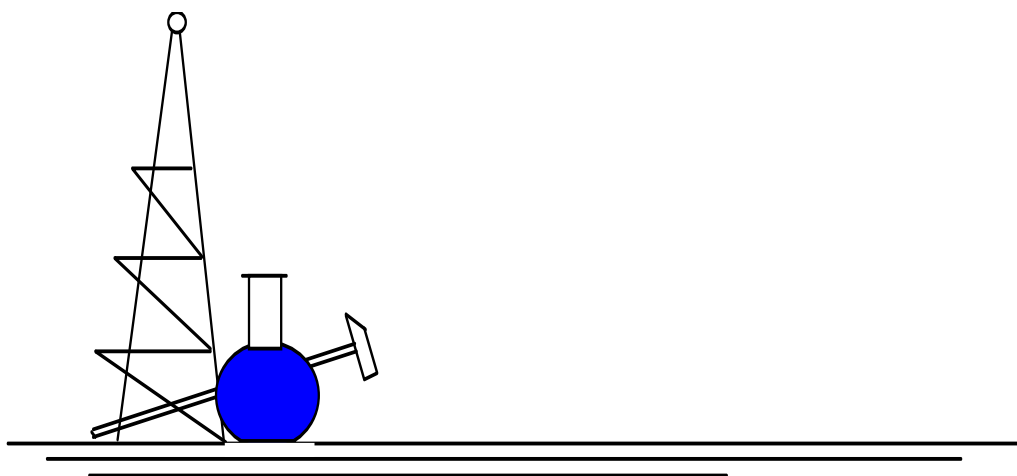


Н.М.Рассказов, М.Б.Букаты

**ОЦЕНКА РЕСУРСОВ И ЗАПАСОВ
ПОДЗЕМНЫХ ВОД**



Министерство образования Российской Федерации
Томский политехнический университет

Н.М.Рассказов, М.Б.Букаты

**ОЦЕНКА РЕСУРСОВ И ЗАПАСОВ
ПОДЗЕМНЫХ ВОД**

Учебное пособие

Томск 2002

УДК 556.3:556.5

Рассказов Н.М., Букаты М.Б. Оценка ресурсов и запасов подземных вод: Учебное пособие. - Томск: Изд. ТПУ, 2002. - 48 с.

Приведены понятия ресурсов и запасов подземных вод, классификация запасов по степени изученности, представления об эксплуатационных запасах. Рассмотрены современные методики оценки запасов и ресурсов подземных вод и проведение подсчета запасов с применением ЭВМ.

Пособие подготовлено на кафедре гидрогеологии и инженерной геологии Томского политехнического университета и предназначено для студентов и специалистов - гидрогеологов.

Печатается по постановлению Редакционно-издательского Совета Томского политехнического университета

Рецензенты:

Попов В.К., доктор геолого-минералогических наук, сотрудник Администрации Томской области

Макушин Ю.В., кандидат геолого-минералогических наук, нач. отдела информационно-программного обеспечения территориального центра "Томскгеомониторинг"

Р 20904 - 2002

Темплан 2002

© Томский политехнический университет, 2002

ВВЕДЕНИЕ

Пособие разработано для студентов специальностей "Гидрогеология и инженерная геология" и "Водные ресурсы и гидрогеоэкология", осваивающих дисциплины "Учение о гидросфере", "Поиски и разведка месторождений подземных вод" и др. Оно составлено на основе публикаций В.Д.Бабушкина, Н.Н.Биндемана [1], Б.В.Боревского, Н.И.Плотникова, В.М.Шестакова, Л.С.Язвина [2] и инструктивных материалов Министерства природных ресурсов РФ [3-9].

При написании пособия авторы преследовали цель ознакомления студентов с требованиями о порядке проведения работ по этапам и стадиям при поисках и разведке месторождений подземных вод, а также с методами оценки их ресурсов и запасов. В связи с этим излагаются материалы, необходимые для решения таких задач, как классифицирование ресурсов и запасов подземных вод, ознакомление с расчетными методами их оценки, использование математического моделирования при определении ресурсов и запасов вод в пластах, приуроченных к различным гидрогеологическим структурам с разнообразными граничными условиями.

Трудоемкость расчетов при оценке ресурсов и запасов обусловила необходимость обзора как традиционных расчетных методов, так и новых алгоритмов и программ, используемых при определении фильтрационно-ёмкостных параметров пластов и оценки ресурсов и запасов с использованием ЭВМ.

Кратко рассмотрена также специфика проведения гидродинамических расчетов при поисках и разведке месторождений глубокозалегающих подземных вод.

1. РЕСУРСЫ И ЗАПАСЫ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Понятие о ресурсах и запасах подземных вод включает различные их категории, отличающиеся как условиями формирования, так и особенностями гидрогеологических исследований, обеспечивающих обоснование той или иной категории.

Различие между содержанием терминов "ресурсы" и "запасы" достаточно точно определено Н.Н.Биндеманом [1]: первый из них характеризует запасы, обеспеченные за счет подтока вод от источников и областей питания, а второй – упругие и/или гравитационные запасы самого месторождения. В отличие от других полезных ископаемых, запасы и ресурсы подземных вод обычно измеряются в единицах расхода.

1.1. Разновидности ресурсов

На основе ряда признаков ресурсы подразделяются по определенным группам. Прежде всего, принимаются во внимание их генетические осо-

бенности, с учетом которых выделяют *естественные* и *искусственные* (формирующиеся под антропогенным влиянием) ресурсы.

Формирование естественных ресурсов обуславливают природные факторы (атмосферные осадки, поверхностные воды, соседние водоносные горизонты). Эти ресурсы обеспечивают расход подземных потоков, меняющийся под воздействием таких факторов.

Искусственные ресурсы обеспечиваются антропогенным влиянием за счет создания специальных водохранилищ на площади питания водоносных горизонтов или закачки (магазинирования) воды по скважинам в водоносные горизонты.

Учитывая площадь распространения, выделяют *региональные* и *локальные* ресурсы. Наряду с этими группами обособлена такая разновидность, как *эксплуатационные* ресурсы, за счет которых обеспечиваются запасы подземных вод при эксплуатации водоносных горизонтов.

Особую группу составляют *прогнозные* ресурсы и *прогнозные эксплуатационные* ресурсы (региональные и локальные) [7]. Первые из них включают любые прогнозируемые ресурсы, (категория Р), а ко вторым относятся те ресурсы, которые могут обеспечивать в определенном объеме питание эксплуатируемых месторождений подземных вод.

1.2. Запасы подземных вод

По различным признакам в настоящее время выделяется также несколько групп запасов подземных вод.

С учетом их восполнения выделяют *восполняемые запасы* (при условии поступления ресурсов) и *невосполняемые* (при отсутствии источников их формирования). К последним принадлежат, так называемые, *геологические* запасы подземных вод, равные объему воды в горизонте.

Как и ресурсы, запасы с учетом площади их распространения, подразделяются на региональные и локальные, а на основе генетических признаков – на естественные и искусственные (накапливаются с участием антропогенного воздействия). Если запасы определенного горизонта восполняются частично за счет притока воды из других водоносных объектов, то поступающее из них количество воды относят к *привлекаемым* запасам.

Особую группу составляют *эксплуатационные запасы*, которые могут быть извлечены или извлекаются из эксплуатируемых водоносных объектов, прежде всего, из месторождений подземных вод с соблюдением природоохранных мероприятий [7]. Как правило, эксплуатационные запасы приурочены к месторождениям подземных вод, обеспечивающим экономически обоснованную их добычу. Степень сложности этих месторождений (или их участков) различна. В связи с этим они подразделяются на три группы.

К первой из них приурочены эксплуатационные запасы месторожде-

ний подземных вод с простыми условиями. На площади их распространения водоносные горизонты (подразделения) выдержаны по площади и строению, однородны по фильтрационным свойствам, обеспечены питанием (ресурсами) и характеризуются устойчивым кондиционным химическим составом.

Вторая группа месторождений подземных вод характеризуется сложным строением, а также сложными гидрогеохимическими и геотермическими условиями. При этом, однако, представляется возможным оценить изменения различных компонентов природной среды, применяя в ограниченных объемах специальные технологии при разведке и освоении запасов.

В третью группу входят эксплуатационные запасы месторождений с очень сложными условиями, характеризующимися невыдержанным геологическим строением, крайней изменчивостью мощностей и фильтрационных свойств водовмещающих пород, а также сложными гидрогеохимическими и геотермическими условиями. Проведение разведочных работ на таких месторождениях требует применения специальных дорогостоящих технологий, реализация которых на стадии разведки может быть технически неосуществима или экономически нецелесообразна.

Эксплуатационные запасы подразделяются на категории (А, В, С₁, С₂) по степени изученности условий формирования, количества и качества подземных вод, а также условий эксплуатации и подготовленности месторождений подземных вод к дальнейшему изучению или освоению.

Категория А - запасы подземных вод освоенные.

Категория В – разведанные.

Категория С₁ - предварительно оцененные.

Категория С₂ - выявленные.

Эти категории подразделяются на промышленные, позволяющие вести эксплуатацию месторождений (А, В, иногда С₁), и непромышленные (С₁, С₂).

По условиям освоения, хозяйственному и экономическому значению эксплуатационные запасы подразделяются на балансовые и забалансовые. К первой из этих групп относятся запасы, целесообразность использования которых установлена на основе всех геолого-экономических и санитарно-гигиенических факторов, учитываемых действующими инструктивными документами. Возможность их использования должна быть подтверждена соответствующими федеральными или территориальными органами. К забалансовым относятся запасы, использование которых на период оценки не может быть признано целесообразным по ряду причин (технико-экономическим, технологическим, экологическим).

2. ОЦЕНКА РЕСУРСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Региональные ресурсы рассматриваются как суммарное количество естественных ресурсов в пределах значительных по площади территорий, охватывающих значительную часть крупных [1], либо полностью одну или несколько более мелких гидрогеологических структур; *локальные* ресурсы характеризуют более мелкие площади в пределах таких структур.

Прогнозные ресурсы определяются путем расчетов или моделированием как сумма естественных и привлекаемых ресурсов, которая может быть использована для восполнения запасов эксплуатируемых горизонтов. Они относятся к категории Р. Прогнозные ресурсы подземных вод оцениваются на основе общих гидрогеологических представлений, региональных исследований и интерпретаций имеющихся материалов [8, 9].

2.1. Виды работ и методы определения региональных ресурсов

Выявление и оценка региональных ресурсов подземных вод проводятся безотносительно к месторождениям этих вод в связи с тем, что подобные ресурсы являются необходимой составной частью гидрогеологической характеристики любого региона. Основой для их оценки являются результаты гидрогеологических съемок, чаще всего среднего масштаба (1:200000), в том числе государственных. Получаемые при этом результаты позволяют определять модули подземного стока и их изменения в годичных циклах. Такие модули весьма информативны для расчлененных горных районов.

При оценке региональных ресурсов (естественных) одним из основных методов является *расчленение гидрографов рек*, в расходе которых до 20-30%, а иногда и более, приходится на подземный сток. Методы расчленения этого графика, отражающего изменение расхода реки в течение года, имеют несколько модификаций. Использование каждой из них позволяет оценить подземный расход с различной точностью [10]. Расходы рек в межженные периоды характеризуют минимальную величину естественных региональных ресурсов подземных вод. Для приближения ее к истинному значению используются различные приемы, основанные на введении поправок, в том числе с учетом результатов режимных наблюдений за расходом источников [11].

Оценить естественные региональные ресурсы позволяет также *балансовый метод*. При этом ресурсы подземных вод принимаются равными разности объемов воды при максимальном и минимальном положениях уровней в изучаемом горизонте. Последние фиксируются в процессе режимных гидрогеологических наблюдений минимум в трех сечениях (скважинах). Время замера уровней в процессе режимных наблюдений выбира-

ется так, чтобы выявить его минимальное и максимальное положение не менее чем в одном цикле подъем – спад – подъем уровня. Обработка полученных данных (например, по методу конечных разностей) позволяет оценить величину питания водоносного горизонта, характеризующую его естественные ресурсы.

2.2. Районирование территорий в связи с региональной оценкой прогнозных эксплуатационных ресурсов

Вопросы районирования территорий, связанные с оценкой прогнозных ресурсов подземных вод, освещены в работах Н.Н.Биндемана [1], Б.И.Куделина и др. [12]. При оценке ресурсов подземных вод большое значение имеет их взаимосвязь с поверхностными водами. В связи с этим, Б.В.Боревским и Л.С.Язвиным предложен подход к районированию верхней гидродинамической зоны, учитывающий эту взаимосвязь. Кроме того, при этом принимается во внимание соотношение площадей питания ресурсов подземных вод и площадей, где возможна их эксплуатация. На этой основе выделены группы районов.

Территории *группы А* характеризуются широким площадным распространением водоносных горизонтов, содержащих пресные подземные воды. На всей их площади возможна эксплуатация водоносных горизонтов. Площади вероятного размещения водозаборов совпадают с площадями питания водоносных горизонтов.

Районы *группы Б* отличаются ограниченным распространением горизонтов пресных подземных вод, причем, эксплуатация последних возможна на всей их площади. Участки расположения водозаборов не совпадают с областями питания подземных вод (замкнутые или полосообразные обводненные структуры в депрессиях). Территория питания чаще всего превышает площадь распространения водоносных горизонтов.

К *группе В* относятся такие территории, где наблюдается частое чередование участков с пресными и солоноватыми (солеными) водами. Размещение водозаборов возможно лишь там, где позволяют фильтрационные свойства пород и состав подземных вод. Площади питания подземных вод, в основном, соответствуют частным водосборам рек и ручьев.

