностного стока при эксплуатации водозаборных сооружений и условия восполнения запасов:

1) *однослойный* — продуктивный водоносный горизонт приурочен к аллювиальным (иногда, коренным) образованиям, непосредственно прорезанным руслом реки;

2) *двухслойный* — продуктивный водоносный горизонт отделен от русла реки слабопроницаемым слоем;

3) *двухслойный* — продуктивный горизонт, как правило, в коренных породах отделен от русла реки аллювиальными водоносными отложениями;

4) *трехслойный* — водносные горизонты в аллювиальных и коренных образованиях разделены слабопроницаемыми отложениями.

Более сложные (многослойные) схемы строения разреза при геофильтрационной схематизации могут быть сведены к перечисленным.

В однослойных разрезах необходимо учитывать соотношение мощности водоносного горизонта и расстояния инфильтрационного водозаборного сооружения от русла реки; по этому признаку можно выделить водоносные горизонты: а) с относительно небольшой мощностью, когда вертикальной составляющей потока в пласте можно пренебречь; б) с относительно большой мощностью водовмещающих пород и резко несовершенным врезом русла, когда потери напора при вертикальной фильтрации в пласте требуют специального учета; к этому типу могут быть отнесены и сложно-слоистые разрезы

Для долин равнинных рек характерны однослойные разрезы небольшой мощности, двухслойные или трехслойные разрезы; для

горных — однослойные большой мощности и сложно-слоистые (многослойные).

Среди месторождений в речных долинах по соотношению величины водоотбора и поверхностного стока, обеспечивающего этот водоотбор, выделяются два вида:

а) эксплуатационные запасы полностью обеспечены поверхностным стоком в течение всего периода эксплуатации;

б) в меженный период или в течение цикла маловодных лет поверхностный сток в реке отсутствует или не обеспечивает расход водозаборного сооружения вследствие недостаточной величины расхода реки, либо ограниченной пропускной способности русла; в течение этого периода эксплуатационные запасы полностью или частично формируются за счет осушения аллювиальных отложений, а затем в период паводков происходит восполнение сработанных емкостных запасов.

**Специфические особенности оценки ЭЗПВ месторождений в речных долинах включают:**

расчет основных характеристик поверхностного стока реки, который может обеспечивать запасы; при этом определяется среднегодовой, среднемеженный, минимальный среднемесячный расход реки 95, 90, 85 или 50 %-й обеспеченности (в зависимости от категории водозаборного сооружения по надежности подачи воды и условий формирования запасов), а также соответствующие этим характеристикам уровни воды в реке и в водоносном горизонте;

расчеты гидравлического сопротивления и пропускной способности русла реки, а таже возможности отрыва уровня от дна реки или слабопроницаемых русловых отложений;

расчет величины сработки и последующего восполнения емкостных запасов в условиях, когда водоотбор не обеспечен постоянным поверхностным стоком;

расчет изменения поверхностного стока в результате эксплуатации подземных вод.

Для расчетов производительности водозаборных сооружений наиболее широко используются гидродинамические методы. При однородном строении водовмещающей толщи эти расчеты выполняются обычно аналитическим путем, в горных речных долинах при слоистом строении разреза и водоносных горизонтах большой мощности в условиях неоднородности и анизотропии фильтрационных свойств продуктивного водоносного горизонта предпочтительнее использование метода математического моделирования. При крайне неоднородных фильтрационных свойствах водовмещающих пород целесообразны гидравлические методы.

Метод гидрогеологических аналогов успешно может быть применен во всех случаях путем использования линейного модуля эксплуатационных запасов. Метод аналогии практически незаменим для оценки эксплуатационной кольматации русловых отложений.

На моделях месторождений в большинстве случаев река рассматривается как граничное условие III рода, при совершенном русле — I рода. При отрыве уровня от реки это условие сменяется условием

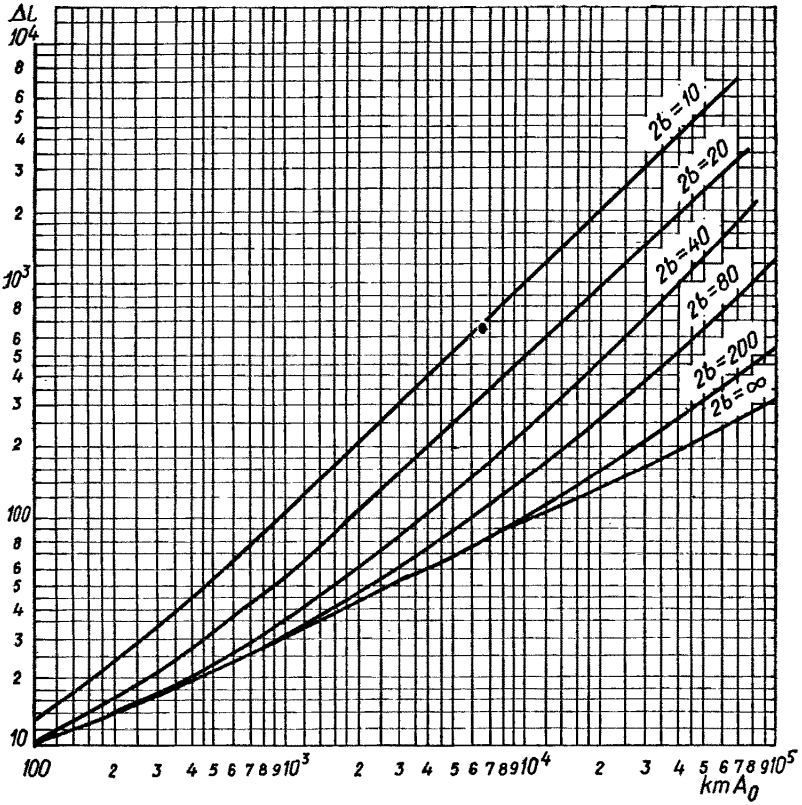



Рис. 63 График зависимости $\Delta L = f(km, b, A_0)$ (по Е. Л. Минкину, 1973)

II рода с заданным расходом, соответствующим рассчитанной пропускной способности русла при параметрах, характеризующих сечение русла реки при ее расходе заданной обеспеченности.

В условиях водоотбора, обеспеченного поверхностным стоком, река может рассматриваться как контур постоянного напора, а суммарное сопротивление, характеризующее несовершенство русла реки, учитывается в структуре формул типа (7.46), принимая

$$R_{\text{с.вн}} = R_1 + R_2, \tag{13.1}$$

где $R_1$ — гидравлическое сопротивление в условиях совершенной связи подземных и поверхностных вод (совершенное русло реки); $R_2$ — дополнительное фильтрационное сопротивление, обусловленное кольматацией русловых отложений, фильтрационным сопротивлением подрусловой толщи и несовершенством вреза реки в водоносный горизонт.

Величина $R_2$ зависит от ширины реки ($2b$) и коэффициента перетекания (по В. М. Григорьеву, 1966), равного

$$A = \frac{1}{A_0\,(km)}; \quad A_0 = \frac{m_0}{k_0}, \tag{13.2}$$

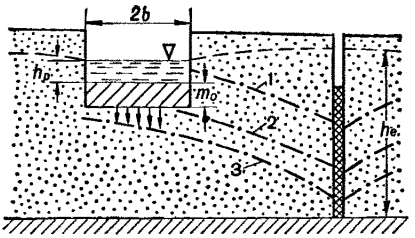



Рис. 64. Схема различных режимов фильтрации при работе берегового водозаборного сооружения для определения отрыва уровня от реки и пропускной способности русла (по Е. Л. Минкину, 1973):

Депрессионная кривая: *1* — при подпертом режиме фильтрации; *2* — в условиях частичного отрыва уровня от подошвы слабопроницаемых русловых отложений; *3* — при полном отрыве уровня от подошвы русловых слабопроницаемых отложений

где $k_0$ и $m_0$ — коэффициент фильтрации и мощность заиленного слабопроницаемого слоя.

Как показал Ф. М. Бочевер (1968), сопротивление $R_2$ оказывает наибольшее влияние на понижение уровня при приближении водозабора к реке.

Значительное влияние на сопротивление $R_2$ может оказать также ширина реки, неучет которой при относительно нешироких руслах (первые десятки метров) может занизить сопротивление русловых отложений в 1,5—2 раза.

Ширину реки можно не учитывать при выполнении соотношения

$$b > \frac{1{,}5\ldots2}{\sqrt{A}}.$$

В практических расчетах водозаборных сооружений в условиях установившейся фильтрации чаще всего учет суммарного фильтрационного сопротивления в прирусловой зоне производится предложенным В. М. Шестаковым (1964) методом, основанным на увеличении действительного расстояния до водозаборного сооружения от реки $l_0$ на величину $\Delta L$. При этом принимается, что фильтрационное сопротивление горизонтального отрезка водоносного горизонта длиной $\Delta L$ эквивалентно величине $R_2$.

Величины $\Delta L$ и $A_0$ связаны между собой зависимостью

$$\Delta L = \sqrt{km A_0}\,\mathrm{cth}\,\frac{2b}{\sqrt{km A_0}}. \qquad (13.3)$$

Для упрощения расчета $\Delta L$ можно рекомендовать построенный Е. Л. Минкиным (1973) график (рис. 63).

Обычно параметры $\Delta L$ и $A_0$ определяются по материалам кустовых откачек, наблюдений за естественным режимом подземных вод и по опыту эксплуатации действующих водозаборных сооружений.

Все расчетные формулы с использованием параметра $\Delta L$ справедливы только при условии подпертого режима фильтрации, когда «отрыва» уровня грунтовых вод от реки не происходит (рис. 64). В этом случае величина понижения уровня грунтовых вод на урезе реки не должна превышать величину $S_{доп}$, определяемую из условия

$$S_{доп} \leqslant h_p + m_0, \qquad (13.4)$$

где $h_p$ — глубина слоя воды в реке.

Выполнение условия (13.4) проверяется расчетом понижения уровня $S_p$ на урезе реки или под рекой.

Помимо условия отрыва, должно быть проверено соответствие пропускной способности русла реки проектной производительности водозаборного сооружения.

Обеспеченность этой производительности складывается из пропускной способности русла и величины двухсторонней естественной разгрузки подземных вод в реку ($Q_{д.р}$) на участке расположения водозаборных скважин с учетом развития воронки депрессии на флангах водозаборного сооружения, а также разгрузки подземных вод в пределах пойменной части долины путем испарения ($Q_{д.и}$).

Исходя из этого условие обеспеченности эксплуатационных запасов подземных вод можно представить в следующем виде

$$Q_э \leqslant q_р l_в + Q_{д.р} + Q_{д.и}, \tag{13.5}$$

где $q_р$ — удельная пропускная способность русла реки (расход фильтрационного потока из реки на единицу ее длины); $l_в$ — протяженность водозаборного сооружения вдоль реки с учетом депрессии на его флангах.

Значение $q_р$ рассчитывается по формуле

$$q_р = \frac{h_р + m_0}{A_0} 2b. \tag{13.6}$$

В связи с изменчивостью глубины и профиля дна русла реки в расчетах следует принимать среднее значение параметров $h_р$ и $2b$ с учетом реального изменения их величин. Причем, эти значения должны быть приведены к уровню реки расчетной обеспеченности. Так, при малой величине емкостных запасов в расчет принимаются $h_р$ и $2b$, соответствующие минимальному 30-суточному расходу реки 95 % обеспеченности.

Приведенные зависимости (13.4) и (13.6) справедливы при наличии хорошо выраженного слабопроницаемого слоя под руслом реки и небольшой мощности водоносного горизонта, когда вертикальной составляющей потока можно пренебречь.

В водоносных горизонтах большой мощности с вертикально-горизонтальной анизотропией фильтрационных свойств или сложнослоистым строением разреза, что характерно для горных речных долин, вертикальной составляющей потока пренебрегать нельзя, так как она обусловливает значительную дифференциацию понижений (напоров) по глубине водоносного горизонта (рис. 65).

Соответственно различаются значения $A_0$, определенные по данным о понижении уровня в пьезометрах, установленных на различных глубинах. Максимальное значение $A_0$ соответствует наиболее глубоким интервалам разреза, минимальные — верхним (по данным о понижении уровня в пьезометре, установленном непосредственно под дном реки).

Из этого следует, что пропускная способность реки может быть резко искажена и существенно занижена, если использовать для расчетов параметра $A_0$ произвольно взятые понижения уровня по пьезометрам независимо от глубины их установки.

Величина пропускной способности реки (собственно русловых

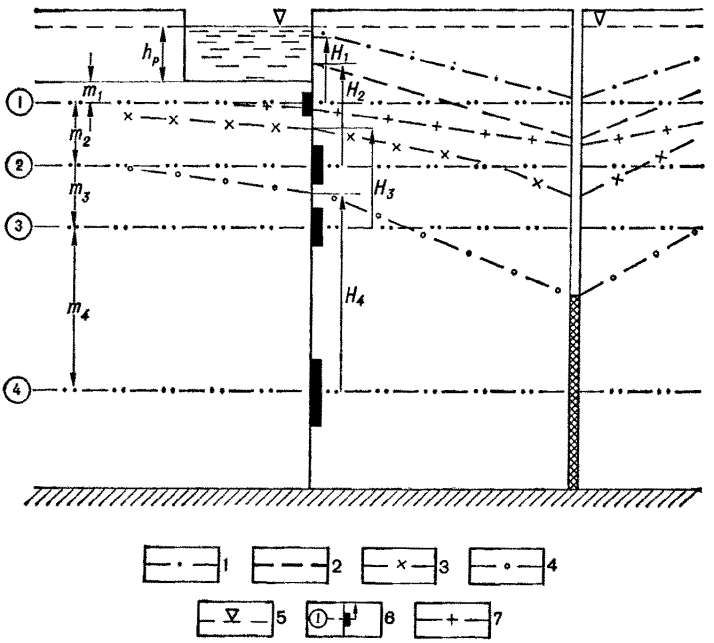



Рис. 65. Схема распределения напоров вблизи реки по глубине водозаборного сооружения:

Напоры подземных вод в различных интервалах разреза при отсутствии отрыва уровня (свободной поверхности) от реки: *1* — по первому пьезометру; *2* — по второму; *3* — по третьему; *4* — по четвертому; *5* — положение уровня в естественных условиях; *6* — номер пьезометра и высота напора в интервале его установки; *7* — свободная поверхность по первому пьезометру в условиях отрыва уровня от реки

отложений) должна определяться через параметр $A_0$ по формуле (13.6). Значение $A_0$ следует стремиться получать по самым верхним интервалам разреза с использованием для этих целей точечных подрусловых или береговых пьезометров.

Пропускная же способность подрусловой толщи должна рассчитываться по формуле

$$q_p = \frac{h_p + m_0 + \sum_{i=1}^{n} m_i}{A_z} 2b = \frac{h_p + m_z}{A_z} 2b, \qquad (13.7)$$

$$A_z = \frac{m_0}{k_0} + \sum_{i=1}^{n} \frac{m_i}{k_i} = A_0 + \sum_{i=1}^{n} A_{zi}, \qquad (13.8)$$

где $A_z$ — комплексный коэффициент сопротивления подрусловой толщи, мощностью $m_z$, физический смысл которого ясен из рис. 65; $A_{zi}$, $m_i$, $k_i$ — соответственно коэффициент сопротивления, мощность и коэффициент фильтрации в вертикальном направлении $i$-го ($i = 1, 2, \ldots, n$) интервала подрусловой водовмещающей толщи; величина $m_z$ принимается как глубина от дна реки до середины интервала, в котором измерено понижение уровня.

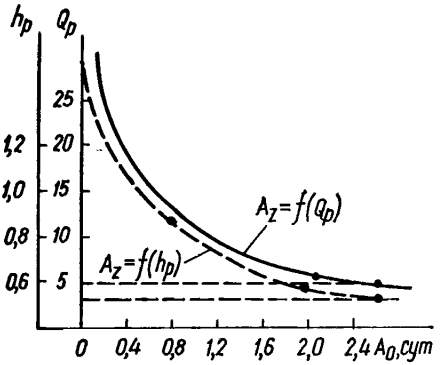



Рис. 66. Графики зависимости $A_z = f(Q_p)$, $A_z = f(h_p)$ в долинах горных рек

Вертикальные сопротивления $A_{z_i}$ между интервалами установки фильтров рассчитываются, исходя из полусуммы мощностей смежных слоев и вертикального коэффициента фильтрации водоносного горизонта $k_i$.

Для определения эксплуатационного понижения $S_p$ могут использоваться величины $\Delta L$ или $A_z$, полученные для интервала разреза, соответствующего глубине оборудования фильтрами эксплуатационных скважин.

В горных речных долинах при изменении расхода реки существенно меняется смоченный периметр русла. При существенной неоднородности фильтрационных свойств подрусловых отложений отмечается нелинейная зависимость $A_z$ от смоченного периметра русла реки, изменение которого определяется изменением уровня (рис. 66). Такую зависимость можно использовать для определения пропускной способности русла реки в разные гидрологические периоды.

При оценке ЭЗПВ в двухслойных и трехслойных пластах необходимо оценить:

а) условия взаимосвязи продуктивного водоносного горизонта с вышезалегающим;

б) условия взаимосвязи первого от поверхности водоносного горизонта с рекой и пропускную способность русла.

Если по данным откачек или эксплуатации продуктивного горизонта определен соответствующий ему параметр $A_z$, то он характеризует обобщенное фильтрационное сопротивление всех отложений между кровлей продуктивного горизонта и рекой и может быть использован для расчета понижений в эксплуатационных скважинах:

$$A_z = A_0 + \frac{m_{z_{al}}}{k_{z_{al}}} + \frac{m_0'}{k_0'}, \qquad (13.9)$$

где $k_{z_{al}}$ и $m_{z_{al}}$, $k_0'$ и $m_0'$ — соответственно вертикальный коэффициент фильтрации и мощность аллювиального горизонта и слабопроницаемого пласта, разделяющего водоносные горизонты. Оценивать пропускную способность русла реки с использованием этого параметра нельзя.

Для расчета эксплуатационного понижения уровня в трехслойном пласте может быть использована схема с перетеканием с постоянным уровнем в питающем слое.

Расчет выполняется по формуле (7.1) с использованием зависимостей (7.93) и (7.96).

При отсутствии раздельного слоя последнее слагаемое в формуле

(13.9) исключается. Максимальная величина питания продуктивного горизонта в речных долинах должна оцениваться в соответствии с площадью развития аллювиального горизонта и величиной параметра: $A_{z_{al}} = A_z - A_0$.

В условиях горизонтов большой мощности или двухслойных и трехслойных пластов в неравенстве (13.4) величина $S_{доп}$ относится к первому от поверхности водоносному горизонту или самому верхнему интервалу разреза горизонта большой мощности.

По предложению М. С. Верзакова (1976), имея значения $A_{z_i}$ для разных интервалов водоносного горизонта, определяется пропускная способность для каждого интервала $m_{zi}$ (см. рис. 65) по формуле (13.7) Минимальное значение $q_р$ будет учитывать положение в разрезе слоя лимитирующего перетекание из реки и может использоваться для оценки ЭЗПВ.

Для речных долин с рыхлообломочным составом русловых отложений, особенно в горных долинах, с повышенной мутностью воды, вследствие эксплуатационной кольматации русловых отложений величина параметров $A_0$ и $A_z$ может возрастать, а $q_р$ уменьшаться.

Различают два режима эксплуатационной кольматации:

1) кольматация в межень — полная или частичная, декольматация — в паводок;

2) постоянная кольматация, возрастающая во времени.

В обоих случаях надежные исходные данные для определения значений $q_р$, $A_0$ и $A_z$ могут быть получены только по опыту эксплуатации водозаборов-аналогов.

При оценке ЭЗПВ гидравлическим методом условие отрыва может быть установлено по данным откачек экстраполяцией достигнутого опытного понижения уровня в наблюдательной скважине на урезе реки в соответствии с отношением опытного и расчетного удельных расходов водозаборных сооружений. При этом фильтр в наблюдательной скважине при откачках должен быть установлен непосредственно «под уровень».

Очевидно, что в речных долинах с водоносными горизонтами большой мощности при выраженной вертикально-горизонтальной анизотропии фильтрационных свойств или сложно-слоистом строении разреза для правильного учета восполнения запасов поверхностным стоком и возможного отрыва уровня от реки для оценки ЭЗПВ целесообразно использовать многослойные модели, а прогнозные расчеты выполнять методом математического моделирования.

При работе водозаборных сооружений в режиме сработка — восполнение емкостных запасов в маловодные периоды возможны следующие варианты:

1. Инфильтрация поверхностного стока меньше величины водоотбора. Водоотбор формируется частично за счет динамических ресурсов и поглощения поверхностного стока и частично за счет сработки емкостных запасов;

2. Поверхностный сток полностью отсутствует и водоотбор практически полностью формируется за счет сработки емкостных запасов,

частично в его обеспечении могут участвовать динамические ресурсы.

В этих случаях при расчетах должны учитываться все составляющие ЭЗПВ. Поскольку в указанных условиях происходит отрыв уровня от реки, депрессия растет, достигая границ водоносных пластов (границ долины реки), которые должны учитываться в расчетных схемах.

Продолжительность маловодного периода, в течение которого происходит сработка запасов, может меняться от нескольких десятков суток до нескольких лет. В расчетах используется так называемая критическая величина продолжительности маловодного периода 95 % вероятности превышения.

На первом этапе расчетов определяется величина понижения в условиях сработки емкостных запасов. Величина инфильтрации из реки учитывается в соответствии с ее реальными стоковыми характеристиками.

На втором этапе рассчитывается восполнение сработанных емкостных запасов путем фильтрации из русла и (или) путем площадной фильтрации при затоплении поймы.

Для оценки восполнения через русло реки рассчитывается величина $q_р$ по формулам (13.6) и (13.7) при соответствующих паводковому (или любому другому многоводному) периоду величинах $h_р$ и $2b$. При этом следует учитывать их реальное изменение в течение расчетного года в соответствии с гидрографом стока.

Для расчета $q_р$ в горных речных долинах следует использовать графики $A_z = f(Q_р)$ или $A_z = f(h_р)$.

При высоких паводках может также учитываться боковая фильтрация в берега реки.

Для количественной оценки эффекта боковой фильтрации используются решения для расчета подпора, а также фильтрационных потерь из водохранилищ и каналов. При этом, исходя из метода наложений течений, на конец периода восполнения запасов результирующее понижение уровня воды $S$ определяется алгебраическим суммированием изменений уровня подземных вод $S_в$ под влиянием работы водозаборного сооружения и изменений уровня $S_{рi}$, вызванных разнонаправленными колебаниями горизонта воды в реке, т. е.

$$S = S_в + \sum_{i=1}^{n} S_{рi}, \qquad (13.10)$$

где $n$ — количество повышений и спадов уровня воды в реке.

Размер восполнения запасов за счет фильтрации речных вод во многих случаях может быть установлен на основании наблюдений за потерей поверхностного стока.

Расчет восполнения за счет фильтрации поверхностных вод на площади затопляемой поймы может быть выполнен следующим образом:

1. Определяется время $t$, которое необходимо для заполнения

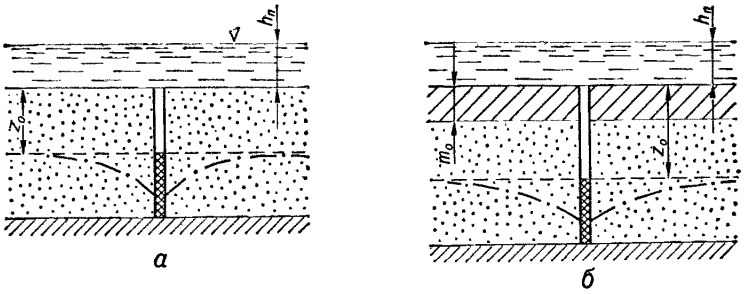



Рис. 67. Схемы к расчету восполнения сработанных запасов подземных вод при затоплении поймы:
*а* — при отсутствии и *б* — при наличии экранирующих отложений

осушенной в меженный период части пласта при условии постоянства высоты слоя воды на пойме $h_п$.

Для однослойного строения поймы (рис. 67, *а*) расчет времени может быть выполнен по формуле Цункера

$$t = \frac{\mu_н}{k}\left[z_0 - h_п \ln\left(1 + \frac{z_0}{h_п}\right)\right], \qquad (13.11)$$

где $\mu_н$ и $k$ — коэффициент недостатка насыщения и коэффициент фильтрации пойменных образований; $z_0$ — мощность осушенных пород, отсчитываемая от поверхности поймы.

При двухслойном строении поймы со слабопроницаемым верхним слоем (рис. 67, *б*) время фильтрации от поверхности земли до уровня грунтовых вод складывается из времени просачивания воды через верхний слабопроницаемый слой $t_1$, и времени движения воды в нижнем слое $t_2$. Время $t_1$ определяется по формуле (13.11), подстановкой недостатка насыщения ($\mu_{н1}$) и коэффициента фильтрации ($k_1$) верхнего слоя, вместо $z_0$ принимается мощность слабопроницаемого слоя ($m_1$). Время $t_2$ определяется по формуле (Веригин, Шержуков, 1969):

$$t_2 = \frac{\mu_{н2}}{k_2}\left\{m_2 - \left[h_п - m_1\left(\frac{k_2}{k_1} - 1\right)\right]\ln\left(1 + \frac{m_2}{h_п + m_1}\right)\right\}, \qquad (13.12)$$

где $\mu_{н2}$, $k_2$, $m_2$ — соответственно недостаток насыщения, коэффициент фильтрации и мощность осушенной части нижнего слоя.

В большинстве случаев $t_2 \ll t_1$, поэтому для приближенного определения времени насыщения осушенной двухслойной толщи пород в пойме можно ограничиться определением времени $t_1$. Полное водонасыщение пойменной толщи возможно при условии $t < t_з$ ($t_з$ — время затопления поймы, $t$ — время, небходимое для водонасыщения).

2. Определяется фильтрационный расход $q$ через единицу площади поймы. При однослойном строении поймы, принимая $h_п = 0$, с небольшим занижением $q \approx \kappa$. При двухслойном строении

$$q = \frac{k_1}{m_1}(h_п + m_1), \qquad (13.13)$$

если $h_п \ll m_1$, $q \approx k$.

3. Рассчитывается объем воды $V_0$, необходимый для полного восполнения (водонасыщения) емкости пород на площади поймы

$$V_0 = [\mu_{н1} m_1 + \mu_{н2} (z_0 - m_1)] F_п. \quad (13.14)$$

В случае однослойного строения поймы в формуле (13.14) принимается $m_1 = 0$.

4. Определяется объем воды, который может поступить в пласт за время затопления поймы $t_з$:

$$V = qF_п t_з. \quad (13.15)$$

5. С учетом объема воды, отобранной водозаборным сооружением во время восполнения, оценивается общий объем воды ($V_{вос}$), который может быть израсходован на восполнение емкости

$$V_{вос} = V - Qt_з, \quad (13.16)$$

где $Q$ — дебит водозаборного сооружения.

Емкость, осушенная при работе водозаборного сооружения в межень, будет полностью восполнена в паводок при $V_{вос} \geqslant V_0$.

### 13.4. МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В АРТЕЗИАНСКИХ БАССЕЙНАХ (ТИП II)

Месторождения этого типа (см. рис. 62), также как и типа I, весьма широко распространены на территории СССР и интенсивно эксплуатируются действующими водозаборными сооружениями. Их производительность достигает десятков и сотен тысяч м³/сут.

Главной отличительной чертой этих месторождений является ведущая роль процессов перетекания в формировании ЭЗПВ.

**Особенности условий формирования ЭЗПВ** определяются: а) слоистым строением разреза; б) наличием нескольких продуктивных водоносных горизонтов и ярусной системой их эксплуатации; в) гидравлической взаимосвязью водоносных горизонтов между собой через слабопроницаемые пласты, определяющей участие грунтовых и поверхностных вод в формировании запасов путем перетекания; г) значительными площадями распространения продуктивных водоносных горизонтов; д) большими размерами и глубиной депрессионных воронок.

Вследствие больших размеров депрессионных воронок во многих случаях отмечается достаточно активное взаимодействие водозаборных сооружений, что требует при оценке ЭЗПВ отдельных разведанных и эксплуатируемых месторождений учитывать и региональный водоотбор. Поэтому, как правило, оценка или переоценка ЭЗПВ на конкретных месторождениях должна выполняться на фоне региональной оценки на базе сочетания системы мелкомасштабных (региональных) и крупномасштабных (локальных) моделей.

В связи с большими размерами областей влияния водозаборных сооружений при построении природных гидрогеологических моделей месторождений подземных вод большое значение имеют выявление и учет закономерностей изменчивости основных факторов формирова-

ния запасов (мощностей и гидрогеологических параметров водоносных горизонтов и слабопроницаемых пластов, в том числе наличие в последних литологических окон, модулей инфильтрационного питания и т. п.). К месторождениям артезианских бассейнов в наиболее полной мере применимы все основные принципы схематизации гидрогеологических условий, рассмотренные в главе 5.

По совокупности основных факторов формирования ЭЗПВ месторождения в артезианских бассейнах подразделены на два подтипа:

а) месторождения в артезианских бассейнах платформенного типа (подтип II-А);

б) месторождения в артезианских бассейнах межгорных впадин и предгорных прогибов (подтип II-Б).

Месторождения этих подтипов, характеризуясь принципиально общими условиями формирования ЭЗПВ различаются прежде всего закономерностями изменчивости ряда основных факторов их формирования, которые должны находить отражение в гидрогеологических моделях, используемых для оценки запасов.

Для месторождений подтипа II-А характерны относительная выдержанность распространения основных водоносных горизонтов и слабопроницаемых пластов (многопластовые водоносные системы), небольшие уклоны естественного потока и незначительная роль так называемых региональных областей питания в краевых частях бассейна в формировании ЭЗПВ их центральных частей; в целом невысокие фильтрационные свойства слабопроницаемых пластов, определяющие затрудненную связь напорных вод продуктивных горизонтов между собой, с грунтовыми и поверхностными водами; схематизация разреза обычно четко обусловлена чередованием водоносных и слабопроницаемых пластов.

Для месторождений подтипа II-Б характерно сложно-слоистое строение разреза, обусловливающее незакономерное чередование водоносных и слабопроницаемых пластов и их достаточно частое выклинивание, что обеспечивает лучшие условия взаимосвязи напорных водоносных горизонтов между собой, с грунтовыми и поверхностными водами; достаточно большие уклоны естественного потока, связанные со значительной величиной динамических ресурсов, формирующихся в краевых частях бассейнов в области выхода пластов на поверхность вследствие поглощения поверхностного стока в предгорьях.

Для месторождений II типа характерно ухудшение условий питания, изменение химического состава и минерализации подземных вод по мере погружения водоносных горизонтов, что обусловливает естественную гидрохимическую зональность.

В связи с этим во многих случаях при оценке запасов требуется учет возможности изменения качества отбираемой воды за счет подтягивания некондиционных (как правило, по минерализации и жесткости) вод снизу или сбоку.

В то же время в артезианских бассейнах продуктивные водоносные горизонты обычно защищены от загрязнения с поверхности.

Источниками формирования эксплуатационных запасов подземных вод месторождений в артезианских бассейнах могут являться:

1) упругие запасы эксплуатируемого водоносного горизонта; 2) естественные емкостные запасы выше- и нижележащих горизонтов; 3) упругие запасы слабопроницаемых пластов, разделяющих водоносные горизонты; 4) емкостные запасы эксплуатируемого пласта в региональной области питания, где к этому пласту приурочены безнапорные воды; 5) ресурсы, привлекаемые из поверхностных водотоков и водоемов; 6) динамические ресурсы подземных вод месторождения.

Имеющиеся данные о формировании динамических ресурсов артезианских бассейнов свидетельствуют, что формирование динамических ресурсов месторождений подтипа II-А происходит по всей их площади, отвечая схеме Мятиева — Гиринского (глава 3), подтипа II-Б — в краевых частях бассейнов в области выхода продуктивных пластов на поверхность. Разгрузка в обоих подтипах осуществляется путем восходящей фильтрации в местную и региональную речную сеть.

По особенностям формирования ЭЗПВ следует различать месторождения, расположенные в центральных и краевых частях бассейнов. В пределах первых, расположенных на значительных расстояниях от границ выклинивания водоносных горизонтов, воронки депрессии, как правило, не достигают этих границ в области их выхода на поверхность. Здесь формирование ЭЗПВ происходит преимущественно за счет перетекания через слабопроницаемые пласты из вышележащих водоносных горизонтов, связанных в свою очередь с грунтовыми водами и поверхностными водами. Поэтому в этих услових определяющее значение в балансе водоотбора имеют динамические ресурсы всей многопластовой водоносной системы и привлекаемые ресурсы поверхностных вод.