В *группу Г* входят территории, в пределах которых основные продуктивные (пресные) водоносные горизонты приурочены к речным долинам и имеют гидравлическую взаимосвязь с поверхностными водами.

Кроме охарактеризованного подхода возможно районирование адартезианских бассейнов на геоструктурной основе, при котором, наряду с блоковыми крупными гидрогеологическими структурами, выделяются также более мелкие структуры пликративного типа. Подобный подход реализован, в частности, в пределах Минусинского адартезианского бассейна [13], в котором оценены прогнозные региональные эксплуатационные ре-

сурсы применительно к гидрогеологическим структурам низких порядков.

2.3. Виды работ, выполняемые в связи с региональной оценкой эксплуатационных ресурсов

Для получения материалов, используемых при оценке прогнозных региональных эксплуатационных ресурсов подземных вод, проводятся региональные гидрогеологические исследования на основе общих представлений об условиях их формирования по гидрогеологическим регионам, бассейнам рек, территориальным административным подразделениям [8]. Эти ресурсы являются основой для постановки поисковых или поисково-оценочных работ на отдельных площадях. Региональная оценка ресурсов входит в состав первого этапа таких работ (региональное изучение недр для оценки прогнозов ресурсов подземных вод). Эти ресурсы оцениваются также на площадях, где проведены поисковые гидрогеологические работы. С меньшей точностью они могут оцениваться для территорий, где выполнены гидрогеологические съемки масштаба 1:500 000 и крупнее. Оценка региональных прогнозных эксплуатационных ресурсов требует решения следующих задач:

- выявить общее количество ресурсов подземных вод на исследуемой площади и обосновать закономерности их формирования (распределение, условия питания, сток и др.);
- установить роль поверхностных вод в возможном пополнении ресурсов;
- наметить перспективные площади для проведения дальнейших исследований.

2.4. Методика оценки прогнозных региональных эксплуатационных ресурсов

Для оценки прогнозных эксплуатационных ресурсов используются гидродинамические расчеты, анализ водного баланса территорий и методы математического моделирования [11]. Весьма распространенным подходом, использующим уравнения гидродинамики, являются методики ВСЕГИНГЕО [1], в соответствии с которыми учитываются также и естественные запасы подземных вод. Однако, как справедливо указывают Б.В.Боревский и Л.С.Язвин [2], последние при длительной эксплуатации водоносных горизонтов играют весьма незначительную роль и могут в связи с этим не учитываться. Поэтому составными частями прогнозных ресурсов, в основном, являются естественные и привлекаемые ресурсы.

2.4.1. Гидродинамический расчет прогнозных региональных ресурсов

Наиболее часто прогнозные эксплуатационные ресурсы рассчитываются по методике, предложенной Н.Н.Биндеманом и Ф.А.Бочевеком [1]. Она заключается в приближенной оценке расхода условных укрупненных водозаборов, равномерно распределенных по изучаемой площади. Эти водозаборы могут быть следующих типов: I – грунтовых вод и II – межпластовых (напорных) вод. Среди водозаборов первого типа различают подтипы: Ia, расположенные на водоразделах, и Ib – в долинах рек.

Очевидно, что, кроме возможных перетоков из нижележащих напорных водоносных горизонтов, водозаборы типа Ia могут питаться только за счет атмосферных осадков, а типа Ib – за счет атмосферных осадков и рек.

Изучаемая территория при использовании этого метода разбивается на ячейки (рис. 1).

Каждая ячейка имеет площадь, приравниваемую к круговой площади радиуса R – радиуса влияния. Соответствующий ячейке условный водозабор рассматривается как "большой колодец" радиуса r . Обычно r берется равным 10 м и более.

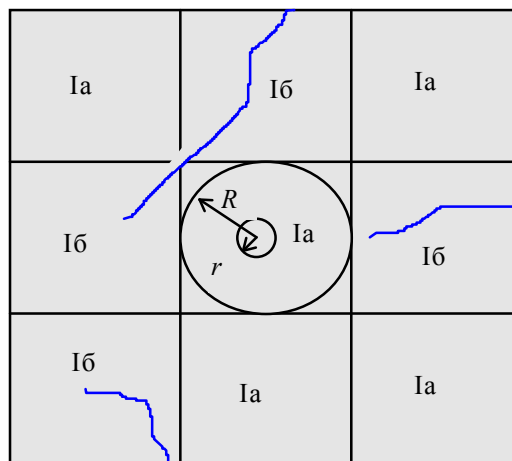


Рис. 1. Схема расположения условных водозаборов

При определении рассматриваемых ресурсов вводятся следующие дополнительные условия:

- водоносные горизонты считаются однородными;
- границы выделенных ячеек считаются непроницаемыми;
- взаимодействие ячеек между собой исключается.

Кроме того, принимается, что в различных ячейках мощности водоносного горизонта могут быть неодинаковыми. Для оценки данного типа ресурсов в ячейках Ia используется уравнение:

$$P_{\text{э}} = \frac{2\pi K H_{\text{ср}} \left(S_{\text{м}} + \frac{W\tau_{\text{э}}}{\mu} \right)}{\ln \frac{0.47R}{r} + \frac{2a_y \tau_{\text{э}}}{R^2}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{э}}$ - региональные прогнозные эксплуатационные ресурсы, м³/сут; K - коэффициент фильтрации, м/сут; $H_{\text{ср}}$ - средняя мощность водоносного горизонта, м; $S_{\text{м}}$ - величина максимально допустимого понижения уровня горизонта (обычно не более 0.6 - 0.7 $H_{\text{ср}}$), м; W - модуль питания водоносного горизонта за счет атмосферных осадков (осадки минус испарение), м/сут; $\tau_{\text{э}}$ - период эксплуатации условного водозабора, сут; μ - гравитационная водоотдача, д.е.; R - радиус ячейки, полученный от преобразования квадрата в круг, м (радиус влияния условного водозабора $R=0.564 \cdot l$, где l - размер стороны ячейки); r - радиус условного водозабора, м; a_y - коэффициент уровнепроводности, м²/сут.

По истечении определенного времени (несколько лет) первое слагаемое в знаменателе уравнения (1) станет значительно меньше второго слагаемого и им можно будет пренебречь. Тогда эта формула примет вид

$$P_{\text{э}} = \frac{\pi K H_{\text{ср}} S_{\text{м}}}{a_y \tau_{\text{э}}} + \frac{\pi K H_{\text{ср}} W}{a_y \mu}.$$

Введем обозначения: $\pi R^2 = F$ - площадь ячейки, м²; $W \cdot F = Q_w$ - расход, обеспечиваемый инфильтрацией атмосферных осадков, м³/сут. В этом случае получаем

$$P_{\text{э}} = \frac{F K H_{\text{ср}} S_{\text{м}}}{a_y \tau_{\text{э}}} + \frac{Q_w K H_{\text{ср}}}{a_y \mu} = \frac{K H_{\text{ср}}}{a_y} \left(\frac{F S_{\text{м}}}{\tau_{\text{э}}} + \frac{Q_w}{\mu} \right).$$

В то же время $\frac{K H_{\text{ср}}}{a_y} = \mu$, поэтому окончательное выражение принимает вид

$$P_{\text{э}} = \frac{F \mu S_{\text{м}}}{\tau_{\text{э}}} + Q_w. \quad (2)$$

Уравнение (2) определяет то суммарное количество воды, которое может быть получено в пределах одной ячейки при осушении водоносного горизонта на величину $S_{\text{м}}$, с учетом инфильтрации атмосферных осадков.

На всей территории, т.е. из всех n ячеек, получим $P_{\text{э}\Sigma} = \sum_{i=1}^n P_{\text{э},i}$.

Поступление воды в ячейки типа Ib будет происходить за счет ин-

фильтрации из рек, протекающих через эти ячейки. Ее величину можно рассчитать по уравнению притока в дрена, имеющую границу с постоянным напором [14].

2.4.2. Оценка прогнозных региональных эксплуатационных ресурсов при перетекании воды из вышележащего водоносного горизонта

Нередкой в пределах гидрогеологических разрезов является ситуация, при которой грунтовый водоносный горизонт (пласт А, рис. 2) отделен полупроницаемой толщей (пласт Б) от нижележащего напорного водоносного пласта (В).

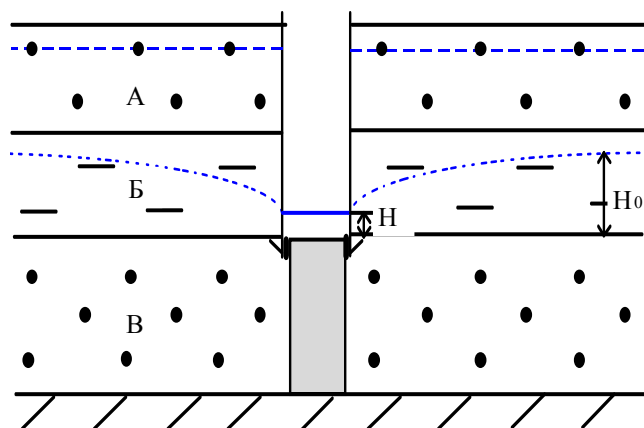


Рис. 2. Система, состоящая из двух водоносных пластов (А, В) и полупроницаемой толщи (Б)

При значительных понижениях уровня воды в пласте В возможно перетекание в него воды из пласта А через полупроницаемую толщу Б. Поступление её в данном случае будет идентичным инфильтрации из зоны аэрации, в связи с чем для оценки такого перетекания может быть использовано рассмотренное выше уравнение (2), где μ должно быть заменено на μ^{**} :

$$P_э = \frac{FS_M \mu^{**}}{\tau_э} + Q_w. \quad (3)$$

В данном случае $S_M = H_0 - H$ и $\mu^{**} = \mu^* + \mu$, где μ и μ^* - коэффициенты гравитационной водоотдачи пласта А и упругой водоотдачи пласта Б; Q_w - количество (общий расход) воды, перетекающей из пласта А в пласт Б при неизменном уровне в пласте А.

2.4.3. Оценка естественных (геологических) запасов подземных вод

Естественные (геологические) запасы подземных вод определяются рядом факторов: объемом пласта, его водоотдачей, газонасыщенностью, температурой, сжимаемостью водно-газовой смеси, величиной давления на

пласт и некоторыми другими. В связи с этим выделяют естественные запасы воды V_e и упругие запасы $V_{упр.}$, причем последние образуются за счет снижения давления и составляют небольшую часть от естественных.

Для определения естественных запасов используют обычно уравнение $V_e = V \cdot \mu$ (безнапорные воды) или $V_e = V \cdot \mu^*$ (напорные воды), где V - объем осушенной части пласта, μ - гравитационная (самотеком) водоотдача пласта, а μ^* - упругая водоотдача напорного пласта.

К геологическим запасам относят весь объем воды в пласте, т.е. они превышают естественные запасы в связи с тем, что последние характерны лишь для той части пласта, которая будет осушена в процессе его эксплуатации.

В среднем считается, что μ для гравийно-галечниковых отложений можно принять равной приблизительно 0.2; средне-крупнозернистых песков - 0.15; мелко-среднезернистых песков - 0.125; переслаивания песков и алевролитов - 0.05; переслаивание песков, алевролитов и глин - 0.03 [15].

Величину μ часто находят также по формуле $\mu = \frac{Km}{a_y}$, а μ^* по аналогичному равенству $\mu^* = \frac{Km}{a}$, где Km - водопроницаемость, a_y - коэффициент уровнепроводности, и a - коэффициент пьезопроводности (все три параметра в м²/сут).

3. ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ЗАПАСЫ ПОДЗЕМНЫХ ВОД И ИХ ОЦЕНКА

Как уже отмечалось, к эксплуатационным относятся запасы подземных вод, которые вовлекаются или в определенное время могут быть вовлечены в эксплуатацию. Очевидно, что эксплуатационные запасы, изученные с детальностью, соответствующей категориям Р, С, В или А, представляют практический интерес, в первую очередь. К каждой из категорий предъявляются определенные требования, например, разработанные Государственной комиссией по запасам (ГКЗ).

Необходимо также отметить, что методика определения запасов в значительной степени влияет на обоснование и выбор методов поисков и разведки месторождений подземных вод, особенно последней. В связи с этим выбор методики оценки запасов подземных вод по различным категориям изученности является весьма ответственным.

Как отмечает Н.И.Плотников [16], для обоснованной оценки запасов месторождения подземных вод целесообразно подразделять на две группы. К первой из них отнесены месторождения, в пределах которых водозаборы располагаются в областях питания подземных вод (долины рек и др.). Это,

в основном, месторождения *инфильтрационного* типа.

Вторая группа включает месторождения, приуроченные к областям стока. Такие месторождения нередко эксплуатируются в условиях неустановившегося движения потоков, в частности, при более высоком дебите водозабора, чем величина используемых ресурсов (*фильтрационные* месторождения).

3.1. Оценка запасов по категориям изученности

Наиболее низкой категорией является категория Р, запасы которой относятся к перспективным. Она выделяется на основе результатов мелко-масштабных (1:1000 000 - 1:500 000) и среднemasштабных (1:200 000 - 1:100 000) гидрогеологических съемок, либо путем интерполяции запасов более высоких категорий.

При определении запасов прогнозной категории С (C_2 и C_1) и промышленных категорий В и А должны учитываться как существующие условия в пределах изучаемой территории (т.е. района месторождения подземных вод), так и возможное их изменение в ближайшее время: сооружение новых водозаборов, водохранилищ, предприятий и т.д. [11].