Возможность и интенсивность процессов перетекания определяются в основном геолого-гидрогеологическими факторами, обусловливающими степень взаимосвязи между эксплуатируемыми водоносными горизонтами (состав и мощность разделяющих слоев, наличие «гидрогеологических окон» и т. п.). В формировании эксплуатационных запасов в начальном периоде эксплуатации, а также в периоды резкого увеличения водоотбора существенную роль играют упругие запасы водоносных горизонтов, а также упругое отжатие воды из слабопроницаемых пластов. В условиях, характерных для глубоких водоносных горизонтов, практически перекрытых водоупорными отложениями, упругие запасы являются основным источником формирования эксплуатационных запасов в течение всего периода эксплуатации (например, горизонты подмерзлотных вод в артезианских бассейнах в зоне развития многолетнемерзлых пород). При эксплуатации подземных вод в центральных частях артезианских бассейнов формируются обширные (радиусом до 100 и более км) и глубокие (с понижением до 100—200 м) депрессионные воронки.

В краевых частях артезианских бассейнов платформ, где, как правило, отсутствуют выдержанные слабопроницаемые слои и водоносные горизонты содержат безнапорные воды, помимо динамических и привлекаемых ресурсов, большое значение в формировании эксплуа-

тационных запасов имеют емкостные гравитационные запасы эксплуатируемых и смежных с ними водоносных горизонтов.

Размеры депрессионных воронок в этих условиях, как правило, локализуются в радиусе от нескольких до первых десятков километров, а водоотбор обеспечен по отношению к центральным частям бассейна автономными источниками формирования. Воронки депрессии в этих условиях могут достигать границ распространения водоносных пластов.

Для анализа и диагностики соотношения восполняемых и емкостных составляющих в балансе водоотбора удобно использовать графики изменения приведенного понижения от времени $\frac{S}{Q} = f(t)$. Причем целесообразно анализировать систему таких графиков, исследуя сначала значения водоотбора оцениваемого одиночного водозаборного сооружения, а затем суммарный отбор систем взаимодействующих водозаборных сооружений.

Для месторождения подземных вод в артезианских бассейнах характерно значительное превышение области влияния водоотбора над площадью месторождения.

При эксплуатации сравнительно неглубоких напорных водоносных горизонтов, связанных с вышележащими, в ряде случаев происходит уменьшение стока рек и снижение уровня грунтовых вод и связанные с этим процессы: осушение болот, обмеление озер, угнетение растительности. При отборе подземных вод из глубоких водоносных пластов при больших понижениях уровня и песчано-глинистом составе перекрывающей толщи возможно оседание дневной поверхности.

**Оценка ЭЗПВ** выполняется гидродинамическим методом. Наиболее эффективно применение математического моделирования с использованием многослойных моделей, что позволяет оценивать не только понижение уровня в эксплуатируемом горизонте, но и во взаимодействующих с ним, включая грунтовый. Особенно это становится важным при расчетах водозаборных сооружений, эксплуатирующих систему этажно расположенных водоносных горизонтов.

На математических моделях в полной мере могут быть учтены границы неоднородности фильтрационных свойств слабопроницаемых и водоносных пластов, условия взаимосвязи подземных вод с поверхностными и т. д.

В относительно простых гидрогеологических условиях оценка ЭЗПВ может быть выполнена аналитическими расчетами.

Наиболее распространены схемы неограниченных в плане пластов в центральных частях бассейнов и полуограниченных в краевых.

По граничным условиям в вертикальном разрезе наибольшее распространение имеют схемы: 1) однослойного пласта, практически изолированного от смежных глинистыми отложениями; 2) двухслойного или трехслойного пласта с постоянным или переменным уровнем в верхнем питающем слое.

При схематизации разреза для аналитических расчетов, как впрочем и для моделирования, большое значение имеет корректное обоснование уменьшения слойности разреза в расчетной схеме (гл. 5.).

Практикуемые часто расчеты по схемам изолированного пласта, игнорирующие процессы перетекания, дают определенный запас надежности (иногда неоправданно большой) при расчетах производительности водозаборных сооружений, но могут принципиально искажать реальную картину снижения напоров в смежных водоносных горизонтах и уровней грунтовых вод, которые в таких схемах принимаются неизменными. При необходимости оценки снижения уровня грунтовых вод схема изолированного пласта использоваться не может и при расчетах понижений уровня в продуктивных горизонтах при оценке ЭЗПВ.

Взаимосвязь подземных и поверхностных вод, особенно характерная для продуктивных горизонтов в краевых частях артезианских бассейнов, учитывается так же, как при оценке ЭЗПВ в речных долинах.

По сложности гидрогеологических условий месторождения в центральных частях артезианских бассейнов относятся в основном к I группе, реже ко II, в краевых частях, как правило, ко II группе.

### 13.5. МЕСТОРОЖДЕНИЯ В КОНУСАХ ВЫНОСА [СУБАЭРАЛЬНЫХ НАЗЕМНЫХ ДЕЛЬТАХ] ПРЕДГОРНЫХ ШЛЕЙФОВ И ВНУТРИГОРНЫХ ВПАДИН (ТИП III)

**Гидрогеологические условия и особенности формирования ресурсов подземных вод.** Месторождения подземных вод рассматриваемого типа (см. рис. 62) широко распространены в южных районах СССР — Средней Азии, Южном Казахстане, Закавказье и на Северном Кавказе. Их эксплуатационные запасы составляют обычно несколько $м^3/с$, достигая на крупных месторождениях первых десятков $м^3/с$.

Конусы выноса, которые часто называют также субаэральными или наземными дельтами рек, формируются в результате накопления аллювиально-пролювиальных осадков, выносимых горными реками на предгорные равнины, в межгорные и внутригорные впадины. На предгорных равнинах и в крупных межгорных впадинах конусы выноса отдельных рек, сливаясь, образуют предгорные шлейфы. Внутригорные впадины, обычно относительно небольших размеров, заполняются целиком грубообломочными аллювиально-пролювиальными отложениями.

В рельефе конусы выноса представляют собой наклонные равнины, поверхность которых понижается в направлении от гор к равнине и от центральных частей конусов к периферическим, образуя так называемые межконусные понижения в предгорном шлейфе. В этих же направлениях происходит довольно быстрое и закономерное ухудшение фильтрационных свойств водовмещающих пород от тысяч до сотен $м^2/сут$ за счет смены более грубообломочных валунно-галечных отложений песчано-гравийно-галечными и песчано-суглинистыми с одновременным увеличением песчаных и глинистых фракций заполнителя. Такие закономерности изменчивости фильтрационных свойств приводят к естественной ограниченности месторождений площадью с высокими фильтрационными свойствами водовмещающих пород, с

одной стороны, и к выраженной площадной гидродинамической зональности, с другой стороны. На конусах выноса, как правило, выделяется зона поглощения поверхностного стока, зона транзита и зона выклинивания подземных вод, а также зона вторичного погружения поверхностного стока. В зоне поглощения, приуроченной к головной части конуса, аллювиально-пролювиальные отложения представлены мощными (до нескольких сотен метров) гравийно-галечниковыми отложениями. Эта основная область питания подземных вод за счет поглощения речного стока и в значительно меньшей степени инфильтрации атмосферных осадков и притока из коренных пород горного обрамления. По мере удаления от гор происходит резкое уменьшение питания и замещение гравийно-галечниковых отложений песками, суглинками и глинами и расчленение единого водоносного горизонта на несколько этажно расположенных горизонтов.

К зоне транзита приурочены мощные безнапорные потоки подземных вод с расходами в несколько $м^3/с$ и гидравлическими уклонами до 0,02—0,05. В зоне транзита меняется и глубина залегания подземных вод от глубин 50—100 м и более в головной части до выхода на поверхность в зоне замещения галечников менее водопроницаемыми отложениями — зоне выклинивания подземного стока. В этой зоне происходит разгрузка подземных вод многочисленными родниками («кара-су»), суммарный дебит которых исчисляется часто несколькими $м^3/с$, а также путем испарения с поверхности грунтовых вод. Суммарный объем испарения может не только быть соизмеримым с родниковым выклиниванием, но и превышать его.

Ниже зоны выклинивания разрез водовмещающих пород представлен переслаиванием песчаных и суглинистых пластов, питание подземных вод в которых происходит частично за счет оттока из собственно конуса выноса и поглощения поверхностных вод, образуемых в результате выклинивания и орошения (зона вторичного поглощения).

Условия в этой зоне более характерны для месторождений в предгорных артезианских бассейнах. В площадь месторождений конусов выноса эта зона практически не входит, но должна учитываться при расчетах баланса подземных вод.

В конусах выноса в зоне транзита образуются мощные безнапорные потоки подземных вод с большими уклонами.

Месторождения рассматриваемого типа разделены на два характерных подтипа: подтип III-А в конусах выноса предгорных шлейфов и III-Б — в конусах выноса внутригорных впадин. Для первого характерны классическая, описанная выше гидродинамическая зональность и четкая геологическая ограниченность только со стороны горного обрамления.

Во втором подтипе формируются так называемые подрезанные конусы, в которых периферическая часть отсутствует или практически не выражена, вследствие чего здесь отсутствуют площади с низкими фильтрационными свойствами водовмещающих пород. Впадины со всех сторон ограничены скальными слабопроницаемыми и глинистыми породами горного обрамления или низкогорных поднятий. Зоны разгрузки локализованы, имеют очаговый характер и приурочены к нижнему

по направлению уклона рельефа и потока подземных вод замыканию впадин, в то время как ширина зоны выклинивания подземных вод на месторождениях подтипа III-А может достигать нескольких километров. Вследствие этого доля разгрузки испарением в месторождениях подтипа III-Б практически отсутствует.

Таким образом, месторождения подтипа III-Б, сохраняя все особенности строения водовмещающих толщ и формирования динамических ресурсов подземных вод, свойственные конусам выноса, по особенностям плановых границ продуктивных водоносных горизонтов ближе к месторождениям в ограниченных по площади структурах.

В периферических частях конусов выноса, где развиты грунтовые воды в покровных суглинках, супесях, а также в зоне транзита (в пределах развития гравийно-галечниковых отложений) обычно происходит орошение. В этих условиях формируются антропогенные ресурсы подземных вод в результате фильтрации из оросительной сети. В связи с тем что при орошении обычно осуществляются дренажные мероприятия, одним из видов разгрузки подземных вод на конусах выноса является их разгрузка в коллекторно-дренажную сеть, причем во многих случаях практически невозможно выделить в дренажном стоке ту его часть, которая формируется за счет выклинивания подземного стока и оросительных вод (естественно-антропогенные ресурсы). Это обстоятельство необходимо учитывать при оценке ЭЗПВ, так как изменение ирригационных систем приводит к изменению питания подземных вод.

Гидрохимические условия обычно благоприятные, однако защищенность от загрязнения слабая. Эксплуатация месторождений подземных вод в конусах выноса приводит к исчезновению родников, сокращению испарения, а в нижних частях конусов — к изменению режима почвообразования.

Таким образом, основными источниками формирования ЭЗПВ в месторождениях конусов выноса являются естественные динамические ресурсы, формирующие мощные потоки подземных вод с большими естественными уклонами, антропогенные ресурсы и емкостные запасы. Однако естественные и антропогенные емкостные запасы, несмотря на большой объем при расчетах на 25-летний срок эксплуатации в общем балансе водоотбора составляют относительно небольшую долю. Однако при кратковременном (например, в вегетационный период) периоде эксплуатации они могут обеспечивать весьма значительный водоотбор. Поэтому во вногих случаях по своей емкости конусы выноса представляют собой огромные подземные водохранилища, при интенсивной эксплуатации которых в меженный период возможно не только значительно увеличить отбор подземных вод, но и осуществлять регулирование поверхностного стока.

**Особенности оценки эксплуатационных запасов.** Основой оценки ЭЗПВ месторождений III типа является изучение всех приходных и расходных статей баланса, отображенных в природной гидрогеологической и геофильтрационной моделях месторождений.

Оценка ЭЗПВ обычно осуществляется гидродинамическим методом. Наиболее эффективно и полно все особенности формирования запасов

могут быть учтены на математических моделях, которые должны учитывать естественную ограниченность продуктивных водоносных толщ, характер зоны выклинивания, закономерности изменчивости фильтрационных свойств водовмещающих пород.

В задачу оценки ЭЗПВ месторождений конусов выноса часто входит оценка мелиоративного эффекта от работы водозаборных сооружений, что так же может быть осуществлено на математических моделях при соответствующей схематизации верхней части разреза.

Если потребность в воде не превышает разгрузку в зоне выклинивания, оценка производительности водозаборных сооружений может быть выполнена аналитическими расчетами.

В этом случае используется расчетная схема полуограниченного пласта с контуром постоянного напора в зоне выклинивания.

При приближении водозаборного сооружения к горному обрамлению, граница последнего учитывается как граница с постоянным расходом.

В этих случаях расчет водозабора проводится по схеме «пласт-полоса» с разнородными границами ($H = \text{const}$, $q$—0). При этом влияние зоны выклинивания может оказаться несущественным.

Межконусные понижения можно рассматривать в большинстве случаев как непроницаемые границы, что позволяет осуществлять оценку запасов каждого конуса выноса в пределах предгорного шлейфа автономно.

На месторождениях подтипа III-Б обычно используется расчетная схема замкнутого пласта с дополнительным питанием.

Во всех случаях требуется тщательный учет неравномерности водоотбора в течение года, а также периодичности в сработке емкостных запасов в течение всего периода эксплуатации или только в вегетационный период.

При расположении водозаборных сооружений в головных частях конуса выноса и в зоне транзита, где формируются мощные безнапорные потоки подземных вод с большими продольными уклонами, на режим работы водозаборных сооружений большое влияние оказывает характер потока. В этих условиях целесообразно использование для аналитических расчетов схемы безнапорного потока на наклонном водоупоре (§ 7.9). Поскольку положение подошвы горизонта обычно выражено нечетко или слабо изучено, часто имеет сложный характер, расчетное положение «наклонного водоупора» рекомендуется принимать параллельным уровенной поверхности подземных вод.

А. А. Плетневым (1987) разработано программное обеспечение, позволяющее реализовать расчеты водозаборных сооружений в таких потоках на математических моделях.

По сложности условий месторождения III типа обычно относятся к первой или второй группам.

### 13.6. МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В ОГРАНИЧЕННЫХ ПО ПЛОЩАДИ СТРУКТУРАХ (ТИП IV)

**Гидрогеологические условия и особенности формирования эксплуатационных запасов** (см. рис. 62). Месторождения этого типа имеют широкое распространение на территории СССР, но наибольшую роль играют в Центральном и Северном Казахстане, на Урале, юге Восточной Сибири, Дальнем Востоке, в ряде районов УССР. Это, как правило, небольшие месторождения, эксплуатационные запасы которых редко превышают первые сотни метров в секунду, однако в отдельных случаях достигают 1—2 м³/с. Площадь — обычно несколько десятков, реже сотен квадратных километров.

Рассматриваемые месторождения характеризуются большим разнообразием и сложностью гидрогеологических условий.

В то же время для них всех характерны: замкнутая или полосообразная форма, контролирующаяся природными геолого-гидрогеологическими границами; небольшие размеры, определяющие распространение депрессионных воронок по всей площади структуры и активное влияние их границ на режим уровней при работе водозаборных сооружений; определяющая роль геоструктурных факторов в общем комплексе условий формирования ЭЗПВ; как правило, значительное превышение над площадью месторождения площади формирования динамических ресурсов (подземного стока), обычно совпадающей с площадью поверхностного водосбора.

Основные различия месторождений этого типа связаны с условиями формирования и последующего геологического развития структур, к которым приурочены МППВ (подтипы А и Б).

В первом случае (подтип IV-А) образование структур постгенетично осадконакоплению, во втором (подтип IV-Б) — сингенетично. Поэтому в первом подтипе закономерности изменчивости фильтрационных свойств водовмещающих пород, их условия залегания, форма структур связаны в основном с тектоническими процессами последующей осадконакоплению геологической истории; во втором — основные черты структур и строения водовмещающей среды определены в период осадконакопления.

Поэтому раскрытие закономерностей условий залегания и изменчивости фильтрационных свойств водовмещающих пород в первом случае базируется на структурно-тектоническом анализе, во втором — на палеогеографическом и литолого-фациальном.

Подразделение месторождений на два основных подтипа (А — в трещинных и трещинно-карстовых и Б — в порово-пластовых коллекторах) связано не столько с составом и строением пород, сколько с различиями в комплексе гидрогеологических условий, определяющих особенности формирования ЭЗПВ и прежде всего закономерностями изменчивости фильтрационных свойств водовмещающих пород по площади и в разрезе.

Месторождения подтипа А характеризуются резко неравномерной трещиноватостью и закарстованностью водовмещающих пород. Боль-

шую роль при этом играют тектонические нарушения, осложняющие залегание и нарушающие сплошность распространения пород. Чаще всего эти месторождения приурочены к карбонатным коллекторам. Характерно быстрое затухание трещиноватости и закарстованности с глубиной, хотя в отдельных случаях зоны повышенной трещиноватости и закарстованности могут быть встречены на значительной глубине (до 100—200 м и более).

Для месторождений типично однопластовое или двух-, трехпластовое строение разреза. В последнем случае скальные водовмещающие породы перекрываются рыхлообломочными, обычно песчано-глинистыми образованиями.

Месторождения подтипа Б подразделяются на два вида: в молодых депрессиях, наложенных на скальный фундамент (вид IV-$Б_1$) и в погребенных речных долинах (вид IV-$Б_2$). Условия залегания пород здесь более спокойные, фильтрационные свойства изменчивы в меньшей степени. Иногда отмечается их увеличение с глубиной. Характерно сложнослоистое строение разреза. Погребенные долины в отличие от депрессий часто не имеют четкой структурной приуроченности и вложены в песчано-глинистые вмещающие породы.

Большое влияние на формирование месторождений типа III имеют наличие речной сети, ее конфигурация и особенности гидрологического режима. При этом особое значение приобретает характер речной сети (местной или транзитной).

Основными источниками формирования ЭЗПВ являются динамические ресурсы, разгружающиеся в основном в пределах месторождений. Для их полного перехвата водозаборными сооружениями создаются часто благоприятные условия в связи с небольшими размерами структур. Роль емкостных запасов возрастает на месторождениях подтипа IV-Б, а также в условиях перекрытия основного пласта-коллектора рыхлообломочными отложениями с высокой водоотдачей на месторождениях подтипа IV-А.

При наличии местных и транзитных водотоков создаются благоприятные условия для усиления сработки емкостных запасов в межень и последующего восполнения в паводок.

При обеспечении водоотбора постоянным или периодическим транзитным поверхностным стоком условия работы водозаборных сооружений близки к условиям на месторождениях в речных долинах.

Учитывая эти особенности, приобретающие исключительно важное значение при оценке ЭЗПВ, все месторождения IV типа по источникам формирования запасов делятся на месторождения, связанные и не связанные с поверхностными водотоками.

**Особенности оценки эксплуатационных запасов подземных вод.** Особенности оценки ЭЗПВ месторождений IV типа определяются прежде всего ограниченной площадью структур, соотношением источников формирования запасов и их временными изменениями, значительной неоднородностью фильтрационных и емкостных свойств водовмещающих пород в плане и разрезе.

Во всех случаях оценка ЭЗПВ базируется на расчетах их обеспеченности балансовыми методами. Особое внимание необходимо

уделять оценке динамических и привлекаемых ресурсов. При этом следует учитывать, что при определении динамических ресурсов подземных вод по меженным расходам рек и ручьев их величина часто оказывается существенно заниженной. Это обусловливает при наличии водозабора-аналога целесообразность использования метода гидрогеологических аналогов для оценки общей величины эксплуатационных запасов, динамических и привлекаемых ресурсов.

Для расчетов производительности водозаборных сооружений на месторождениях подтипа IV-Б наиболее применимы гидродинамические методы (как аналитические, так и моделирование), подтипа IV-А — гидравлические или гидродинамические. Первые наиболее целесообразно применять, когда в процессе откачек депрессия охватывает практически всю площадь оцениваемой структуры; вторые — при достаточно большой площади структуры по сравнению с площадью опытного возмущения.

Широкое применение при оценке ЭЗПВ месторождений IV типа имеет комбинирование различных методов, позволяющее наиболее полно учесть все особенности формирования запасов.

На месторождениях подтипа IV-А, когда основным источником формирования ЭЗПВ являются емкостные запасы, а водовмещающие породы представлены интенсивно закарстованными и трещиноватыми породами с высокой водопроводимостью (замкнутые структуры с трещинно-карстовыми карбонатными коллекторами), эксплуатация подземных вод будет происходить при нестационарном режиме. В связи с высокой водопроводимостью водоносных горизонтов понижения уровня будут близкими по всей площади структуры. В этих условиях основным методом оценки запасов является балансовый, так как с его помощью можно определить не только обеспеченность запасов, но и понижение уровня в водозаборных скважинах. Так, для структур радиусом несколько километров и допустимым понижением несколько десятков метров уже при $\frac{Q}{km} < 10$ с точностью до 10 % понижение уровня можно считать одинаковым на всей площади структуры. Дополнительное понижение в скважине можно учесть также как при переходе от обобщенных систем к конкретным скважинам (глава 7).

В условиях постоянной или периодической обеспеченности ЭЗПВ поверхностным стоком для расчетов водозаборных сооружений применимы те же методы, что и при расчетах инфильтрационных водозаборных сооружений в речных долинах.

Кроме того, для подтипа IV-А трудности в расчетах могут быть связаны с высокой неоднородностью фильтрационных свойств водовмещающих пород. Поэтому для этого типа наряду с гидродинамическими методами целесообразно применять гидравлические, а также метод гидрогеологических аналогов.

По сложности гидрогеологических условий месторождения подтипа IV-А относятся чаще всего ко II или III группам, подтипа IV-Б ко II, реже к I. При обеспечении водоотбора транзитным поверхностным стоком группа сложности обычно ниже, чем при его отсутствии.

При оценке ЭЗПВ большое внимание следует уделять определению

сокращения стока рек (особенно, если он формируется в пределах структуры) и снижению уровня грунтовых вод, которые могут приводить к угнетению растительности.

### 13.7. МЕСТОРОЖДЕНИЯ В БАССЕЙНАХ И ПОТОКАХ ГРУНТОВЫХ ВОД (ТИП V)

**Гидрогеологические условия и особенности формирования ресурсов.** Месторождения этого типа также имеют широкое распространение на территории СССР (Центральный и Северный Казахстан, Дальний Восток, Поволжье, ряд районов Средней Азии, Белоруссия, Украина и др.) и характеризуются значительным разнообразием (см. рис. 62), хотя и относительно небольшой величиной ЭЗПВ, составляющей чаще всего от нескольких тысяч до первых десятков тысяч м$^3$/сут.

Главной особенностью этих месторождений является безнапорный характер продуктивных водоносных горизонтов, определяющий ограниченное распространение депрессионных воронок. Поэтому в большинстве случаев пласт может рассматриваться как неограниченный (в отличие от горизонтов грунтовых вод месторождений IV типа).

Основными источниками формирования ЭЗПВ месторождений V типа являются емкостные запасы и динамические ресурсы, формирующиеся как за счет инфильтрационного питания на площади развития депрессии, так и бокового притока (транзитного подземного стока). Динамические ресурсы в балансе ЭЗПВ могут иметь существенное значение в двух случаях:

1) при близком залегании уровня грунтовых вод и инверсии в период эксплуатации их естественной разгрузки, происходившей путем испарения и транспирации, либо очаговой разгрузки родниками в виде мочажин и заболоченностей;

2) при больших уклонах естественного потока, когда в процессе эксплуатации может быть осуществлен перехват части потока (безнапорные потоки на наклонном водоупоре, раздел 7.9).

В основу подразделения этих месторождений на подтипы положен характер строения водовмещающей среды (см. табл. 13.1).

Для месторождений подземных вод трещинно-карстовых массивов (подтип V-А) характерны весьма неоднородные, но достаточно высокие в целом фильтрационные свойства и большая мощность водовмещающих пород, достигающая 100—150 м и более метров и соответственно большая величина допустимого понижения уровня. Эти месторождения во многих случаях характеризуются сравнительно высокими величинами эксплуатационных запасов, составляющими сотни литров в секунду. В таких бассейнах часто формируются крупные безнапорные потоки, что требуется учитывать в расчетах водозаборных сооружений.

Для месторождений в бассейнах и потоках грунтовых вод в зоне экзогенной трещиноватости скальных, терригенных, интрузивных пород (подтип V-Б) также характерна высокая неоднородность фильтрационных свойств, однако в отличие от месторождений подтипа V-А коэффициенты фильтрации водовмещающих пород обычно невелики.

Эффективная мощность водовмещающих пород (первые десятки метров) невелика, наблюдается быстрое затухание трещиноватости с глубиной, что определяет небольшие величины допустимых понижений уровня и необходимость выявления закономерностей изменчивости фильтрационных свойств в разрезе.

Несмотря на плановую неоднородность фильтрационных свойств, в расчетах она может рассматриваться обычно как эффективная, а пласт приводится к эквивалентному однородному. Фактическая плановая неоднородность учитывается прежде всего при размещении точек заложения эксплуатационных скважин.

Месторождения подтипа V-В приурочены к песчаным массивам. Они подразделяются на три вида: V-$В_1$ — в песчаных массивах пустынь и полупустынь, в пределах которых распространены линзы пресных вод; V-$В_2$ — в отложениях зандровых равнин; V-$В_3$ — в отложениях широких речных террас. Для всех указанных видов месторождений общим является песчаный состав водовмещающих пород, их сравнительно однородные фильтрационные свойства и небольшая (первые десятки метров) мощность. Эксплуатационные запасы подземных вод месторождений подтипа V-В обычно невелики (десятки и первые сотни л/с) Основной специфической чертой месторождений первого вида являются сложность гидрохимических условий в плане и разрезе и незначительная величина динамических ресурсов, второго — как правило, хорошие условия питания подземных вод, третьего — особенности морфологии долины, определяющие условия залегания и распространения продуктивного горизонта. В последнем случае важной особенностью (в отличие от месторождений речных долин является удаленность русла реки от водозаборного сооружения. Поэтому поверхностный сток в формировании ЭЗПВ не участвует.

**Особенности оценки эксплуатационных запасов.** Оценка ЭЗПВ может выполняться, как правило, гидродинамическими аналитическими методами по формулам для условий бассейнов или потоков подземных вод, реже (для V-А и V-$В_1$) целесообразно использование метода математического моделирования.

При ограниченной величине ЭЗПВ на месторождениях подтипов V-А и V-Б могут использоваться гидравлические методы. Большое внимание следует уделять возможному влиянию снижения уровня грунтовых вод на природные ландшафтные комплексы.

По сложности гидрогеологических условий месторождения типа V в основном относятся ко второй группе, подтипа V-$В_2$ и V-$В_3$ — к первой.

### 13.8. МЕСТОРОЖДЕНИЯ В БАССЕЙНАХ СУБНАПОРНЫХ ВОД МЕЖМОРЕННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ (ТИП VI)

Месторождения этого типа пользуются ограниченным распространением на территории СССР. Основная часть разведанных и эксплуатируемых месторождений сосредоточена на территории Белорусской ССР. Кроме Белорусской ССР эти месторождения известны в Литве,

северо-западных районах РСФСР, а также в некоторых других районах, где развиты межморенные отложения.

Для месторождений этого типа (см. рис. 62) характерно наличие, как правило, нескольких этажно расположенных водоносных горизонтов, крайне изменчивые литологический состав, мощность и фильтрационные свойства рыхлообломочных (преимущественно песчаных) водовмещающих пород, а также перекрывающих и подстилающих их моренных отложений, небольшая глубина залегания водоносных горизонтов, благоприятные условия питания подземных вод, простые гидрохимические условия.

Между отдельными водоносными горизонтами ледниковых отложений существует активная гидравлическая связь, особенно усиливающаяся в местах размыва моренных отложений (на участках развития «гидрогеологических окон»). Отмечается также хорошая связь подземных и поверхностных вод. Рассматриваемые месторождения характеризуются эксплуатационными запасами, составляющими первые сотни литров в секунду.

Основными источниками формирования ЭЗПВ являются динамические ресурсы всей многопластовой водоносной системы и привлекаемые ресурсы поверхностных вод; емкостные запасы имеют подчиненное значение и существенную роль обычно играют лишь в начальные периоды эксплуатации. Воронки депрессии, как правило, невелики, их радиусы составляют 5—10 км, редко увеличиваясь до 15 км. Границы месторождения обычно определяются по условиях их освоения.

В связи с неглубоким залеганием продуктивных водоносных горизонтов и хорошей гидравлической взаимосвязью напорных и грунтовых вод при эксплуатации месторождений напорных вод межморенных отложений может происходить снижение уровня грунтовых вод, вызывающее осушение болот, изменение режима влажности почв и угнетение растительности. В верховьях небольших рек при расположении вблизи них водозаборных сооружений на отдельных участках реки может происходить прекращение стока.

Особенности гидрогеологических условий месторождений VI типа определяют ведущую роль процессов перетекания в формировании динамики изменения напоров подземных вод при эксплуатации, поэтому обычно водозаборные сооружения работают при стационарном режиме фильтрации.

По своей структуре модели месторождений в бассейнах субнапорных вод межморенных отложений близки к месторождениям в артезианских бассейнах, поэтому и методика оценки ЭЗПВ в целом идентична. Основные различия связаны, помимо специфики условий залегания водовмещающих пород и невыдержанности их фильтрационных свойств в плане и разрезе, с локализацией воронок депрессий на небольшой площади. Поэтому в отличие от артезианских бассейнов вопросы взаимодействия водозаборных сооружений на большой площади можно не рассматривать, а сочетание систем региональных и локальных моделей обычно не требуется. В большинстве случаев можно ограничиваться локальными моделями в пределах области развития депрессии от эксплуатации разведанного месторождения.

В тех случаях, когда подземные воды гидравлически хорошо связаны с поверхностными, оценку запасов следует проводить, как для месторождений подземных вод в речных долинах, если расстояние от водозаборного сооружения до реки меньше, чем половина коэффициента перетекания.

По сложности гидрогеологических условий эти месторождения обычно относятся ко II группе.

### 13.9. МЕСТОРОЖДЕНИЯ В ПОТОКАХ ТРЕЩИННО-ЖИЛЬНЫХ ВОД (ТИП VII)

Месторождения трещинно-жильных вод развиты в горных районах, а также на Украинском и Балтийском кристаллических массивах, Центральном Казахстане, Урале и в ряде других районов распространения трещиноватых скальных пород. Это небольшие месторождения, эксплуатационные запасы которых не превышают десятков литров в секунду, а депрессионные воронки локализуются в радиусе нескольких сотен метров, реже — нескольких километров. Основная особенность месторождений этого типа — приуроченность более водообильных участков, как правило, к долинам рек и зонам тектонических нарушений. Иногда такие участки локализуются по отдельным трещинам и зонам дробления, что может приводить даже к разрыву сплошности потока. Глубина распространения обводненных трещинных зон обычно не превышает 100—150 м. Основную роль в формировании эксплуатационных запасов подземных вод играют динамические, реже привлекаемые, ресурсы, формирующиеся за счет поверхностных вод.

На месторождениях этого типа поле фильтрационных параметров в ряде случаев не может быть представлено с учетом конфигурации отдельных трещин и зон дробления, а их взаимоотношение с вмещающими слаботрещиноватыми и монолитными блоками пород не изучено в такой степени, чтобы могло быть отражено в геофильтрационной схеме. Поэтому здесь гидравлические методы являются основными для расчета производительности водозаборных сооружений.

В этих условиях они применяются на базе выявленных в процессе разведки точек для заложения водозаборных скважин и установленной опытным путем зависимости между темпом снижения уровня подземных вод и временем при заданном отборе воды с последующей экстраполяцией полученной зависимости на расчетный срок эксплуатации. Для этих целей проводятся достаточно длительные опытно-эксплуатационные откачки.

Обычно затруднена и экстраполяция достигнутого при откачках расхода из-за сложности оценки источников формирования ЭЗПВ, прежде всего динамических ресурсов.

Оценка обеспеченности ЭЗПВ обычно основывается на предпосылке о неизменности условий формирования запасов при эксплуатации по сравнению с опытными данными, что подтверждается балансовыми расчетами. Наиболее эффективно обеспеченность ЭЗПВ может

быть оценена методом гидрогеологических аналогов по опыту эксплуатации действующих водозаборных сооружений.

Однако здесь необходимо отметить, что в сложных условиях рассматриваемого типа месторождений само доказательство аналогичности сопоставляемых участков часто представляет собой трудную задачу.

Проведенный Н. И. Дробноходом (1988) анализ особенностей формирования динамических ресурсов ряда месторождений подземных вод Украинского щита показал, что для их оценки может успешно применяться метод математического моделирования, несмотря на большую сложность строения массивов водовмещающих кристаллических пород. Это связано с тем, что при оценке динамических ресурсов отдельные проводящие трещины и трещинные зоны занимают небольшую площадь водоносного горизонта и не определяют общую величину динамических ресурсов и подземного стока, формирующихся, в основном, в обширном слаботрещиноватом массиве изучаемого водосбора. Поэтому в таких условиях для оценки динамических ресурсов целесообразно применение математического моделирования с последующим расчетом водозаборного сооружения гидравлическим методом.

Важное значение может иметь также приток с других водосборов по отдельным проводящим зонам, который должен учитываться дополнительно, если его удается выявить каким-либо методом.

Если ЭЗПВ обеспечиваются транзитным стоком рек, водозаборные сооружения носят инфильтрационный характер, однако их производительность определяется наличием достаточного числа скважин, вскрывших зоны с повышенной водообильностью. Расчеты этих скважин производятся методом срезок для условий установившегося режима фильтрации.

На ряде месторождений отмечаются сосредоточенные выходы родников, которые могут эксплуатироваться как прямыми каптажами, так и скважинными водозаборными сооружениями, обеспечивающими инверсию родниковой разгрузки. В этих случаях обеспеченность ЭЗПВ оценивается по родниковому стоку.

По сложности гидрогеологических условий месторождения типа VII относятся, как правило, к III группе.

### 13.10. МЕСТОРОЖДЕНИЯ В ПЕРИФЕРИЙНЫХ ЧАСТЯХ ЛАВОВЫХ ПОТОКОВ (ТИП VIII)

Этот тип месторождений имеет весьма ограниченное распространение (главным образом, в Армении, а также на Дальнем Востоке), но характеризуется ярко выраженными специфическими особенностями. Месторождения этого типа представляют собой подземные водотоки, приуроченные к этажно залегающей системе перемежающихся монолитных и сильно трещиноватых лавовых потоков, выполняющих древние погребенные долины (см. рис. 62). Эти водотоки играют роль дрен, собирающих воды различных этажей лавовых потоков. В нижней части водоносные лавовые потоки часто переслаиваются с озерно-аллювиальными песчано-глинистыми отложениями.

В пределах месторождений обычно выделяется два-три водоносных этажа (горизонта). Разгрузка подземных вод осуществляется мощными сосредоточенными родниками с расходами от сотен литров до нескольких кубических метров в секунду в периферийных частях потоков либо в понижениях рельефа, где водоносные горизонты эродированы.

Условия распространения и залегания водоносных горизонтов, их мощность и фильтрационные свойства крайне изменчивы; основным источником формирования ЭЗПВ являются динамические ресурсы.

Производительность водозаборных сооружений достигает сотен литров в секунду, реже первых кубических метров в секунду, широко распространены каптажи родников с аналогичными расходами. Благодаря большой регулирующей емкости лавовых пород расходы родников в сезонном и многолетнем разрезе меняются незначительно. Радиусы депрессионных воронок не превышают сотен метров, реже нескольких километров.

На участках транзита связь между потоками подземных вод различных этажей слабая. В депрессиях, где осуществляется восходящая разгрузка подземных вод нижних этажей, она усиливается, но здесь верхние этажи часто отсутствуют.

В таких условиях крупные родники выходят в бортах четкообразных речных долин в тыловых частях пойменных или надпойменных террас. В пределах собственно долины скважинами вскрываются нижние этажи лавовых отложений, часто переслаивающихся с озерно-аллювиальными. Воды родников и пластовые воды нижних этажей практически между собой не связаны и оценка их ЭЗПВ может осуществляться раздельно.

При пространственном совмещении подземных и поверхностных водотоков последние часто дренируют лишь грунтовые воды, подземные водотоки на участках транзитного потока с поверхностными могут быть гидравлически практически не связаны. Поэтому поверхностный сток в обеспечении ЭЗПВ нижних этажей на таких участках участия не принимает.

Эксплуатация подземных вод лавовых потоков эффективно может осуществляться лишь в периферийных частях водотоков каптажом родников, либо перехватом восходящей разгрузки скважинами.

Оценка ЭЗПВ в первом случае осуществляется по данным наблюдений за родниковым стоком, во втором — гидравлическим методом по данным опытно-эксплуатационных откачек.

По сложности гидрогеологических условий месторождения относятся к III группе.

### 13.11. МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ТАЛИКОВ В ОБЛАСТИ РАЗВИТИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД (ТИП IX)

На месторождениях в области распространения многолетнемерзлых пород наиболее специфические особенности формирования ЭЗПВ, связанные с наличием мерзлоты, характерны для месторождений в тали-

ках речных долин, подозерных и подаласных таликах. Последние характеризуются весьма ограниченными запасами. Практическое значение в качестве источников централизованного водоснабжения имеют лишь талики в речных долинах (параграф 13.11 подготовлен с помощью В. Д. Гродзенского).

В зависимости от условий формирования эксплуатационных запасов здесь могут быть выделены месторождения под крупными, полностью не промерзающими зимой равнинными реками, и месторождения под полностью промерзающими зимой реками горных и предгорных областей. Для первой группы месторождений основным источником формирования эксплуатационных запасов являются привлекаемые ресурсы — поверхностный сток; в месторождениях второй группы в период отрицательных температур при полном промерзании реки эксплуатационные запасы обеспечиваются сработкой естественных емкостных запасов, в период наличия стока к водозаборам привлекаются поверхностные воды.

Распространение и размеры таликов под руслами непромерзающих рек зависят от ряда таких факторов, как состав аллювиальных отложений, ширина и глубина реки, мощность и теплофизические характеристики многолетнемерзлых пород, режим стока реки, температура воды и ее изменение в течение года и др. В зависимости от сочетания этих факторов различают две группы таликов.

Ширина таликов первой группы не превышает ширину водного сечения реки в зимнюю межень, эксплуатация подземных вод таких таликов возможна только лучевыми водозаборными сооружениями.

Талики второй группы имеют ширину, превосходящую ширину русла; здесь возможно строительство береговых инфильтрационных водозаборных сооружений. Обоснование и оценка ЭЗПВ в этих условиях и в речных долинах вне зоны развития многолетнемерзлых пород аналогичны. Однако при оценке запасов следует учитывать изменение условий и параметров взаимосвязи подземных и поверхностных вод в связи с промерзанием водоносных пород в прибрежной зоне и на мелководных участках реки, что приводит к уменьшению сечения потока между рекой и водозаборными скважинами, а также влияние резкого понижения температуры на величину скорости (коэффициента) фильтрации.

На месторождениях подземных вод таликов в долинах рек, полностью промерзающих зимой, размеры таликов также изменяются в зависимости от общих мерзлотно-климатических условий, строения водовмещающей толщи и ее фильтрационных свойств, уклона долины, величины поверхностного стока и его изменения во времени. Так, во всех случаях в песчаных отложениях или при уклонах долин менее 0,002 в валунно-гравийно-галечниковых отложениях формируются талики, размеры которых незначительно превышают ширину русла, при уклонах порядка 0,002—0,01 ширина таликов в хорошо проницаемых валунно-гравийно-галечниковых отложениях значительно больше ширины русла, а, например, в древних переуглубленных долинах граница таликовых зон может проходить по границе долины и ширина таликов составлять сотни метров. В рассматриваемых условиях могут

формироваться весьма крупные месторождения подземных вод, эксплуатационные запасы которых превышают 1 м$^3$/с.

В естественных условиях в бессточный период движение подземных вод обеспечено осушением пород в верхней части талика. Формирующийся расход в нижней части талика уходит на ледообразование, являющееся поисковым признаком таких месторождений.

При этом скорость снижения уровня выше, чем скорость образования сезонномерзлотного слоя.

Эксплуатационные запасы месторождений в таликах в бессточный период формируются за счет частичного и полного перехвата естественного потока, образующегося в талике за счет осушения водовмещающих пород в верхней по долине части талика, и емкостных запасов, аккумулированных в талике на водозаборном участке. С началом поверхностного стока эксплуатационные запасы обеспечиваются привлечением поверхностных вод реки по сквозным подрусловым таликам. Величина поверхностного стока и поглощающая способность этих таликов должны обеспечить прохождение расхода большего, чем водоотбор, для полного восстановления емкостных запасов к началу бессточного периода, т. е. зимой емкостные запасы срабатываются, летом — восстанавливаются.

По условиям формирования ЭЗПВ эти месторождения аналогичны месторождениям в речных долинах с периодическим стоком, что позволяет использовать и идентичную методику оценки — гидродинамическими методами рассчитывается производительность водозабора за счет сработки емкостных запасов в бессточный период с учетом перехвата динамических ресурсов, также обеспечиваемых сработкой емкости, но в естественных условиях расходовавшихся на ледообразование. В стоковый период рассчитывается инфильтрационный водозабор и возможность восполнения сработанных емкостных запасов.

Поэтому при оценке ЭЗПВ особое внимание должно быть уделено пропускной способности русловых отложений в таликовой зоне, которая наиболее надежно может быть оценена по данным наблюдений за режимом подземных и поверхностных вод.

По сложности гидрогеологических условий эти месторождения чаще всего относятся ко II и III группам.

**Контрольные вопросы.** 1. С помощью каких принципов может выполняться типизация месторождений подземных вод? 2. Для каких целей нужна типизация месторождений? 3. Как Вы представляете себе «образ месторождения» какого-либо типа? 4. Что такое сложность гидрогеологических условий месторождений подземных вод? 5. В каких условиях, сложных или простых, более полно проявляются характерные черты месторождений каждого типа? 6. Выделите общие черты и особенности формирования запасов различных типов месторождений. 7. Какие особенности формирования ЭЗПВ характерны отдельным типам месторождений и влияют на методику их оценки? 8. Для каких типов месторождений используется методика оценки ЭЗПВ, разработанная для месторождений в речных долинах? 9. Что общего между месторождениями, расположенными в аридной зоне и в области развития многолетнемерзлых пород? 10. По каким признакам, не учтенным в рассмотренной типизации, можно выполнить дополнительную типизацию, позволяющую унифицировать методику оценки влияния эксплуатации на окружующую среду?

# ГЛАВА 14. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ И ПРОГНОЗНЫХ РЕСУРСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД И ПРИНЦИПЫ ИХ КАТЕГОРИЗАЦИИ

Эксплуатационные запасы подземных вод, как и запасы других полезных ископаемых, являются расчетными величинами, так как они не могут быть измерены непосредственно. Как было показано в предыдущих разделах, оценка эксплуатационных запасов включает прогноз изменения расходов водозаборных сооружений, уровней подземных вод, их качества, обоснование границ зон санитарной охраны, а также влияния отбора подземных вод на окружающую среду. Эти прогнозы выполняются на основе информации об условиях формирования ЭЗПВ, получаемой при проведении поисково-разведочных работ (в том числе и при эксплуатации водозаборных сооружений) с использованием той или иной расчетной модели.

Однако любая расчетная модель в силу неполноты наших знаний об условиях формирования ЭЗПВ содержит целый ряд допущений. Поэтому принятая модель лишь в той или иной степени функционально соответствует реальным условиям формирования ЭЗПВ, но полностью им неадекватна. В связи с этим подсчитанные эксплуатационные запасы могут иметь различную достоверность.

Первая официально утвержденная классификация эксплуатационных запасов подземных вод по степени достоверности, подготовленная Н. А. Плотниковым при участии Г. Н. Каменского и Г. В. Богомолова, появилась в 1950 г. В дальнейшем она была изменена и переутверждена в 1960 г. В настоящее время в СССР, как уже указывалось в гл. 1, действует «Классификация эксплуатационных запасов и прогнозных ресурсов подземных вод», утвержденная постановлением Совета Министров СССР в феврале 1983 г.

Классификация эксплуатационных запасов и прогнозных ресурсов подземных вод устанавливает единые для Союза ССР принципы подсчета и государственного учета ЭЗПВ по степени их изученности и народнохозяйственному значению; условия, определяющие подготовленность месторождений подземных вод для промышленного освоения, а также основные принципы оценки прогнозных ресурсов подземных вод.

В соответствии с действующей «Классификацией» эксплуатационные запасы подразделяются на две группы: б а л а н с о в ы е, использование которых в настоящее время экономически целесообразно, и з а б а л а н с о в ы е, использование которых в настоящее время экономически нецелесообразно или технически и технологически невозможно, но которые в дальнейшем могут быть переведены в балансовые.

«Классификацией эксплуатационных запасов и прогнозных ресурсов подземных вод» предусматривается их подразделение на разведанные эксплуатационные запасы — категории $A$, $B$ и $C_1$, предварительно оцененные — категория $C_2$ и прогнозные ресурсы — категория $P$.

**14.1. Соотношение различных категорий запасов, определяющих подготовленность МППВ к промышленному освоению**

| Категории запасов | Группа сложности месторождений | | |
|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 |
| $A + B$, | 80 | 80 | 70 |
| в том числе $A$ не менее | 40 | 20 | — |
| $C_1$ | 20 | 20 | 30 |

«Классификация» предусматривает, что целесообразная степень изученности месторождений подземных вод для промышленного освоения определяется в зависимости от сложности гидрогеологических условий, а также экономических факторов — затрат средств и времени, требуемых на производство гидрогеологических работ. В связи с этим для охарактеризованных в главе 13 трех групп месторождений подземных вод по сложности гидрогеологических условий установлены дифференцированные требования к обеспеченности проектируемых водозаборных сооружений разведанными запасами подземных вод различных категорий. В целом разведанные месторождения подземных вод считаются подготовленными к промышленному освоению при соблюдении следующих условий:

а) балансовые эксплуатационные запасы подземных вод утверждены ГКЗ СССР или ТКЗ (при условии, если стоимость строительства водозаборных сооружений превышает установленные нормы);

б) утвержденные в установленном порядке балансовые эксплуатационные запасы подземных вод должны иметь следующее соотношение различных категорий в процентах (табл. 14.1).

Указанные соотношения должны быть достигнуты на участках водозаборных сооружений, намечаемых к строительству для удовлетворения заявленной первоочередной потребности в воде. Запасы для удовлетворения перспективной потребности должны быть разведаны не ниже категории $C_1$. Значительное превышение количества запасов категории $A$ на месторождения 1 и 2 групп по сравнению с указанными без должного обоснования нецелесообразно. Возможность промышленного освоения разведанных месторождений всех групп при меньших соотношениях балансовых запасов различных категорий по сравнению с указанными устанавливается ГКЗ СССР (ТКЗ) при утверждении запасов на основе экспертизы материалов подсчета запасов при наличии в этих материалах соответствующих обоснований;

в) качество подземных вод изучено по всем показателям в соответствии с требованиями их использования в народном хозяйстве; доказано, что в течение расчетного срока эксплуатации качество воды будет постоянным или будет изменяться в допустимых пределах;

г) условия эксплуатации подземных вод изучены с детальностью, обеспечивающей получение данных, необходимых для составления проекта водозаборного сооружения.

В соответствии с «Классификацией» материалы подсчета ЭЗПВ должны содержать:

оценку общих эксплуатационных запасов подземных вод месторождений, включая запасы категории $C_2$;

рекомендации по режиму подземных вод, а для водозаборных сооружений хозяйственно-питьевого назначения — по их санитарной охране;

оценку влияния работы проектируемого водозаборного сооружения на существующие водозаборные сооружения, а также на поверхностные водные источники и экологические условия исследуемого района.

Применение «Классификации эксплуатационных запасов и прогнозных ресурсов подземных вод» к подземным водам, используемым для хозяйственно-питьевого и технического водоснабжения, орошения земельных массивов и обводнения сельскохозяйственных угодий, определяется «Инструкцией по применению классификации эксплуатационных запасов подземных вод к месторождениям питьевых и технических вод», утвержденной председателем ГКЗ СССР 19 января 1984 г. и являющейся обязательной для всех организаций, ведущих разведку подземных вод с целью оценки их запасов.

Инструкцией ГКЗ для каждой группы месторождений подземных вод по степени сложности гидрогеологических условий установлены дифференцированные требования для обоснования запасов различных категорий. При этом основным критерием выделения запасов категорий $A$, $B$ и $C_1$ для всех групп является надежность определения их количества, качества и условий эксплуатации. Под последними понимается количество водозаборных скважин (или других каптажных сооружений), система их расположения, глубина залегания динамического уровня и производительность отдельных скважин.

В соответствии с требованиями инструкции ГКЗ СССР к запасам категории $A$ относятся запасы, изученные с детальностью, позволяющей надежно прогнозировать их количество, качество и условия эксплуатации. К категории $B$ следует относить запасы, изученность которых позволяет при надежной оценке из количества и качества дать приближенный прогноз условий эксплуатации. К категории $C_1$ относятся запасы, изученные с детальностью, позволяющей произвести приближенную оценку их количества, качества и условий эксплуатации на расчетный срок водопотребления. Запасы категории $C_2$ устанавливаются на основании общих геолого-гидрогеологических данных в пределах выявленного месторождения подземных вод при ориентировочном установлении их количества, качества и условий эксплуатации.

Прогнозные эксплуатационные ресурсы категории $P$ оцениваются в пределах крупных гидрогеологических структур (артезианских бассейнов, гидрогеологических массивов и т. д.) на основании общих геолого-гидрогеологических представлений, теоретических предпосылок и по результатам региональных оценок эксплуатационных ресурсов подземных вод.

Между разными категориями разведанных запасов ($A$, $B$ и $C_1$) установлены следующие различия. Если для запасов категории $A$ должны быть определены надежно не только их количество и качество, но и схема водозаборного сооружения (количество скважин, их производительность), то для запасов категории $B$ при надежном определении их количества и качества могут быть допущены приближенные

решения в схеме водозаборного сооружения (может потребоваться иное количество скважин с отличной от принятой производительностью). В то же время для запасов категории $C_1$ могут быть допущены некоторые отклонения от оцененной величины при определении их количества и возможных изменений качества воды.

Оценка разведанных эксплуатационных запасов подземных вод категорий $A$, $B$ и $C_1$ проводится применительно к рациональной схеме водозаборного сооружения. При подсчете предварительно оцененных запасов категории $C_2$ следует учитывать возможность перевода этих запасов в более высокие категории по результатам дальнейших разведочных работ или опыта эксплуатации водозаборного сооружения. Так, при оценке запасов категории $C_2$ по общему водному балансу подземных вод месторождения следует проверить возможность их отбора водозаборными сооружениями при заданном допустимом понижении уровня.

Надежность определения количества и качества воды и условий эксплуатации в свою очередь зависит от степени изученности гидрогеологических условий (включая граничные условия водоносных горизонтов, источники формирования эксплуатационных запасов, качество воды), расчетных гидрогеологических параметров и технических условий отбора воды. В связи с этим в классификации эксплуатационных запасов и прогнозных ресурсов для каждой категории сформулированы требования к изученности гидрогеологических условий (граничных условий, источников формирования, качества подземных вод) и гидрогеологических параметров, а в инструкции по применению классификации определены условия для отнесения подсчитанных запасов к той или иной категории.

Отнесение эксплуатационных запасов подземных вод к отдельным категориям при выполнении сформулированных в «Классификации» требований производится по фактическим либо расчетным дебитам действующих водозаборных сооружений, опробованных и проектных скважинах или других выработок, каптированных родников.

При этом возможность получения расчетного дебита из скважин, входящих в схему водозаборного сооружения и обосновывающих запасы, подготовленные к промышленному освоению, должна быть доказана прямым опытом (откачкой с дебитом, близким к проектному). В других опробованных откачками точках допускается двухкратная экстраполяция опытного расхода. В тех случаях, когда фактический дебит при опробовании превышает расчетный (проектный), для обоснования запасов принимается расчетный дебит.

На предварительно разведанных участках при наличии единичных опробованных скважин запасы категории $A$ и $B$ по этим скважинам не выделяются, а данные их опробования используются для обоснования запасов категорий $C_1$ и $C_2$.

Возможность отнесения расчетного дебита проектных и опробованных скважин к категориям $A$ и $B$ определяется степенью сложности гидрогеологических условий. Так, для месторождений (участков) первой группы допускается отнесение к категории $A$ расчетных дебитов скважин, смежных с опробованными, если дебит опробованных сква-

жин не менее 50 % расчетного, при этом на одну опробованную скважину должно приходиться не более 2-х проектных; к категории *B* могут быть отнесены дебиты проектных скважин, удаленных на двухкратное расстояние от опробованных. Для месторождений второй группы к категории *A* могут быть отнесены только проектные дебиты опробованных скважин (также если их дебит при опробовании составлял не менее 50 % расчетного), а к категории *B* — расчетные дебиты проектных скважин смежных с опробованными. Для месторождений третьей группы запасы категории *A* могут быть оценены только по фактическому дебиту опытно-эксплуатационной откачки, проведенной при стабильном гидродинамическом и гидрохимическом режимах при условии доказательства возможности сохранения установленной стабильности на расчетный срок эксплуатации, а запасы категории *B* — также по фактическому дебиту опытно-эксплуатационной откачки, проводимой при нестационарном режиме, если доказана возможность получения данного количества воды кондиционного качества на весь расчетный срок эксплуатации.

Категоризация эксплуатационных запасов подземных вод соответствующих дебитам родников, эксплуатация которых предлагается путем их непосредственного каптирования, проводится в зависимости от срока наблюдений за их расходом и обоснованности определения расходов родников заданной вероятности превышения (85—95 %) в зависимости от категории водозаборного сооружения. Для категорий *A* расчетные дебиты родников должны быть обоснованы данными многолетних наблюдений, при этом продолжительность наблюдений должна учитывать естественную изменчивость родникового стока, для категории *B* — данными наблюдений продолжительностью не менее года, для категории $C_1$ — данными периодических наблюдений в меженный период. Подробно условия отнесения запасов к различным категориям изложены в Инструкции по применению «Классификации».

Классификацией эксплуатационных запасов подземных вод устанавливаются также условия, при которых утвержденные в ГКЗ СССР (ТКЗ) эксплуатационные запасы подлежат переутверждению:

а) в случаях пересмотра требований к качеству воды, изменения водохозяйственных, природных или санитарных условий, применительно к которым было произведено утверждение запасов, если это существенно отражается на целевом использовании подземных вод в народном хозяйстве, экономичности или масштабах эксплуатации;

б) при увеличении или уменьшении балансовых запасов категорий $A + B + C_1$ более чем на 20 % в результате дополнительных разведочных работ или проведения наблюдений за режимом подземных вод на участке эксплуатируемого водозаборного сооружения;

в) при превышении фактического срока эксплуатации над принятым при утверждении запасов расчетным сроком, если при этом возникает необходимость реконструкции водозаборных сооружений в связи с изменением условий эксплуатации.

Анализ охарактеризованных выше основных положений «Классификации эксплуатационных запасов и прогнозных ресурсов подземных вод» и «Инструкции» по ее применению к месторождениям

питьевых и технических вод показывает, что ряд этих положений (количество категорий, необходимое соотношение категорий для месторождений различных групп сложности и др.), принятых по аналогии с другими полезными ископаемыми, недостаточно учитывает специфические особенности подземных вод.

Это вносит неопределенность в требования к изученности запасов разных категорий, снижает эффективность работ по обоснованию использования подземных вод в народном хозяйстве и затрудняет учет использования запасов разных категорий.

Поэтому в 1987 г. группой специалистов ВСЕГИНГЕО (Б. В. Боревский, Л. В. Боревский, В. П. Стрепетов, Л. С. Язвин) и геологического управления «Геолминвод» (Л. К. Гохберг) выполнен критический анализ действующей «Классификации» и разработаны предложения по изменению принципов категоризации запасов, которые излагаются ниже.

Действительно, в связи с тем, что «Классификация» устанавливает нормативную изученность ЭЗПВ, определяющую подготовленность месторождения к промышленному освоению на базе требуемого соотношения запасов различных категорий и требования к детальности изученности запасов каждой категории, рационализация методики разведочных работ во многом зависит именно от обоснованности требований классификации. Этот вопрос становится особенно актуальным в связи с переводом геологоразведочных работ на новый хозяйственный механизм, в котором основой планирования и финансирования геологоразведочных работ является полезный геологический результат. Отсюда вытекает необходимость четкого и однозначного определения конечных результатов каждого этапа.

Оптимальными следовало бы считать такие требования к различным категориям запасов по степени их изученности, при которых каждая выделяемая категория отвечала бы определенному целевому назначению различных этапов изучения и освоения запасов подземных вод в народном хозяйстве. Одновременно каждому такому этапу должна отвечать и определенная степень изученности запасов подземных вод с учетом сложности гидрогеологических и геолого-технических условий их формирования и разработки месторождений. Это позволило бы увязать целевое назначение различных стадий геологоразведочного процесса с требованиями к изученности запасов соответствующих категорий.

Рассмотрим с этих позиций ряд основных положений действующей «Классификации».

1. Согласно действующей «Классификации» (аналогично с другими видами полезных ископаемых) по степени изученности выделяются эксплуатационные запасы подземных вод категорий $A$, $B$, $C_1$ и $C_2$ и прогнозные ресурсы категории $P$. В основу разделения запасов на категории положены детальность изученности геологического строения и гидрогеологических условий разведуемого месторождения и участка водозаборного сооружения, источников формирования эксплуатационных запасов и граничных условий, расчетных гидрогеологических параметров, принимаемых при подсчете запасов, качества подзем-

ных вод, технологических свойств (для промышленных и теплоэнергетических вод), обоснованность проектных расходов водозаборных сооружений и т. п. Для различных групп сложности месторождений по гидрогеологическим условиям и условиям разработки приняты дифференцированные требования по количественному соотношению различных категорий запасов, определяющих возможность проектирования водозаборных сооружений.

В связи с изложенным наиболее принципиальными являются вопросы: обоснованность требований «Классификации» к изученности запасов подземных вод различных категорий и подготовленность разведанных месторождений к промышленному освоению.

В отличие от месторождений подземных вод на месторождениях других видов полезных ископаемых выделяются блоки с запасами различных категорий, достоверность подсчета которых может быть проверена при последующей разработке месторождения, причем их величина в любом блоке практически не зависит от степени изученности и условий разработки запасов в других блоках.

На месторождениях подземных вод в связи со специфическими особенностями формирования эксплуатационных запасов, обусловленными подвижностью подземных вод, их восполняемостью, значительным превышением области формирования запасов над площадью разработки, возможностью изменения качества и т. д., **эксплуатационные запасы различных категорий не могут быть отобраны раздельно.** Это связано с тем, что расход водозаборного сооружения формируется при совместном участии всех источников формирования запасов независимо от степени их изученности, а условия функционирования водозаборных сооружений определяются совокупностью **всех факторов формирования запасов в пределах области развития депрессии.** Даже при высокой степени изученности точек заложения проектных скважин, обосновывающих запасы высоких категорий, водоотбор может формироваться в первую очередь за счет слабо изученных источников. Все это не позволяет проверить даже по данным эксплуатации обоснованность выполненного подразделения запасов на категории и, следовательно, обоснованно установить требования к соотношению запасов различных категорий, определяющие подготовленность месторождения к промышленному освоению.

В связи с этим выделение на разведанной части месторождения запасов различных категорий всегда условно в отношении требований к изученности источников их формирования и формально в отношении обоснованности дебитов проектных скважин. Поэтому в основу разделения запасов на категории практически положена только степень изученности точек заложения проектных скважин, в то время как эксплуатационные понижения и качество отбираемой воды в подавляющем большинстве случаев будут определяться не столько расходом данной скважины, сколько другими факторами, равноценными для скважин с выделенными запасами категорий $A$, $B$ или $C_1$, независимо от категорий, по которым классифицированы их дебиты.

Охарактеризованные особенности запасов подземных вод не нашли отражения в требованиях «Классификации» к изученности запасов

различных категорий и обусловили неопределенность этих требований.

2. В соответствии с «Классификацией» проектирование и строительство водозаборных сооружений осуществляется одновременно на запасах категорий $A$, $B$ и $C_1$, подготовленных к промышленному освоению. Если учесть, что запасы различных категорий не могут быть отобраны раздельно, теряет смысл разделение на категории запасов, подготовленных к промышленному освоению. Тем более, что освоение запасов производится не в соответствии с их категорийностью, а по очередям, включающим одновременно запасы различных категорий.

3. При анализе затрат на разведку ЭЗПВ, подготовленных к промышленному освоению, невозможно оценить раздельно стоимость разведки запасов различных категорий.

Это объясняется тем, что при анализе экономической эффективности выполненных работ определяется не стоимость разведки единицы запасов различных категорий, а только стоимость разведки единицы запасов подготовленных к промышленному освоению, независимо от соотношения в них запасов различных категорий. Соответственно невозможно установить экономически обоснованное соотношение запасов различных категорий, определяющее степень подготовленности месторождения к промышленному освоению.

4. Принятая формулировка ЭЗПВ — «расход рациональных в технико-экономическом отношении водозаборных сооружений при заданном режиме эксплуатации» не может быть отнесена к запасам, не подготовленным к промышленному освоению. С другой стороны, требования «Классификации» к изученности условий эксплуатации для разных категорий принципиально различны, причем только для категории $A$ требуется изученность, обеспечивающая «получение исходных данных, необходимых для составления проекта разработки месторождения». Формально это означает, что проектирование должно быть произведено только на основе запасов категории $A$, хотя они составляют менее половины от общей требуемой суммы запасов, а на месторождениях III группы сложности их обоснования по данным разведочных работ вообще не требуется.

5. Нечетко выражено понятие забалансовых запасов. Так, например, к забалансовым относятся те ЭЗПВ, «использование которых в настоящее время экономически нецелесообразно или технически невозможно...». Тогда по принятому в «Классификации» определению они не являются эксплуатационными, так как не могут быть получены рациональными в технико-экономическом отношении водозаборными сооружениями.

6. Существующая «Классификация» допускает утверждение ЭЗПВ на неограниченный срок эксплуатации. Вместе с тем опыт эксплуатации МПВ свидетельствует о невозможности сохранения условий эксплуатации неопределенно длительное время вследствие изменений водохозяйственной обстановки, техники добычи, технологии переработки, способа сброса вод и т. д. Кроме того, она предусматривает переутверждение эксплуатационных запасов по истечении срока эксплуатации, принятого при их утверждении, только в случае необ-

ходимости реконструкции водозаборных сооружений. Это обстоятельство сдерживает разработку и реализацию оптимальных схем использования ресурсов подземных вод при изменении водохозяйственной обстановки и не нацеливает эксплуатирующие организации на проведение наблюдений за режимом отбора ЭЗПВ.

В связи с вышеизложенным целесообразно изменить принципы разделения ЭЗПВ на категории и оценки подготовленности разведанных запасов к промышленному освоению. При этом в отличие от действующей «Классификации» каждая категория должна иметь не только различную степень изученности, но и вполне определенное **целевое назначение**, что позволит исключить существующую «приблизительность» и «неопределенность» как в различиях между требованиями к запасам отдельных категорий, так и в их формулировках.

Уточнений требуют и существующие определения (формулировки) эксплуатационных запасов и прогнозных ресурсов подземных вод, понятий балансовых и забалансовых запасов.

Разработанные предложения приводятся ниже.

**Категория *P*, прогнозные эксплуатационные ресурсы** — количество (расход) подземных вод определенного качества и целевого назначения, которое может быть получено в пределах оцениваемой площади распространения продуктивного водоносного горизонта (комплекса), перспективного для дальнейшего народнохозяйственного освоения, и отражающее потенциальные возможности использования подземных вод в народном хозяйстве применительно к существующей, проектируемой или условной схеме размещения водопотребителей.

Ресурсы категории *P* являются основой для постановки поисково-оценочных работ на площадях, перспективных для нахождения месторождений подземных вод соответствующего целевого назначения и масштаба, а также составления схем комплексного использования и охраны водных ресурсов, водохозяйственных балансов.

Ресурсы категории *P* подсчитываются по результатам геолого-гидрогеологических, гидрологических, водно-балансовых, гидрохимических и геофизических исследований на основе общих теоретических предпосылок и гидрогеологических представлений об условиях их формирования.

При подсчете прогнозных ресурсов категории *P* технико-экономические аспекты обоснования системы размещения и схемы водозаборных сооружений специально не рассматриваются и устанавливаются на основании принципиальных оценок возможности использования подземных вод в народном хозяйстве.

**Эксплуатационные запасы** — количество (расход) подземных вод, которое может быть получено геолого-экономически обоснованными водозаборными сооружениями при условии соответствия их целевому использованию в народном хозяйстве.

Эксплуатационные запасы подземных вод в соответствии со степенью изученности целесообразно разделить на три категории: *C*, *B* и *A*, каждая из которых имеет различное целевое народнохозяйственное назначение.

**Категория** *С* — эксплуатационные запасы, предназначенные для обоснования отдельных схем использования подземных вод в целях обеспечения ими объектов народного хозяйства различного назначения, социально-экологического и технико-экономического обоснования целесообразности использования подземных вод, в том числе разработки временных кондиций; постановки дальнейших разведочных работ на месторождении; разработки комплекса мероприятий, технологически не связанных с эксплуатацией подземных вод, но определяющих возможность их дальнейшего использования (в случае выделения забалансовых запасов).