Кроме того, подсчет этих запасов производится с учетом равномерности планируемого водоотбора. В частности, если водопотребление неравномерное как например, при различных видах орошения, то подсчет запасов выполняется отдельно для вариантов с максимальным и минимальным использованием воды в течение определенного времени.

Существенным является также требование о том, что запасы подземных вод, откачиваемых с целью осушения массивов пород при разведке и разработке твердых полезных ископаемых, должны рассчитываться по тем же показателям, что и месторождений питьевых вод, независимо от оценки запасов руды (или угля и т.д.).

К определению запасов подземных вод каждой из категорий в соответствии с инструкцией ГКЗ предъявляются различные требования. При этом для выбора методики проведения поисково-разведочных работ важное значение имеет сложность гидрогеологических условий месторождений подземных вод. Напомним, что по степени сложности все месторождения подразделяются на три группы: с простыми (I-я группа), сложными (II-я группа) и очень сложными (III-я группа) гидрогеологическими условиями.

3.1.1. Категория C_2

Эксплуатационные запасы категории C_2 подсчитываются по следующим методикам:

- на основе данных опробования (и расчетов) по единичным скважи-

нам как разность между общими запасами на площади исследований (в пределах общего баланса подземных вод) и запасами категорий С₁, В и А;

- по аналогии гидрогеологических условий изучаемой структуры с более полно исследованными территориями;
- по экстраполяции разведанных запасов более высоких категорий в пределах их обеспеченности, прежде всего, ресурсами природных вод.

Необходимо, однако, помнить, что для месторождений в расчет берутся не все запасы категории С₂, а лишь та их часть, которая отнесена к балансовой. Площади, к которым приурочены забалансовые запасы, не причисляются к территориям месторождений подземных вод.

3.1.2. Категория С₁

Запасы категории С₁ оцениваются:

- по данным опробования ограниченного числа скважин (и необходимых расчетов) в пределах месторождений подземных вод с относительно простыми гидрогеологическими условиями (I-я и II-я группы сложности);
- по разности между рассчитанными общими запасами (без категории С₂) и запасами категорий В и А на месторождениях подземных вод I-й и II-й групп;
- по результатам одновременного опробования скважин с использованием расчетов по методике взаимодействующих выработок для месторождений со сложными гидрогеологическими условиями (III-я группа); величина запасов категории С₁ берется как разность между общими рассчитанными запасами (без категории С₂) и запасами категорий В и А;
- путем полуторной экстраполяции кривой дебита, полученной по данным опробования скважин групповой опытно-эксплуатационной откачкой (за вычетом запасов категорий В и А) на месторождениях III-й группы, и при условии приближенно установленной обеспеченности эксплуатационных запасов;
- по минимальному суточному дебиту родников, определенному в процессе замеров в межень период и приведенному (по данным наблюдений за режимом родников-аналогов или за изменением различных метеорологических факторов) к уровню 95% обеспеченности.

3.1.3. Запасы промышленных категорий

Запасы категории В подсчитывают по данным разведки месторождений подземных вод (в основном детальной или эксплуатационной раз-

ведки). Их можно определить следующим путем:

- по тройной экстраполяции фактического водоотбора на месторождениях I-й группы сложности (за вычетом запасов категории А);
- в пределах двойной экстраполяции фактического водоотбора на месторождениях II-й группы (при подтверждении сохранения качества воды и за вычетом запасов категории А);
- по величине дебита действующего водозабора (при сохранении качества воды) для месторождений III-й группы, обеспечив расчетную проверку возможности его работы на срок последующей эксплуатации с прежним дебитом;
- по расчетному дебиту проектных скважин на месторождениях I-й группы, удаленных на двукратное расстояние от опробованных, по откачкам из которых обоснованы запасы категории А;
- по расчетному дебиту проектных скважин, находящихся рядом (т.е. на расчетном расстоянии) с опробованными на месторождениях II-й группы, обосновывающими запасы категории А;
- по фактическому дебиту скважин, одновременно опробованных групповыми опытно-эксплуатационными откачками на месторождениях III-й группы при подтверждении возможности получения этого количества воды с нужным качеством на расчетный срок эксплуатации за счет либо ресурсов, либо эксплуатационных запасов;
- по среднесуточному дебиту родников с 95% обеспеченностью при проведении режимных наблюдений в течение не менее 1 года.

Запасы категории А определяются, в основном, по результатам детальной разведки месторождений подземных вод. Они, как правило, равны фактической производительности опытно-эксплуатационных или эксплуатационных скважин на месторождениях I-й и II-й групп сложности при подтверждении их стабильности.

На месторождениях III-й группы эти запасы также берутся равными фактической производительности насосов в процессе таких откачек, но лишь при условии достижения установившегося режима фильтрации. Запасы категории А утверждаются также по расчетной производительности действующих водозаборов в пределах двойной интерполяции достигнутого фактического дебита для месторождений I-й группы. Их можно, кроме того, оценить по тройной экстраполяции дебита опытных откачек, а также по расчетному дебиту (по кривой дебита) опытных откачек на месторождениях II-й группы, если дебит при этих откачках составляет не менее половины проектного. Эксплуатационные запасы категории А могут быть утверждены по среднесуточному дебиту родников 95% обеспеченности (или по среднегодовому дебиту родников) при условии ведения многолетних режимных наблюдений.

3.2. Методы определения эксплуатационных запасов

При оценке эксплуатационных запасов подземных вод, прежде всего высоких категорий, необходимо учитывать граничные условия в плане (безграничный или полуограниченный пласт, пласт-полоса с различными границами, круговой контур и т.д.) и в разрезе (безнапорный пласт с инфильтрационным питанием, напорный при перетекании сверху или снизу и т.д.), а также начальные условия (при слабом колебании уровня, значительном колебании уровня и др.).

За начальную отметку уровня при расчете запасов обычно берется минимальное ее значение, выявляемое в процессе режимных наблюдений.

3.2.1. Гидродинамический метод

Этот метод применяется для схематизированных природных условий с учетом взаимодействия скважин, времени их работы, а также граничных условий в плане и разрезе (т.е. расчет ведется применительно к типовым расчетным схемам). Основные недостатки - невозможность достаточно полно учесть особенности конструкции скважин и неоднородность горизонтов. При использовании метода пласт считается однородным, т.е. для него рассчитывается среднее значение основных параметров (Km , a и др.). По существу, подсчет запасов гидродинамическим методом сводится к определению производительности проектируемого водозабора на необходимый срок (чаще всего - 10 000 суток, т.е. 27 лет).

Величина снижения уровня в эксплуатируемом водоносном горизонте не должна превышать значения максимального допустимого понижения (S_m). Последнее для безнапорного пласта не должно превышать 0.5 - 0.6 m , где m - мощность горизонта. В случае, если пласт очень мощный (порядка 50 и более m), оно может быть повышено до 2/3 от величины m . Слабонапорные пласты, имеющие напор порядка 5 m и менее, обычно рассматриваются как безнапорные. Для напорных пластов S_m обычно не превышает величины напора, исключая мощные пласты, которые можно эксплуатировать и в напорно-безнапорном режиме (т. е. с осушением на 2/3 от m).

Гидродинамический метод подсчета запасов подземных вод применим во многих случаях, однако, в ряде гидрогеологических ситуаций его использование нецелесообразно, в частности в случаях, когда не удается достаточно точно схематизировать природные условия или учесть значительную неоднородность водоносного пласта с помощью формул гидродинамики. Существенно расширяются возможности гидродинамического метода в части учета сложности и неоднородности водоносных горизонтов, если он используется не как традиционное аналитическое решение, требующее весьма жесткой схематизации природных условий, а в варианте сеточного моделирования работы проектного водозабора по методам ко-

нечных разностей или элементов с применением специальных программ для ЭВМ.

При оценке запасов гидродинамическим методом обычно рассчитывается величина понижения уровня водоносного горизонта в наиболее неблагоприятно расположенной точке (например, в центре водозабора, где оно будет наибольшим) на конец срока эксплуатации. Полученная расчетом величина снижения уровня S сравнивается со значением S_m . Если $S \leq S_m$, запасы при заданной производительности водозабора считаются обеспеченными. Этим расчетом определяются общие запасы, обычно по категории C . Более точная их индексация зависит в основном от типа скважины (ее диаметра и т.д.), количества откачивающих скважин, величины и длительности понижения уровня и т.д. Для решения этого вопроса используются, прежде всего, требования инструкции ГКЗ.

3.2.1.1. Неограниченный по площади водоносный пласт

Наиболее известно использование для решения данной задачи метода "большого колодца", основой которого является уравнение:

$$S = S_{\text{вн}} + S_c, \quad (4)$$

где S - полное понижение уровня воды в скважине, расположенной в центре площади расчетного водозабора, приведенного к "большому колодцу"; $S_{\text{вн}}$ - понижение уровня водоносного горизонта, обусловленное работой всех скважин, влияющих на центральную (внешнее); S_c - дополнительное понижение уровня в центральной скважине, возникающее за счет собственной ее работы с учетом совершенства и расположения в системе взаимодействующих скважин (собственное).

Внешнее понижение $S_{\text{вн}}$ находится по равенству (здесь и в последующем для напорных вод):

$$S_{\text{вн}} = \frac{Q_{\Sigma}}{2\pi Km} \ln \frac{R_{\Pi}}{R_0}, \quad (5)$$

где Q_{Σ} - суммарный дебит системы проектируемых скважин, м³/сут; R_0 - радиус "большого колодца", а R_{Π} - приведенный радиус влияния водозабора, м (системы взаимодействующих скважин; определяется по равенству: $R_{\Pi} = 1.5\sqrt{a\tau}$ - здесь τ - время работы водозабора, сут; τ обычно берется равным 10 000 сут).

Уравнение (5) применимо в случаях, когда выполняется условие: $\frac{a\tau}{R_0^2} \geq 2.5$ - для линейного ряда скважин или $\frac{a\tau}{R_0^2} \geq 3.5$ - для кольцевой системы скважин.

Величина понижения уровня в центральной скважине за счет ее собственной работы находится по уравнению

$$S_c = \frac{Q}{2\pi K m} \left[\ln \frac{r_n}{r_c} + 0.5\xi \right], \quad (6)$$

где Q - дебит скважины, м³/сут; r_n - приведенный радиус области влияния скважины и r_c - радиус скважины, м; ξ - фильтрационное сопротивление, учитывающее несовершенство скважины, б/р (безразмерное находится по справочной таблице).

Для линейного водозабора $r_n = \frac{b}{2\pi}$ и $R_0 = 0.2 L$, где b - расстояние между скважинами линейного ряда, а L - длина ряда водозаборных скважин, м (рис. 3).

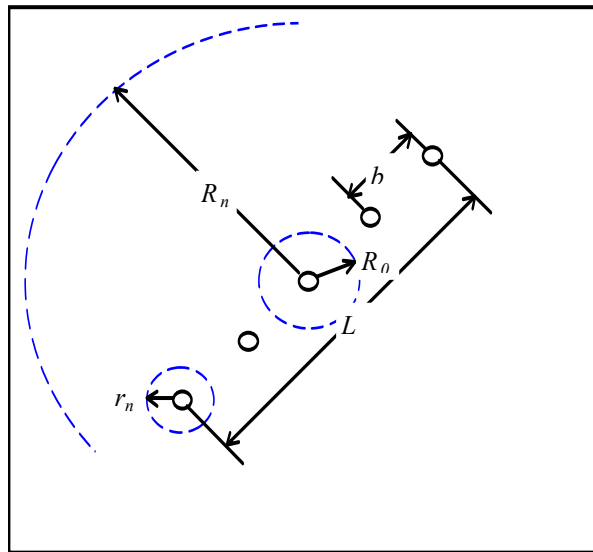


Рис. 3. Схема расположения скважин линейного ряда в неограниченном пласте

Таким образом, запасы воды линейного водозабора в пределах площади с радиусом питания R_n в неограниченном пласте будут определяться дебитом Q_Σ , обеспечивающим понижение S , которое находится по уравнению:

$$S = S_{вн} + S_c = \frac{Q_\Sigma}{2\pi K m} \ln \frac{R_n}{R_0} + \frac{Q}{2\pi K m} \left[\ln \frac{r_n}{r_c} + 0.5\xi \right]. \quad (7)$$

3.2.1.2. Полуограниченный пласт

Полуограниченными считаются водоносные пласты, с одной или нескольких сторон имеющие удаленную границу, не достигаемую депрессионной воронкой, формирующейся в процессе эксплуатации водозабора. Остальные границы (или граница) часто имеют либо постоянный напор (река, водоем), либо постоянный - вплоть до нулевых значений - расход. В первом случае приток воды к водозаборным скважинам будет поступать в

большем количестве по сравнению со вторым вариантом.

Исходная зависимость для расчета запасов имеет такой же вид, как и уравнение (4). Численное значение $S_{\text{вн}}$ во многом зависит от граничных условий. В частности, для границы с постоянным напором оно может быть определено по зависимости:

$$S_{\text{вн}} = \frac{Q_{\Sigma}}{2\pi K m} \ln \frac{2l}{R_0}, \quad (8)$$

где l - расстояние от линии водозабора до контура с постоянным напором, м (остальные обозначения прежние).

Значение S_c находим по уравнению (6), использованному для определения запасов в неограниченном пласте. При наличии границы с непроницаемым контуром (расход через границу равен 0) используется уравнение

$$S_{\text{вн}} = \frac{Q_{\Sigma}}{2\pi K m} \ln \frac{1.13a\tau}{l \cdot R_0}, \quad (9)$$

где l - расстояние до непроницаемого контура, м. Понижения в центральной скважине также находятся по равенству (4).