Запасы категории *С* могут учитываться при проектировании водозаборных сооружений в сечении водоводов, мощности насосных станций, конструкций водозаборных скважин, установлении размеров зоны санитарной охраны в объеме, соответствующем заявленной перспективной потребности в воде. Запасы категории *С* должны быть изучены в степени, позволяющей охарактеризовать промышленную ценность разведанных запасов, возможность целевого использования подземных вод в народном хозяйстве и основные особенности условий эксплуатации с учетом влияния водоотбора на окружающую среду и разработать ТЭО целесообразности использования подземных вод в разведанном количестве. Запасы категории *С* подсчитываются применительно к обобщенным системам водозаборных сооружений.

**Категория** *В* — подготовленные для промышленного освоения эксплуатационные запасы, предназначенные для обоснования проектов водозаборных сооружений и выделения капиталовложений на их строительство. Запасы категории *В* должны быть детально изучены с обоснованием исходных данных для составления проекта разработки месторождения.

Запасы категории *В* подсчитываются с учетом конкретных технико-экономических и геолого-технических схем и конструкций водозаборных сооружений, заданного графика водоотбора, существующей водохозяйственной обстановки, ее проектируемых изменений и заданных допустимых пределов влияния на окружающую среду.

**Категория** *А* — эксплуатационные запасы, подсчитанные по производительности действующих водозаборных сооружений (запасы уже используемые в народном хозяйстве). Запасы категории *А* на ранее разведанных месторождениях являются, как правило, уже используемой частью запасов категории *В*. Они выделяются для учета использования разведанных запасов подземных вод в народном хозяйстве и оценки достоверности выполненных по данным разведки гидрогеологических прогнозов.

В качестве забалансовых выделяются запасы, решение о целесообразности освоения которых на период оценки не может быть принято по технико-экономическим и социально-экологическим причинам, таким как отчуждение земель, природоохранные ограничения, отсутствие рациональной технологии извлечения ценных компонентов, изменение социально-экономической конъюнктуры, необходимость регулирования поверхностного стока и т. п. Указанные вопросы должны

быть решены до постановки специальных разведочных работ по обоснованию запасов категории *В*.

Специфика подземных вод как полезного ископаемого, связанного с внешней средой, условия которой, в том числе антропогенные (водохозяйственная обстановка, источники загрязнения и т. д.) весьма изменчивы, делает нецелесообразным утверждение запасов категорий *А* и *В* на неограниченный срок эксплуатации. Их целесообразно утверждать только на расчетный срок, который при отсутствии его регламентации по опыту оценки и освоения запасов может быть принят равным 25 годам, как это практикуется в настоящее время. Запасы категории *С* и прогнозные ресурсы *Р* могут оцениваться как на заданный срок эксплуатации, так и на условные сроки 25, 50 лет.

Учитывая не только степень изученности, но и целевое назначение запасов различных категорий, проектирование и строительство водозаборных сооружений предлагается осуществлять на запасах категории *В*, которые всегда должны быть подготовленными к промышленному освоению. Запасы категории *С* в объеме заявленной перспективной потребности могут учитываться при проектировании наиболее капиталоемких сооружений (насосные станции, водоводы, установки по улучшению качества воды и т. п.), технологически не связанных со схемой и конструкцией водозаборов.

Поскольку разделение разведанных месторождений на 3 группы сложности по геолого-гидрогеологическим условиям на практике себя оправдало, его целесообразно сохранить. При этом для каждой группы следует установить дифференцированные требования к обоснованию запасов категорий *В* и *С* с учетом практической возможности и экономической целесообразности детального изучения условий формирования запасов. Основным требованием для всех групп остается получение материалов, необходимых для проектирования водозаборных сооружений на базе запасов категории *В* и оценки их общей величины на базе запасов категории *С*.

Необходимое количество точек, опробованных в схеме водозаборного сооружения, должно определяться только степенью неоднородности водовмещающих пород на участке водозабора, а не группой сложности месторождения.

При отнесении месторождений к различным группам сложности должны учитываться сложность гидрогеологических условий относительно обоснования точек заложения водозаборных скважин, схематизации условий для целей прогнозирования не только режима работы водозаборных сооружений и возможных изменений качества подземных вод, но и относительно влияния эксплуатации на окружающую среду, а также геолого-технические и конструктивные особенности и сложность систем водозаборных сооружений. Соответствующие требования должны найти отражение при изменении существующих инструкций по применению классификации эксплуатационных запасов и прогнозных ресурсов подземных вод.

Предлагаемый подход позволяет дать геолого-экономические требования к изученности различных категорий запасов и повысить эффективность разведочных работ за счет исключения объемов, направ-

ленных на удовлетворение формальных требований для обоснования соотношения запасов разных категорий, определяющих подготовленность месторождений к промышленному освоению.

**Контрольные вопросы.** 1. Для каких целей производится разделение ЭЗПВ на разные категории? 2. Чем принципиально различаются запасы, подготовленные и неподготовленные к промышленному освоению? 3. Почему подразделение ЭЗПВ на категории в отрыве от экономического обоснования их использования не целесообразно? 4. В чем заключаются формальные положения действующей «Классификации»? 5. На каких принципах основаны новые предложения по категоризации ЭЗПВ и чем они отличаются от положенных в основу действующей «Классификации»? 6. Может ли измениться изученность ЭЗПВ под влиянием антропогенной деятельности? 7. Как влияет изученность негативных последствий эксплуатации на подготовленность ЭЗПВ к промышленному освоению? 8. Почему для МПВ различных групп сложности устанавливаются различные требования к детальности изученности ЭЗПВ?

# ГЛАВА 15. РЕГИОНАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РЕСУРСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

## 15.1. ЗАДАЧИ И СОДЕРЖАНИЕ РЕГИОНАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ

Региональная оценка эксплуатационных ресурсов подземных вод проводится для отдельных административных и природных районов, а также для всей страны в целом с целью гидрогеологического обоснования схем комплексного использования и охраны водных ресурсов. Материалы региональной оценки позволяют обосновывать перспективные планы размещения и дальнейшего развития производительных сил на территории СССР.

Важнейшей задачей региональной оценки является прогноз перспектив использования ресурсов подземных вод для водоснабжения, орошения и обводнения пастбищ.

Кроме установления потенциальных возможностей использования подземных вод с учетом влияния их отбора на поверхностный сток и другие компоненты окружающей среды региональная оценка служит научной основой планирования поисково-разведочных работ в пределах отдельных регионов.

Необходимость региональной оценки эксплуатационных ресурсов подземных вод возрастает в связи с непрерывным увеличением их отбора и усиливающимся в связи с этим взаимодействием водозаборных сооружений. В таких условиях обеспеченность эксплуатационных запасов подземных вод на каждом отдельном участке нельзя рассматривать независимо от общих эксплуатационных ресурсов водоносной системы в целом в пределах рассматриваемого региона.

Региональная оценка эксплуатационных ресурсов подземных вод сводится к определению потенциальных и перспективных ресурсов, понятие о которых дано в гл. 1. Здесь необходимо подчеркнуть, что перспективные ресурсы характеризуют возможности использования подземных вод при заданной схеме водоотбора *независимо от степени*

*их разведанности.* В общем случае перспективные эксплуатационные ресурсы ($Q_{пер}$) равны сумме разведанных эксплуатационных запасов ($Q_{раз}$) категорий $A + B + C_1$, предварительно оцененных запасов ($Q_{п.о}$) категории $C_2$ и прогнозных эксплуатационных ресурсов ($Q_{пр}$) категории Р:

$$Q_{пер} = Q_{раз} + Q_{п.о} + Q_{пр}. \quad (15.1)$$

Если в пределах рассматриваемой площади отсутствуют разведанные и предварительно оцененные запасы, то

$$Q_{пер} = Q_{пр}. \quad (15.2)$$

При постоянной величине $Q_{пер}$ с увеличением величины разведанных запасов происходит уменьшение величин предварительно оцененных запасов и прогнозных ресурсов.

В связи с тем, что оценка потенциальных и перспективных эксплуатационных ресурсов подземных вод проводится в пределах крупных гидрогеологических регионов, она получила название региональной оценки (в отличие от локальной оценки эксплуатационных запасов в пределах отдельных месторождений или участков).

В СССР впервые региональная оценка эксплуатационных ресурсов подземных вод была выполнена в начале 60-х годов для гидрогеологического обоснования генеральной схемы комплексного использования и охраны водных ресурсов страны. В результате этой работы была составлена карта модулей эксплуатационных ресурсов подземных вод масштаба 1 : 5 000 000. При этом по существу были определены общие перспективные эксплуатационные ресурсы подземных вод применительно к равномерной сетке размещения водозаборных сооружений. В связи с малым шагом сетки (5 км) перспективные ресурсы в основном соответствовали потенциальным.

В 70—80-х годах в системе Министерства геологии СССР проводились и проводятся работы по оценке эксплуатационных ресурсов подземных вод отдельных районов страны, имеющих важное народнохозяйственное значение. Эта оценка проводится с учетом схемы существующего и планируемого водопотребления и заявленных потребностей на перспективу, т. е. соответствует оценке перспективных ресурсов.

## 15.2. МЕТОДИКА РЕГИОНАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РЕСУРСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Важнейшей особенностью этого этапа работ является акцентирование внимания на выявлении региональных особенностей формирования эксплуатационных ресурсов.

Общие принципы и методика региональной оценки эксплуатационных ресурсов подземных вод впервые были разработаны Н. Н. Биндеманом и Ф. М. Бочевером в связи с составлением генеральной схемы комплексного использования и охраны водных ресурсов СССР. В дальнейшем при проведении региональных оценок по отдельным регионам принципы и методика оценки совершенствовались с учетом

специфических особенностей формирования эксплуатационных ресурсов подземных вод в различных природных условиях.

Методика региональной оценки эксплуатационных ресурсов подземных вод зависит от типа распространенных на исследуемой территории выявленных и потенциальных месторождений подземных вод. Для месторождений подземных вод, имеющих четкие геологические границы и автономные источники формирования ЭЗПВ, применяется методика, принципиальной особенностью которой является возможность изолированного (без учета взаимодействия) рассмотрения каждого предполагаемого месторождения. В тех случаях, когда оцениваются водоносные горизонты, имеющие широкое площадное распространение, при котором границы предполагаемых месторождений проводятся условно (с учетом возможности использования земельных участков, по границам зон санитарной охраны, с учетом границ зон с водами некондиционного состава), применяется методика оценки, предусматривающая возможность учета взаимодействия отдельных месторождений друг с другом. Первая группа представляет собой месторождения, приуроченные, как правило, к небольшим по площади структурам, ограниченным в плане массивам трещинных и трещинно-карстовых пород, небольшим конусам выноса, разделенным межконусными понижениями, небольшим межгорным и внутригорным впадинам, бассейнам грунтовых вод небольших песчаных массивов и т. п. Сюда же могут быть отнесены горные районы, эксплуатация подземных вод в которых осуществляется путем каптажа отдельных крупных родников.

Ко второй группе обычно относят артезианские бассейны, крупные конусы выноса, речные долины и др.

Предполагаемые месторождения первой группы выделяются по анализу геолого-гидрогеологических условий, климатических и водохозяйственных факторов. При региональной оценке ресурсов подземных вод в них необходимо прежде всего по имеющимся данным с учетом ранее разведанных месторождений и опыта эксплуатации действующих водозаборных сооружений установить, какие типы и подтипы месторождений могут формироваться в оцениваемом районе и дальнейший анализ проводить применительно к возможности выявления этих типов.

Для выявления месторождений проводится комплексный анализ геолого-гидрогеологических и физико-географических условий антропогенной обстановки оцениваемой территории с использованием дешифрирования космоаэроснимков, данных о морфоструктурной обстановке, гидрографии, палеогеографических условиях осадконакопления, геологического развития, структурно-тектонических и неотектонических особенностей, литолого-фациальной изменчивости водовмещающих пород. На базе такого анализа выявляются основные критерии и признаки, обусловливающие расположение участков повышенной водопроводимости наиболее благоприятных условиий питания подземных вод в естественной и нарушенной эксплуатацией обстановке.

После выделения возможных месторождений по геолого-структур-

ным принципам и ориентировочного определения площадей этих месторождений масштаб их эксплуатационных ресурсов приближенно может быть установлен по общему балансу подземных вод. Для этих целей используются модули подземного стока (модули динамических ресурсов подземных вод), а в тех случаях, когда эксплуатационные ресурсы могут формироваться и за счет сработки естественных запасов,— ориентировочные значения коэффициента водоотдачи. Балансовым расчетом устанавливаются потенциальные эксплуатационные ресурсы. Основным методом оценки перспективных эксплуатационных ресурсов выявленных месторождений этой группы является метод гидрогеологической аналогии. Для использования этого метода для каждого выявленного месторождения устанавливаются месторождения-аналоги со сходным геологическим строением, условиями и источниками формирования эксплуатационных ресурсов и проводится сопоставление этих факторов. В тех случаях, когда эти условия и факторы достаточно близки, оценка перспективных эксплуатационных ресурсов может быть выполнена по величине площадного или линейного модуля эксплуатационных ресурсов (гл. 9). Если в количественном отношении какие-либо факторы могут существенно изменяться (мощности водовмещающих пород, гранулометрический состав, возможное понижение уровня), в величину модуля эксплуатационных ресурсов необходимо внести соответствующие коррективы на основании критериев подобия. При отсутствии месторождения-аналога оценка прогнозных эксплуатационных ресурсов может быть выполнена гидродинамическим методом, при использовании которого расчетная схема и гидрогеологические параметры принимаются приближенно по анализу общей геолого-гидрогеологической обстановки.

В горных районах оценку потенциальных эксплуатационных ресурсов следует выполнять по величине модуля родникового стока. Для оценки перспективных эксплуатационных ресурсов должны быть выделены родники, которые целесообразно каптировать, и определены их среднегодовые и среднесуточные дебиты, приведенные к соответствующим минимальным величинам (гл. 6).

Общие перспективные ресурсы подземных вод всего гидрогеологического региона в условиях, когда выявленные предполагаемые месторождения не взаимодействуют друг с другом, определяются суммированием подсчитанных прогнозных ресурсов отдельных месторождений.

Региональная оценка перспективных эксплуатационных ресурсов территорий, где продуктивные горизонты имеют широкое площадное распространение, проводится в пределах крупных артезианских бассейнов платформенных и горно-складчатых областей, речных долин, конусов выноса, бассейнов грунтовых вод и других структур, где может быть выявлено большое количество месторождений, взаимодействующих друг с другом. Она осуществляется, как правило, гидродинамическим методом, при этом в зависимости от конкретных гидрогеологических условий могут быть использованы как аналитические методы, так и методы математического моделирования. Оценка потенциальных эксплуатационных ресурсов проводится с использованием основного балансового уравнения (гл. 3).

Аналитические расчеты при оценке перспективных ресурсов целесообразно выполнять в относительно простых гидрогеологических условиях для водоносных горизонтов с выдержанными фильтрационными свойствами и простыми граничными условиями. В сложных гидрогеологических условиях, особенно при наличии достаточно мощного водоотбора и оформившихся крупных депрессионных воронок, более предпочтительным является использование методов математического моделирования (гл. 8). Несомненно, широкие возможности, которые представляет метод математического моделирования, целесообразно использовать только при достаточной геолого-гидрогеологической изученности оцениваемого бассейна, в том числе и при наличии опыта эксплуатации.

Анализ геолого-гидрогеологической изученности и наличие опыта эксплуатации предопределяют возможность и необходимость выделения в пределах оцениваемых территорий месторождений подземных вод, характеризующихся различной степенью изученности. В этих случаях в пределах региона могут быть выделены: а) месторождения с разведанными запасами, где изученность эксплуатационных запасов соответствует категориям $A$, $B$ и $C_1$ и где также могут быть выделены предварительно оцененные запасы категории $C_2$; б) месторождения с предварительно оцененными запасами категории $C_2$; в) предполагаемые месторождения с прогнозными эксплуатационными ресурсами категории $P$.

Методика региональной оценки прогнозных эксплуатационных ресурсов подземных вод крупных гидрогеологических регионов имеет свою специфику в зависимости от особенностей различных типов крупных гидрогеологических структур.

В артезианских бассейнах платформенного типа региональная оценка эксплуатационных ресурсов, как правило, должна выполняться методом математического моделирования в связи с многослойностью строения геологического разреза. Состав необходимой информационной характеристики рассмотрен в гл. 5, а принципы оценки — в гл. 8.

Для крупных артезианских бассейнов, где имеется опыт эксплуатации, первоначально в крупном масштабе на модели решается обратная задача для одной или нескольких ограниченных площадей, для которых путем анализа опыта эксплуатации действующих водозаборных сооружений определяются условия формирования эксплуатационных ресурсов и уточняются расчетные параметры водовмещающих и слабопроницаемых отложений. В дальнейшем полученные закономерности распространяются на всю оцениваемую территорию с аналогичными условиями и выполняется моделирование всего бассейна с учетом расположения эксплуатируемых, разведанных и предполагаемых месторождений подземных вод.

В артезианских бассейнах платформенного типа с достаточно простыми условиями формирования ресурсов региональная оценка, как уже указывалось, выполняется аналитически применительно к принимаемой схеме размещения месторождений различной степени изученности. Для целей расчета вся оцениваемая площадь разбивается

на блоки, количество которых соответствует числу эксплуатируемых, разведанных и предполагаемых месторождений и отдельных водозаборных участков, т. е. площадь распространения водоносного горизонта покрывается равномерной или неравномерной сеткой водозаборных сооружений.

При выборе шага сетки расположения скважин следует исходить из: 1) густоты имеющихся и проектируемых водопотребителей городских и сельских населенных пунктов на оцениваемой территории; 2) природной обстановки, определяющей условия и возможность размещения будущих объектов водопотребления (характер рельефа местности, заболоченность, наличие месторождений полезных ископаемых, застроенность и пр.); 3) целевого назначения будущего водопотребления (водоснабжение или орошение).

В зависимости от перечисленных условий шаг сетки наиболее часто может приниматься от 5 до 25—30 км. В ряде районов могут быть использованы неравномерные сетки, шаг которых по площади не остается постоянным (с учетом расположения конкретных водопотребителей).

При условии одновременной длительной эксплуатации водозаборных сооружений, расположенных по сетке, между ними сформируются водоразделы подземных вод, где градиенты потока равны нулю. В результате область формирования дебита каждого водозаборного сооружения в сетке будет ограничена как бы непроницаемой стенкой. Согласно Н. Н. Биндеману, в этом случае можно представить, что каждое водозаборное сооружение будет работать в замкнутом круговом блоке с непроницаемыми боковыми границами. Если принять шаг сетки равным $\Delta x$, радиус блока — радиусу круга равновеликого по площади с квадратным блоком сетки, то

$$R_б = \frac{\Delta x}{\sqrt{\pi}} = 0{,}565\Delta x. \qquad (15.3)$$

Дебит водозаборного сооружения, работающего внутри блока, будет формироваться за счет естественных запасов подземных вод блока, динамических и привлекаемых ресурсов, приходящихся на площадь блока.

В соответствии с приближенным решением Маскета — Бочевера понижение уровня в водозаборном сооружении, расположенном в центре блока, может быть определено по формуле

$$S = \frac{Q - Q_{доп}}{\pi km} \frac{at_р}{R_б^2} + \frac{Q}{2\pi km} \ln \frac{R_б}{r_к}, \qquad (15.4)$$

где $S$ — понижение уровня; $Q$ — расход водозаборного сооружения; $Q_{доп}$ — часть расхода водозаборного сооружения, обеспечиваемая за счет восполняемых запасов (динамических, искусственных и привлекаемых ресурсов); $a$ — коэффициент пьезопроводности; $km$ — водопроводимость; $t_р$ — расчетный срок эксплуатации; $R_б$ — радиус блока; $r_к$ — приведенный радиус водозаборного сооружения (большого колодца).

Если $Q \leqslant Q_{доп}$, то первый член в формуле (15.4) следует принимать равным нулю, и эта формула преображается в формулу Дюпюи:

$$S = \frac{Q}{2\pi km} \ln \frac{R_б}{r_к}. \qquad (15.5)$$

Определение расхода водозабора, расположенного в центре блока, с учетом формул (15.4) и (15.5) рекомендуется выполнять в следующей последовательности:

1. По модулю восполняемых ресурсов рассчитывается $Q_{доп}$ (питание, поступающее на площадь блока).

2. По формуле (15.5) рассчитывается понижение уровня $S$ при $Q = Q_{доп}$ и полученная величина сравнивается с допустимым понижением. Если рассчитанное понижение оказывается больше, чем допустимое ($S_{доп}$), то по формуле (15.5) определяется расход, соответствующий допустимому понижению. Эта величина принимается за расход водозабора.

3. Если рассчитанное по формуле (15.5) понижение оказывается меньше допустимого, то производится расчет расхода водозаборного сооружения с учетом сработки емкостных запасов по формуле, полученной из (15.4), которая для напорных вод имеет вид:

$$Q = \frac{\left[S_{доп} + Q_{доп} \frac{t_р}{\pi R_б^2 \mu^*}\right] \pi R_б^2}{\frac{t_р}{\mu^*} + \frac{R_б^2}{2km} \ln \frac{R_б}{r_к}}, \qquad (15.6)$$

для безнапорных вод формула (15.6) принимает следующий вид:

$$Q = \frac{\left[S_{доп}\left(1 - \frac{S_{доп}}{2H}\right) + Q_{доп} \frac{t_р}{\pi R_б^2 \mu}\right] \pi R_б^2}{\frac{t_р}{\mu} + \frac{R_б^2}{2kH} \ln \frac{R_б}{r_к}}, \qquad (15.7)$$

а для напорно-безнапорных вод:

$$Q = \frac{H' + Q_{доп} \frac{t_р}{\pi R_б^2 \mu}}{\frac{t_р}{\mu^*} + \frac{R_б^2}{2km} \ln \frac{R_б}{r_к}} + \frac{(S_{доп} - H')\left(1 - \frac{S_{доп} - H'}{2m}\right)}{\frac{t_р}{\mu} + \frac{R_б^2}{2km} \ln \frac{R_б}{r_к}}, \qquad (15.8)$$

где H′ — напор над кровлей водоносного горизонта.

Второй член уравнения представляет собой часть дебита, которая обеспечивается за счет осушения водоносного горизонта.

4. Суммарные перспективные эксплуатационные ресурсы оцениваемого горизонта рассчитываются по формуле

$$Q_э = \sum_{i=1}^{n} Q_i, \qquad (15.9)$$

где $Q_i$ — дебит водозаборного сооружения в $i$-м блоке ($i = 1, 2, 3, \ldots, n$); $n$ — число блоков на оцениваемой площади.

Для расчетов по приведенным формулам радиус водозаборного со-

оружения $r_к$ определяют исходя из величины площади, необходимой для размещения такого количества скважин, которое может обеспечить заданную производительность. При равномерной сетке этот радиус можно с некоторым запасом принимать равным 10 м, что соответствует водозаборному сооружению, состоящему примерно из двух-трех скважин.

Расчетный срок эксплуатации принимается обычно в 25 и 50 лет. При проведении расчетов предполагается, что фиктивная сеть водозаборных сооружений включается в эксплуатацию одновременно. Поскольку данные условия практически не могут быть реализованы, подсчитанные перспективные ресурсы на 25 и 50 лет будут обеспечены на значительно больший срок.

Величина допустимого понижения принимается в соответствии с рекомендациями, приведенными в гл. 4.

Рассмотрим особенности региональной оценки эксплуатационных ресурсов для районов с другими типами месторождений подземных вод.

В пределах конусов выноса водозаборные сооружения наиболее часто представляют собой линейные ряды, расположенные параллельно контуру выклинивания подземных вод в областях с достаточно высокими фильтрационными свойствами водовмещающих пород. Расчеты выполняются применительно к такой схеме водоотбора. Однако это не исключает, что водозаборные сооружения могут быть расположены по сетке, шаг которой определяется гидрогеологическими условиями и размещением существующих и потенциальных водопотребителей. Тогда расчеты выполняются также, как в артезианских бассейнах. При оценке эксплуатационных ресурсов в этих условиях необходимо учитывать планируемые изменения водохозяйственной обстановки.

Региональная оценка эксплуатационных ресурсов подземных вод месторождений речных долин имеет ряд особенностей, связанных с размерами этих долин и условиями взаимосвязи подземных и поверхностных вод. В узких речных долинах при активной связи подземных и поверхностных вод, когда весь период эксплуатации основным источником формирования эксплуатационных запасов является поверхностный сток, оценка эксплуатационных ресурсов проводится применительно к водозаборному сооружению, представляющему линейный ряд, расположенный параллельно реке. В пределах долины выделяются отдельные месторождения, границы которых устанавливаются с учетом застроенности территории, возможности организации зон санитарной охраны, изменения водопроводимости водовмещающих пород и т. д. По каждому месторождению определяются линейные модули эксплуатационных ресурсов. Их величина определяется гидродинамическим методом по формулам Маскета — Лейбензона или Форхгеймера, а также по данным эксплуатации. Величина модуля используется для оценки перспективных эксплуатационных ресурсов в пределах выделенных месторождений подземных вод.

Если гидрогеологические условия, определяющие интенсивность привлечения поверхностного стока на участке действующего водоза-

борного сооружения и оцениваемого месторождения, различны (мощности, состав и коэффициент фильтрации водовмещающих пород, русловых отложений, достигнутое и возможное понижение уровня), то в величину линейного модуля следует вводить коррективы. Определенная по линейному модулю (или по расчету водозаборных сооружений) величина прогнозных эксплуатационных ресурсов должна быть сопоставлена с пропускной способностью русла реки и с общей величиной поверхностного стока. При этом учитываются рекомендации, приведенные в гл. 13.

При оценке перспективных эксплуатационных ресурсов речных долин с периодическим или ограниченным в меженный период поверхностным стоком в случае регулирующей емкости следует учитывать возможность использования емкостных запасов в маловодный период при условии их восполнения в паводки.

Работы по региональной оценке выполняются преимущественно камеральным путем; наиболее ответственным этапом работ является подготовка исходных данных.

Работы по подготовке исходных данных и проведению региональной оценки эксплуатационных ресурсов подземных вод рекомендуется проводить примерно в такой последовательности:

1. Производится сбор необходимых гидрометеорологических, геологических, гидрогеологических и геофизических материалов по оцениваемой территории. Это различные геологические и гидрогеологические карты и разрезы, результаты геофизических работ, данные по разведке подземных вод и эксплуатации водозаборных сооружений, бурению и опробованию скважин, о минерализации и химическом составе подземных вод, данные наблюдений за режимом подземных вод, родниковым стоком, режимом речного стока в многолетнем разрезе на гидрометрических створах и т. п.

2. На основании анализа и обобщения фактического материала выделяются водоносные горизонты, пригодные для водоснабжения, для которых строятся карты уровенной поверхности, величин напоров над кровлей, мощностей и литологии водовмещающих пород и разделяющих слабопроницаемых пластов, глубин залегания горизонтов и статических уровней, а также гидрохимические карты.

3. Собираются данные по опорным значениям гидрогеологических параметров, а при необходимости производится переинтерпретация опорных данных опытных работ и наблюдений за режимом эксплуатации действующих водозаборных сооружений, согласно рекомендациям, приведенным в гл. 5.

4. Выполняются гидрогеологическое районирование и типизация выделенных районов по условиям распространения продуктивных водоносных горизонтов и особенностям формирования эксплуатационных ресурсов подземных вод оцениваемых горизонтов. При этом учитываются данные о геологическом строении, изменении водопроводимости пород в плане и разрезе, емкостных свойствах пород, особенностях взаимосвязи оцениваемых водоносных горизонтов с вышеи нижележащими, а также поверхностными водоемами и водотоками.

Первоначальной основой районирования является схематизация

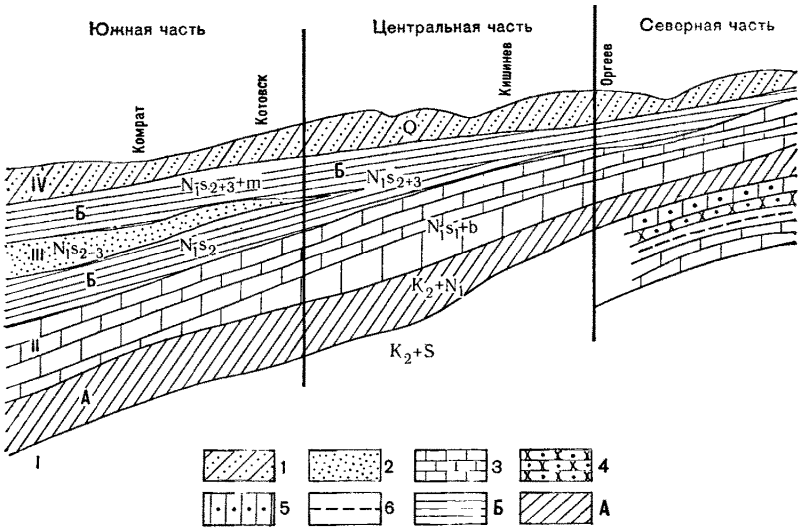



Рис. 68. Схематизация разреза Днестровско-Прутского междуречья для районирования территории при региональной оценке прогнозных эксплуатационных ресурсов подземных вод:

Водоносные горизонты и комплексы в отложениях:— I — мел-силурийских ($K_2 + S$), II — баден-сарматских ($N_1s_1 + b$); III — конгериевых ($N_1s_{2-3}$); IV — четвертичных ($Q$) Слабопроницаемые пласты: А — глинистая толща между I и II водоносными комплексами; Б — толща, перекрывающая II-й водоносный комплекс Литологические разности пород: *1* — покровные супеси, суглинки; *2* — пески; *3* — известняки; *4* — песчаники; *5* — алевролиты; *6* — аргиллиты

разреза оцениваемой территории с выделением районов с различными продуктивными горизонтами и разным их количеством, по которым должны быть оценены перспективные эксплуатационные ресурсы подземных вод. Дальнейшее более дробное районирование производится на основе схематизации разреза для выделения оцениваемых водоносных горизонтов (комплексов).

На рис. 68 приведен пример такой схематизации разреза, выполненный для региональной оценки эксплуатационных ресурсов междуречья Днестр — Прут, являющегося западным крылом Причерноморского артезианского бассейна (по данным Л. П. Шараевского, 1977). Как видно, каждый выделенный район (Северная, Южная и Центральная части междуречья) характеризуется различным строением разреза в пределах оцениваемой глубины и различным количеством и сочетанием оцениваемых горизонтов. Такая схематизация определила все дальнейшие построения, в том числе количество карт водопроводимости, напоров и т. д. и площади их картирования.

5. При необходимости выполняются специальные гидрологические, буровые, опытные, геофизические, лабораторные и прочие работы на опорных участках, направленные на выявление основных принципиальных особенностей формирования эксплуатационных ресурсов в типовых районах.

6. Производится оценка динамических ресурсов подземных вод. Для этого можно использовать следующие методы: генетического расчленения гидрографов рек; расчета расхода потока по формулам динамики подземных вод; определения подземного стока по изменению меженного расхода реки между двумя гидрометрическими створами; определения величины питания по данным наблюдений за режимом подземных вод в естественных условиях, по величине инфильтрации, родниковому стоку и др.

7. Производится выбор наиболее рационального метода оценки перспективных эксплуатационных ресурсов подземных вод и обоснование природной гидрогеологической модели оцениваемого региона.

8. Для выделения расчетных районов дается обоснование необходимых расчетных гидрогеологических параметров (водопроводимости, водоотдачи, пьезопроводности, уровнепроводности, динамических и привлекаемых ресурсов, мощности водоносного горизонта, величины допустимого понижения уровня воды, расчетного срока эксплуатации водозаборных сооружений).

9. Принимается расчетная схема размещения водозаборных сооружений по площади распространения водоносного горизонта.

10. Выполняется подсчет эксплуатационных ресурсов подземных вод по участкам, водоносным горизонтам, региону в целом.

11. Оценивается возможное изменение речного стока при эксплуатации подземных вод.

12. Производится выделение разведанных, предварительно оцененных эксплуатационных запасов категорий $A$, $B$, $C_1$ и $C_2$ и прогнозных ресурсов категории $P$. Апробация прогнозных эксплуатационных ресурсов категории $P$ производится Министерством геологии СССР.

**Контрольные вопросы.** 1. Для каких целей проводится оценка прогнозных эксплуатационных ресурсов? 2. Каково различие между перпективными и потенциальными эксплуатационными ресурсами? 3. Чем региональные оценки эксплуатационных ресурсов отличаются от локальных оценок ЭЗПВ? 4. Какие принципы положены в основу методики региональной оценки эксплуатационных ресурсов? 5. В каких гидрогеологических условиях наиболее полно проявляются специфические особенности региональной оценки? 6. Что могут дать дополнительные полевые исследования для целей региональной оценки эксплуатационных ресурсов? 7. Чем отличается методика региональной оценки при локальном и широком площадном развитии оцениваемых водоносных горизонтов? 8. Какая информационная характеристика необходима при проведении работ по региональной оценке ресурсов в различных условиях?

## ГЛАВА 16. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ОБОСНОВАНИЯ ПРИ ОЦЕНКЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

### 16.1. ЗАДАЧИ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ

При разведке и оценке ЭЗПВ большая роль отводится технико-экономическому обоснованию целесообразности использования подземных вод и выбору наиболее рациональной схемы эксплуатации. В частности, технико-экономические расчеты проводятся для решения

следующих задач: 1) выбора источника водоснабжения; 2) выбора участка (участков) водозаборного сооружения и водоносного горизонта (горизонтов); 3) обоснования рациональной схемы водозаборного сооружения.

**Технико-экономическое обоснование выбора источника водоснабжения.** Выбор источников хозяйственно-питьевого водоснабжения в СССР должен производиться в соответствии с ГОСТ 2761—84. Как следует из требований этого ГОСТа, для целей хозяйственно-питьевого водоснабжения должны максимально использоваться подземные воды. Поэтому при наличии местных источников подземных вод, удовлетворяющих заявленную потребность в воде, сопоставления технико-экономических показателей использования подземных вод с вариантом забора воды из поверхностных водоисточников не требуется. В то же время, если в непосредственной близости нет подземных вод питьевого качества в требуемом количестве или нет необходимости транспортировать подземную воду из удаленных на десятки (а иногда и сотни) километров месторождений, а также при варианте эксплуатации подземных вод с их искусственным подпитыванием, выбрать источник водоснабжения нельзя без соответствующего технико-экономического сопоставления вариантов использования поверхностных и подземных вод.

Такое же обоснование необходимо и при использовании подземных вод для производственного водоснабжения и орошения.

В этих случаях технико-экономические расчеты выполняются специализированными проектными организациями, а их результаты должны быть отражены в заявках на проведение детальных разведочных работ. При выборе в качестве источника водоснабжения подземных вод необходимо установить и по возможности учесть в технико-экономическом обосновании максимальное расстояние от водозаборного участка до потребителя, максимальные глубины эксплуатационных скважин и динамических уровней в них при эксплуатации, минимально допустимые дебиты скважин, режим и срок действия водозаборного сооружения, возможные негативные последствия от влияния эксплуатации на окружающую среду.

**Технико-экономическое обоснование выбора участка водозаборного сооружения и водоносного горизонта.** В некоторых случаях возникает альтернативная возможность удовлетворения заявленной потребности в воде за счет использования одного из нескольких месторождений подземных вод или различных водоносных горизонтов. Такие месторождения могут быть расположены на разных расстояниях от потребителя, отличаться величинами гидрогеологических параметров, определяющих конструкцию и схему водозаборных сооружений, характеризоваться различными условиями защищенности подземных вод от загрязнения, что связано с необходимостью проведения неодинаковых по затратам защитных мероприятий и т. д. Например участок, наиболее приближенный к потребителю, может оказаться менее водообильным, чем отдаленный участок, в связи с чем отбор заданного количества воды потребует создания более дорогостоящего водозаборного сооружения, состоящего из большого количества скважин и тре-

бующего для своего размещения отчуждения земель большей площади. В других случаях для устройства водозаборного сооружения подземных вод и его эксплуатации могут потребоваться мероприятия по охране подземных вод или защите других компонентов окружающей среды.

В таких условиях выбор участка и водоносного горизонта также должен быть обоснован технико-экономическими расчетами.

Необходимо иметь в виду, что в ряде случаев природоохранные соображения могут приводить к необходимости отдавать предпочтение участкам с худшими технико-экономическими показателями.

**Выбор рациональной схемы водозаборного сооружения.** При проведении разведочных работ и оценке ЭЗПВ технико-экономические обоснования имеют наибольшее значение при выборе рациональной схемы водозаборного сооружения. Это объясняется прежде всего тем, что сама оценка ЭЗПВ требует выбора рациональной схемы водозаборного сооружения. Кроме того, детальная разведка подземных вод должна проводиться применительно к рациональной схеме водозаборного сооружения, обоснованной по результатам предварительной разведки. Это позволяет не только повысить целесообразность детальных разведочных работ, но и существенно увеличить их экономическую эффективность.

Схема водозаборного сооружения включает в себя тип водозаборного сооружения (скважины, шахтные колодцы, галереи, лучевые водозаборы), системы их расположения, количество водозаборных сооружений, скважин или каптажей другого типа, расстояния между ними, режим водоотбора, дебит отдельных скважин (колодцев, галерей и т. д.), максимальную глубину динамического уровня. Например, один и тот же расход может быть получен различным количеством скважин, расположенных на различной площади и с неодинаковой глубиной динамического уровня воды. Выбор рациональной схемы должен быть обоснован соответствующими технико-экономическими расчетами. Сопоставление различных вариантов как при выборе источника водоснабжения, так и при обосновании участка водозабора и его рациональной схемы в соответствии с Инструкцией по определению экономической эффективности капитальных вложений в строительство (СН 423-71) проводится по величине годовых приведенных затрат (годовой приведенной стоимости продукции).

Приведенные затраты вычисляются по формуле

$$C_i = P_i + EK_i, \tag{16.1}$$

где $C_i$ — приведенные затраты; $P_i$ — годовые эксплуатационные расходы (себестоимость продукции); $E$ — нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений (величина, обратная нормативному сроку окупаемости), принимается равным 0,15; $K_i$ — сумма капитальных затрат; $i$ — индекс варианта.

В результате сопоставления выбирается вариант с минимальной величиной приведенных затрат ($C_{\min}$) Годовой экономический эффект $Э$, от реализации этого варианта по сравнению с другим вариантом,

имеющим номер $i$, рассчитывается по формуле

$$Э_r = C_i - C_{\min}. \qquad (16.2)$$

В связи с тем что гидрогеологам при оценке ЭЗПВ приходится заниматься в основном сравнением вариантов для выбора рациональной схемы водозаборного сооружения, в следующем параграфе рассматривается методика соответствующего технико-экономического обоснования.

### 16.2. МЕТОДИКА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО ОБОСНОВАНИЯ РАЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ ВОДОЗАБОРНОГО СООРУЖЕНИЯ

Как было показано в гл. 4, при оценке определяется возможность получения заданного расхода водозаборного сооружения при условии, что понижение уровня подземных вод на конец расчетного срока эксплуатации не превысит величины допустимого понижения. В некоторых случаях при фиксированной площади расположения водозаборных сооружений можно также определить максимально возможный дебит при выполнении условия $S_р \leqslant S_{доп}$.

При решении обеих задач следует учитывать, что одна и та же производительность водозаборного сооружения может быть получена при различных схемах водозаборного сооружения — могут меняться количество скважин, система и площадь их расположения, расстояние между скважинами, их конструкция (диаметр, глубина, длина фильтра), понижение уровня, дебит скважин. Поскольку дебит водозаборного сооружения (ЭЗПВ) зависит от многих факторов, выбрать оптимальный вариант по минимуму приведенных затрат можно сопоставлением большого количества вариантов. Решение этой задачи, относящейся к типу так называемых оптимизационных, обычно может быть осуществлено при помощи ЭВМ с использованием метода линейного или нелинейного программирования. Существуют также приближенные аналитические зависимости, позволяющие выбрать оптимальный вариант путем определения минимума приведенных затрат при изменении какого-либо одного, наиболее важного, параметра, например расстояния между скважинами.

Выбор рациональной схемы водозаборного сооружения проводится в такой последовательности:

а) исходя из гидрогеологических условий и потребного количества воды, выбирают несколько вариантов размещения водозаборных скважин, расстояний между ними, дебита скважин и их количества.

Для каждого варианта проводятся расчеты производительности водозабора и определяется величина понижения уровня воды в скважинах;

б) проводятся приближенные экономические расчеты выбранных вариантов; определяются капитальные затраты и эксплуатационные расходы, при этом могут учитываться только те затраты и расходы, которые меняются в связи с изменением схемы водозаборного сооружения;

в) производится расчет приведенных затрат (по каждому варианту) по формуле (16.1); по приведенным затратам выполняется сопоставление вариантов с учетом гидрогеологических условий месторождения и условий его эксплуатации.

Рассмотрим методику определения капитальных затрат и эксплуатационных расходов при технико-экономическом обосновании выбора схемы водозабора на примере наиболее часто используемых на практике водозаборных сооружений, состоящих из вертикальных скважин.

**Капитальные затраты.** При технико-экономическом обосновании рациональной схемы водозаборного сооружения, проводимом при оценке ЭЗПВ, необходимо учитывать капитальные затраты на строительство и оборудование водозаборных скважин ($K_{скв}$), на строительство, оборудование и монтаж насосных станций 1-го подъема (на скважинах) ($K_{н.с}$), на строительство отводящих и сборных водоводов в пределах водозаборного сооружения ($K_в$), автомобильных дорог и линий электропередач вдоль водозаборных сооружений ($K_д$), инфильтрационных бассейнов, отстойников, насосных станций или самотечных водоводов для вариантов с искусственным пополнением подземных вод ($K_и$).

Строительство и оборудование других сооружений (насосные станции 2-го подъема, магистральный трубопровод, сборный и резервный резервуар, хлораторные, станции обезжелезивания, внешние коммуникации и т. д.) обычно не влияют на выбор оптимальной схемы, так как при заданной производительности водозаборного сооружения затраты на их сооружения одинаковы. В то же время в отдельных случаях на схему водозаборного сооружения могут оказывать существенное влияние затраты, связанные с изъятием земель под водозаборные сооружения и зону санитарной охраны и переносом зданий и сооружений, расположенных на отводимых землях. Эти затраты должны учитываться в той мере, в какой они различаются в сравниваемых вариантах.

В тех случаях, когда проектируется водозабор без искусственного пополнения запасов и затраты, связанные с отчуждением земель и переносом сооружений, могут не учитываться, капитальные затраты ($K$) определяются по формуле

$$K = K_{скв} + K_{н.с} + K_в + K_д. \qquad (16.3)$$

**Эксплуатационные расходы.** Годовые эксплуатационные расходы $Р_{год}$, которые необходимо учитывать при технико-экономическом обосновании водозаборных сооружений, складываются из расходов на электроэнергию ($Р_э$), на заработную плату ($Р_з$), на текущий ремонт ($Р_р$), на непредвиденные расходы ($Р_н$) и на амортизационные отчисления ($Р_а$):

$$Р_{год} = Р_з + Р_э + Р_р + Р_н + Р_а. \qquad (16.4)$$

Величина $Р_з$ определяется по формуле

$$Р_з = Р'_з \alpha_з \alpha_с, \qquad (16.5)$$

где $P'_з$ — заработная плата по штатному расписанию; $\alpha_з$ — районный коэффициент к зарплате; $\alpha_с$ — коэффициент, учитывающий отчисления на социальное страхование (в настоящее время принимается равным 1,08).

Заработная плата административного и производственного персонала ($P_з$) определяется в соответствии с Рекомендациями по составлению смет эксплуатационных расходов внеплощадных систем водоснабжения и канализации промышленных предприятий Союзводоканалпроекта Госстроя СССР, 1976 г.

Годовые эксплуатационные расходы на электроэнергию ($P_э$) могут быть определены по упрощенной формуле

$$P_э = \frac{QH}{\eta_0}\left(Ц_1 + \frac{Ц_2}{T}\right), \qquad (16.6)$$

где $Q$ — производительность водозабора, м³/сут; $H$ — высота подъема воды в скважине, м; $\eta_0$ — к. п. д. насосных установок, принимаемый равным 0,7—0,75; $Ц_1$ и $Ц_2$ — плата соответственно за 1 кВт · ч и за 1 кВт установленной мощности в рублях, принимаемая по действующим в данной местности тарифам; $T$ — среднее время работы насосных установок в течение года, принимаемое равным 6500—6700 часам.

Амортизационные отчисления ($P_а$) определяются как процент балансовой стоимости основных фондов. Для упрощенных расчетов можно принимать средние проценты амортизационных отчислений: по строительной части зданий и сооружений — 5 и по оборудованию и монтажу — 11 % в год.

Расходы на текущий ремонт ($P_р$) принимаются в размере 1 % общих капитальных затрат, а непредвиденные расходы ($P_н$) — в размере 6 % суммы расходов на заработную плату, электроэнергию и текущий ремонт.

С учетом всего вышеизложенного формула (16.4) может быть представлена в следующем виде:

$$P_{год} = \left[P'_з\alpha_з\alpha_с + \frac{QH}{\eta_0}\left(Ц_1 + \frac{Ц_2}{T}\right) + 0{,}01K\right]1{,}06 + P_а. \qquad (16.7)$$

Все данные, необходимые для расчетов капитальных затрат и эксплуатационных расходов, следует принимать по справочной литературе либо получать в местных водохозяйственных и проектных организациях соответствующих министерств, а также использовать материалы по водозаборам-аналогам. В отдельных случаях целесообразно привлекать для этих расчетов специализированные организации.

Рассмотрим пример технико-экономического обоснования выбора рациональной схемы водозаборного сооружения (И. С. Глазунов, 1973). Для водоснабжения города, потребность в воде которого составляет 750 *л*/с, предварительно разведан водоносный горизонт аллювиальных отложений первой надпойменной террасы, ширина которой превышает несколько километров, мощность гравийно-галечниковых водовмещающих пород изменяется от 12,6 до 16,5 м и в среднем составляет 14 м. Глубина залегания уровня изменяется от 8 до 11 м. По качеству вода отвечает требованиям соответствующих ГОСТов. Горизонт характеризуется высокой водообильностью. Де-

**16.1. Основные данные по трем вариантам водозабора**

| № варианта | Количество скважин | Расстояние между скважинами, м | Общая длина ряда скважин, м | Пронзводительность скважин, л/с | Количество резервных скважин |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 25 | 300 | 7200 | 30 | 5 |
| 2 | 30 | 200 | 5800 | 25 | 6 |
| 3 | 41 | 100 | 4000 | 18,5 | 8 |

**16.2. Капитальные затраты на строительство водозабора, тыс. руб.**

| № варианта | $К_{скв}$ | $К_{н.с}$ | $К_в$ | $К_д$ | К |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 66,810 | 206,6 | 236,3 | 1044,0 | 1553,7 |
| 2 | 72,612 | 260,9 | 204,8 | 840,0 | 1378,0 |
| 3 | 98,833 | 297,2 | 144,9 | 576,0 | 1116,9 |

**16.3. Эксплуатационные расходы, тыс. руб.**

| № варианта | $Р_з$ | $Р_э$ | $Р_р$ | $Р_н$ | $Р_а$ | $Р_{год}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 18,0 | 65,8 | 15,5 | 6,8 | 72,4 | 177,7 |
| 2 | 19,2 | 63,1 | 13,8 | 5,8 | 67,3 | 169,2 |
| 3 | 21,8 | 70,0 | 11,2 | 6,2 | 59,5 | 168,7 |

биты разведочных скважин составляли 25—50 л/с при понижениях до 1,5—2,5 м. Средний коэффициент фильтрации равен 100 м/сут. По условиям возможного строительства проектный водозабор представляет собой линейный ряд скважин, расположенных на расстоянии 500 м от реки. Допустимое понижение равно 8 м.

Гидродииамические расчеты, проведенные по схеме полуограниченного пласта с контуром постоянного напора, показали, что заданное количество воды может быть получено тремя вариантами водозаборного сооружения (табл. 16.1).

Как видно из таблицы, увеличение количества скважин с уменьшением дебита каждой скважины позволяет существенно уменьшить длину водозаборного ряда. Таким образом, увеличение стоимости строительства и оборудования скважин может компенсироваться уменьшением стоимости водоводов и автомобильной дороги.

В табл. 16.2 приведены результаты расчетов капитальных затрат по разным вариантам.

Из этой таблицы следует, что по общим капитальиым затратам наиболее рациональным является третий вариант. В этом случае решающим явилось уменьшение длины водозаборного ряда.

Теперь определим изменение эксплуатационных расходов (табл. 16.3).

Как следует из этой таблицы, наименьшими эксплуатационными расходами характеризуется третий вариант. В этом случае небольшое увеличение расходов, связанных с затратами на зарплату и электроэнергию, компенсируется уменьшеннем главным образом амортизациониых отчисленнй (уменьшение расходов на электроэнергию во 2-м варианте по сравнению с 1-м связано с более высоким к. п. д. используемого во 2-м варианте насоса). Поскольку в этом случае по третьему варианту получены миинмальные капитальные затраты и эксплуатационные расходы, то и приведенные затраты по этому варианту будут минимальными, и он может быть принят в качестве оптнмального. Приведенные затраты и годовой экономический эффект, расчитаиные по формулам (16.1) и (16.2), приведены в табл. 16.4.

Как видно из рассмотренного примера, оптимальным оказался вариант более компактного размещения скважин, что связано с уменьшением капитальных затрат иа строительство водоводов и дорог и сокращением амортизационных отчислений.

Как показали исследоваиия И. С. Глазунова, при выборе рациональных схем водозаборных сооружений из эксплуатационных расходов наиболее важны затраты на электроэнергию и амортизационные отчисления, а из капитальных затрат — стоимость строительства автодорог.

В приведенном примере в связи с небольшой и постоянной величиной понижения уровня во всех рассмотренных вариантах (8 м) затраты на электроэнергию изменялись весьма незначительно. В связи с этим рассмотрим еще один пример выбора оптимального варианта водозабора подземных вод для одного из городов Белоруссии (анализ выполнен Б. И. Коробейниковым). Месторождение подземных вод приурочено к многослойной толще, гидрогеологические условия которого можно было представить в виде геофильтрационной схемы с перетеканием при постоянном уровне в питающем пласте. Водопроводимость основного водоносного горизонта — 250 м²/сут, коэффициент перетекания ($B$) — 3200 м. Суммарный расход водозаборного сооружения 50 тыс. м³/сут. С использованием ЭВМ были определены приведенные затраты для 9 вариантов водозаборных сооружений, характеризующихся различным количеством скважин (от 13 до 27) и длиной водозаборного ряда (от 1500 до 6000 м). Ниже, в табл. 16.5, приведены результаты расчетов для четырех вариантов.

**16.4. Затраты и годовой экономический эффект, руб.**

| № варианта | К | $Р_{год}$ | $С_I$ | $Э_i$ от реализации 3-го варианта |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 1553,8 | 177,7 | 410,8 | 74,6 |
| 2 | 1378,0 | 169,2 | 375,9 | 39,7 |
| 3 | 1116,9 | 168,7 | 336,2 | — |

Как следует из таблицы, минимальными приведенными затратами характеризуется первый вариант с наименьшим количеством скважин и длиной водозаборного ряда. Несмотря на то что по энергозатратам этот вариант почти в 1,5 раза дороже, чем 3 и 4-й варианты, стоимость дороги и водоводов существенно меньше, а при сопоставлении 1 и 4-го вариантов — и скважин, делает первый вариант наиболее предпочтительным. Многочисленные сопоставления показали, что в подавляющем большинстве случаев наиболее целесообразным является вариант, характеризующийся минимальной длиной (площадью) водозабора и наименьшим количеством скважин, причем этот вывод сделан без учета уменьшения площади отчуждения земель, что еще больше повышает эффективность компактных вариантов водозаборных сооружений.

В связи с тем что технико-экономическое обоснование выбора оптимальной схемы водозаборных сооружений проводится по результатам предварительной разведки, а в некоторых случаях — поисковых работ, важное значение приобретают вопросы влияния достоверности определения основных гидрогеологических параметров на величину приведенных затрат.

Такая работа для рассмотренного выше примера была проведена Б. И. Коробейниковым. Для каждого исследуемого варианта водозаборного сооружения были рассчитаны приведенные затраты при определенном диапазоне изменения гидрогеологических параметров В процессе расчетов варьировались значения водопроводимости и

**16.5. Приведенные затраты по вариантам**

| № варианта | Длина водозабора, м | Количество скважин | Капитальные затраты, тыс. руб. | | | | Понижение уровня в центре водозабора, м | Эксплуатационные расходы, тыс. руб. | | Приведенные затраты, тыс. руб., $С_I$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | $К_{скв} + К_{н.с}$ | $К_в$ | $К_д$ | общие | | общие, $Р_{год}$ | в том числе, $Р_э$ | |
| 1 | 1500 | 13 | 194,8 | 135,3 | 90,0 | 420,1 | 84,0 | 157,3 | 132,2 | 220,3 |
| 2 | 1500 | 27 | 384,5 | 141,6 | 90,0 | 616,1 | 83,0 | 165,3 | 122,3 | 257,7 |
| 3 | 6000 | 13 | 198,6 | 390,7 | 360,0 | 949,3 | 47,7 | 125,4 | 87,0 | 267,8 |
| 4 | 6000 | 27 | 386,0 | 400,6 | 360,0 | 1146,6 | 43,3 | 137,6 | 81,6 | 309,6 |

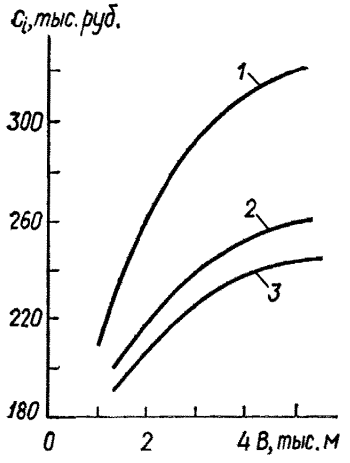



Рис. 69. График зависимости приведенных затрат от фактора перетекания $B$ при различных значениях водопроводимости продуктивного горизонта, м²/сут: *1* — 200; *2* — 250; *3* — 300

параметра перетекания $B$. Изменение этих параметров при фиксированной длине водозаборного сооружения и его производительности сказывается на величине понижения уровня подземных вод, тем самым на стоимости электроэнергии на подъем воды (рис. 69).

Как видно из графика, правильное определение величины водопроводимости имеет весьма большое значение при оценке приведенных затрат. Так, изменения водопроводимости от 200 до 250 м²/сут, т. е. на 25 % первоначальной величины, приводят к изменению приведенных затрат на 60 тыс. руб., что практически пропорционально изменению понижения.

Существенно меньшую роль играет изменение параметра перетекания. В приведенном примере изменение этого параметра в три раза приводит к изменению приведенных затрат на 15—30 %.

В связи с этим при планировании разведочных работ необходимо учитывать возможные погрешности экономической оценки различных вариантов водозаборного сооружения, связанные с неправильным выбором расчетных параметров, и уделять наибольшее внимание определению тех показателей, которые играют наибольшую роль в выборе оптимальных в технико-экономическом отношении вариантов.

**Контрольные вопросы.** 1. Для решения каких задач проводятся технико-экономические расчеты при оценке эксплуатационных запасов подземных вод? 2. Что является критерием выбора оптимального в технико-экономическом отношении варианта водозабора. 3. Из каких составляющих складываются капитальные затраты и эксплуатационные расходы при технико-экономической оценке вариантов водозаборного сооружения? 4. Как влияет точность определения гидрогеологических параметров на правильный выбор оптимального варианта? 5. В чем заключается экономическое содержание оценки ЭЗПВ?

## ГЛАВА 17. ОСОБЕННОСТИ РАЗВЕДКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОДЗЕМНЫХ ВОД (МПВ)

### 17.1. СТРУКТУРА И ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ РАЗВЕДКИ

**Цели и содержание разведки.** Под разведкой МПВ (как и других полезных ископаемых) понимается совокупность геологоразведочных работ и связанных с ними исследований для выявления, всестороннего изучения и геолого-экономической оценки месторождений, проводимых с целью достижения требуемой степени их подготовленности к промышленному освоению.

Разведка МПВ включает:

1) оценку принципиальных возможностей решения поставленной задачи с учетом регламентированных ограничений, связанных с освоением месторождений, и степенью их изученности;

2) выбор путей, методов и средств решения задачи;

3) получение и интерпретацию необходимой информации в рамках решения данной целевой задачи для оценки ЭЗПВ с детальностью изученности, регламентируемой инструктивными документами;

4) обоснование природной пространственно-временной гидрогеологической модели условий формирования ЭЗПВ;

5) оценку ЭЗПВ и степени их подготовленности к промышленному освоению.

*Разведка МПВ (по аналогии с любой разведкой) имеет своей целью воссоздание по дискретной информации целостной картины формирования ЭЗПВ.*

Указанные цели и задачи определяют общую структуру разведки как единой системы, включающей весь комплекс полевых и камеральных исследований, начиная с оценки возможностей решения поставленной задачи на базе анализа состояния изученности района (месторождения) и кончая оценкой степени подготовленности месторождения к промышленному освоению. В таком понимании проектирование, поиски, разведка и оценка ЭЗПВ являются неотъемлемыми составными частями разведки.

Оценкой степени подготовленности месторождения к промышленному освоению завершается лишь данный конкретный этап разведки. В дальнейшем она непрерывно продолжается в процессе эксплуатации месторождения, по данным которой осуществляется корректировка режима эксплуатации и доразведка для перевода запасов низких категорий в высокие и наращивания величины запасов. В необходимых случаях ставятся специальные разведочные работы для доизучения месторождения по площади или на глубину, а также источников формирования ЭЗПВ. Кроме того, само разделение запасов по степени изученности на различные категории, а также нестабильность во времени основных факторов формирования запасов также предопределяют необходимость непрерывности процесса разведки и постоянного наращивания информации.

В общем виде основными элементами структуры разведки подземных вод (рис. 70) являются:

1. Построение рабочей разведочной модели (выбор рабочей гипотезы) природных гидрогеологических условий (условий формирования ЭЗПВ) месторождений на базе анализа имеющейся геолого-гидрогеологической информации и оценка этой модели с точки зрения:

а) возможностей решения поставленной целевой задачи с учетом требований к количеству и качеству подземных вод, режиму и условиям эксплуатации, а также ограничений по условиям освоения месторождения (расстояние до водопотребителя, условия землеотведения, природоохранные требования и т. п.);

б) информационной обеспеченности построенной рабочей модели по составу и содержанию материалов с учетом требований к детальности

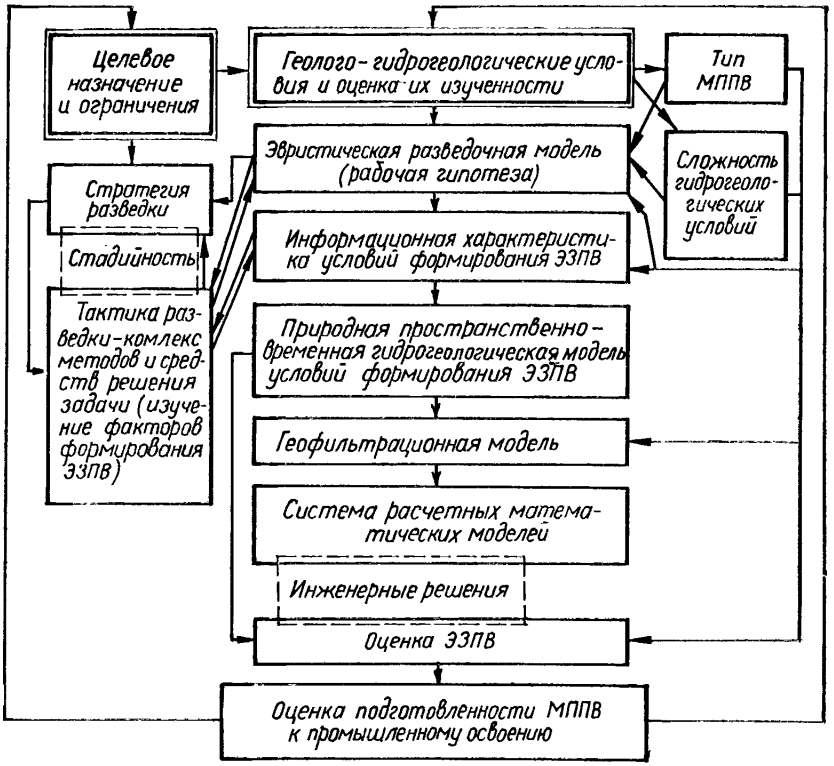



Рис. 70. Структурная схема разведки МППВ

ности изученности месторождения и достоверности запасов для обеспечения подготовленности месторождения к промышленному освоению, с одной стороны, и изученности всех отдельных компонентов модели, определяющих условия формирования запасов (строение, пространственное распределение параметров, источники формирования запасов, условия освоения), с другой. Этот этап является одним из наиболее ответственных и принципиально важных, поскольку весь дальнейший разведочный процесс сводится *к насыщению этой модели новой недостающей информацией, получаемой в процессе разведки* и необходимой для оценки ЭЗПВ. Эта информация может приводить не только к детализации отдельных компонентов модели (факторов формирования запасов), но и к ее изменениям и даже *коренной структурной перестройке*, в связи с несоответствием исходной рабочей гипотезы реальной природной ситуации.

2. Выбор комплекса методов исследований, видов работ, обоснование их объемов и состава, технических средств и технологических способов выполнения, размещения по площади и распределения во времени по этапам разведки. Выбор комплекса методов и средств разведки определяется типом месторождения, сово-

купностью факторов формирования запасов, сложностью гидрогеологических условий, целевым назначением работ, требованиями к составу и детальности необходимой информации, а также возможностями ее получения с заданной достоверностью. При этом должна учитываться допустимая неравномерность детальности (плотности информации) как по пространственно-временной характеристике всей модели, так и ее отдельных компонентов (факторов, определяющих условия формирования запасов).

3. Проведение исследований — поэтапное накопление информации, ее интерпретация и оценка с точки зрения достаточности по составу и детальности для решения поставленной задачи. При этом имеется в виду не накопление информации вообще, а только такой, которая необходима и достаточна для обоснования модели условий формирования и обеспечения требуемой детальности и достоверности изученности ЭЗПВ.

4. Обоснование эмпирической природной гидрогеологической модели месторождения и ее оценка с точки зрения достаточности по составу, детальности и достоверности полученной информации об основных факторах, определяющих условия формирования ЭЗПВ.

5. Представление гидрогеологической модели путем схематизации в *виде геофильтрационной,* а затем системы расчетных математических моделей и схем, на базе которых выполняется оценка ЭЗПВ.

6. Оценка подготовленности месторождения к промышленному освоению.

На каждом этапе проведение разведки необходимо увязывать с ее конечным результатом, что достигается установлением обратных связей между основными элементами в системе разведки (см. рис. 70). Поэтому необходимо на каждом этапе исследований по мере накопления информации давать текущую оценку возможного конечного результата и вносить соответствующие изменения в проводимые исследования, а в отдельных случаях даже менять или корректировать исходное целевое назначение разведки.

Таким образом, разведочная природная гидрогеологическая модель месторождения и система геофильтрационных и математических моделей являются одновременно *исходной базой, рабочим инструментом и основой инженерных решений, определяющих результаты разведки.*

Типизация гидрогеологических условий изучаемого объекта позволяет при создании исходной разведочной модели учитывать основные типовые факторы формирования запасов и в соответствии с их изученностью, сложностью и индивидуальными особенностями целенаправленно проектировать и своевременно корректировать весь разведочный процесс.

**Основные принципы разведки.** При обосновании методики и содержания разведочных работ необходимо учитывать особенности формирования ЭЗПВ и двойственную природу подземных вод как полезного ископаемого в земных недрах, с одной стороны, и части общих водных ресурсов, с другой.