3.2.1.3. Пласт-полоса с двумя границами

Водоносные горизонты данного типа (по граничным условиям) имеют различные контуры, все разнообразие которых часто может быть сведено к двум видам - с постоянным напором и с постоянным расходом - и к их сочетанию (3 варианта). При этом граничные условия будут в основном влиять лишь на величину $S_{\text{вн}}$.

1-й вариант - обе границы с постоянным напором. Применительно к данному варианту

$$S_{\text{вн}} = \frac{Q_{\Sigma}}{2\pi K m} \ln \frac{0.64z \cdot \sin \frac{\pi z_1}{z}}{R_0}, \quad (10)$$

где z - ширина полосы (т.е. водоносного пласта), м; z_1 - расстояние от водозабора до ближайшего контура, м.

2-й вариант - оба контура водонепроницаемы. В данном случае используется уравнение

$$S_{\text{вн}} = \frac{Q_{\Sigma}}{4\pi K m} \left(\frac{7.1\sqrt{a\tau}}{z} + 2 \ln \frac{0.16z}{R_0 \sin \frac{\pi z_1}{z_2}} \right), \quad (11)$$

где z_2 - расстояние до более удаленного контура, м.

3-й вариант - один контур с постоянным напором, второй - непрони-

цаемый. В этом случае понижение определяется по равенству

$$S_{\text{вн}} = \frac{Q_{\Sigma}}{2\pi K m} \ln \frac{1.27z \cdot \text{ctg} \frac{\pi z_1}{z}}{R_0}, \quad (12)$$

причем, в данном случае z_1 - расстояние до контура с постоянным напором.

3.2.1.4. Пласты с круговым контуром питания

Наиболее характерными являются случаи непроницаемого контура и контура, по которому повсеместно происходит питание. Для расчета также используется уравнение (4). Для определения $S_{\text{вн}}$ для напорного пласта с круговым непроницаемым контуром используется равенство:

$$S_{\text{вн}} = \frac{Q_{\Sigma}}{\pi K m} \cdot \frac{a\tau}{R_{\kappa}^2}, \quad (13)$$

где R_{κ} - радиус кругового контура, м. Использование данного уравнения возможно, если время работы водозабора (τ) составляет более 360 суток.

В случае контура с круговым питанием это уравнение имеет вид

$$S_{\text{вн}} = \frac{Q_{\Sigma}}{2\pi K m} \ln \frac{R_{\kappa}}{R_0}. \quad (14)$$

Основным условием применения большинства формул, приведенных при освещении гидродинамического метода оценки запасов, является удаленность крайних скважин водозаборного ряда от ближайшей границы пласта. Для линейного расположения скважин она должна превышать $2.5R_0$, а для кольцевого ряда - $1.6R_0$.

Следует также отметить, что, если эксплуатируемые водоносные горизонты будут безнапорными, то в приведенных формулах необходимо заменить выражение $2mS$ на $H^2 - h^2$, где H - мощность безнапорного горизонта, а h - высота остаточного столба воды в скважинах после снижения в них уровня воды, м.

3.2.2. Гидравлический метод

Основой гидравлического метода определения запасов подземных вод являются данные (эмпирические зависимости), полученные в результате опытных и опытно-эксплуатационных откачек, либо опытной эксплуатации водоносного горизонта.

Кроме дебитов, получаемых в процессе этих работ, используется также интерполяция кривых дебита (зависимостей Q от S), строящихся по результатам опытных работ. Наиболее надежные результаты при этом получают в случае не менее чем трехкратных снижений уровня при различных дебитах. Данный метод позволяет учесть особенности конструкции скважин, их взаимное расположение и строение водовмещающих отложе-

ний. Его недостатками является отсутствие возможности учитывать изменение дебита водозаборов во времени и, кроме того, невозможность прогнозировать влияние граничных условий пластов на производительность водозаборов.

Необходимо также учесть, что более точные результаты можно получать по одиночно работающим скважинам при установившемся режиме фильтрации. Однако для приближенного решения задач метод может применяться и при использовании данных по взаимодействующим скважинам. Причем, в этом случае, необходимо добиваться стабилизации уровня (либо квазистационарного режима) во всей зоне влияния опытных работ. В таких случаях снижение уровня за счет работы взаимодействующих скважин (S) можно определить по уравнению

$$S = S_0 + \sum_{i=1}^n \Delta S_i \frac{Q_i}{Q'_i}, \quad (15)$$

где S_0 - понижение уровня в центральной скважине группового водозабора при ее работе с проектным дебитом, часто определяемое по кривой дебита в пределах допустимой интерполяции; ΔS_i - срезки уровня в этой скважине за счет работы каждой скважины i из n других проектных скважин (определяются при проведении одиночных, парных или групповых откачек); Q'_i - дебиты соответствующих скважин при опытных работах, обусловившие срезки уровней ΔS_i в центральной скважине; Q_i - проектные дебиты этих же скважин.

Наиболее точные результаты определения S по уравнению (15) получаются для инфильтрационных месторождений, имеющих постоянное питание. Полученная величина S сравнивается с S_m . Кроме рассмотренной методики, к гидравлическому способу оценки эксплуатационных запасов относится также метод депрессионных воронок, предложенный Н.И.Плотниковым [17].

3.2.3. Совместное использование гидродинамического и гидравлического методов

Отмеченные в предыдущих разделах достоинства и недостатки гидравлического и гидродинамического методов оценки эксплуатационных запасов месторождений подземных вод показывают, что во многих случаях целесообразно использовать их совместно. При этом можно учесть конструктивные особенности водозаборных скважин, их взаимодействие и неоднородности гидрогеологических разрезов, а также время работы скважин и особенности граничных условий пластов.

Одним из основных условий успешного использования данного способа является то, что в процессе определения запасов сохраняются те же границы водоносных горизонтов, прежде всего в плане, которые имелись в

период опытных работ, проведенных в связи с оценкой гидрогеологических параметров этих горизонтов. Поэтому он применим, прежде всего, в условиях неограниченных водоносных пластов или пластов-полос с непроницаемыми границами.

Расчет запасов при использовании данной методики, равно как и других методов, сводится к нахождению величины снижения уровня S в наиболее неблагоприятно расположенной скважине (обычно центральной в системе взаимодействующих скважин) и сравнению его с S_M .

На первом этапе расчетов определяется дополнительное понижение (срезка) уровня в неблагоприятно расположенной скважине проектного водозабора при работе ее как одиночной на конец срока эксплуатации:

$$S_c = S_0 + \frac{(z_2 - z_1) \cdot Q_3 \ln \frac{\tau_3}{\tau_2}}{Q_{оп} \ln \frac{\tau_2}{\tau_1}}, \quad (16)$$

где S_0 - понижение уровня в скважине при проектном дебите (определяется по кривой зависимости дебита от понижения, построенной по данным опытной откачки), м; $Q_{оп}$ - дебит скважины при опытной откачке и Q_3 - проектный дебит скважины, м³/сут; z_1 - понижение уровня в скважине на время τ_1 от начала опытной откачки; z_2 - понижение уровня в скважине через время τ_2 (чаще всего в конце опытной откачки); τ_3 - срок работы водозабора.

На втором этапе расчетов определяется срезка уровня в той же расчетной скважине при взаимодействии ее с другими скважинами на конец срока эксплуатации водозабора (по данным групповой откачки):

$$S_{вн} = \frac{Q_3}{Q_{оп}} \cdot \left(\Delta z_1 + \frac{(\Delta z_2 - \Delta z_1) \ln \frac{\tau_3}{\tau_2}}{\ln \frac{\tau_2}{\tau_1}} \right), \quad (17)$$

где Δz_1 - срезка уровня в расчетной скважине во время групповой опытной откачки через время τ_1 от ее начала; Δz_2 - срезка уровня в той же скважине через время τ_2 от начала откачки (чаще всего на конец откачки).

Общее понижение S находится, как обычно, по уравнению (4) и сравнивается с максимальным допустимым понижением (S_M).

Если из соседних скважин была проведена не групповая откачка, а были выполнены поочередно из каждой одиночные откачки и за счет них получены срезки уровня, пересчитанные на конец срока эксплуатации водозабора: $\Delta S_1, \Delta S_2, \dots, \Delta S_n$, то общее понижение в неблагоприятно расположенной скважине находится как

$$S = S_c + \sum_{i=1}^n \Delta S_i . \quad (18)$$

Величины срезок ΔS_i на конец срока эксплуатации водозабора находятся (для каждой из них отдельно) по данным одиночных откачек с использованием уравнения (17), приведенного выше. Аналогично, при необходимости, можно рассчитать снижение уровня в любой из взаимодействующих скважин данной водозаборной системы.

3.2.4. Балансовый метод

При использовании балансового метода оценки запасов учитываются приходные и расходные составляющие баланса месторождений подземных вод. Приходная часть - инфильтрация атмосферных осадков, поверхностных вод, а также приток воды из соседних водоносных горизонтов. Расходная часть - испарение (для грунтовых вод), отток в поверхностные водоемы, водотоки и другие места разгрузки на дневной поверхности, перетоки в соседние водоносные горизонты.

Балансовым методом определяются, прежде всего, общие возможности эксплуатации подземных вод в районах месторождений. Они должны удовлетворять уравнению

$$Q_{\Sigma} = Q_p + \frac{V_e}{\tau_3} \cdot \alpha , \quad (19)$$

где Q_p - региональные естественные ресурсы подземных вод, численно равные расходу подземного потока; V_e - естественные запасы подземных вод; α - коэффициент практического извлечения естественных запасов подземных вод (обычно от 0.3 до 0.6).

Балансовые расчеты применяются, как правило, только в сочетании с гидравлическим и гидродинамическим методами оценки эксплуатационных запасов, так как не дают возможности рассчитывать понижения в водозаборных скважинах и являются региональными.

Наиболее значимой при использовании данного метода является приходная часть баланса, которая складывается из величины естественных запасов и региональных естественных ресурсов.

При определении естественных запасов наибольшие трудности возникают в процессе получения величины водоотдачи μ . Определять последнюю для грунтовых водоносных горизонтов наиболее целесообразно, по мнению Н.Н.Биндемана, на основе опытных откачек из скважин по уравнению:

$$\mu = \beta \frac{Q \cdot \tau}{r_1^2 (S_1 - S_2)} , \quad (20)$$

где β - коэффициент, находимый по графику, приведенному в работе [1], в

зависимости от S_1 и S_2 при заданном отношении $\frac{r_2}{r_1}$; Q - дебит центральной

скважины, м³/сут; τ - время опытной откачки, сут; r_1 - расстояние до ближней и r_2 - до дальней наблюдательных скважин, м; S_1 - понижение уровня при откачке в ближней (к центральной) и S_2 - в дальней наблюдательных скважинах, м.

Возможно определение водоотдачи по результатам режимных наблюдений, хотя и с меньшей точностью. При этом можно использовать, например, уравнение Г.Н.Каменского в конечных разностях [18].

Нахождение региональных естественных ресурсов в процессе использования балансового метода следует проводить, по рекомендации Н.Н.Биндемана, на основе оценки величины питания водоносного горизонта атмосферными осадками по уравнению:

$$Q_p = W \cdot F, \quad (21)$$

где W - инфильтрация атмосферных осадков на единицу площади водной поверхности водоносного горизонта, м/сут; F - площадь области питания водоносного горизонта, определяемая по гидрогеологической карте, м².

Достаточно трудоемкие исследования необходимо выполнять для определения величины инфильтрации атмосферных осадков. Для этого Н.Н.Биндеманом рекомендуется, в частности, уравнение Г.Н.Каменского в конечных разностях при неустановившемся движении грунтовых вод. При использовании данной методики среднегодовую величину инфильтрации можно рассчитать по уравнению

$$W = \mu \cdot \frac{\Delta h + \Delta z}{365}, \quad (22)$$

где μ - водоотдача водоносного горизонта; Δh - наблюдаемое повышение уровня подземных вод после инфильтрации за время Δt (после снеготаяния, выпадения обильных дождей и т.п.), м; Δz - величина, на которую уровень подземных вод снижается за такое же точно время Δt за счет оттока по водоносному горизонту в случае отсутствия осадков (рис. 4).

Величины, приведенные в данном уравнении, находятся, в основном, по результатам достаточно длительных (не менее 1 года) режимных наблюдений по створу скважин (минимум трех), расположенному по направлению движения подземных (как правило, грунтовых) вод. При этом более удовлетворительные данные получают при соблюдении следующих условий:

- режимные наблюдения проводятся на участках, где поверхность грунтовых вод близка к горизонтальной, т.е. вдали от рек;
- глубина залегания уровня водоносного горизонта должна быть близка к 2-4 м.

3.2.5. Оценка региональных запасов промышленных вод в пределах артезианских структур

При планировании освоения промышленных вод в пределах перспективных артезианских структур требуется знание региональных эксплуатационных запасов, как самих промышленных вод, так и содержащихся в них полезных компонентов.

В общем виде оценка эксплуатационных запасов сводится к определению *модуля эксплуатационных запасов* (эксплуатационного дебита, приходящегося на единицу площади) и может быть условно разделена на две взаимосвязанные части: определение расчетных параметров и расчет модуля.