Учитывая соответствующие разработки в области разведки твердых полезных ископаемых (Л. И. Четвериков, 1984; В. И. Смирнов, 1954; А. Б. Каждан, 1977), можно констатировать, что месторождениям подземных вод как объектам разведки в земных недрах присущи следующие особенности:

*месторождение является одновременно природным и целевым объектом исследования,* что предопределяет геолого-гидрогеологическое его изучение применительно к конкретным требованиям народного хозяйства. Только на основе этих требований представляется возможным выделять месторождения подземных вод на фоне какого-либо гидрогеологического региона или водоносного горизонта. Целевая направленность коренным образом отличает разведку от региональных (съемочных) и научных исследований. Изменение целевого назначения может привести к серьезному изменению представлений о сложности гидрогеологических условий, перспективности месторождений и содержании разведки;

*типичность месторождений по геолого-гидрогеологическим условиям* формирования ЭЗПВ, что позволяет унифицировать процесс разведки, широко используя метод аналогии и типовые рекомендации по методике ведения работ;

*индивидуальность месторождений,* связанная с тем, что в природе не наблюдается полностью идентичных гидрогеологических условий (строение разреза, водоносные горизонты и т. д.). Эта особенность требует индивидуализации процесса разведки, заключающейся в ограничении применимости типовых рецептов, с одной стороны, и внесении индивидуальных к ним дополнений, с другой;

*большие размеры объектов изучения* (месторождений и областей формирования ЭЗПВ) по сравнению с размерами объектов доступных прямым наблюдениям и измерениям (образцы, скважины, другие пункты наблюдений);

*закрытость объекта для непосредственных наблюдений.*

(Последние две особенности определяют необходимость интерполяции и экстраполяции полученных данных на большие площади по сравнению с размерами изученных элементов месторождения);

*неоднородность строения и параметрических характеристик пластов различного порядка,* а также возможность представления реальных неоднородных тел в виде кусочно-однородных или квазиоднородных («масштабные эффекты» по М. В. Рацу). Эта особенность определяет необходимость изучения одного и того же элемента месторождения с различной детальностью в зависимости от поставленной задачи. Так, для определения коэффициента водопроводимости сложно-слоистый водоносный комплекс может рассматриваться как условно однородный в разрезе, а для выбора интервалов установки фильтра должен учитываться каждый конкретный отдельный прослой. Эта особенность определяет также необходимость изучения различных по размеру элементов неоднородности соответствующими по масштабу опытами (экспресс-откачки и длительная эксплуатационная откачка из одной и той же скважины будут характеризовать различные по раз-

мерам блоки-элементы неоднородности). В пределах области опробования неоднородное геологическое тело выступает как квазиоднородное.

Специфика подземных вод как особого подвижного полезного ископаемого и части общих водных ресурсов, определяющая особенности постановки и проведения разведочных работ рассмотрена в гл. 1.

Особенности формирования МПВ как объектов изучения позволяют сформулировать следующие основные принципы разведки, определяющие ее методику (стратегию и тактику):

1. *Принцип экономической целесообразности и оптимальности состава исследований* выражает необходимость получения требуемых результатов при оптимальных затратах средств и времени. Оптимальную эффективность следует понимать в смысле не столько снижения стоимости работ, сколько возможности принятия по их результатам наиболее экономичных проектных решений. Целесообразность рассматривается с точки зрения оптимального соотношения трудоемкости и стоимости того или иного вида исследований, увеличения достоверности получаемых результатов, а также затрат на освоение месторождения. Поэтому рассматриваемый принцип выражается также в дифференциации требований к категориям запасов, подготовленных к промышленному освоению на месторождениях с различной сложностью гидрогеологических условий. Отметим при этом, что при существующей степени изученности некоторых гидрогеологических процессов (например, эксплуатационной кольматации русловых отложений, изменения емкостных и фильтрационных параметров в процессе эксплуатации водозаборного сооружения) в соответствующих случаях и невозможно добиться высокой степени достоверности гидрогеологических прогнозов при оценке ЭЗПВ.

2. *Принцип стадийности (последовательных приближений)* — проведение разведки по стадиям (поиски, предварительная и детальная разведка, эксплуатационная разведка), что обеспечивает последовательную детализацию исследований и повышение степени изученности ЭЗПВ от более ранних стадий к более поздним, а также возможность уточнения видов, объемов и методики работ на каждой последующей стадии по результатам предыдущей.

3. *Принцип неравномерности изучения* — неодинаковая детальность изучения участков МППВ, отдельных составляющих ЭЗПВ и факторов их формирования в зависимости от: а) инструктивных требований к соотношению разных категорий запасов для месторождений различных групп сложности; б) затрат на исследование различных факторов для достижения одной и той же степени изученности; в) относительного влияния различных факторов на величину запасов. Этот принцип определяет также различную детальность изучения одних и тех же факторов и параметров на различных участках по площади и глубине месторождения и в области формирования запасов. Качественным выражением неравномерности изученности является выделение запасов разных категорий ($A$, $B$, $C_1$ и $C_2$) в пределах разведанного месторождения, и отдельных его участков.

Реализация принципа неравномерности изучения при разведке базируется на:

а) блокировке и районировании изучаемой территории — представлении сложного неоднородного объекта в виде элементарных кусочно-однородных блоков или однотипных районов (участков, которые могут выделяться по какому-либо одному или совокупности факторов формирования запасов;

б) выделении опорных (ключевых) участков детализации, на которых проводится полный комплекс детальных исследований с распространением получаемой информации в соответствии с выполненными ранее блокировкой и районированием;

в) обоснованности пространственно-временной интерполяции и экстраполяции результатов исследований на ключевых участках, что обусловлено большими размерами объектов изучения, их скрытостью для непосредственных наблюдений, дискретностью информации;

4. *Принцип аналогии и индивидуализации* — учет и применение при обосновании методики разведки как опыта и результатов работ, а также эксплуатации других месторождений данного типа, так и специфических особенностей месторождений, требующих разработки индивидуальных приемов и способов проведения исследований.

5. *Принцип методологической, технической и технологической обоснованности* заключается в обоснованном выборе в программе поисково-разведочных работ только тех исследований, результаты которых будут использованы для решения заданной целевой задачи с учетом особенностей гидрогеологических условий месторождения. В проектах работ предусматриваются только те их виды, проведение которых обеспечено соответствующими технологиями и техническими средствами.

6. *Принцип разносторонности и комплексности исследований* (рационального комплексирования) — применение разнообразных методов, позволяющих изучить все основные факторы формирования запасов (естественные физико-географические и геолого-гидрогеологические, антропогенные, в том числе определяющие условия эффективного каптажа подземных вод) и характер взаимосвязей между ними.

7. *Принцип обратной связи* — постоянная корректировка объемов и методики работ в зависимости от получаемых текущих результатов и изменения представлений о гидрогеологических условиях месторождения (модели месторождения) по мере повышения его изученности.

Из анализа изложенных принципов видно, что разведка имеет научно-методический и технико-экономический аспекты, тесно связанные между собой.

Многогранность и разносторонность природных условий МППВ, многофакторность процессов формирования ЭЗ и сложность связей между различными факторами наряду с дискретностью во времени и пространстве получаемой информации определяют решающее значение научно-методического обоснования методов, способов и приемов интерпретации результатов исследований, их пространственной и временной интерполяции и экстраполяции. Решение этого вопроса

базируется на использовании теоретических и методических достижений самых разнообразных не только гидрогеологических, но и смежных с ними геологических и инженерно-геологических дисциплин, а также физической географии (метеорологии, орогидрографии, гидрологии), физики, химии, математики. Однако следует иметь в виду, что использование этих дисциплин не должно быть самоцелью, а направлено на повышение достоверности оценки ЭЗПВ.

В процессе разведки *эвристическая модель* месторождения имет две тенденции развития, связанные с последовательным накоплением информации: в начале — постоянное усложнение модели по составу и количеству входящей в нее информации, затем — обоснованное ее упрощение до уровня, позволяющего максимально просто осуществить инженерное решение целевой задачи или комплекса задач.

**Оптимизация разведки.** Одним из актуальнейших вопросов совершенствования теории и методики разведки является *вопрос оптимизации видов и объемов разведочных работ*. Методологическое содержание этого вопроса наиболее подробно рассмотрено И. К. Гавич, В. А. Мироненко, Л. С. Язвиным (1982), которые выделяют в этой проблеме два основных аспекта: 1) выбор и обоснование рационального комплекса исследований с учетом разрешающей способности выбранных методов и их экономической эффективности; 2) обоснование рациональной методики отдельных видов исследования.

При решении вопроса оптимизации разведки в настоящее время развиваются два подхода:

вероятностно-статистический, базирующийся на оценке достоверности прогнозов, исходя из погрешностей определения различных факторов формирования запасов;

эвристический, базирующийся на детерминированных моделях и комплексном анализе геолого-гидрогеологических условий МППВ с учетом взаимосвязи всех факторов формирования запасов и генетических закономерностей их изменчивости, разрешающей способности каждого отдельного метода исследований и их комплекса в целом.

Многочисленные предложения по решению вопросов оптимизации разведки и оценки достоверности прогнозов на базе аппарата математической статистики и теории вероятности в большинстве случаев на практике себя не оправдали. С одной стороны, сами статистические критерии не учитывают комплексный характер целевой функции того или иного вида работ. Например, предполагая, что количество скважин можно определить, исходя только из требований к погрешности среднего значения водопроводимости, рассчитанного по частным определениям этого параметра, не учитывается возможность получения среднего по данным длительной откачки, а также других показателей, определяемых по данным бурения, геофизических работ и т. д. Таким образом, комплексный характер исследований не позволяет статистически независимо оценивать объемы работ по расчету статистической погрешности определения одного какого-либо параметра, а попытки проведения таких оценок по совокупности факторов приводят к требованиям нереально большого количества опробований.

С другой стороны, наряду с типовыми должны максимально учитываться индивидуальные особенности разведуемого МППВ, которые в основном и определяют конкретное инженерное решение задачи, выявляются уже собственно в процессе разведки и поэтому не могут быть учтены в опережающих статистических оценках.

Поэтому использование вероятностно-статистических методов для определения оптимального объема работ и требуемой информации могут иметь весьма ограниченное применение. Это же относится и к оценке этими методами погрешностей гидрогеологических прогнозов.

Оптимизацию методики разведки и повышение достоверности гидрогеологических прогнозов в целом следует искать на путях широкого применения *эвристических методов, базирующихся на теории, аналогии, интуиции и здравом смысле.*

Такой подход при проектировании разведки позволяет на базе эвристической гидрогеологической модели МППВ учесть как имеющиеся методические рекомендации для типовых условий, так и индивидуальные особенности объекта.

Поскольку задача определения оптимальных объемов работ и их распределения по площади не поддается строго научному анализу из-за недостаточности информации на период проектирования, «эвристические методы как раз и направлены на то, чтобы принять правильное решение и уменьшить цену ошибки» (Ф. П. Кренделев, 1977).

В состав обычно практикуемых при разведке полевых методов и видов исследований входят: 1) геолого-съемочные; 2) геоботанические и ландшафтно-индикационные; 3) дистанционные аэрокосмические; 4) метеорологические и гидрологические; 5) геофизические наземные и скважинные; 6) буровые; 7) опытно-фильтрационные работы и наблюдения; 8) опытно-миграционные и индикаторные; 9) наблюдения за различными элементами режима и баланса подземных и поверхностных вод; 10) гидрохимическое и изотопное опробование; 11) гидрогеотермические исследования; 12) топо-геодезические работы; 13) лабораторные исследования свойств воды и пород; 14) исследования по изучению режима эксплуатации действующих водозаборных сооружений.

Соответствующий выбор комплекса методов исследований определяется в каждом конкретном случае составом и детальностью требуемой исходной информации о характеристиках условий формирования запасов, которая необходима для обоснования целевой гидрогеологической модели МПВ, позволяющей осуществить комплекс прогнозных решений с отражением тех особенностей, которые необходимо учесть при оценке запасов, проектировании и эксплуатации водозаборного сооружения.

Сложность и многогранность самого объекта изучения и соответствующей ему эмпирической модели, многочисленность и разнообразие методов исследований и обработки их результатов требуют не формального использования при разведке всех возможных средств и методов исследований, а только необходимых, по существу отвечающих требованиям к решению конкретной целевой задачи в условиях данного месторождения, т. е. рационального комплексирования различных методов и технических средств разведки.

Под *рациональным комплексированием* следует понимать такую совокупность методов и средств получения целевой информации, ее обработки, интерпретации и оценки ЭЗПВ, которая по объему и содержанию обеспечивает решение поставленной задачи наиболее экономично с точки зрения конечных результатов инженерного прогноза. При этом применение того или иного метода обязательно должно быть направлено на получение только той информации, которая необходима для обоснования модели месторождения и оценки запасов, а также повышения достоверности прогнозов за счет увеличения состава, объема и плотности информации.

В конечном счете необходимо обоснованное представление дискретно измеренных показателей, характеризующих факторы формирования запасов, в виде непрерывных (в частном случае кусочно-однородных) полей.

Применение в комплексе разведочных работ новых методов или их сочетание с традиционными позволяет не только увеличить состав, объем и плотность информации об условиях формирования ЭЗПВ, но и получать принципиально новую информацию и тем самым повышать разрешающую способность разведки.

Рациональное комплексирование является также важнейшим резервом интенсификации разведки без ущерба для информационной обеспеченности ее результатов. При этом надо иметь в виду, что увеличение масштабов и комплексности освоения месторождений подземных вод во взаимосвязи с другими народнохозяйственными задачами (гидротехническое, горно-рудное, промышленное и городское строительство, агротехнические мероприятия, охрана природы и ее рациональное использование) приводит к постоянному повышению «экономического и экологического риска от принятия неверных решений и соответственно изменению требований к точности и достоверности прогнозов» (В. А. Гороховский, 1985). В соответствии с увеличением комплексности исследований возрастает и стоимость собственно разведочных работ. Однако это находит свое оправдание в значительно более крупной экономии от уменьшения риска инженерных решений, которое связано как раз с увеличением плотности и состава исходной информации, используемой при прогнозах.

Дополнительный резерв экономии следует искать не в сокращении комплекса методов или замены одного другим, а в таком сочетании их видов и объемов, которое позволяет исключить из состава работ те исследования, которые не дают дополнительной информации.

Важнейшим видом разведочных работ, существенно повышающим достоверность гидрогеологических прогнозов, являются исследования по изучению опыта эксплуатации действующих водозаборных сооружений. Их результаты могут использоваться для: 1) оценки достоверности гидрогеологических прогнозов путем их сопоставления с данными эксплуатации; 2) доизучения условий формирования и переоценки ЭЗПВ; 3) использования полученных материалов при проведении разведки новых МПВ; 4) усовершенствования методики разведочных работ на базе анализа роли отдельных факторов в формировании запасов и повышения обоснованности временных экстраполя-

ций, полученных при разведке данных, и соотношения объемов работ и затрат на их изучение.

В качестве нового отдельного вида разведочных работ можно выделить комплексные исследования условий формирования запасов на опытных полигонах, создаваемых на опорных ключевых участках и участках действующих водозаборных сооружений. Эти исследования включают длительные во времени наблюдения за режимом подземных вод и изменениями свойств пород, другими элементами геологической среды. Возможность получения длительных рядов наблюдений определяет одно из основных преимуществ исследований на опытных полигонах по сравнению с разведкой конкретных МПВ до начала эксплуатации. Создание опытных полигонов позволяет целенаправленно приступить к решению принципиально новой задачи учета возможных изменений гидрогеологических параметров и физических свойств водовмещающих пород под влиянием эксплуатации подземных вод, а, следовательно, и условий формирования ЭЗПВ, при проведении гидрогеологических расчетов и прогнозов. Изучение изменений свойств горных пород (плотность, влажность, электрическое сопротивление) и связанных с ними гидрогеологических параметров водоносных горизонтов и слабопроницаемых пластов может проводиться как непосредственно в процессе эксплуатации или длительных опытно-эксплуатационных возмущений, так и путем сравнения значений гидрогеологических параметров, получаемых в процессе периодически повторяющихся опытов. В последнем случае представляется возможным оценить необратимые изменения параметров, связанные с предыдущими возмущениями.

При увеличении общей стоимости работ в связи с расширением объема и содержания требуемой информации, повышение экономической эффективности может быть достигнуто за счет более полной и всесторонней оценки ЭЗПВ, что будет выражаться в сокращении:

стоимости единицы разведанных запасов за счет увеличения их общей величины;

площади отчуждаемых земель для строительства водозаборных сооружений;

количества вовлекаемых в эксплуатацию участков для решения вопросов водоснабжения крупных водопотребителей или группы водопотребителей одновременно;

затрат, связанных с завышением размеров зон санитарной охраны;

других затрат, связанных с освоением МППВ (например, берегоукрепительных мероприятий при сокращении длины водозабора).

В отдельных случаях эффективность может быть обусловлена и принятием решения о водоснабжении за счет альтернативных более дешевых вариантов, в частности использования подземных вод вместе поверхностных.

Важную роль в общем комплексе разведочных работ, в том число в планировании их объемов и распределении по площади, играют математические методы. Интерпретация информации и расчеты, связанные с оценкой ЭЗПВ, без применения в той или иной форме математических методов и современных вычислительных средств невозможны. Эвристические оценки особенно эффективны на ранних стадиях исследований

при планировании разведки и при оперативных оценках текущих результатов ее проведения, а также оценке (предсказании) величины ЭЗПВ на месторождении перед началом работ. Окончательные же варианты инженерных прогнозов и подтверждение первоначальных оценок должны иметь по возможности строгое математическое обоснование.

Существенно расширяет возможности разведочной гидрогеологии внедрение в практику оценки ЭЗПВ методов математического моделирования на АВМ и ЦВМ.

Эффективное применение более мощного математического аппарата, позволяющего повысить полноту, объективность и достоверность оценки ЭЗПВ, а также анализировать и уточнять условия формирования запасов путем решения обратных задач, несомненно должно базироваться на соответствующем усилении информационного обеспечения по данным разведочных работ.

Вместе с тем в начале — середине 70-х годов возникла тенденция фетишизации методов математического моделирования и даже пропаганды частичной замены ими полевых исследований физических природных процессов. В связи с этим следует подчеркнуть, что такой подход не может дать положительных результатов, так как никакой самый современный математический аппарат не может заменить содержательных экспериментальных исследований физических процессов при формировании ЭЗПВ, и позволяет только дать им более совершенное математическое описание и теоретическое истолкование.

Целесообразно в процессе разведки использование для оперативных решений упрощенных экспертных оценок, позволяющих исключить из рассмотрения факторы, не имеющие существенного влияния на конечный результат решения, но значительно осложняющие применяемый математический аппарат, вызывающие большие трудности при получении исходной информации и требующие для получения и учета больших затрат. Такие оценки (например, методами последовательной смены стационарных состояний; дополнительного слоя при расчетах инфильтрационных водозаборов, обобщенных систем скважин и т. д.) полностью себя оправдали при решении многих практических задач. Однако принимаемые при этом допущения должны иметь соответствующие обоснования путем хотя бы приближенных оценок возникающих погрешностей. Применение оценочных вариантов позволяет одновременно оптимизировать объемы и методику выполняемых работ.

Большое значение для оптимизации объемов и содержания полевых разведочных работ имеет внедрение разведочного и имитационного моделирования, наиболее последовательно пропагандирующихся И. К. Гавич и В. А. Мироненко.

Разведочное моделирование может применяться в следующих основных направлениях: 1) выявление степени влияния отдельных факторов формирования запасов на их величину (факторно-диапазонный анализ) и определение требуемой детальности их изучения; 2) оценка целесообразности проведения тех или иных видов работ (прежде всего длительных групповых откачек) для получения необходимых резуль-

татов; 3) сопоставление результатов разведочного опыта с расчетной временной экстраполяцией на модели опытного эксперимента.

Информативность и эффективность, а, следовательно, и оптимальность разведки определяется целенаправленностью выбора комплекса методов работ и их распределения по площади на всех этапах от проектирования до оценки ЭЗПВ. В этом смысле разведка может быть признана эффективной, если полученная дискретная информация позволяет правильно обосновать структуру формирования запасов. Конечный успех разведки с учетом геолого-экономической информативности и эффективности определяется правильно выбранными стратегией и тактикой разведки.

Стратегия разведки — составная часть ее теории и методики, определяющая направленные на достижение конечной цели разведки основные принципы выбора направления, планирования и ведения исследований, их состава и содержания в конкретных гидрогеологических и экономических условиях.

Тактика разведки — совокупность методов, способов и приемов (как методических, так и технологических), а также технических средств ведения разведочных работ, обеспечивающих успех выбранной стратегии. Эта часть разведки включает общую тактику (методику) исследований, методику и технологию проведения отдельных видов работ.

В структуру тактики разведки входят:

1. Формулировка задачи: а) выбор конкретной на данном этапе цели работ; б) оценка условий проведения работ.

2. Принятие решения на основе сформулированной задачи, в котором должны быть определены: а) замысел и методика исполнения; б) организация системы исполнения (силы и средства); в) определение главного звена или участка работ; г) задачи отдельным исполнителям (по видам работ); д) организация материально-технического обеспечения; е) организация исполнения; ж) организация оперативного комплексирования хода и анализа результатов различных видов работ.

3. Выполнение намеченных работ.

4. Определение и оценка полученных результатов в целом и по отдельным направлениям, видам и методам работ в рамках рабочей разведочной модели, принятой на данной стадии (этапе) исследований, а также возможности перехода к следующим стадиям или завершению работ.

Учитывая, что разведочная модель является эвристической и носит в значительной степени эмпирический характер, базируется и формируется в условиях недостаточной информации, то для правильного выбора стратегии и тактики разведки большое значение имеет не только теоретическая подготовка гидрогеолога-разведчика, но и его *профессиональная интуиция*, базирующаяся на комплексе теоретических знаний и практическом опыте исследователя. В этом смысле можно говорить об *искусстве разведки* (понимая здесь искусство как «мышление в образах»), поскольку эмпирическая модель всегда отличается от реального строения объектов.

Такое образное мышление позволяет используя широко в про-

цессе разведки метод *экспертных оценок*, на базе рабочей разведочной модели, анализируя имеющийся фактический материал и интуитивно дополняя недостающие звенья, правильно предсказать конечный результат разведки в целом, а также отдельных этапов (стадий), видов и методов исследований и тем самым обеспечить их эффективное применение и распределение по площади. Метод экспертных оценок при квалифицированном применении способствует повышению эффективности работ, сокращению сроков их проведения и в значительной мере позволяет исключить необоснованные виды исследований. Наиболее эффективные результаты этот метод дает на этапе оценки принципиальной возможности и выбора путей, средств и методов решения поставленной целевой задачи.

Изложенное позволяет сделать вывод о том, что разведка, по существу, каждого МППВ, особенно находящегося в сложных гидрогеологических условиях, является не только инженерной, но и научно-методической задачей.

Таким образом, основная задача разведки — получение информации, позволяющей обосновать модель условий формирования ЭЗПВ и выполнить инженерный прогноз — требует по существу для каждого МППВ разработки индивидуальных рецептов ведения работ на базе типовых общеметодических рекомендаций, интерпретации и диагностики получаемой конкретной информации. Нельзя добиться эффективных результатов разведки, используя только типовые рекомендации. Это положение позволяет сделать важный общеметодологический вывод о нецелесообразности и ненужности регламентирования разведочных сетей и видов работ, т. е. разработки строгих количественных рекомендаций по объемам и содержанию различных видов исследований.

### 17.2. СТАДИЙНОСТЬ РАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ

С т а д и й н о с т ь — это основной методологический принцип разведки, обеспечивающий поэтапное повышение детальности изученности месторождения и достоверности (категорийности) ЭЗПВ, подсчитанных по результатам выполненных работ на каждой стадии.

Стадийность гидрогеологических исследований является практическим выражением одного из основных принципов разведки месторождений полезных ископаемых — принципа последовательного приближения, введенного в практику геологоразведочных работ В. М. Крайтером. Основная сущность этого принципа — постоянное наращивание знаний о разведуемом месторождении. Поэтому для планомерного выявления ресурсов подземных вод и во избежание неоправданных затрат на проведение поисково-разведочных работ с излишней детальностью, не отвечающей целевому заданию, все геологоразведочные работы на месторождениях подземных вод должны проводиться в несколько стадий, отличающихся друг от друга целевым назначением, содержанием, объемами и результатами работ. Соответственно изученность ЭЗПВ на каждой стадии отличается различной

детальностью (категорийностью) и возможной достоверностью гидрогеологических прогнозов.

Стадийность регламентируется соответствующими методическими и инструктивными документами, определяющими порядок планирования и финансирования геолого-разведочных работ.

Анализ информационной характеристики условий формирования ЭЗПВ месторождения позволяет сделать вывод о целесообразности проведения работ и решения целевой задачи разведки с соблюдением всех стадий, совмещением или исключением некоторых из них. Иногда при достаточной изученности условий формирования ЭЗПВ представляется возможным решение поставленной задачи без проведения специальных полевых работ. Например, в тех случаях, когда решаются вопросы децентрализованного водоснабжения отдельных объектов при небольшой по отношению к общим ресурсам потребности в воде и достаточной изученности района, гидрогеологические исследования сводятся к бурению и опробованию поисково-разведочных или разведочно-эксплуатационных скважин.

В настоящее время для всех организаций и предприятий, проводящих геологоразведочные работы на подземные воды, является обязательным подразделение поисково-разведочного процесса на стадии, утвержденное приказом Министерства геологии СССР № 63 от 01.03.1978 г. Согласно этому документу, геологоразведочные работы на воду проводятся с соблюдением следующих стадий: а) поисков; б) предварительной разведки; в) детальной разведки; г) эксплуатационной разведки.

Работы на каждой стадии выполняются по проекту, утвержденному соответствующими организациями. Результаты работ каждой предыдущей стадии должны быть основой для составления проекта работ последующей.

**Стадия поисков.** Целевым назначением работ поисковой стадии является выявление водоносных горизонтов и перспективных площадей для постановки дальнейших разведочных работ. Эта стадия подразделяется на две подстадии — общие и детальные поиски.

Исследования на подстадии «*общие поиски*» проводятся с целью оценки перспектив крупных гидрогеологических регионов. Они направлены на прогнозирование локализации и выявление различных типов месторождений подземных вод, выделение водоносных горизонтов (комплексов), а также площадей их распространения, перспективных для дальнейших поисково-разведочных работ. На этой подстадии при наличии необходимого материала проводится региональная оценка эксплуатационных ресурсов подземных вод в пределах отдельных бассейнов, регионов, площадей по конкретным водоносным горизонтам и комплексам.

Работы на подстадии «общие поиски» проводятся главным образом путем сбора, обобщения и камеральной обработки материалов предшествующих съемочных работ, поисков и разведки подземных вод, наблюдений за их естественным и нарушенным режимом, а также данных, полученных при поисках, разведке и эксплуатации других полезных ископаемых. В случае необходимости на этой подстадии могут

проводиться бурение и опробование отдельных скважин, опытные работы на действующих водозаборных сооружениях, ревизионное обследование ранее пробуренных скважин, вскрывших подземные воды, и специализированные исследования для выявления условий формирования эксплуатационных запасов подземных вод.

На основании работ подстадии «общие поиски» дается характеристика гидрогеологических условий крупных регионов и в их пределах выделяются площади, перспективные для постановки детальных поисковых работ, а в хорошо изученных районах — предварительной разведки. Изученность подсчитанных по результатам общих поисков ЭЗПВ в первом случае отвечает категории $P$, во втором — $C_2$. На территориях покрытых гидрогеологической съемкой масштаба 1 : 200 000 общие поиски, как правило, не проводятся.

Целевым назначением работ на подстадии *«детальные поиски»* является выявление в пределах перспективных площадей водоносных горизонтов и участков с благоприятными условиями для постановки дальнейших разведочных работ и предварительная оценка их эксплуатационных возможностей.

Основной задачей этой подстадии является получение необходимой исходной информации, позволяющей обосновать в пределах конкретных площадей наличие (или отсутствие) месторождений подземных вод, определить их локализацию и наметить первоочередные месторождения (участки), представляющие интерес для хозяйственного освоения.

Работы на этой подстадии могут включать крупномасштабные комплексные и специализированные съемки, буровые, опытно-фильтрационные, геофизические, гидрогеохимические и другие специальные исследования.

На действующих водозаборных сооружениях на площади детальных поисков или в аналогичных условиях вблизи них должны быть организованы наблюдения за режимом подземных вод.

ЭЗПВ по результатам детальных поисков подсчитываются преимущественно по категории $C_2$, а в простых условиях, где возможен непосредственный переход к детальной разведке без проведения предварительной — по категории $C_1$.

Для хорошо изученных районов в простых гидрогеологических условиях, где оценка эксплуатационных запасов по категории $C_2$ (или более высоким) была проведена на подстадии общих поисков, а также в тех случаях, когда заявленная потребность в воде значительно меньше потенциальных эксплуатационных запасов или выделение перспективных участков может быть сделано по результатам предыдущей стадии, детальные поиски не проводятся.

**Стадия предварительной разведки**. Предварительная разведка является важной стадией разведочных работ на воду и имеет целью изучение основных особенностей геолого-гидрогеологических условий месторождения и условий формирования ЭЗПВ, определение общей величины ЭЗПВ в пределах, выявленных при поисках месторождений, и обоснование постановки детальной разведки.

Следует обратить внимание на различие в соотношении объемов исследований на стадиях предварительной и детальной разведки для

месторождений подземных вод и для месторождений других полезных ископаемых. Обычно при разведке месторождений полезных ископаемых (кроме подземных вод) основной объем исследований приходится на стадию детальной разведки. Однако в силу специфических особенностей месторождений подземных вод, главным образом в связи с тем что оцениваются их эксплуатационные запасы, а не запасы в недрах, основной стадией становится стадия предварительной разведки. Именно на этой стадии нужно оценить общий размер эксплуатационных запасов подземных вод и должны быть изучены вопросы, определяющие выбор рациональной схемы водозаборного сооружения. Это объясняется тем, что в отличие от месторождений других полезных ископаемых, детальная разведка месторождений подземных вод проводится применительно к рациональной в технико-экономическом отношении схеме водозаборного сооружения, материалы для выбора которой должны быть получены по результатам предварительной разведки.

Предварительная разведка осуществляется при наличии заявленной потребности в воде, если месторождение (участок) по своим размерам, качеству воды, географо-экономическому положению и технико-экономическим показателям представляет интерес для последующего освоения.

Основными задачами исследований на стадии предварительной разведки являются: а) выбор наиболее перспективного водоносного горизонта или комплекса (одного или несколько) в пределах разведуемого участка; б) выявление и оценка основных источников формирования ЭЗПВ; в) выбор участка и обоснование схемы размещения скважин будущего водозаборного сооружения; г) обоснование расчетной схемы и метода оценки запасов; д) предварительная оценка эксплуатационных запасов; е) изучение качества подземных вод.

На стадии предварительной разведки проводятся: рекогносцировочное обследование участка; буровые работы; пробные и опытные (одиночные и кустовые) откачки (выпуски) и нагнетания; крупномасштабные площадные геофизические исследования; геофизические исследования в скважинах; гидрологические работы; специальные балансовые исследования; исследования с применением специальных методов (изотопных, ядерно-физических, индикаторных и др.); отбор проб воды и пород, лабораторные работы; наблюдения за режимом подземных и поверхностных вод, в том числе и на действующих водозаборных сооружениях; топо-геодезические работы; санитарное обследование участка работ.

В результате предварительной разведки должны быть изучены основные особенности геолого-гидрогеологических условий месторождения участка, определены, охарактеризованы и предварительно оценены источники формирования и расчетные параметры водоносного горизонта, установлено соответствие качества воды заданному назначению, предварительно оценены гидрогеологические и технико-экономические условия эксплуатации, разработана принципиальная схема водозаборного сооружения и определены возможные варианты и способы его эксплуатации.

Оценка ЭЗПВ по результатам предварительной разведки проводит-

ся в основном по категории $C_1$ в простых гидрогеологических условиях и по категории $C_2$ — для месторождений со сложными гидрогеологическими условиями. В отдельных случаях в простых гидрогеологических условиях, при небольшой потребности в воде данные, полученные при предварительной разведке, могут оказаться достаточными для оценки эксплуатационных запасов по категориям $A$ и $B$ в требуемом количестве, и детальная разведка не проводится.

В очень сложных гидрогеологических условиях (например, месторождения трещинно-жильных вод), где эксплуатационные запасы подземных вод могут быть определены только гидравлическим методом по данным опытно-эксплуатационных откачек, основная задача предварительной стадии (определение общей величины запасов) не может быть решена. В этих случаях стадии предварительной и детальной разведок совмещаются в единую стадию, которая заканчивается опытно-эксплуатационной откачкой.

**Стадия детальной разведки.** Детальная разведка проводится с целью получения необходимых данных для обоснования проекта строительства нового или расширения существующего водозаборного сооружения с выявлением запасов подземных вод, обеспечивающих по количеству и категориям работу водозаборного сооружения в течение заданного срока эксплуатации. Стадия детальной разведки подразделяется на два вида: *детальная разведка нового и эксплуатируемого месторождений.*

Детальная разведка нового месторождения должна производиться только на тех месторождениях (участках), по результатам предварительной разведки которых обоснована целесообразность их народнохозяйственного освоения. Выбор участка разведки водоносного горизонта, а также возможность использования подземных вод по заданному назначению и условия водопользования должны быть согласованы с проектной и водопотребляющей организациями, местными органами по регулированию использования и охране вод, органами государственного санитарного надзора, земельного контроля. Детальная разведка проводится при наличии заявки от головной проектной организации, согласованной с Госпланом республики.

Целевое назначение детальной разведки — подготовка месторождения к промышленному освоению, т. е. обоснование исходных данных для проекта строительства и эксплуатации будущего водозаборного сооружения, уточнение величины ЭЗПВ и доведение их изученности до категорий, обосновывающих выделение капиталовложений на проектирование и строительство в соответствии с «Классификацией эксплуатационных запасов подземных вод».