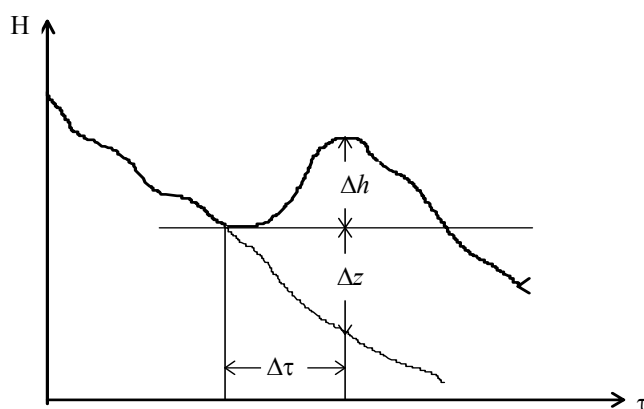


Рис. 4. График режимных наблюдений за уровнем грунтовых вод

Расчет модуля традиционно осуществляется исходя из допущения, что все эксплуатационные водозаборы в пределах изучаемого района расположены по равномерной сетке и пущены в эксплуатацию одновременно [17, 19]. Запасы промышленных вод, как правило, относятся к невозполнимым. В этом случае, через относительно непродолжительное время между депрессионными воронками каждого условного водозабора образуются водоразделы, которые можно рассматривать как непроницаемые границы расчетного блока, где размещен водозабор. Тогда решение может быть получено на основе использования формулы Маскета и метода "большого колодца" [20], модифицированных применительно к специфике глубоких горизонтов.

Для блока площадью $F \text{ м}^2$ эксплуатационные запасы составят

$$Q = \mu^* F S_M \tau^{-1}, \quad (23)$$

где Q - эксплуатационный дебит в $\text{м}^3/\text{сут}$, μ^* - параметр водоотдачи в д.е., S_M - максимальное допустимое понижение уровня в м, τ - расчетный срок действия условного водозабора в сут.

Переменные μ^* , S_M и τ , входящие в эту зависимость, определяются в данном случае технологической схемой работы водозабора. Принципиаль-

но возможными являются два варианта добычи промышленных вод:

а) сопровождающийся сработкой пластового давления/напора (обычная добыча при самоизливе и/или с помощью глубинных насосов) и

б) с замещением промышленных вод в поровом пространстве горизонта-коллектора закачиваемым флюидом (известный в нефтедобыче вариант разработки залежей с поддержанием пластового давления - ППД; в частности, добыча законтурных промышленных вод на месторождениях нефти и газа, эксплуатируемых с законтурным заводнением, или добыча подошвенных вод при внутриконтурном заводнении, что может способствовать повышению эффективности промыслов за счет возможности более гибкого регулирования текущих давлений в теле залежей, извлечения полезных компонентов из попутных пластовых вод и утилизации отработанных вод в системе ППД).

Соответственно, при добыче промышленных вод по варианту "а", μ^* представляет собой коэффициент упругой ёмкости пласта, определяемый как

$$\mu_y^* = \frac{K_p}{a\mu} \text{ или } \mu_y^* = n_0\beta_\phi + \beta, \quad (24)$$

где K_p - коэффициент проницаемости (m^2), a - коэффициент пьезопроводности (m^2/c), μ - вязкость воды (Па·с), n_0 - открытая пористость в д.е., β_ϕ - коэффициент сжимаемости воды (при отсутствии лабораторных определений может быть задан примерно равным $3 \cdot 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$), β - коэффициент сжимаемости пористой среды (породы), определяемый экспериментально или, например, по приведенному ниже уравнению (32).

В варианте "б", μ^* - гравитационная водоотдача

$$\mu_r^* = n_0 - W_{\max}, \quad (25)$$

где W_{\max} - максимальная молекулярная влагоемкость в д.е.

В этом случае, в формулу расчета модуля эксплуатационных запасов необходимо включить в качестве дополнительного сомножителя коэффициент вытеснения.

Поскольку W_{\max} , даже при низкой общей пористости и распространении мелко и тонкозернистых терригенных коллекторов, значительно меньше величины n_0 , эксплуатационные запасы по данному варианту оказываются прямо пропорциональными величине геологических запасов.

Площадь однородного по фильтрационно-емкостным свойствам (ФЕС) расчетного блока-квадрата, условно заменяемая в вычислениях пластом-кругом с непроницаемым контуром равной площади (см. рис. 1), должна выбираться с таким расчетом, чтобы расчетная сетка максимально учитывала реально имеющиеся сведения о площадной изменчивости величины водоотдачи. Для территории относительно изученных крупнейших

структур рациональный шаг расчетной сетки может составлять 10 и более км ($F=100$ и более км²), увеличиваясь с уменьшением изученности ФЕС до 50-100 км ($F=2500-10000$ км²). Формально площадь каждого блока не участвует в вычислении модуля эксплуатационных запасов $q_n=Q_n/F$, но каждое полученное значение q_n относится к конкретному расчетному блоку n .

S_m и τ для варианта "а" фактически являются технико-экономическими параметрами. Допустимое понижение динамического уровня, учитывая широкое распространение в глубоких горизонтах трещинной проницаемости (проявление эффекта смыкания трещин при высоких депрессиях), часто высокие плотность и давление газонасыщения промышленных вод (резкое снижение производительности насосного оборудования при попадании в него даже 1-2% газа), необходимость поддержания избыточного давления на устье, технические характеристики производимых в России штанговых и электроцентробежных насосов [21, 22] и др. в подавляющем большинстве случаев не может превышать 500-600 м. В варианте "б" ситуация в этом отношении много проще, поскольку S_m - это эффективная мощность пласта.

В качестве расчетного времени эксплуатации водозабора промышленных вод Инструкцией ГКЗ по подсчету эксплуатационных запасов рекомендуется период в 25 лет, что при отсутствии расчетов срока окупаемости капиталовложений, может быть принято для варианта "а". В случае же варианта "б" этот срок необходимо увязать с планами и проектно-технологическими проработками по строительству и эксплуатации нефтегазопромысла, которому сопутствуют промышленные воды.

Изложенное показывает, что оценку прогнозных эксплуатационных запасов промышленных вод необходимо проводить в двух вариантах, соответствующих возможным вариантам их добычи. При этом первый вариант должен применяться преимущественно для территорий и частей разреза, где отсутствуют пригодные к эксплуатации месторождения нефти и газа, а второй - только для промышленно нефтегазоносных горизонтов и площадей.

Оценку запасов и их картирование до начала проектирования конкретных водозаборов целесообразно осуществлять в величинах соответствующих видов водоотдачи, что позволит оставить открытым вопрос о значениях параметров S_m и τ до того времени, когда станет возможным их надежное обоснование на основе привязки к выбранной схеме водозабора.

При наличии карт распределения содержания полезных компонентов в промышленных водах, расчет модуля запасов полезных компонентов после оценки модуля эксплуатационных запасов вод не составляет затруднений и производится путем умножения последнего на среднюю концентрацию полезного компонента в каждом из расчетных блоков:

$$q_{n,i} = q_n \cdot C_{n,i} , \quad (26)$$

где $q_{n,i}$ - модуль запасов полезного компонента i ($\text{кг}/\text{м}^2 \equiv \text{тыс. т}/\text{км}^2$), q - модуль эксплуатационных запасов промышленных вод ($\text{м}^3/\text{м}^2$), $C_{n,i}$ - концентрация полезного компонента в воде ($\text{г}/\text{л} \equiv \text{кг}/\text{м}^3$).

3.3. Использование ЭВМ при оценке запасов подземных вод

Оценка эксплуатационных запасов подземных вод, как следует из предыдущего рассмотрения, всегда производится применительно к конкретной схеме водозабора, определяющей размещение, конструкцию и водоприемную способность входящих в его состав водозаборных сооружений. Последние должны максимально учитывать реально существующее геолого-гидрогеологическое строение объекта исследований, изученное в зависимости от стадии исследований и сложности природных условий с различной полнотой и достоверностью.

Обоснование оптимальной в технико-экономическом отношении схемы водозабора требует в этой связи проведения многовариантных расчетов, что в случае наиболее часто используемых гидродинамического и гидравлического методов сопряжено со значительной трудоемкостью, а в ряде ситуаций и сложностями чисто вычислительного характера. Относительная трудоемкость вычислений характерна, кроме того, и для обработки результатов опытно-фильтрационных работ с целью определения фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) горных пород, предшествующей оценке запасов. Особый класс гидрогеологических задач, сопутствующих оценке ресурсов и запасов подземных вод, в принципе не решаемых "вручную", ввиду нереальности требуемого для этого времени, представляет собой моделирование геофильтрации и геомиграции.

Эти обстоятельства обусловили интенсивную разработку и все более широкое внедрение в практику поисково-разведочных работ на подземные воды методов автоматизации геофильтрационных расчетов и численного моделирования гидродинамических и гидрогеохимических процессов, реализованных в виде специализированного программного обеспечения для персональных электронно-вычислительных машин (ПЭВМ).

Использующиеся при оценке запасов программы могут быть условно подразделены на три группы, на практике часто объединяемые в единые программные комплексы:

- 1) вспомогательные, предназначенные для оценки ФЕС пород и др.,
- 2) прямого расчета и оптимизации водозаборов на базе описанных выше аналитических методов и
- 3) имитационного численного гидродинамического и гидрогеохимического моделирования водозаборов на сеточных моделях.

3.3.1. Основные программные средства

Среди отечественных *гидродинамических* пакетов программ наиболее известны программы русско-австрийского СП ГеоЛинк, ВСЕГИНГЕО, МГУ (г. Москва) и С-ПбГИ(У) – ВИМС (г. Санкт-Петербург).

Основным продуктом СП ГеоЛинк является "Автоматизированное рабочее место гидрогеолога" (АРМ ГЕО; руководители проекта А.А.Рошаль, Л.В.Боревский), объединяющее серию самостоятельных или относительно самостоятельных программ-модулей, предназначенных для решения производственных и научных задач в области гидрогеологии. АРМ ГЕО представляет собой диалоговую систему, обеспечивающую доступ к имеющимся в ней программным средствам и геологической информации, содержащейся во "встроенных" специализированных БД.

Во ВСЕГИНГЕО развиваются 2 системы сеточного моделирования задач геофильтрации и массопереноса (без учета взаимодействий в системе вода-порода) в среде подземных вод, близкие по назначению и своим возможностям: TOPAS А.Плетнёва и "Система специального программного обеспечения автоматизированных сеточных моделей гидрогеологических объектов" ССПО Модель Е.А.Полшкова.

К этому же типу программного обеспечения (ПО) относится система Stimul-2 Е.А.Ломакина и др., разрабатывавшаяся в Санкт-Петербурге, сначала в ВИМС - С-ПбГИ, а затем в фирме "Водные ресурсы", и система моделирования геофильтрации и массо- и теплопереноса В.И.Гунина и А.М.Плюснина (ЧИПР).

Особый вид гидродинамического ПО представляют программные разработки А.В.Кирюхина (С-ПбГИ – ДВО СО РАН), предназначенные для моделирования тепло- и паропереноса в пределах гидротермальных систем.

Наиболее известными зарубежными аналогами данных продуктов является моделирующая система GMS (Groundwater Modeling System) лаборатории Brigham Young University США, распространяемая Environmental Modeling Systems Incorporated, и Visual Modflow геологической службы США (USGS) и фирмы TecSoft. Для последней дополнительно поставляется мощная система визуализации результатов моделирования Visual Groundwater. В целом, можно говорить об их большей сервисности по сравнению с отечественными программами, хотя с содержательной точки зрения российские продукты, как правило, обладают более широкими наборами методов решения и, соответственно, большими возможностями корректного решения широкого круга гидродинамических задач.

Подобная ситуация наблюдается и по *гидрогеохимическому* ПО [23]. Практически не имеют близких по возможностям зарубежных аналогов геохимические моделирующие системы, основанные на методе минимиза-

ции свободных энергий Гиббса, GIBBS Ю.В.Шварова (МГУ) и Селектор-С И.К.Карпова, К.В.Чудненко и др. (Институт геохимии СО РАН, г. Иркутск), а также аналогичная, судя по публикациям, разработка Н.Н.Акинфиева.

Не уступают лучшим зарубежным системам, а во многих случаях и превосходят их, и программные разработки, базирующиеся на методе "констант равновесия". Наиболее интересны среди них генератор гидрогеохимических моделей В12 и полученная с его помощью серия узкоприкладных программ-имитаторов SOXXXX фирмы СофДек В.Н. и С.В.Озябкиных (г. Санкт-Петербург), в т.ч. учитывающих геомиграцию, и программная система MIF Г.А.Соломина (ВСЕГИНГЕО, г. Москва).

К этому ряду примыкает и разработанный в ТПУ программный комплекс HydroGeo (HG32 для Windows), объединяющий одновременно гидродинамические и гидрогеохимические модули, что позволяет отнести его к одной из версий АРМ-гидрогеолога. В отличие от других, данный ПК ориентируется как на традиционные гидрогеологические задачи, так и на специфику глубокозалегающих подземных вод и методов нефтегазовой гидрогеологии, и может широко использоваться в этой области.

Среди зарубежных программ в данном направлении наиболее интересны HYDROGEOCHEM 1 и 2, PHREEQE и PHRQPITZ.

Ряд интересных относительно узкофункциональных программных продуктов разработан в МГУ: TEIS и REGIM (обработка данных откачек и режимных наблюдений; Р.С.Штенгелов, М.И.Казаков), MCG (сеточная модель геофильтрации; С.О.Гриневский), TRANSFER (сеточная геофильтрация и геомиграция; А.В.Лехов и др.).

Самостоятельная область использования ПЭВМ при оценке запасов подземных вод и других гидрогеологических исследованиях связана с применением многочисленных в настоящее время программных средств общего назначения, предназначенных для автоматизированного хранения, первичной оперативной обработки и визуализации (в т.ч. картографической) информации или как это называют в последнее время - для создания фактографических моделей гидрогеологических объектов. Прежде всего, это различные, так называемые, СУБД (средства управления базами данных) и ГИС (географические информационные системы), а также табличные процессоры, графические пакеты и др., носящие вспомогательный характер. Не останавливаясь на этом специально, отметим среди них в качестве примера такие широко известные серии пакетов программ как Paradox - QuattroPro, FoxPro/Access/MDE - Excel, Grapher - Surfer - MapViewer, GeoGraph - GeoDraw, ArcView - ArcInfo, MapInfo и т.п.

Специализированное ПО, которое может быть применено для изучения месторождений подземных вод, использует в принципе близкие мето-

ды обработки информации, поэтому ниже более подробно рассматриваются методы, реализованные в программном комплексе HydroGeo (ПК HG32), разработанном и применяемом в учебной и научной работе кафедры гидрогеологии и инженерной геологии ТПУ [24].

3.3.2. Определение фильтрационно-емкостных свойств водоносных горизонтов

В качестве основных расчетных зависимостей для определения ФЕС по результатам гидрогеологических откачек и испытания скважин в программе SP, входящей в состав ПК HG32, используются широко известные формулы геогидродинамики, записанные применительно к системе СИ и специфике вод глубоких горизонтов (с учетом их плотности и вязкости):

1) логарифмического приближения уравнения Тейса, описывающего плоско-радиальную фильтрацию флюида к скважине:

$$P_0 - P_3 = \frac{Q\mu}{4\pi mK_{\pi}} \ln \frac{a\tau c}{r^2}, \quad (27)$$

где P_0 - пластовое давление (Па), P_3 - текущее забойное давление (Па), Q - текущий дебит ($\text{м}^3/\text{с}$), μ - вязкость флюида (Па·с), m - эффективная мощность пласта (м), K_{π} - коэффициент проницаемости (м^2), a - коэффициент пьезопроводности ($\text{м}^2/\text{с}$), τ - время замера P_3 (с), r - расстояние от оси скважины до внутренней границы изучаемой зоны дренирования: в случае одиночной скважины - ее радиус в зоне залегания пласта, а для наблюдательной - расстояние до нее (м), $c=2.24584$ - константа, вычисленная как $4/e^{\nu}$ (ν - постоянная Эйлера);

2) обработки кривых восстановления давления по методу Хорнера:

$$P_0 - P_3 = \frac{Q_{\text{ср}}\mu}{4\pi mK_{\pi}} \ln \frac{T + \tau}{\tau}, \quad (28)$$

где $Q_{\text{ср}}$ - средний дебит за время притока ($\text{м}^3/\text{с}$), T - продолжительность притока, τ - текущее время КВД (с).

При этом давление и напор (в метрах) связаны соотношением $P = \rho g H$, а коэффициенты фильтрации (в м/с) и проницаемости зависимостью $K = K_{\pi} \frac{\rho g}{\mu}$, где g - ускорение свободного падения ($g=9.807 \text{ м/с}^2$) и ρ - плотность воды (кг/м^3).

Алгоритм определения фильтрационно-емкостных параметров использует стандартные графоаналитические методы обработки полученных при откачках кривых понижения и восстановления уровня Тейса-Джейкоба и Хорнера-Сейза [18]. Последний применяется также и для расчета параметров по кривым восстановления давления (КВД) в глубоких скважинах,

опробованных при помощи испытателя пласта (ИП).

При использовании этого алгоритма в процессе визуализации графиков, для более корректной их интерпретации, выполняются проверки времени наступления квазистационарного режима $\tau_k \geq 2.5r^2/a$ и времени $\tau_e \geq 20 \cdot \pi r^2 S/Q$, начиная с которого погрешность расчетов за счет влияния ёмкости ствола скважины не превышает 5%.

Ввиду необходимости учета одновременного изменения дебита и забойного давления в ходе опробования глубоких скважин с помощью ИП или испытания в колонне, данные по получаемым при этом кривым притока (КП) обрабатываются аналитическим методом, базирующимся на численном интегрировании КП и КВД на основе принципа суперпозиций (наложения течений), частные варианты которого изложены применительно к исследованию глубоких скважин в работах [25, 26].

Используемые при этом расчетные зависимости вытекают из уравнения (27), в соответствии с которым разность пластового и текущего забойного давления для каждой точки N кривой притока, начиная с 3-й, составляет

$$P_0 - P_N = K' \left(\sum_{n=0}^{N-2} Q_n \ln \frac{\tau_N - \tau_n}{\tau_N - \tau_{n+1}} + Q_{N-1} \ln(\tau_N - \tau_{n-1}) + Q_{N-1} \ln d \right), \quad (29)$$

где $n = \overline{0, N-2}$, $N \geq 2$, $K' = \frac{\mu}{4\pi m K}$, $d = ac/r^2$.

В случае, когда P_0 требует расчета, используются последовательные разности выражений, записанных в соответствии с уравнением (29) для каждой пары расчетных точек:

$$\frac{P_N - P_{N-1}}{K'} = \sum_{n=0}^{N-3} Q_n \ln \frac{(\tau_{N-1} - \tau_n)(\tau_N - \tau_{n+1})}{(\tau_{N-1} - \tau_{n+1})(\tau_N - \tau_n)} + Q_{N-2} \ln \frac{(\tau_{N-1} - \tau_{N-2})(\tau_N - \tau_{N-1})}{(\tau_N - \tau_{N-2})} - Q_{N-1} \ln(\tau_N - \tau_{N-1}) + (Q_{N-2} - Q_{N-1}) \ln d. \quad (30)$$

Коэффициент пьезопроводности во всех случаях, кроме кустовых откаток (или гидропрослушивания), лучше рассчитывать методом последовательных приближений, используя равенство, примененное при программной реализации метода суперпозиций:

$$a = \frac{K_p}{\mu(n_0 \beta_\phi + \beta)}, \quad (31)$$

где n_0 - открытая пористость коллектора в д.е., β_ϕ - коэффициент сжимаемости флюида (при отсутствии лабораторных определений для воды может быть задан равным $3 \cdot 10^{-10}$ Па⁻¹), β - коэффициент сжимаемости пористой среды (породы), определяемый для гранулярных коллекторов по уравнению регрессии, описывающему график Холла (точность $\pm 6\%$; Па⁻¹):

$$\beta = 4.15 \cdot 10^{-12} n_0 + 1.99 \cdot 10^{-11}. \quad (32)$$

В первом приближении обычно задается $a = 10 \text{ м}^2/\text{сут}$ и по уравнениям (29) или (30) рассчитывается значение $K_{\text{п}}$ в расчетных точках, затем они подставляются в уравнение (31), по которому определяются уточненные значения a , используя которые уточняются величины $K_{\text{п}}$ и т.д., пока a и $K_{\text{п}}$ в ходе итераций не перестанут изменяться в пределах заданной точности их оценки. Возможные вариации действительных значений n_0 , $\beta_{\text{ф}}$ и β по сравнению с принятыми в расчете практически не влияют на достоверность оценки $K_{\text{п}}$, но могут изменить величину a в пределах одного-двух порядков, что вполне допустимо для опытов в одиночных скважинах.

Ориентировочная величина скин-эффекта s , суммарно характеризующего несовершенство скважины по характеру и степени вскрытия пласта, для одиночной скважины вычисляется по зависимости [26]:

$$s = \left(\frac{K_{\text{п},i}}{K_{\text{п},0}} - 1 \right) \ln \frac{r_3}{r}, \quad (33)$$

где $K_{\text{п},i}$ и $K_{\text{п},0}$ - проницаемости в удаленной зоне пласта и призабойной зоне (например, полученные по последним и первой сериям расчетных точек), r_3 - радиус зоны призабойного изменения фильтрационных свойств пласта при проходке скважины (обычно около 5 см).

В случае если давление насыщения пластовой воды газом ($P_{\text{г}}$) попадает в интервал между начальным и конечным давлениями КП, то во время притока происходит скачкообразное увеличение коэффициента продуктивности (q) при смене двухфазной фильтрации на однофазную, когда $P_3 = P_{\text{г}}$. В отсутствие выраженного эффекта смыкания трещин это может позволить оценить $P_{\text{г}}$ по характеру зависимости $q = f(P_3)$.

Приведенные выше формулы записаны для условий напорного режима фильтрации. Для безнапорных водоносных горизонтов в них производится переход от давлений к напорам и понижениям уровня и замена $2Sm$ на $S(2H-S)$, где H - мощность безнапорного горизонта. Соответственно, a в этом случае заменяется на $a_{\text{в}}$ - коэффициент уронепроводности.

3.3.3. Расчет и оптимизация водозаборов

Для оценки эксплуатационных запасов подземных вод с использованием гидродинамического метода в ПК HG32 предназначена опция "Водозаборы". Расчеты с ее помощью выполняются для конкретных схем размещения водозаборных скважин с учетом граничных условий в плане и сводятся, как рассмотрено в предыдущих разделах, к оценке величины понижения уровня в каждой из них на конец срока эксплуатации. Кроме того, в зависимости от полученных результатов может быть выполнена автоматизированная оптимизация дебитов и размещения скважин водозабо-

ра.

Из подобных программных разработок известна программа расчета и оптимизации неупорядоченного размещения скважин на основе ЛП-поиска (использует смещение координат по равномерно распределенной последовательности точек), разработанная М.С.Шутовым в ЗапСибНИГНИ (г. Тюмень).

Все расчеты проводятся для условий однородного по ФЕС (водопродоводимость и пьезо- или гидропродоводность не изменяются) горизонта, изолированного от выше- и нижележащих водоносных толщ. Переход к безнапорному режиму фильтрации, описанный выше, является относительно несложным, поэтому описание расчетов для безнапорных условий далее приводится в сокращенном виде.

Понижения уровня в скважинах водозабора и любых других заданных расчетных точках (формально такие точки отличаются от скважин лишь нулевым дебитом) вычисляются по принципу сложения фильтрационных течений, в соответствии с которым они определяются как сумма срезок уровня, обусловленных независимой работой каждой из эксплуатируемых скважин.

Основная расчетная зависимость, базирующаяся на формуле логарифмического приближения Тейса (27), с учетом различного времени пуска скважин и их дебита, в этом случае принимает для напорных условий вид

$$S_i = \frac{1}{4\pi T} \sum_j^n Q_j \left(\ln \frac{\tau_j}{l_{ij}^2} + b \right), \quad j = \overline{1, n}, \quad (34)$$

где S_i - суммарное понижение уровня в расчетной точке i , вызванное работой водозабора, м; T - водопродоводность горизонта ($T=Km$), $m^2/сут$; n - число расчетных эксплуатационных скважин (включая зеркально отраженные при задании границ пласта); Q_j - дебит расчетной скважины j , $m^3/сут$; τ_j - продолжительность откачки из скважины j до расчетного момента времени ($\tau_j = \tau_p - \tau_j^0$, где τ_p - расчетное время, а τ_j^0 - время запуска скважины), сут; l_{ij} - расстояние между расчетной точкой i и скважиной j , м; b - для однородного горизонта является постоянной величиной, зависящей от пьезопроводности.

При $i \neq j$, квадрат расстояния между расчетной точкой и расчетной скважиной вычисляется по формуле: $l_{ij}^2 = (y_i - y_j)^2 + (x_i - x_j)^2$, где x, y - координаты, а когда $j \equiv i$ (j и i совпадают, обозначая одну и ту же скважину) - $l_{ij}^2 = r_i^2$, где r - радиус скважины. Параметр b определяется как $b = \ln(a \cdot c)$, где a - пьезопроводность, а $c=2.24584$.

В случае безнапорного водоносного горизонта, имеющего мощность

H_0 , зависимость (34) принимает вид

$$S_i = H_0 - \sqrt{H_0^2 - \sum_{j=1}^n \frac{Q_j}{2\pi K} \left(\ln \frac{\tau_j}{l_{ij}^2} + b \right)}.$$

Для слабо неоднородных по ФЕС горизонтов параметры K , m и a определяются как средневзвешенные по площади развития воронки депрессии, а при существенной неоднородности вместо их обобщенных величин можно использовать конкретные значения в каждой расчетной точке. Например, для напорных условий:

$$S_i = \frac{1}{4\pi} \sum_j^n \frac{Q_j}{T_{ij}} \left(\ln \frac{a_{ij} \tau_j}{l_{ij}^2} + \ln c \right),$$

где T_{ij} и a_{ij} вычисляются как среднее арифметическое по расчетным точкам, попадающим в эллипс с осями l_{ij} , $0.5 \cdot l_{ij}$, вписанный между точками i и j .

В расчетах учитываются два основных вида границ пласта в плане: постоянного напора (например, гидравлически связанный с эксплуатационным водоносным горизонтом водоём или водоток) и непроницаемые (выклинивание горизонта, изолирующее разрывное нарушение и т.п.), для чего используется метод зеркальных отображений. При этом границы рассматриваются как бесконечные прямолинейные, а число расчетных скважин в зависимости (34) определяется выражением:

$$n = n_c (z + 1), \quad (35)$$

где n_c - число реально существующих скважин и z - число учитываемых границ.

В случае непроницаемой границы расчетные дебиты отраженных скважин приравниваются к дебитам соответствующих им реальных скважин, а в случае границы с постоянным напором - равны дебитам реальных скважин с обратным знаком.

Если задать каждую из границ координатами двух лежащих на их линии точек x_1, y_1 и x_2, y_2 (рис. 5), то координаты отраженных скважин определяют уравнения:

$$\begin{aligned} x_{i,0} &= x_i - 2(Ax_i + B - y_i) \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha, \\ y_{i,0} &= y_i - \frac{2}{A}(Ax_i + B - y_i) \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha, \end{aligned} \quad (36)$$

где $A = \frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2}$, $B = y_1 - Ax_1$, $\alpha = \arctg A$.