В процессе детальной разведки основными видами работ являются: а) бурение разведочных, разведочно-эксплуатационных и наблюдательных скважин; б) проведение пробных, опытных (одиночных и кустовых) и опытно-эксплуатационных откачек (выпусков) и нагнетаний.

Кроме того, в общий комплекс работ входят геофизические исследования, наблюдения за режимом подземных и поверхностных вод (в том числе и на действующих водозаборных сооружениях), гидро-

метрические работы, отбор проб воды и грунтов, лабораторные и топогеодезические работы, а при необходимости — специальные виды исследований.

Детальная разведка проводится преимущественно на участке проектируемого водозаборного сооружения, но в отдельных случаях за пределами участка проводится детализация факторов, наиболее существенно влияющих на величину запасов подземных вод и технико-экономические условия их эксплуатации.

По результатам детальной разведки, проводимой применительно к выбранной схеме водозаборного сооружения, уточняются условия формирования ЭЗПВ (в том числе и качество подземных вод) и основные параметры водоносного горизонта, позволяющие обосновать количество эксплуатационных скважин, расстояния между ними, проектные дебиты и понижения, способ эксплуатации и оценить запасы по категориям, определяющим подготовленность месторождения к промышленному освоению.

Детальная разведка подземных вод на эксплуатируемых месторождениях проводится по специальному заданию с целью:

оценки ЭЗПВ на участках эксплуатации с неутвержденными запасами;

переоценки ранее утвержденных ЭЗПВ на участках действующих водозаборных сооружений по данным эксплуатации для перевода запасов низких категорий в более высокие; либо в случае неподтверждения утвержденных запасов при эксплуатации; либо при предполагаемом изменении условий эксплуатации (например, при искусственном подпитывании подземных вод).

Разведка подземных вод на эксплуатируемом месторождении обязательно включает наблюдения за расходом водозаборных сооружений, уровнем подземных вод и их качеством (как на водозаборном сооружении, так и на прилегающих территориях) в течение времени, достаточного для установления основных закономерностей формирования ЭЗПВ.

В результате разведки подземных вод на эксплуатируемых месторождениях уточняются закономерности формирования запасов, расчетная схема и гидрогеологические параметры, определяется степень соответствия фактических запасов утвержденным, проводится их оценка или переоценка.

**Эксплуатационная разведка** проводится в процессе строительства и эксплуатации водозаборных сооружений на месторождениях с утвержденными запасами с целью определения соответствия фактических условий и режима эксплуатации прогнозам по материалам разведочных работ Разведка проводится также с целью переоценки запасов по материалам эксплуатации, корректировки и оптимизации режима эксплуатации и разработки рекомендаций по реконструкции водозаборных сооружений, получения материалов для оценки ЭЗПВ на других месторождениях и участках, находящихся в аналогичных условиях.

Переоценка запасов проводится в случае несоответствия их ранее утвержденной величине.

Эксплуатационная разведка включает проведение систематиче-

ских наблюдений за величиной водоотбора, уровнями в эксплуатационных и наблюдательных скважинах, изменением качества воды и технического состояния эксплуатационных скважин.

В состав работ, кроме того, входит бурение при необходимости дополнительных скважин, проведение учащенных наблюдений за изменением уровней и дебитов при пуске новых и остановках работающих скважин, отбор проб воды, проведение специальных лабораторных работ, а также анализ экономических показателей эксплуатации.

Несомненно, что с учетом необходимости оценки влияния эксплуатации на окружающую среду в состав эксплуатационной разведки должны быть включены наблюдения за изменениями ландшафтной обстановки во всей области депрессии. Эти работы должны выполняться специализированной службой Мингео СССР.

На основании результатов эксплуатационной разведки проводится оперативное регулирование режима работы водозаборных сооружений, разрабатываются рекомендации по их реконструкции и оптимизации режима эксплуатации, решается вопрос о необходимости постановки работ по доразведке месторождения.

В тех случаях, когда по результатам нескольких лет эксплуатации установлено, что подсчитанные эксплуатационные запасы не подтвердились либо выявлены возможности расширения действующего водозаборного сооружения и прироста запасов, проводится переоценка запасов либо непосредственно по данным, полученным в процессе эксплуатационной разведки, либо по материалам специально проведенных дополнительных поисково-разведочных работ (детальная разведка).

Результаты оценки и переоценки запасов представляются на утверждение в ГКЗ СССР или ТКЗ в установленном порядке.

Стадийность геологоразведочных работ, рассмотренная в данном разделе, соответствует директивным требованиям к организациям геологической службы СССР, утвержденным приказом министра геологии СССР еще в десятой пятилетке.

Естественно, что с течением времени по мере повышения геологической изученности территории, развития методики разведочных работ, улучшения их технической оснащенности, изменения требований к содержанию и результатам работ по оценке эксплуатационных запасов должна меняться и стадийность работ, количество стадий, их целевое назначение и соответствующее ему содержание работ, в том числе в направлении исключения излишних стадий, не отвечающих эффективному решению поставленных задач.

Рассмотренные в гл. 14 предложения по выделению категорий ЭЗПВ с учетом не только детальности их изученности, но и целевого назначения позволяют существенно упорядочить разделение поисково-разведочных на воду работ по стадиям, четко ориентировать каждую из них на определенный законченный геологический результат. Эти результаты четко и однозначно различаются как по решаемым задачам, так и по категорийности оцениваемых на каждой стадии запасов.

Такой подход позволяет не только сократить объемы поисково-разведочных работ за счет исключения тех из них, которые направле-

**17.1. Подразделение поисково-разведочных работ на стадии с учетом новых принципов классификации ЭЗПВ** (по Б. В. Боревскому, Л. В. Боревскому, Л. К. Гохбергу, В. П. Стрепетову, Л. С. Язвину)

| Индекс стадии | Наименование стадий и их разновидности | Назначение работ | Категория запасов, являющаяся результатом работ на данной стадии | Единица измерения конечного геологического результата |
|---|---|---|---|---|
| 1-п | Поиски | Изучение территории с целью выявления площадей, перспективных для нахождения месторождений подземных вод соответствующего целевого назначения и масштаба (по величине запасов) | *P* | Площадь, км$^2$ |
| 2-оп | Поисково-оценочные работы | Выявление площади локализации месторождения (участка) или нескольких месторождений (участков) требуемого целевого назначения и размера; предварительная оценка их эксплуатационных запасов | *C* | Объект поисково-разведочных работ (месторождение или участок с запасами определенной величины по установленным градациям) |
| 3-р | Разведка месторождения: | | | |
| 3-рн | 1) нового | Получение исходных геолого-гидрогеологических и технико-экономических данных для подсчета запасов, подготовленных для промышленного освоения, как правило, за счет доизучения части ранее разведанных запасов категории *C* | *B* | ЭЗПВ, тыс. м$^3$/сут |
| 3-рд | 2) ранее разведанного (доразведка) | Получение тех же исходных данных для прироста запасов, подготовленных к промышленному освоению: | *B* | То же |
| | а) не эксплуатируемого | за счет ранее разведанных запасов категории *C*; | | |
| | б) эксплуатируемого | то же плюс прирост по данным эксплуатации | | |
| 4-эр | Эксплуатационная разведка месторождения: | | | |

*Продолжение табл. 17.1*

| Индекс стадии | Наименование стадий и их разновидности | Назначение работ | Категория запасов, являющаяся результатом работ на данной стадии | Единица измерения конечного геологического результата |
|---|---|---|---|---|
| 4-эр$_1$ | 1) эксплуатируемого на неутвержденных запасах | Получение исходных данных для оценки запасов в объеме существующего водоотбора и обоснования возможности его прироста | Категории *А*, а также *В* и *С* в случаях выявления | Объект (так же как для 2-оп) |
| 4-эр$_2$ | 2) эксплуатируемого на ранее разведанных и утвержденных запасах | Переоценка эксплуатационных запасов категорий *В* и *С* в связи с: | | |
| | | а) истечением срока утверждения запасов | *А* и *В* | ЭЗПВ, тыс. м$^3$/сут или объект |
| | | б) изменением кондиций | *А* и *В* | |
| | | в) превышением отбора над утвержденными запасами | *А* и *В* | |
| | | г) изменением природной водохозяйственной обстановки | *А* и *В* | |
| | | д) изменением способа водоотбора | *А* | |
| | | е) неподтверждением запасов | *А* | |

ны на удовлетворение формальных требований для обоснования необходимого соотношения запасов разных категорий, исключения стадий и подстадий, не дающих четко определенного геологического и народнохозяйственного результата, но и обосновать нормативы стоимости разведочных работ на каждой стадии применительно к запасам разных категорий, с учетом типичных и индивидуальных особенностей каждого разведуемого месторождения.

Предложения по разделению поисково-разведочных работ на стадии, разработанные для типовых условий с учетом новых принципов «Классификации» ЭЗПВ, сведены в табл. 17.1.

Для особо сложных по условиям освоения и эксплуатации месторождений (участков), обоснования принципиально новых технологий разработки продуктивных водоносных горизонтов, при решении специальных задач, связанных с оценкой влияния эксплуатации на окружающую среду и в случае неподтверждения ранее разведанных запасов допускается подразделение выделенных стадий поисково-оценочных и разведочных работ на несколько отдельных этапов с финансированием их по самостоятельным проектам. Конечный геологический результат, предусмотренный работами данной стадии, должен быть получен по окончании последнего завершающего этапа.

**Контрольные вопросы, задания.** 1. Какой элемент разведки МПВ занимает центральное место в ее общей структуре и почему? 2. Рассмотрите два крайних варианта структуры разведки в наиболее полном и наиболее сокращенном вариантах. Какие элементы разведки ЭЗПВ и почему могут быть в последнем случае исключены?

**3.** Рассмотрите какую-либо схему, в которой изменение рабочей гипотезы об условиях формирования ЭЗПВ потребует изменения стратегии разведки. **4.** В чем заключаются преимущества эвристических методов при проектировании разведки? **5.** Какова роль типизации условий формирования ЭЗПВ на месторождениях различных типов в оптимизации разведки? **6.** Как влияет на оптимизацию объемов и состава разведочных работ индивидуальность гидрогеологических условий месторождения? **7.** В чем заключается разрешающая способность разведки? **8.** Как влияют основные принципы разведки на ее оптимизацию? **9.** На чем основывается подразделение геологоразведочных работ на воду на стадии? **10.** В чем заключается смысл увязки стадийности разведки с классификацией ЭЗПВ по категориям изученности? **11.** Может ли быть получен конечный геологический результат всей разведки на ранних стадиях и в каких случаях? **12.** В чем разница научно-методического и технико-экономического содержания разведки?

# ГЛАВА 18. ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ МЕСТОРОЖДЕНИЙ МИНЕРАЛЬНЫХ, ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И ПРОМЫШЛЕННЫХ ВОД

## 18.1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ФОРМИРОВАНИЯ И ОЦЕНКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ

В настоящее время минеральные, теплоэнергетические и промышленные воды широко эксплуатируются для удовлетворения нужд народного хозяйства.

К **минеральным водам** относятся природные воды, которые могут оказывать на организм человека лечебное действие, обусловленное повышенным содержанием отдельных терапевтически активных компонентов, их ионно-солевым или газовым составом либо общим ионно-солевым составом воды. Для отнесения вод к минеральным используются косвенные критерии (определенные физические свойства воды и содержание компонентов ионно-солевого или газового состава). Требования к минеральным водам для внутреннего (лечебно-питьевого) применения установлены ГОСТ 23268.0—78. В соответствии с этим ГОСТом минеральные воды делятся на две группы — лечебные (минерализация 8—12 г/л) и лечебно-столовые (2—8 г/л). Для разлива в бутылки могут использоваться минеральные воды, соответствующие не только ГОСТ 23268.0—78, но и стандарту Министерства пищевой промышленности СССР, включающему так называемые природные минеральные воды с минерализацией 1—2 г/л и менее.

Пригодность оцениваемой воды для бальнеологических целей в каждом конкретном случае устанавливается органами здравоохранения.

**Теплоэнергетические воды** — подземные воды, пригодные для использования в народном хозяйстве в качестве источника тепла и (или) электроэнергии. Они подразделяются на собственно термальные воды и парогидротермы (пароводяные смеси, сухой пар). Основным показателем для отнесения подземных вод к теплоэнергетическим является их температура. Как правило, к теплоэнергетическим водам

относят подземные воды с температурой 35 °С и более. Выделяют низкопотенциальные воды с температурой 35—70 °С, используемые главным образом для технологических целей, в рыбоводстве, закачки в нефтеносные пласты; среднепотенциальные с температурой 70—100 °С, применяемые для теплоснабжения промышленных, сельскохозяйственных и коммунально-бытовых объектов; высокопотенциальные с температурой более 100 °С, которые также широко используются для теплоснабжения, а при температуре 150—160 °С и более градусов и соответствующих экономических условиях — и для выработки электроэнергии.

К **промышленным водам** относятся подземные воды, содержащие отдельные полезные компоненты или их соединения в количествах, при которых экономически эффективно их извлечение и последующее использование в народном хозяйстве. К таким полезным компонентам и их соединениям относятся бор, бром, йод, литий, германий, цезий, стронций, рубидий, калийные, натриевые и кальциевые соли и др. В настоящее время наряду с понятием «промышленные воды», используется понятие «гидроминеральное сырье», которое объединяет все природные воды, могущие служить источником для извлечения полезных компонентов. Это собственно подземные воды глубоких водоносных горизонтов, попутные воды месторождений нефти и твердых полезных ископаемых, погребенные рассолы современных эвапоритовых бассейнов, рапа континентальных озер и отшнурованных морских заливов, морская вода. К подземным водам относятся три первых из перечисленных типов. В СССР основные перспективы использования гидроминерального сырья связаны с подземными водами глубоких водоносных горизонтов. В дальнейшем изложении мы будем пользоваться термином «промышленные воды».

Приведенное подразделение подземных вод на отдельные типы, основанное на характере их использования, является в некоторой степени формальным. Это связано с тем, что во многих случаях подземные воды могут быть одновременно теплоэнергетическими и минеральными или теплоэнергетическими и промышленными. Следует стремиться к комплексному использованию таких вод. Примером комплексного использования может служить эксплуатация Махачкалинского месторождения, где подземные воды применяются для розлива, отопления зданий и горячего водоснабжения, в теплично-парниковом хозяйстве. Проведенная Б. Ф. Маврицким и Л. Ф. Полуботко геолого-экономическая оценка этого месторождения показала значительную эффективность такого использования подземных термоминеральных вод. Попутное использование тепла промышленных подземных вод (перед извлечением полезных компонентов) позволяет существенно снизить себестоимость добычи этих компонентов и сэкономить другие виды энергетических ресурсов.

Потребность в минеральных, теплоэнергетических и промышленных водах с каждым годом возрастает, поэтому вопросы оценки их эксплуатационных запасов занимают особое место. Оценке эксплуатационных запасов посвящены работы многих исследователей — Н. А. Плотникова, С. С. Бондаренко, Л. В. Боревского, Н. В. Ефре-

мочкина, Б. Ф. Мавpицкого, Н. М. Фролова, Л. С. Язвина, Г. С. Вартаняна, Л. А. Яроцкого.

Как и рассмотренные в предыдущих главах питьевые и технические воды, минеральные и теплоэнергетические воды формируют месторождения. В целом к месторождениям этих вод может быть применена формулировка, предложенная для месторождений питьевых и технических вод. В то же время существует определенная специфика в выделении границ этих месторождений, главным образом для месторождений теплоэнергетических и промышленных вод в пластовых водонапорных системах. Границы таких месторождений устанавливаются как правило, с использованием экономических критериев — граница проводится по изолинии такого значения температуры (теплосодержания) или концентрации промышленно ценного компонента, при котором экономически рентабельной является разработка оцениваемого месторождения. При многоцелевом использовании подземных вод граница имеет стоимостное выражение с использованием показателя, характеризующего «ценность воды».

Для всех трех рассматриваемых видов вод выделяют: а) месторождения пластового типа в крупных артезианских бассейнах платформенных областей; б) месторождения пластового типа в артезианских бассейнах межгорных и предгорных впадин; в) месторождения трещинно-жильных водонапорных систем горно-складчатых областей. Кроме того, выделяются некоторые специфические типы месторождений. Для промышленных вод — это месторождения в озерных понижениях (месторождения в современных эвапоритовых бассейнах и месторождения в донных отложениях озер континентального происхождения). Для минеральных вод — месторождения в бассейнах грунтовых вод, а также месторождения так называемого гидроинжекционного типа, которые формируются в зонах разгрузки напорных минеральных вод в вышележащие напорные или безнапорные горизонты. Специфическими условиями характеризуются и месторождения парогидротерм областей современного вулканизма.

В целом условия и источники формирования эксплуатационных запасов месторождений минеральных, теплоэнергетических и промышленных вод во многом сходны с аналогичными месторождениями пресных вод. Так, для месторождений в артезианских бассейнах платформенного типа основным источником формирования являются упругие запасы, для месторождений артезианских месторождений межгорных впадин и предгорных прогибов — упругие запасы и динамические ресурсы, для месторождений трещинно-жильного типа горно-складчатых структур, массивов кристаллических и метаморфических пород, парогидротерм районов современного вулканизма, гидроинжекционных месторождений — динамические ресурсы. Следует отметить, что для месторождений минеральных, теплоэнергетических и промышленных вод участие в формировании эксплуатационных запасов привлекаемых ресурсов (подземных вод других горизонтов или — там, где это возможно,— поверхностных вод) может привести к такому изменению химического, газового состава или температуры, при котором эти показатели не будут соответствовать кондиционным требо-

ваниям. В связи с этим в подобных условиях эксплуатационные запасы должны ограничиваться такой величиной, отбор которой исключает привлечение вод некондиционного состава и температуры. В то же время для ряда месторождений термальных вод, приуроченных к артезианским бассейнам межгорных впадин и предгорных прогибов, следует учитывать возможность усиления питания подземных вод в процессе эксплуатации. В этих случаях холодные воды, поступающие в области питания, в процессе движения к водозаборному сооружению приобретают температуру, соответствующую установленным кондициям.

Проведенными в последние годы исследованиями установлено, что в определенных гидрогеологических условиях эффективна разработка месторождений теплоэнергетических вод с поддержанием пластового давления путем закачки воды в специальные нагнетательные скважины. В этих случаях возможно формирование искусственных ресурсов термальных вод, которое связано с нагревом воды при ее движении от нагнетательных до водозаборных скважин.

Оценка эксплуатационных запасов минеральных, теплоэнергетических и промышленных вод проводится гидродинамическими (включая математическое моделирование), гидравлическими методами, методом гидрогеологических аналогов или совместным применением этих методов. Все эти методы и особенности их применения в конкретных гидрогеологических условиях были рассмотрены в предыдущих главах. Здесь только отметим, что гидродинамические методы являются основными при оценке эксплуатационных запасов месторождений промышленных, термоэнергетических и минеральных вод в артезианских бассейнах, а гидравлические — месторождений минеральных и теплоэнергетических вод трещинно-жильных структур в горно-складчатых областях, в районах современного вулканизма и т. д.

## 18.2. СПЕЦИФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ

Оценка эксплуатационных запасов минеральных, теплоэнергетических и промышленных вод по сравнению с пресными водами имеет ряд специфических особенностей.

1. Как правило, водоносные горизонты, содержащие промышленные и теплоэнергетические воды (в отдельных случаях и минеральные), залегают на больших глубинах и характеризуются высокими температурами и наличием растворенного в воде газа. При эксплуатации подземных вод газовый и температурный факторы выступают в качестве дополнительного источника энергии, способствующего извлечению ее на поверхность. Противоположное влияние оказывает сопротивление, возникающее в водоподъемных трубах при движении воды от забоя к устью скважины, в результате чего происходит потеря гидродинамического напора.

Влияние газового фактора. Под газовым фактором подразумевается отношение расхода газа при атмосферном давлении

к соответствующему расходу воды. В большинстве случаев минеральные, теплоэнергетические и промышленные подземные воды содержат тот или иной газ в растворенном состоянии.

При подъеме воды по трубам к поверхности земли на определенной глубине, соответствующей давлению насыщения, газ переходит из раствора в свободное состояние. В результате в верхней части скважин образуется облегченная газоводяная смесь с плотностью меньшей, чем плотность негазированной воды. Благодаря этому уровень воды в скважинах повышается. Это повышение бывает настолько значительным, что иногда из скважины даже при положении динамического уровня ниже поверхности земли начинается самоизлив (явление газлифта). В таком случае понижение уровня, замеренное на устье скважины, будет меньше понижения, замеренного в пластовых условиях. Эту разницу в понижениях $\Delta S_г$ приближенно можно определить по формуле Е. Е. Керкиса

$$\Delta S_г = \frac{\nu P_0 \tau}{\gamma_в}\left(\ln \frac{P_г}{P_1} - \frac{P_г - P_1}{P_г}\right), \qquad (18.1)$$

где $\nu$ — газовый фактор, или объемное отношение газ/вода до начала выделения газа (объем газа приведен к атмосферному давлению при температуре 0 °С); $P_0$ — атмосферное давление; $P_г$ — давление насыщения газа; $P_1$ — давление у устья скважины; $\gamma_в$ — плотность воды; $\tau$ — температурный коэффициент, рассчитанный по формуле

$$\tau = 1 + \frac{t^0}{273}, \qquad (18.2)$$

где $t^0$ — температура газоводяной смеси в верхней части скважины.

Влияние изменения температуры воды. Во многих глубоких водоносных горизонтах температура воды в пластовых условиях достигает 100 °С и больше. Однако в стволах неработающих скважин, которые вскрывают такой водоносный горизонт, вода охлаждается до температуры, соответствующей геотермическим условиям местности. При пуске скважины температура в стволе повысится, что, в свою очередь, повлечет уменьшение плотности воды. За счет этого увеличится столб воды в скважине по сравнению с тем, когда скважина не работала. В результате скважина после включения в работу начинает иногда фонтанировать (явление термолифта). При увеличении столба воды в скважинах вследствие повышения температуры понижение уровня воды, замеренное у устья, будет меньше, чем понижение в условиях пластового давления. Поэтому для определения истинного понижения в эксплуатируемом пласте к замеренному понижению на устье скважины нужно прибавить поправку $\Delta S t^\circ$ на влияние температуры. С достаточной для практической цели точностью размер этой поправки можно рассчитать по формуле

$$\Delta S_{t^\circ} = \frac{H_0}{2}\left(\frac{\gamma_{ст} - \gamma_д}{\gamma_д}\right), \qquad (18.3)$$

где $H_0$ — столб воды в скважине; $\gamma_{ст}$ — плотность воды у устья неработающей скважины; $\gamma_д$ — плотность у устья действующей скважины.

Значения поправок $\Delta S_г$ и $\Delta St^\circ$ при больших глубинах скважин достигают размеров, соизмеримых с общим понижением уровня.

Влияние сопротивления при движении воды в водоподъемных трубах. При движении воды от забоя к устью скважины часть напора теряется на преодоление сил сопротивления, возникающих в результате трения, пульсации и т. д. Вследствие этого понижение, замеренное на устье, будет большим по сравнению с забойным на размер этих потерь $\Delta S_н$. Для определения поправки $\Delta S_н$ на потери напора в водоподъемных трубах с достаточной точностью можно использовать универсальную формулу Дарси, которую в упрощенном виде можно записать так:

$$\Delta S_н = 2{,}33 \cdot 10^{-13} H_0' \frac{Q_0^2}{d^{5,3}}, \qquad (18.4)$$

где $H_0'$ — глубина от устья до средних отверстий фильтра, м; $Q_0$ — дебит скважины, м³/сут; $d$ — диаметр скважины, м.

Учет влияния газового фактора, изменения температуры воды, потерь напора в водоподъемных трубах имеет особое значение при определении фильтрационных параметров пластов. Принимаемое для расчета понижение забойного давления $S_{заб}$ выражается так:

$$S_{заб} = S_{уст} + \Delta S_г + \Delta S_{t^\circ} - \Delta S_н, \qquad (18.5)$$

где $S_{уст}$ — замеренное понижение на устье.

Оценивая эксплуатационные запасы минеральных, теплоэнергетических и промышленных вод, поправки $\Delta S_г$, $\Delta St^\circ$, $\Delta S_н$ необходимо учитывать при определении максимально допустимого понижения уровня. Без учета отмеченных факторов размер допустимого понижения обычно выбирают, исходя из технических возможностей насосного оборудования. Однако в связи с тем что при отборе воды под влиянием растворенного в ней газа и увеличения температуры происходит повышение динамического уровня воды в скважинах, а в результате потери напора в трубах — его понижение, то расчетное значение максимально допустимого понижения принимается равным:

$$S_{max} = h_д + \frac{P_и}{\gamma(t)} + \Delta S_г + \Delta S_{t^\circ} - \Delta S_н, \qquad (18.6)$$

где $h_д$ — допустимая глубина понижения динамического уровня от устья скважины; $P_и$ — избыточное давление; $\gamma(t)$ — плотность воды в процессе эксплуатации.

При расчете водозабора в режиме самоизлива $h_д = 0$.

2. Важной особенностью оценки эксплуатационных запасов минеральных и промышленных вод является необходимость обоснования устойчивости (или допустимых изменений) качества воды, а теплоэнергетических вод — температуры в процессе эксплуатации.

Для месторождений пластового типа, приуроченных к артезианским бассейнам, такой прогноз может быть выполнен гидродинамическим методом по зависимостям, приведенным в главе 10. При этом следует отметить, что в подобных условиях существенные изменения качества воды и ее температуры при движении вод некондиционного

состава к водозаборному сооружению по эксплуатируемому пласту может произойти через достаточно длительное время даже при близком расположении водозаборного сооружения от границы зоны некондиционных вод. Как было показано И. И. Крашиным на основании расчета методом математического моделирования эксплуатационных запасов теплоэнергетических вод Терско-Сунженской депрессии, за 60 лет эксплуатации холодная вода из области питания продвинется всего на 5 км, а изменение температуры в этой полосе не превысит 1—1,5 °С.

Несоизмеримо большое значение имеют доказательства устойчивости состава и температуры подземных вод при оценке эксплуатационных запасов минеральных и термальных вод трещинно-жильных структур. В этих условиях поставленная задача решается проведением длительных опытно-эксплуатационных откачек (выпусков), в процессе которых выполняются наблюдения за ионно-солевым, газовым составом и температурой воды. Поскольку для таких месторождений во многих случаях характерна связь режима подземных вод с гидрометеорологическими факторами, опытно-эксплуатационные откачки (выпуски) должны проводиться в сроки, охватывающие периоды наибольшей и наименьшей интенсивности питания водоносного горизонта и в общем составлять не менее одного годового цикла. Длительные опытно-эксплуатационные откачки (выпуски) на месторождениях минеральных и теплоэнергетических вод, связанных с трещинно-жильными структурами, проводятся не только для оценки устойчивости качества воды и температуры, но и для определения самой величины эксплуатационных запасов гидравлическими методами. Эти месторождения, как правило, характеризуются очень сложными гидрогеологическими условиями, где гидродинамические методы неприменимы.

При оценке эксплуатационных запасов теплоэнергетических вод глубоких водоносных горизонтов в ряде случаев необходимо проводить прогноз уменьшения температуры воды при ее движении от забоя к устью скважины. В этом случае потери тепла определяются различными факторами: коэффициентом теплоотдачи, теплоемкостью и плотностью теплоэнергетических вод, диаметром и глубиной скважины, ее дебитом. При небольшом дебите скважин изменение температуры воды может быть довольно существенным.

Для прогноза температуры на устье скважины возможно использование следующей зависимости:

$$T_{\text{у}} = T_0 + (T_{\text{пл}} - T_0)\, e^{\frac{\varepsilon_{\text{т}} d h_{\text{с}}}{Q_0}}, \qquad (18.7)$$

где $T_{\text{у}}$ — температура воды на устье скважины, °С; $T_0$ — температура пород на глубине «нейтрального слоя», °С; $T_{\text{пл}}$ — температура воды в пласте термальных вод, °С; $d$ — диаметр скважины, м; $h_{\text{с}}$ — глубина скважины, м; $\varepsilon_{\text{т}}$ — комплексный параметр, зависящий от коэффициента теплоотдачи, теплоемкости и плотности теплоэнергетических вод, м/сут.

Параметр $\varepsilon_{\text{т}}$ определяется по результатам опытных работ путем решения уравнения (18.7) относительно этого параметра.

3. Месторождения промышленных и теплоэнергетических вод обычно приурочены к глубокозалегающим водоносным горизонтам (до 2—3 км и более), содержащим высокоминерализованные воды или рассолы. В связи с этим при эксплуатации таких месторождений необходимо проводить мероприятия по сбросу (захоронению) использованных вод. Кроме того, эксплуатация ведется при больших понижениях уровня, достигающих нескольких сотен метров. Поэтому при оценке эксплуатационных запасов теплоэнергетических и промышленных вод необходимо проводить технико-экономическое обоснование рентабельности эксплуатации. Такое обоснование основывается на разработке и утверждении кондиций для подсчета запасов.

Кондиции представляют собой совокупность экономически обоснованных требований к качеству и количеству воды, техническим условиям эксплуатации месторождения при рациональном использовании недр и соблюдения правил охраны окружающей среды. При разработке кондиций должны учитываться требования Инструкции о содержании и порядке представления на утверждение в ГКЗ СССР технико-экономических обоснований кондиций для подсчета запасов полезных ископаемых.

В проекте кондиций для подсчета запасов теплоэнергетических и промышленных вод обосновываются следующие показатели: средние и минимальные температуры термальной воды (пароводяной смеси) или среднее и минимальное содержание основных и попутных полезных компонентов, допустимое содержание вредных примесей, глубина и конструкция скважин, максимально допустимые понижения уровней в них, средние расчетные и минимально допустимые дебиты скважин, способы и средства водоподъема, система транспортировки воды до водопотребителя, согласованный с заказчиком расчетный срок эксплуатации водозаборного сооружения и режим отбора воды в пределах этого срока, способы удаления использованных вод.

При разработке кондиций в технико-экономическом обосновании рентабельности разработки месторождений теплоэнергетических и промышленных вод должно учитываться наличие других конкурентоспособных вариантов получения теплоэнергоресурсов или соответствующих видов минерального сырья. Выбор оптимального варианта должен осуществляться на основе поварианных технико-экономических расчетов с учетом затрат на сброс или захоронение промышленных стоков. В расчетах должны учитываться возможные варианты комплексного использования подземных вод (для извлечения полезных компонентов, в теплоэнергетических и бальнеологических целях).

4. При оценке эксплуатационных запасов промышленных и теплоэнергетических вод кроме самого подсчета запасов воды необходимо определить: а) для промышленных вод — их общее количество (в кубических метрах) и количество содержащихся в них полезных компонентов (в тоннах), которое будет получено на месторождении за расчетный срок эксплуатации; б) для теплоэнергетических вод — тепло-

энергетическую мощность месторождения (в Гкал/ч, МВт, тоннах условного топлива — в зависимости от намечаемого использования вод).

**Контрольные вопросы, задания. 1.** Какие подземные воды относятся к минеральным, теплоэнергетическим, промышленным? **2.** Сформулируйте понятие о месторождениях минеральных, теплоэнергетических и промышленных вод и принципы их ограничения. **3.** Сравните типы месторождений питьевых и технических подземных вод и месторождений минеральных, теплоэнергетических, промышленных вод; охарактеризуйте источники формирования их эксплуатацио ых запасов. **4.** Как при расчете водозаборных сооружений учитываются методические особенности минеральных, теплоэнергетических и промышленных вод? **5.** Какие дополнительные задачи необходимо решать при оценке эксплуатационных запасов минеральных, теплоэнергетических и промышленных вод по сравнению с пресными водами?

*Приложение 1*

**Значение функции $E_i(-x)$ и $W(x, r/B)$ при $x = \frac{r^2}{4at}$**

| $x$ | $-E_i(-x)$ | $W$ при $r/B$ | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 0,1 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1 |
| 0,0005 | 7,024 | 4,853 | 3,504 | 2,229 | 1,555 | 1,131 | 0,842 |
| 6 | 6,842 | 4,851 | | | | | |
| 7 | 6,688 | 4,848 | | | | | |
| 8 | 6,554 | 4,843 | | | | | |
| 9 | 6,437 | 4,837 | | | | | |
| 0,001 | 6,331 | 4,829 | | | | | |
| 2 | 5,639 | 4,708 | 3,504 | | | | |
| 3 | 5,235 | 4,562 | 3,497 | | | | |
| 4 | 4,948 | 4,423 | 3,481 | | | | |
| 5 | 4,726 | 4,296 | 3,457 | | | | |
| 6 | 4,545 | 4,181 | 3,427 | | | | |
| 7 | 4,392 | 4,077 | 3,395 | | | | |
| 8 | 4,259 | 3,982 | 3,360 | 2,229 | | | |
| 9 | 4,142 | 3,895 | 3,324 | 2,227 | | | |
| 0,01 | 4,038 | 3,815 | 3,288 | 2,225 | 1,555 | | |
| 2 | 3,355 | 3,244 | 2,952 | 2,181 | 1,553 | 1,131 | |
| 3 | 2,959 | 2,887 | 2,690 | 2,103 | 1,542 | 1,130 | |
| 4 | 2,681 | 2,629 | 2,482 | 2,016 | 1,521 | 1,127 | |
| 5 | 2,468 | 2,427 | 2,311 | 1,928 | 1,493 | 1,121 | 0,841 |
| 6 | 2,295 | 2,262 | 2,167 | 1,845 | 1,459 | 1,117 | 0,839 |
| 7 | 2,151 | 2,123 | 2,044 | 1,767 | 1,423 | 1,099 | 0,836 |
| 8 | 2,027 | 2,003 | 1,935 | 1,695 | 1,386 | 1,086 | 0,832 |
| 9 | 1,919 | 1,898 | 1,839 | 1,627 | 1,349 | 1,067 | 0,826 |
| 0,1 | 1,823 | 1,805 | 1,753 | 1,564 | 1,312 | 1,050 | 0,819 |
| 2 | 1,223 | 1,216 | 1,194 | 1,114 | 0,996 | 0,858 | 0,715 |
| 3 | 0,906 | 0,902 | 0,890 | 0,846 | 0,778 | 0,693 | 0,601 |
| 4 | 0,702 | 0,700 | 0,693 | 0,665 | 0,621 | 0,565 | 0,502 |
| 5 | 0,560 | 0,558 | 0,553 | 0,534 | 0,504 | 0,465 | 0,421 |
| 6 | 0,454 | 0,453 | 0,450 | 0,436 | 0,415 | 0,387 | 0,354 |
| 7 | 0,374 | 0,373 | 0,370 | 0,361 | 0,345 | 0,324 | 0,300 |
| 8 | 0,311 | 0,310 | 0,308 | 0,301 | 0,289 | 0,273 | 0,254 |
| 9 | 0,260 | 0,260 | 0,258 | 0,253 | 0,244 | 0,231 | 0,217 |
| 1,0 | 0,219 | 0,219 | 0,218 | 0,214 | 0,206 | 0,197 | 0,186 |
| 2 | 0,049 | 0,049 | 0,049 | 0,048 | 0,047 | 0,046 | 0,044 |
| 3 | 0,013 | 0,013 | 0,013 | 0,013 | 0,013 | 0,012 | 0,012 |
| 4 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,004 |
| 5 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 |

**Значение функций $erfc(x)$, $K_0(x)$**

| $x$ | $erfc(x)$ | $K_0(x)$ | $x$ | $erfc(x)$ | $K_0(x)$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 0,0 | 1 | $\infty$ | 0,44 | 0,5338 | 1,0321 |
| 0,02 | 0,9774 | 4,0285 | 0,46 | 0,5253 | 0,9943 |
| 0,04 | 0,9549 | 3,3365 | 0,48 | 0,4973 | 0,9584 |
| 0,06 | 0,9324 | 2,9329 | 0,50 | 0,4795 | 0,9244 |
| 0,08 | 0,9099 | 2,6475 | 0,54 | 0,4451 | 0,8614 |
| 0,10 | 0,8875 | 2,4271 | 0,58 | 0,4121 | 0,8042 |
| 0,12 | 0,8652 | 2,2479 | 0,62 | 0,3806 | 0,7520 |
| 0,14 | 0,8431 | 2,0972 | 0,66 | 0,3506 | 0,7043 |
| 0,16 | 0,8210 | 1,9674 | 0,70 | 0,3332 | 0,6605 |
| 0,18 | 0,7991 | 1,8537 | 0,74 | 0,2953 | 0,6202 |
| 0,20 | 0,7773 | 1,7527 | 0,78 | 0,2700 | 0,5829 |
| 0,22 | 0,7557 | 1,6620 | 0,82 | 0,2462 | 0,5484 |
| 0,24 | 0,7343 | 1,5798 | 0,86 | 0,2239 | 0,5164 |
| 0,26 | 0,7131 | 1,5040 | 0,90 | 0,2031 | 0,4867 |
| 0,28 | 0,6921 | 1,4360 | 0,94 | 0,1837 | 0,4591 |
| 0,30 | 0,6714 | 1,3725 | 0,98 | 0,1658 | 0,4333 |
| 0,32 | 0,6509 | 1,3136 | 1,1 | 0,1198 | 0,3656 |
| 0,34 | 0,6306 | 1,2587 | 1,3 | 0,0660 | 0,2782 |
| 0,38 | 0,5910 | 1,1596 | 1,7 | 0,0162 | 0,1655 |
| 0,40 | 0,5716 | 1,1145 | 1,9 | 0,0072 | 0,1288 |
| 0,42 | 0,5525 | 1,0721 | 2,0 | 0,0047 | 0,1139 |

## СПИСОК
## ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ


1. Биндеман Н. Н., Язвин Л. С. Оценка эксплуатационных запасов подземных вод.— М. : Недра, 1970.— 214 с.

2. Бондаренко С. С., Боревский Л. В., Ефремочкин Н. В. Изыскания и оценка запасов промышленных подземных вод. — М. : Недра, 1971.— 244 с.

3. Боревский Б. В., Самсонов В. Г., Язвин Л. С. Методика определения параметров водоносных горизонтов по данным откачек.— М. : Недра, 1979.— 326 с.

4. Боревский Б. В., Хордикайнен М. А., Язвин Л. С. Разведка и оценка эксплуатационных запасов месторождений подземных вод в трещинно-карстовых пластах.— М. : Недра, 1976.— 247 с.

5. Бочевер Ф. М. Расчеты эксплуатационных запасов подземных вод.— М. : Недра, 1968.— 325 с.

6. Бочевер Ф. М., Веригин Н. Н. Методическое пособие по расчетам эксплуатационных запасов подземных вод для водоснабжения.— М. : Госстройиздат, 1961.— 199 с.

7. Бочевер Ф. М., Орадовская А. К. Гидрогеологическое обоснование защиты подземных вод и водозаборов от загрязнения.— М. : Недра, 1972.— 128 с.

8. Бочевер Ф. М. и др. Основы гидрогеологических расчетов / Ф. М. Бочевер, И. В. Гармонов, А. В. Лебедев, В. М. Шестаков.— М. : Недра, 1969.— 368 с.

9. Вартанян Г. С., Яроцкий Л. А. Поиски, разведка и оценка эксплуатационных запасов месторождений минеральных вод.— М. : Недра, 1972.— 128 с.

10. Гавич И. К. Оценка эксплуатационных запасов подземных вод методом моделирования.— М. : ВИЭМС, 1972.— 98 с.

11. Гавич И. К. Теория и практика применения моделирования в гидрогеологии.— М. : Недра, 1980.— 359 с.

12. Глазунов И. С. Методические рекомендации по технико-экономическому обоснованию рациональных схем скважинных водозаборов при разведке подземных вод.— М.: Недра, 1973.— 125 с.

13. Гольдберг В. М. Гидрогеологические прогнозы качества подземных вод на водозаборах.— М. : Недра, 1976.— 153 с.

14. Гольдберг В. М., Газда С. Гидрогеологические основы охраны подземных вод от загрязнения.— М. : Недра, 1984.— 262 с.

15. Гольдберг В. М., Язвин Л. С. Методические указания по оценке эксплуатационных запасов термальных вод. — М. : ВСЕГИНГЕО, 1966. — 114 с.

16. Дробноход Н. И. Оценка запасов подземных вод.— К. : Вища шк., Головное изд-во, 1976.— 215.

17. Дробноход Н. И., Язвин Л. С., Боревский Б. В. Оценка запасов подземных вод.— К. : Вища шк., Головное изд-во, 1982.— 301 с.

18. Жернов И. Е., Шестаков В. М. Моделирование фильтрации подземных вод.— М. : Недра, 1971.— 224 с.

19. Инструкция по применению классификации эксплуатационных запасов подземных вод к месторождениям питьевых и технических вод: Утв. ГКЗ СССР 19.01.84.— М., 1984.— 18 с.

20. Инструкция по применению классификации эксплуатационных запасов подземных вод к месторождениям лечебных минеральных вод: Утв ГКЗ СССР 06.06.84.— М., 1984.— 16 с.

21. Инструкция по применению классификации эксплуатационных запасов подземных вод к месторождениям теплоэнергетических вод: Утв. ГКЗ СССР 06.06.84.— М., 1984.— 15 с.

22. Инструкция по применению классификации эксплуатационных запасов подземных вод к месторождениям промышленных вод: Утв. ГКЗ СССР 06.06.84.— М., 1984.— 14 с.

23. Кац Д. М., Пашковский И. С. Мелиоративная гидрогеология.— М.: Агропромиздат, 1988.— 256 с.

24. Классификация эксплуатационных запасов и прогнозных ресурсов подземных вод: Утв. ГКЗ СССР 25.02.83.— М., 1983.— 11 с.

25. Лучшева А. А. Практическая гидрология. — Л. : Гидрометеоиздат, 1976.— 440 с.

26. Минкин Е. Л. Взаимосвязь подземных и поверхностных вод и ее значение при решении некоторых гидрогеологических водохозяйственных задач.— М. : Стройиздат, 1973.— 103 с.

27. Мирзаев С. Ш., Валиев Х. И. Разведка и оценка запасов подземных вод для орошения.— Ташкент: Фан, 1977.— 201 с.

28. Мироненко В. А. Динамика подземных вод.— М. : Недра, 1983.— 357 с.

29. Мироненко В. А., Шестаков В. М. Теория и методы интерпретации опытно-фильтрационных работ.— М. : Недра, 1978.— 325 с.

30. Орадовская А. К., Лапшин Н. Н. Санитарная охрана водозаборов подземных вод.— М. : Недра, 1987.— 167 с.

31. Плотников Н. И. Поиски и разведка пресных подземных вод для целей водоснабжения.— М. : Изд-во Моск. ун-та.— Ч. 1.— 1965.— 470 с.; Ч. 2.— 1968.— 243 с.

32. Плотников Н. И. Эксплуатационная разведка подземных вод.— М. : Недра, 1973.— 296 с.

33. Плотников Н. А., Сычев К. И. Оценка эксплуатационных запасов подземных вод с искусственным их восполнением. — М. : Недра, 1976.— 152 с.

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

35. Поиски и разведка подземных вод для крупного водоснабжения / Под ред. Н. Н. Биндемана.— М. : Недра, 1969.— 328 с.

36. Поиски, разведка, оценка запасов и эксплуатация линз пресных вод / В. Д. Бабушкин, И. С. Глазунов, В. М. Гольдберг и др.— М. : Недра, 1969.— 304 с.

37. Проектирование водозаборов подземных вод / А. И. Арцев, Ф. М. Бочевер, Н. Н. Лапшин и др.— М. : Стройиздат, 1976.— 292 с.

38. Региональная оценка ресурсов подземных вод / Под ред. Н. Н. Биндемана.— М. : Наука, 1975.— 136 с.

39. Сборник руководящих материалов по геолого-экономической оценке месторождений полезных ископаемых.— М. : ГКЗ СССР, 1986.— 206 с.

40. Рекомендации по проектированию и эксплуатации систем искусственного пополнения запасов подземных вод (ИППВ).— М. : ВНИИ ВОДГЕО, 1976.— 223 с.

41. Руководство по проектированию сооружений для забора подземных вод.— М. : Стройиздат, 1978.— 209 с.

42. Справочное руководство гидрогеолога / Под ред. В. М. Максимова.— Л. : Недра, 1979.— Т. 1.— 295 с.; Т. 2.— 512 с.

43. Усенко В. С. Искусственное восполнение запасов и инфильтрационные водозаборы подземных вод.— Минск : Наука и техника, 1972.— 252 с.

44. Ферронский В. И., Поляков В. А., Романов В. В. Космогенные изотопы гидросферы.— М. : Наука, 1984.— 268 с.

45. Шестаков В. М. Динамика подземных вод.— М. : Изд-во Моск., ун-та, 1979.— 368 с.

46. Штенгелов Р. С. Формирование и методы оценки эксплуатационных запасов пресных подземных вод.— М. : Недра, 1988.— 231 с.

47. Язвин Л. С. Достоверность гидрогеологических прогнозов при оценке эксплуатационных запасов подземных вод.— М. : ВСЕГИНГЕО, 1971.— 168 с.

48. Язвин Л. С. и др. Методическое руководство по разведке и оценке эксплуатационных запасов подземных вод для водоснабжения / Л. С. Язвин, Б. В. Боревский, В. Д. Гродзенский, М. П. Полканов. — М. : ВСЕГИНГЕО, 1979.— 132 с.

Амортизационные отчисления 361
Аналогия полная 88, 221
— частичная 88, 220

Большой колодец 171

Влагоемкость максимальная молекулярная 58
— полная 57
Водозаборные сооружения 145—146
Водозаборы инфильтрационные (береговые) 309
— лучевые 250
Воды минеральные 386
— промышленные 387
— теплоэнергетические 386
Возвратные воды 18, 20, 257
Возобновляемость подземиых вод 8

Газлифт 390
Газоводяная смесь 390
Газовый фактор 390
Гидрограф (гидрограмма) реки 81
Гидродисперсия продольная 232
— поперечная 232
Границы месторождений подземных вод 43—45
Границы пласта 141—143
Граничные условия 143—145
— — I рода 143—144
—— II рода 144
—— III рода 144
—— IV рода 144

Дискретизация области фильтрации 201, 204
Доля суффозионного выноса 287
Допустимое понижение 96—97, 391
Дренажно-поглощающие скважины 265

Загрязнение подземиых вод 225
— бактериальное (микробное) 229
— второй степени 226
— механическое 231
— первой степени 225
— радиоактивное 230
— тепловое 230
— химическое 229
Запасы подземных вод 12—18
— антропогенные 16
— балансовые 335
— вековые 12
— геологические 12
— гравитационные 16, 61—62
— динамические 12, 18
— емкостные 12, 57
— естественно-антропогенные 14, 16
— естественные 12, 16
— забалансовые 335
— искусственные 13, 18
— пассивные 12
— перспективные 23, 347
— потенциальные 23
— предварительно оцененные 335, 347
— привлекаемые 12—13, 18
— природные (общие) 16
— прогнозные 15, 22, 343
— разведанные 335
— регулировочные 62
сложившиеся 14
— статические 12
— упругие 13, 16, 62
— эксплуатационные 12—13, 19
Закон изменения дебита водозаборного сооружения 173
Зона санитарной охраны 251

Изученность месторождений подземных вод 350
Инфильтрационные сооружения открытые 264
— — закрытые 265
Информационная характеристика гидрогеологических моделей 114
Искусственное подпитывание подземных вод (ИППВ) 262
Искусство разведки 376
Источники загрязнения подземных вод 229—231
— питания подземных вод 24—25

— формирования эксплуатационных запасов подземных вод 31—32
— ИППВ 263

Капитальные затраты 360
Карта водопроводимости 122, 124
— динамических ресурсов 90—91
Категории водозаборов 153
— эксплуатационных запасов 335—337, 343
Карстово-суффозноиный процесс 283
Классификация запасов (ресурсов) подземных вод 12, 16
— эксплуатационных 18—20
— эксплуатационных и прогнозных 335
— месторождений дренажных подземиых вод 259
Коли-индекс 228
Коли-титр 228
Конвективный (фильтрационный) перенос 232—233
Кондиции для подсчета запасов 393
Коэффициент активной пористости 58
— водоотдачи (гравитационной водоотдачи) 57
— динамичности груитового стока в реку 83
— микродисперсии 241
— модульный 154
— недостатка иасыщения 57
— объемной упругости воды 60
— объемной упругости пород 60
— общей эффективности ИППВ 267
— перетекания 308
— полезного действия ИППВ 267
— прогнозного использования подземных вод 23
— просачивания 77
— сжимаемости породы 282
— сопротивления $A_0$ 308
— сопротивления подрусловой толщи 311
— температурный 390
— упругоемкости 60
— упругой водоотдачи 61
— эффективиости капитальных вложений 358
Кривая дебита 214
— обеспеченности (вероятности превышения) 80
— расходов реки 80

Линзы пресных вод 230, 328

Макродисперсия 232
Масштабы (критерии) подобия 224
Меженный сток 80
Мелиоративный эффект 257, 277
Месторождения минеральных вод 388
— промышленных вод 388
— теплоэнергетических 388
Месторождения подземиых вод 41—42
— в артезианских бассейнах межгорных впадин и предгориых прогибов 296, 317
— в артезианских бассейнах платформенных областей 296, 316—317
— в бассейнах и потоках грунтовых вод зон экзогенной трещиноватости 297, 327
— в бассейнах и потоках грунтовых вод песчаных массивов:
— — зандровых равнии 297, 328
— — пустынь и полупустынь 297, 328
— — широких речных террас 297, 328
— в бассейнах и потоках грунтовых вод трещинно-карстовых массивов 327
— в бассейнах субнапорных вод межморениых отложений 297, 328
— в конусах выиоса (субаэральных дельтах) 296, 321
— в ограниченных по площади структурах в трещинно-карстовых и трещинных коллекторах 297, 324—325
— в ограниченных структурах в рыхлообломочных коллекторах 297, 324—325
— в ограничениых структурах в наложенных молодых депрессиях 297, 324—325
— в ограниченных структурах в погребенных речных долинах 297, 325
— в потоках трещинно-жильных вод 297, 330
— в периферийных частях лавовых потоков 297, 331
— в таликах в области развития многолетнемерзлых пород 297, 332—333
— в речных долинах горных рек 296, 304—306
— в речных долинах равнинных рек 296, 304—306
Метод аналитический 236
— графический 232
— гидрогеологических аналогов 220
— графоаналитическнй 236
— зеркальных отображений 176—177, 181—182
— конечных разностей 67—68
— лизиметрический 77—78
— математического моделирования 192—198
— иаложения течений (суперпозиции) 166—167
— натурного моделироваиия 88, 106
— натурного подобия 106
— природных аналогов 106
— расчленения гидрографа реки 81—83

— среднемноголетнего водного баланса 78
— удельных депрессионных воронок 219
— экспертных оценок 107, 377
Методы оценки динамических ресурсов 64—66
— балансовые 75—79
— гидрогеологических аналогов 87—88
— гидродинамические 66—67
— гидрометрические 79—87
Методы оценки эксплуатационных запасов балансовые 105
— гидравлические 104, 214
— гидрогеологических аналогов 105—106
— гидродинамические 102—103, 166—168
— искусственного подпитывания подземных вод 264—265
— расчета нейтральной линии тока 236
Миграция 232
Микродисперсия 232
Модель условий формирования эксплуатационных запасов геофильтрационная 110—111, 135
— природная 108—111
— разведочная 365
— расчетная 110
— эвристическая 371
Модуль динамических ресурсов 64
— подземного стока 64, 84
— подземного питания рек 64
Модуль эксплуатационных запасов линейный 221, 353
— площадной 221
Молекулярная диффузия 232

Начальные условия 142—143
Нейтральная линия тока 236
Норма атмосферных осадков 78
— испарения 78
— питания подземных вод 63
— расхода родника 154
— речного стока 78

Область формирования эксплуатационных запасов подземных вод 43
— влияния водозаборных сооружений 43
— захвата водозаборного сооружения 235—236
Обеспеченность эксплуатационных запасов 151
Обобщенная система скважин 171
— линейная 171
— кольцевая 171
— площадная 171
Обратная задача 205—209
Опорная информация 115
Оптимизация разведки МППВ 371—372
Оценка эксплуатационных запасов 93

Параметр (фактор) перетекания 186—187
Параметры емкости пластов 57
— гравитационной 57—58
— упругой 57, 60
— эффективной 125, 140
Пласт двухслойный 187, 306
— квадрант 142
— круговой 142
— многослойный 306
— неограниченный (безграничный) 141
— неоднороднослоистый 186
— ограниченный 142
— однороднослоистый 185
— однослойный 306
— полосообразный 142
— полуограниченный 141
— полуполосообразный 142
— сложнослоистый 118
— трехслойный 186, 306
— угловой 142
Подземный сток 25
— в реки 25
Подстадия «общих поисков» 378
— «детальных поисков» 379
Поле фильтрационных параметров 119—127
— гидродинамических напоров 129
— емкостных параметров 127—128
— миграционных параметров 133, 146
Показатели качества воды макробиологические 228
— органолептические 226—227
— токсикологические 227
Показатель гидравлического сопротивления за счет несовершенства скважины по степени вскрытия 169
— по характеру вскрытия 170
Показатель интенсивности карстового процесса 286
Поршневое вытеснение 233—234
Пояс зоны санитарной охраны 251
— второй (ограничений) 252
— первый (строгого режима) 251
— третий (ограничений) 252
Приведенное время эксплуатации 275
Приведенные затраты 358
Приведенный водоотбор 276
Приведенный радиус водозаборного сооружения 351, 353
Принципы разведки МППВ 367
Пропускная способность русла реки 310

Радиус влияния приведенный 168
— скважины приведенный 171
Разведка МПВ 364
Расчленение гидрографа 81
Рациональное использование подземных вод 5

Рациональное комплексирование методов 373
Региональная оценка динамических ресурсов 89
— эксплуатационных ресурсов 346
Ресурсы подземных вод (см. запасы подземных вод)

Сложность гидрогеологнческих условнй 299
Сокращение речного стока 288—290
Спаренные скважины 248
Среднегодовой расход водозабора 256
Стадийность разведочных работ 369, 377
Стадия поисков 378—379
— детальной разведки 381—382
— предварительной разведки 379—381
— эксплуатационной разведки 382—383
Степень фильтрационной неоднородности 300
Стратегия разведки 376
Схема водозаборного сооружения 358
— Мятиева — Гиринского 125
— разведки МППВ 366
Схематизация гидрогеологических условий 108—109
— гидрогеологического разреза 116—119, 136—137
— полей гидрогеологических параметров 138, 140
«Сырая» вода 267

Тактнка разведки 366, 376
Талики речных долин 333
— подаласные 333
— подозерные 333
Технико-экономическое обоснование 356—359
Тнпизация месторождений подземных вод 295
Уравнение водного баланса 76
— баланса влаги в зоне аэрации 77

Факторно-диапазонная оценка 209
Факторы формирования динамических ресурсов 26—27
— антропогенные 28
— биогенные 27
— геологические 27
— гидрогеологические 27
— естественные 26—27
— физико-географические 26—27
Факторы формирования эксплуатационных запасов 30
— антропогенные 30
— естественные 30
Фильтрационное (гидравлическое) сопротивление 166, 168
Формирование водоотдачи 58
— динамических ресурсов 26
— эксплуатационных запасов 30
Формула Буссинеска — Майэ 155
— Дюпюн 168
— Маскета — Лейбеизона 178
— Тейса 168
— Цункера 315
Фрагментирование области фильтрации 200—201
Функция Бесселя 187
— Хантуша 186

Экономический эффект 358
Эксплуатационные расходы 358, 360
Эксплуатациоиный участок 41
Эффективная пористость 241
Эффективное давление 282
Эффективные осадки 76

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение . . . . . 3

**Глава 1. Основные понятия и общие положения оценки запасов подземных вод** . . . . . 8

1.1. Особенности подземных вод как полезного ископаемого . . . . . 8
1.2. Виды запасов подземных вод и их классификация 11
1.3. Особенности формирования динамических ресурсов подземных вод . . . . . 24
1.4. Особенности формирования эксплуатационных запасов подземных вод . . . . . 29
1.5. Понятие о месторождениях подземных вод . . . 40
1.6. Основные этапы изучения ресурсов питьевых и технических вод в СССР . . . . . 45
1.7. Официальные документы и положения, регламентирующие использование питьевых и технических подземных вод в СССР . . . . . 52

**Глава 2. Оценка емкостных запасов подземных вод** . . . . . 57

2.1. Параметры емкости пластов . . . . . 57
2.2. Определение емкостных запасов подземных вод 61

**Глава 3. Оценка динамических ресурсов подземных вод** . . . 63

3.1. Общая характеристика методов оценки . . . . . 63
3.2. Гидродинамические методы . . . . . 66
3.3. Балансовые методы . . . . . 75
3.4. Гидрометрические методы . . . . . 79
3.5. Методы гидрогеологических аналогов . . . . . 87
3.6. Принципы региональной оценки динамических ресурсов подземных вод . . . . . 89

**Глава 4. Содержание оценки эксплуатационных запасов месторождений подземных вод** . . . . . 93

4.1. Задачи оценки эксплуатационных запасов месторождений подземных вод . . . . . 93
4.2. Основные принципы и элементы оценки эксплуатационных запасов подземных вод . . . . . 95
4.3. Общая характеристика методов гидрогеологических прогнозов при оценке эксплуатационных запасов подземных вод . . . . . 101

**Глава 5. Принципы схематизации условий формирования эксплуатационных запасов подземных вод** . . . . . 108

5.1. Общие вопросы схематизации гидрогеологических условий и построения моделей месторождений подземных вод . . . . . 108

5.2. Информационная характеристика природных гидрогеологических моделей условий формирования эксплуатационных запасов месторождений подземных вод . . . . . 114
5.3. Геофильтрационная схематизация . . . . . 135
5.4. Принципы выбора метода оценки ЭЗПВ . . . . 147

**Глава 6. Оценка обеспеченности эксплуатационных запасов подземных вод** . . . . . 151

6.1. Общие принципы оценки . . . . . 151
6.2. Оценка эксплуатационных запасов подземных вод по дебитам родников . . . . . 154
6.3. Особенности оценки обеспеченности эксплуатационных запасов подземных вод в различных гидрогеологических условиях . . . . . 156

**Глава 7. Гидродинамические аналитические методы расчета водозаборных сооружений для целей оценки эксплуатационных запасов подземных вод** . . . . . 165

7.1. Общие принципы расчета . . . . . 165
7.2. Расчет водозаборных сооружений в однородном неограниченном пласте при постоянном дебите скважин . . . . . 168
7.3. Расчет водозаборных сооружений в однородном неограниченном пласте при изменяющемся дебите
7.4. Расчет водозаборных сооружений в неограниченном 173
однородном пласте при постоянном понижении уровня воды в скважинах . . . . . 174
7.5. Расчеты водозаборных сооружений в ограниченных пластах . . . . . 176
7.6. Расчет водозаборных сооружений в неоднородных в плане пластах . . . . . 184
7.7. Расчет водозаборных сооружений в слоистых пластах . . . . . 185
7.8. Расчет водозаборных сооружений в безнапорных потоках на наклонном водоупоре . . . . . 188

**Глава 8. Оценка эксплуатационных запасов подземных вод методом математического моделирования** . . . . . 192

8.1. Общие принципы оценки запасов на математических моделях . . . . . 192
8.2. Принципы построения расчетных моделей области фильтрации . . . . . 199
8.3. Особенности методики решения обратных задач 205
8.4. Особенности решения прогнозных задач . . . . 210

**Глава 9. Гидравлические методы расчета водозаборных сооружений для оценки эксплуатационных запасов подземных вод и методы гидрогеологических аналогов** . . . . . 214

9.1. Гидравлические методы . . . . . 214
9.2. Методы гидрогеологических аналогов . . . . . 220

**Глава 10. Прогноз качества подземных вод и их охрана на водозаборных участках** . . . . . 225

10.1. Общие задачи изучения качества подземных вод при оценке их эксплуатационных запасов . . . 225
10.2. Требования к качеству подземных вод различного назначения . . . . . 226
10.3. Виды и источники загрязнения подземных вод 228
10.4. Прогноз качества подземных вод при оценке эксплуатационных запасов . . . . . 231

10.5. Охрана подземных вод от загрязнения на водозаборных участках . . . . . 247

**Глава 11. Особенности оценки эксплуатационных запасов подземных вод в специфических условиях их отбора и использования** . . . . . 254

11.1. Оценка эксплуатационных запасов подземных вод для целей орошения . . . . . 254
11.2. Оценка эксплуатационных запасов подземных вод в районах разведываемых и разрабатываемых месторождений твердых полезных ископаемых . . . 257
11.3. Особенности оценки эксплуатационных запасов подземных вод в условиях их искусственного подпитывания . . . . . 262
11.3.1. Задачи, источники и условия искусственного подпитывания запасов подземных вод . . . . 262
11.3.2. Методы искусственного подпитывания запасов подземных вод . . . . . 264
11.3.3. Основные принципы и методы оценки эксплуатационных запасов подземных вод при их искусственном подпитывании . . . . . 266
11.3.4. Расчет водозаборных сооружений в условиях искусственного подпитывания запасов подземных вод . . . . . 268
11.4. Оценка эксплуатационных запасов подземных вод в районах действующих водозаборных сооружений . . . . . 273

**Глава 12. Оценка влияния эксплуатации подземных вод на изменение гидрогеологических условий и окружающую среду** . . . . . 276

12.1. Оценка снижения уровня грунтовых вод . . . . 278
12.2. Оценка оседания земной поверхности . . . . . 281
12.3. Оценка активизации карстово-суффозионных процессов . . . . . 283
12.4. Оценка изменения поверхностного стока . . . . 288

**Глава 13. Особенности формирования и оценки эксплуатационных запасов питьевых и технических подземных вод в типовых гидрогеологических условиях** . . . . . 294

13.1. Типизация месторождений подземных вод . . . . 294
13.2. Группировка месторождений подземных вод по сложности гидрогеологических условий . . . . 299
13.3. Месторождения подземных вод в речных долинах (тип I) . . . . . 304
13.4. Месторождения подземных вод в артезианских бассейнах (тип II) . . . . . 316
13.5. Месторождения в конусах выноса (субаэральных наземных дельтах) предгорных шлейфов и внутригорных впадин (тип III) . . . . . 320
13.6. Месторождения подземных вод в ограниченных по площади структурах (тип IV) . . . . . 324
13.7. Месторождения в бассейнах и потоках грунтовых вод (тип V) . . . . . 327
13.8. Месторождения в бассейнах субнапорных вод межморенных отложений (тип VI) . . . . . 328
13.9. Месторождения в потоках трещинно-жильных вод (тип VII) . . . . . 330
13.10. Месторождения в периферийных частях лавовых потоков (тип VIII) . . . . . 331

13.11. Месторождения подземных вод таликов в области развития многолетнемерзлых пород (тип IX) . . . . . 332

**Глава 14. Классификация эксплуатационных запасов и прогнозных ресурсов подземных вод и принципы их категоризации** . . . . . 335

**Глава 15. Региональная оценка эксплуатационных ресурсов подземных вод** . . . . . 346

15.1. Задачи и содержание региональной оценки . . 346
15.2. Методика региональной оценки эксплуатационных ресурсов подземных вод . . . . . 347

**Глава 16. Технико-экономические обоснования при оценке эксплуатационных запасов подземных вод** . . . . 356

16.1. Задачи технико-экономических расчетов . . . . 356
16.2. Методика технико-экономического обоснования рациональной схемы водозаборного сооружения . . 359

**Глава 17. Особенности разведки месторождений подземных вод (МПВ)** . . . . . 364

17.1. Структура и общие принципы разведки . . . . 364
17.2. Стадийность разведочных работ . . . . . 377

**Глава 18. Особенности оценки эксплуатационных запасов месторождений минеральных, теплоэнергетических и промышленных вод** . . . . . 386

18.1. Общие вопросы формирования и оценки эксплуатационных запасов . . . . . 386
18.2. Специфические особенности оценки эксплуатационных запасов . . . . . 389

Прнложення . . . . . 395

Список использованной литературы . . . . . 397

Предметный указатель . . . . . 400

Учебное издание

**Боревский Борис Владимирович**
**Дробноход Николай Иванович**
**Язвин Леонид Семенович**

**ОЦЕНКА ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД**

Переплет художника *В. Г. Самсонова*
Редактор карт А. А. *Щербина*
Художественный редактор *И. Г. Сухенко*
Технический редактор *Н. Ю. Морозова*
Корректор *Т. А. Ремезовская*

ИБ 12831

Сдано в набор 15.06.88. Подписано в печать 04.05.89. БФ 00045. Формат 60×90/16. Бумага кн.-журн. Гарнитура литературная. Высокая печать. Усл. печ. л. 25,5. Усл. кр.-отт. 25,5. Уч.-изд. л. 30,35. Тираж 2000 экз. Изд. № 8462. Зак. 692. Цена 1 р. 30 к.

Головное издательство издательского объединения «Выща школа», 252054, Киев-54, ул. Гоголевская, 7.

Отпечатано с матриц Головного предприятия республиканского производственного объединения «Полиграфкнига», 252057, Киев, ул. Довженко, 3, на Белоцерковской книжной фабрике, 256400, г. Белая Церковь, ул. К. Маркса, 4.