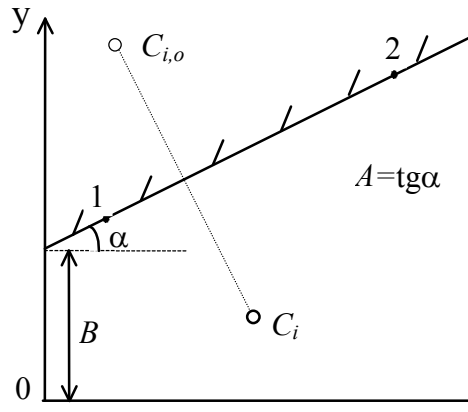


Рис. 5. Схема размещения реальной и отраженной скважин относительно границы

Очевидно, что при $y_1 = y_2$, $x_{i,o} = x_i$, а при $x_1 = x_2$, $y_{i,o} = y_i$ (границы параллельны осям координат). В этих случаях $y_{i,o} = y_i - 2(y_i - y_1)$ и $x_{i,o} = x_i - 2(x_i - x_1)$, соответственно.

Расчетные значения S_i в точках, совпадающих с эксплуатационными скважинами, сравниваются с величиной максимального допустимого понижения S_m . Последняя при существенном несовершенстве скважин должна предварительно уменьшаться на величину дополнительной срезки уровня ($\Delta S_{ск}$) за счет скин-эффекта (s):

$$\Delta S_{ск} = \frac{Q \cdot s}{2\pi T}. \quad (37)$$

Размещение скважин водозабора может считаться оптимальным, если понижения уровня во всех скважинах на конец расчетного срока эксплуатации будут близки к величине допустимого понижения, поскольку при $S_i < S_m$ запасы избыточны, а при $S_i > S_m$ - недостаточны. В первом случае оптимизация размещения скважин может заключаться в уменьшении расстояния между ними, а во втором - в его увеличении, либо в удалении водозабора от непроницаемых границ или же приближении к границам постоянного напора, для чего используется специальный алгоритм обработки изменения координат каждой из скважин, не удовлетворяющих условию:

$$S_i \leq S_m \pm \delta, \quad (38)$$

где δ - заданная точность, при их перемещении в поле графического окна с помощью мыши.

Необходимые во втором случае для проведения оптимизации расстояния скважины от границы определяются по зависимости:

$$l_{i-г} = (Ax_i + B - y_i) \cos \alpha. \quad (39)$$

При изменении координат каждой скважины все расчеты повторяются до выполнения условия (38) по всем скважинам. Критериями возможности перемещения каждой конкретной скважины также являются: ее сбли-

жение с другими скважинами или с границей постоянного напора на минимально допустимое расстояние, а также удаление от соседней скважины или от непроницаемой границы до исчезновения их взаимодействия. При невозможности выполнения условия (38) за счет изменения размещения эксплуатационных скважин, требуется принципиальный пересмотр исходной схемы водозабора (его суммарной производительности, числа, размещения, времени запуска и дебитов скважин) и, возможно, конструкции водозаборных скважин (диаметров, степени гидравлического совершенства, типа водоподъемного оборудования и т.п.).

Аналогично, вместо оптимизации размещения, выполняется оптимизация дебитов всех проектных скважин водозабора, для чего при заданном их размещении выполняется пошаговый подбор величины оптимального дебита по каждой скважине с заданной точностью. Дебиты в этом случае ограничиваются сверху величиной максимальной водозахватной/водоприемной способности, задаваемой дополнительно, исходя из конкретной конструкции фильтров эксплуатационных скважин.

3.3.4. Численное моделирование гидродинамических и гидрогеохимических процессов

Развитие в последние десятилетия методов численного моделирования геофильтрации и геомиграции [27-30] привело к появлению целого ряда программных средств, существенно повышающих геологическую эффективность моделирования процессов эксплуатации подземных водозаборов и оценки на этой основе эксплуатационных запасов подземных вод.

Основой численного моделирования является разбиение области фильтрации на относительно однородные блоки, образующие пространственную сетку, между ячейками которой с использованием методов конечных разностей, конечных элементов или граничных интегральных уравнений и моделируются фильтрационные процессы.

По сравнению с традиционно применяемыми методами, практически всегда требующими более или менее значительной схематизации природных условий, такой подход в большинстве случаев позволяет лучше учесть пространственную неоднородность ФЕС пород, сложный характер и разнообразие граничных условий, инфильтрацию, перетекание и другие факторы, реально присущие таким сложным геологическим объектам как месторождения подземных вод. Все это обуславливает возможность получения с их помощью более точных и достоверных оценок эксплуатационных запасов подземных вод и оптимизации водозаборов, хотя, в то же время, современный уровень как теоретического, так и практического развития методов и программ численного моделирования геофильтрации пока еще недостаточен для их применения в весьма сложных гидрогеологических

условиях.

Значительный интерес представляет также использование моделирующих программных комплексов для создания и эксплуатации постоянно действующих моделей месторождений подземных вод, постепенно уточняющихся по мере накопления гидрогеологической информации.

За редкими исключениями, такие программные средства в настоящее время весьма дороги, довольно сложны в использовании, часто громоздки и недостаточно сервисны, что сдерживает их широкое внедрение в практику гидрогеологических исследований. Тем не менее, активно продолжающаяся доработка и совершенствование существующих программных продуктов позволяют надеяться на успешное преодоление большинства отмеченных недостатков уже в ближайшие годы. Поэтому можно утверждать, что численному моделированию принадлежит будущее в реализации наиболее масштабных, сложных и дорогостоящих проектов, тогда как в решении сравнительно небольших и относительно простых гидрогеодинамических задач, а также при очень сложных гидрогеологических условиях (месторождения подземных вод III-й группы сложности), более целесообразным пока останется использование охарактеризованных в предыдущих разделах традиционных методов.

В качестве примера алгоритмов, реализующих численное моделирование одновременно как гидродинамических, так и гидрогеохимических процессов, кратко рассмотрим положения, лежащие в основе моделирующих модулей ПК НГ32.

Математическое описание процессов, протекающих в фильтрационном потоке подземных вод, складывается из совместного решения задач геофильтрации, массопереноса и взаимодействия раствора с вмещающей твердой фазой пород.

3.3.4.1. Геофильтрация

Основой моделирования геофильтрации являются численные методы решения дифференциальных уравнений, описывающих математическую модель движения вод. Для этого применяется пространственная дискретизация непрерывного фильтрационного поля путем его разбивки на сеть сообщающихся блоков и пошаговая дискретизация процесса фильтрации во времени, в результате которых дифференциальные уравнения фильтрации могут быть заменены их разностными представлениями.

Общая конечно-разностная форма дифференциального уравнения нестационарной плановой фильтрации, например в изотропном напорном пласте, имеет вид

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \dots + W = \mu \frac{\partial H}{\partial \tau}, \quad (41)$$

где T – водопроводимость, H – напор, W – расход источников/стоков, μ – удельная емкость пород (водоотдача), а "... " здесь и далее заменяет аналогичные предшествующему члены по координатам u и z .

Переход от дифференциальной записи к разностной может быть выполнен после разбивки области фильтрации на сеть элементарных блоков/узлов и записи для каждого блока уравнения баланса воды. В ПК НГ32 для этого использован метод конечных разностей в форме, предусматривающей итерационный расчет напоров/давлений с использованием методов релаксации и переменных направлений по зависимости

$$H^k = \frac{\omega(p_{i-1}H_{i-1}^k + p_{i+1}H_{i+1}^{k-1} + \dots + E / \Delta\tau \times H^{k-1} + W^{k-1})}{p_{i-1} + p_{i+1} + \dots + E / \Delta\tau} + (1 - \omega)H^{k-1}, \quad (42)$$

где p – межблочная проводимость между текущим и смежными блоками по координате s с индексом блоков i , E – текущая емкость блока, ω – ускоряющий коэффициент релаксации (рекомендуемое значение 1.7).

Для расчета дисперсионной составляющей массопереноса в рассматриваемом случае использован упрощенный подход, заключающийся во введении эффекта двойной пористости [31]. В этом случае общая пустотность породы (открытая пористость) условно разделяется на проточную (эффективная пористость) и непроточную составляющие, а расчет сводится к замещению части проточной пустотности блока втекающим раствором, смешению содержащихся в проточной части блока добавившегося и остающегося растворов и частичному/полному диффузионному обмену между растворами проточной и непроточной зон. Более строгое описание дисперсионной и диффузионной составляющих массопереноса, пока не реализованное в ПК НГ32, приводится ниже.

3.3.4.2. Массоперенос

Массоперенос вещества в движущемся потоке вод включает несколько различных процессов, основными среди которых являются [29]:

1) Конвективный перенос фильтрующимся потоком (вынужденная конвекция) под действием гидравлического градиента, протекающий со скоростью $u=v/n$, где v – скорость фильтрации Дарси, а n – эффективная пористость. Удельный поток вещества (масса вещества, перемещающаяся в единице объема породы за единицу времени) за счет конвективного переноса $I_k=uC$, где C – содержание в растворе или концентрация.

2) Плотностная конвекция, связанная с наличием вертикального градиента плотности растворов. Ее скорость $v_p=K_z\Delta\rho$. В этом выражении v_p – вертикальная составляющая скорости фильтрации за счет градиента плотности, K_z – коэффициент фильтрации в вертикальном направлении, а $\Delta\rho=(\rho_v-\rho_n)/\rho_n$, где индексы "в" и "н" отвечают выше- и нижезалегающим

водам. Из-за эффекта начального градиента фильтрации движение в этом случае может возникать лишь тогда, когда минерализация более плотного вышележающего раствора на 2-5 г/л выше, чем у менее плотного нижележающего. Удельный поток $I_p = v_p C$.

3) Диффузионный перенос, подчиняющийся закону Фика $I_{Df} = D_m \frac{\partial C}{\partial l}$, где D_m – коэффициент молекулярной диффузии в водонасыщенной среде, а l – расстояние в направлении вектора градиента концентрации.

4) Гидродинамическая дисперсия, контролируемая коэффициентом дисперсии $D_v = \delta v$. Используемый здесь коэффициент дисперсивности δ определяется размерами и структурой пустотности породы, а удельный поток вещества за счет дисперсии $I_{Dp} = D_v \frac{\partial C}{\partial l}$. Поскольку перенос за счет диффузии и дисперсии являются физическими аналогами, может быть введено понятие суммарного коэффициента дисперсии $D = D_m + D_v$. В этом случае $I_{Df} + I_{Dp} = D \frac{\partial C}{\partial l}$ определяются совместно.

Общее уравнение баланса вещества записывается как

$$\frac{\partial I_x}{\partial x} + \dots + W_s = n \frac{\partial C}{\partial \tau}, \quad (40)$$

где I – суммарный удельный поток вещества в направлении координаты, указанной нижним индексом, W_s – удельная объемная интенсивность источников-стоков. С учетом перечисленных процессов миграции, суммарный удельный поток по каждой из рассматриваемых пространственных координат $I = I_k + I_p + I_{Df} + I_{Dp}$.

Величина W_s включает в себя действие как внешних по отношению к системе источников/стоков вещества (например, привнос вместе с закачиваемым в скважину раствором), так и внутренних, главным среди которых является физико-химическое взаимодействие раствора с вмещающими породами, складывающееся, в общем случае, из процессов растворения/осаждения минералов породы и ионного обмена между раствором и поглощенным комплексом породы, то есть собственно гидрогеохимические процессы.

Таким образом, в целом моделирование геомиграции включает в себя несколько последовательных взаимосвязанных этапов:

1) Геофильтрационный расчет, в результате которого определяется поле напоров/давлений, а затем скоростей и объемов перемещения растворов и содержащихся в них компонентов в направлении осей координат на момент времени τ^k .

2) Независимый расчет дисперсионной составляющей массопереноса на τ^k за $\Delta\tau$.

3) Самостоятельный расчет действия источников/стоков вещества, включая расчет взаимодействий в системе вода-порода, на том же временном шаге.

В результате расчетов в соответствии с п.п. 1-3 определяется распределение в расчетных блоках/узлах текущих напоров/давлений, а также составов и других расчетных параметров жидких и твердых фаз системы, после чего повторяется выполнение всех расчетов для следующего временного шага и т.д., до достижения заданного конечного момента времени.

3.3.4.3. Источники/стоки вещества

В основу моделирования внутренних источников/стоков вещества (собственно гидрогеохимических процессов - взаимодействия компонентов раствора друг с другом и/или раствора с вмещающей твердой фазой пород за счет растворения/осаждения) положено понятие элементарных реакций

$$r \equiv b_1 B_1 + \dots + b_n B_n = B_{1b_1} \dots B_{nb_n}, \quad (43)$$

где r - элементарная реакция; B_i , b_i - i -я частица раствора и её стехиометрический коэффициент в реакции r ; $B_{1b_1} \dots B_{nb_n} \equiv D_r$ - образующийся в результате r минерал, либо ионный ассоциат, совокупность которых исчерпывающе описывает анализируемые природные процессы, а также методы равновесной термодинамики и химической кинетики. Для учета неидеальности раствора применен метод активности Льюиса [32]. Расчет коэффициентов активности компонентов раствора и активности растворителя-воды основан на методике Питцера [33].

При этом в качестве параметров элементарных процессов рассматриваются:

$$G_{T,P,r} = G_r^0 + (298 - T)S_r^0 + G'_{T,r} + G'_{P,r},$$

$$\ln K_{T,P,r} = -G_{T,P,r} (RT)^{-1}, \quad (44)$$

$$P_{a,r} = a_{D_r} \prod_i^n a_{B_i}^{-1},$$

где параметры $G'_{T,r} = \int_{298}^T C_{P,r}^0 \cdot dT - T \int_{298}^T \frac{C_{P,r}^0}{T} \cdot dT$ и $G'_{P,r} = \int_{P'_0}^{P'} V_{T,r}^0 \cdot dP'$ вычис-

ляются по формулам интегрирования после подстановки функций $C_p^0 = f(T)$ и $V_T^0 = f(P')$ в виде полиномов четырех видов: Майера-Келли, Карпова или Тангера-Хелгесона, либо принимая их постоянными; P' - давление в термодинамических Дж; $G_{T,P,r}$, G_r^0 , S_r^0 , $C_{P,r}^0$, V_r^0 - мольные изменения термодинамических параметров в ходе реакции r при заданных и стан-

дартных Т-Р условиях; R - универсальная газовая постоянная; $K_{T,P,r}$ - термодинамическая константа равновесия, $P_{a,r}$ - произведение активностей (a) компонентов раствора и минерала, участвующих в реакции r, получаемое в соответствии с законом действия масс.

Моделирование растворения-осаждения проводится по зависимостям

$$\begin{aligned} K_{\tau,r} &= K_{T,P,r}^{\alpha_{\tau,r}}, \quad L_r = \ln K_{\tau,r} - \ln P_{a,r}, \\ V_r &= 0.3(T - 298)(n_r/m_r)d_r L_r B_{D_r}, \quad r = r_{|v|=\max}, \\ P_{\gamma,r} &= \gamma_{D_r} \prod_i \gamma_{B_i}^{-b_i}, \quad \text{и} \quad K_{\tau,r} = P_{\gamma,r} \prod_i (m_{B_i} + x_{D_r})^{-b_i}. \end{aligned} \quad (45)$$

Здесь $\alpha_{\tau,r}$ и $K_{\tau,r}$ - текущие условное время и константа равновесия; L_r и v_r - параметр насыщенности раствора и условная скорость осаждения минерала D_r в процессе r; d_r и b_r - относительная скорость диффузии и число составляющих минерал D_r независимых ("базовых") компонентов; m_{B_i} - молярность частицы раствора B_i , входящей в минерал D_r ; $P_{\gamma,r}$ - произведение коэффициентов активности для реакции r в соответствии с законом действия масс; x_{D_r} - недостаток насыщения раствора по отношению к минералу D_r или шаг реагирования (число молей породы, переводимых в единицу объема раствора на каждой итерации по минералам породы; определяется итерационным путем по методу дихотомии).

Расчет модели комплексообразования, необходимый для изучения форм миграции и определения действительных концентраций компонентов в растворе (а не валовых, получаемых при химическом анализе) из R_r ионных ассоциатов и комплексных соединений, включённых в систему моделирования, проводится по формулам

$$m_{D_r} = K_{T,P,r} P_{\gamma,r}^{-1} \prod_i m_{B_i}^{b_i}, \quad m_{B_j,\Sigma} = \sum_r K_{T,P,r} P_{\gamma,r}^{-1} b_j \prod_i m_{B_i}^{b_i}, \quad (46)$$

где $i = \overline{1, n}$, $r = \overline{1, R_r}$, $j \in i$, $i \subset r$,

$$m_{B_j} = m_{B_j,\Sigma} \left(\sum_r K_{T,P,r} P_{\gamma,r}^{-1} b_j m_{B_j}^{b_j-1} \prod_i m_{B_i}^{b_i} \right)^{-1}, \quad l = i \setminus j. \quad (47)$$

При этом текущие содержания иона водорода, гидроксил-иона и активность электронов, используемая при моделировании окислительно-восстановительных взаимодействий, определяются на основе условия электронейтральности

$$m_{H^+,OH^-} = f \left(\sum_i z_i m_i = 0 \right) \text{ и зависимости } a_{e^-} = \exp \left(- \frac{F}{RT} \cdot Eh \right),$$

где z - заряд, F - постоянная Фарадея и Eh - окислительно-восстановительный потенциал раствора.

Сходимость расчета комплексообразования обеспечивается путем

итераций по методам среднего геометрического, а затем Ньютона отдельно сначала по катионам, потом по анионам и нейтральным частицам, после чего оценивается электронейтральность и вычисляются величины pH и Eh раствора.

Важно подчеркнуть, что такой алгоритм не содержит принципиальных ограничений по солености или ионной силе растворов и пригоден для моделирования реакций сорбции и ионного обмена, если ввести в систему ионы поглощенного комплекса породы как самостоятельную фазу, термодинамические параметры которой могут быть оценены по экспериментальным/опытным данным.

Приведенный подход к одновременному моделированию геофильтрации и геомиграции, безусловно, не охватывает всех сторон этой достаточно сложной проблемы, но уже в данной постановке и реализации позволяет решать достаточно сложные реальные гидрогеологические задачи, в том числе и непосредственно связанные с комплексной оценкой ресурсов, запасов и качества подземных вод, эксплуатируемых подземными водозаборами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Освещая проблему изучения запасов и ресурсов подземных вод, необходимо подчеркнуть, что в основе всех выполняемых на практике построений и расчетов лежит детальность, полнота и качество геолого-гидрогеологических данных, полученных в процессе проведенных исследований. Поэтому основные усилия при выявлении и оценке запасов и ресурсов следует сосредоточить, в первую очередь, на возможном улучшении исходной гидрогеологической информации - на полевых геологических и гидрогеологических изысканиях и наблюдениях. Существует и обратная связь, поскольку все такие исследования должны быть подчинены конечной цели, которая не может быть достигнута без полноценного представления о теоретических и методических основах гидродинамических расчетов и моделирования, выполняемых на завершающих стадиях поисково-разведочных работ на подземные воды.

К настоящему времени накоплен значительный опыт изучения запасов и ресурсов подземных вод, нашедший свое отражение в многочисленной нормативной литературе и действующих инструкциях, регламентирующих основные аспекты гидрогеологических исследований и требования к их составу, объемам и качеству. Но следует помнить, что природа гораздо многообразнее существующего опыта и ее нельзя подчинить даже самым лучшим инструкциям и методическим указаниям. Последние в этой связи могут нести лишь рекомендательный характер. Следовательно, важнейшим условием эффективности геологоразведочного процесса всегда

останется творческий, исследовательский подход к каждому конкретному региону и месторождению подземных вод.

Развитие методов оценки запасов и ресурсов испытывает сейчас новый подъем, обусловленный широким внедрением в практику гидрогеологических исследований ЭВМ и связанных с ними новых методов и технологий автоматизированного анализа, обобщения и интерпретации полученных материалов. Многие из них - например, численное имитационное моделирование геофильтрации - были ранее просто недоступны, ввиду своей сложности и трудоемкости. Это порождает необходимость принципиального пересмотра многих из ставших обычными представлений, вплоть до основ теории фильтрации и геохимии подземных вод, составляющих теоретическую базу гидрогеологии как науки.

Нельзя также не упомянуть о важнейшем значении интенсивно сейчас развивающихся геоэкологических и гидрогеохимических аспектов изучения запасов и ресурсов подземных вод, не рассматривавшихся в настоящей работе ввиду ее ограниченного объема.

ЛИТЕРАТУРА

1. Биндеман Н.Н., Язвин Л.С. Оценка эксплуатационных запасов подземных вод. - М.: Недра, 1970. - 215 с.
2. Боровский Б.В., Дробноход Н.И., Язвин Л.С. Оценка запасов подземных вод. - Киев, 1989. - 407 с.
3. Инструкция о содержании, оформлении и порядке представления в ГКЗ СССР технико-экономических обоснований кондиций на минеральное сырье. - М.: ГКЗ СССР, 1984. - 24 с.
4. Инструкция по применению классификации эксплуатационных запасов и прогнозных ресурсов подземных вод к месторождениям промышленных вод. - М.: ГКЗ СССР, 1985. - 15 с.
5. Инструкция по применению классификации эксплуатационных запасов и прогнозных ресурсов подземных вод к месторождениям минеральных вод. - М.: ГКЗ СССР, 1985. - 17 с.
6. Инструкция по применению классификации эксплуатационных запасов и прогнозных ресурсов подземных вод к месторождениям теплоэнергетических вод. - М.: ГКЗ СССР, 1985. - 18 с.
7. Классификация эксплуатационных запасов и прогнозных ресурсов подземных вод. - М.: ГКЗ, 1997. - 16 с.
8. Временное положение о порядке проведения геологоразведочных работ по этапам и стадиям (подземные воды). - М.: МПР РФ, 1998. - 30 с.
9. Мониторинг месторождений и участков водозаборов питьевых подземных вод. - М.: МПР РФ, 1998. - 80 с.
10. Методические рекомендации по оценке подземного притока в реки. -

Л.: Гидрометеиздат, 1991. - 96 с.

11. Кононов В.М., Климентов П.П. Методика гидрогеологических исследований. - М.: Высш. шк., 1989. - 395 с.

12. Куделин Б.И. и др. Естественные ресурсы подземных вод Центрально-Черноземного района и методика их картирования. – М.: Изд. МГУ, 1963. - 147 с.

13. Рассказов Н.М., Кусковский В.С., Булатов А.А. и др. Ресурсы пресных подземных вод степных районов Республики Хакасия. – Водные ресурсы. – 1999. - №2. – с. 143-148.

14. Мироненко В.А. Динамика подземных вод. - М.: Недра, 1988. - 357с.

15. Ресурсы пресных и маломинерализованных подземных вод южной части Западно-Сибирского артезианского бассейна. - М.: Недра, 1991. - 260 с.

16. Плотников Н.И. Поиски и разведка пресных подземных вод для целей крупного водоснабжения. - М.: Изд. МГУ, 1968. - 470 с.

17. Плотников Н.И. Поиски и разведка пресных подземных вод. - М.: Недра, 1985. -370 с.

18. Поиски и разведка подземных вод для крупного водоснабжения. / Под ред. Н.Н.Биндемана и др. - М.: Недра, 1969. - 328 с.

19. Методы изучения и оценка ресурсов глубоких подземных вод. / Под ред. С.С.Бодаренко, Г.С.Вартаняна - М.: Недра, 1986. - 479 с.

20. Основы гидрогеологии. Гидрогеодинамика. / Дзюба А.А., Зекцер И.С., Караванов К.П. и др. - Новосибирск: Наука, 1983. - 283 с.

21. Альбом нефтяного оборудования, средств автоматизации и приборов. / Под ред. Ю.В.Вадецкого, А.А.Джавадяна. - М.: ВНИИОЭНГ, 1988. - 454 с.

22. Василевский В.Н., Петров А.И. Оператор по исследованию скважин. - М.: Недра, 1983. - 309 с.

23. Методы геохимического моделирования и прогнозирования в гидрогеологии. / Под ред. С.Р.Крайнова. – М.: Недра, 1988. – 254 с.

24. Букаты М.Б. Разработка программного обеспечения в области нефтегазовой гидрогеологии. // Разведка и охрана недр. – 1997. - № 2. – с. 37-39.

25. Бузинов С.Н., Умрихин И.Д. Исследование нефтяных и газовых скважин и пластов. - М.: Недра, 1984. - 269 с.

26. Карнаухов М.Л., Рязанцев Н.Ф. Справочник по испытанию скважин. - М.: Недра, 1984. - 268 с.

27. Ломакин Е.А., Мироненко В.А., Шестаков В.М. Численное моделирование геофильтрации. - М.: Недра, 1988. - 229 с.

28. Мироненко В.А., Шестаков В.М. Теория и методы интерпретации опытно-фильтрационных работ. - М.: Недра, 1978. - 325 с.

29. Гидрогеодинамические расчеты на ЭВМ / Под ред. Р.С.Штенгелова. – М.: Изд-во МГУ, 1994 – 335 с.

30. Мироненко В.А., Румынин В.Г. Проблемы гидрогеоэкологии. Т. 1. Теоретическое изучение и моделирование геомиграционных процессов. – М.: Изд-во МГУ, 1998. – 611 с.
31. Озябкин В.Н., Озябкин С.В. Программные имитаторы для моделирования геохимической миграции неорганических загрязнений. // Геоэкология. – 1996. - № 1. – с. 104-120.
32. Льюис Г., Рендалл М. Химическая термодинамика. – М.: ОНТИ, Химтеорет, 1936. – 390 с.
33. Термодинамическое моделирование в геологии: минералы, флюиды и расплавы./ Р.К.Ньютон, А.Навротски, Б.Дж.Вуд и др. - М.: Мир, 1992. - 534 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1. Ресурсы и запасы подземных вод	3
1.1. Разновидности ресурсов.	3
1.2. Запасы подземных вод.	4
2. Оценка ресурсов подземных вод	6
2.1. Виды работ и методы определения региональных ресурсов	6
2.2. Районирование территорий в связи с региональной оценкой прогнозных эксплуатационных ресурсов	7
2.3. Виды работ, выполняемые в связи с региональной оценкой эксплуатационных ресурсов	8
2.4. Методика оценки прогнозных региональных эксплуатационных ресурсов	8
2.4.1. Гидродинамический расчет прогнозных региональных ресурсов	9
2.4.2. Оценка прогнозных региональных эксплуатационных ресурсов при перетекании воды из вышележащего водоносного горизонта	11
2.4.3. Оценка естественных (геологических) запасов подземных вод .	11
3. Эксплуатационные запасы подземных вод и их оценка	12
3.1. Оценка запасов по категориям изученности	13
3.1.1. Категория C_2	13
3.1.2. Категория C_1	14
3.1.3. Запасы промышленных категорий	14
3.2. Методы определения эксплуатационных запасов	16
3.2.1. Гидродинамический метод	16
3.2.2. Гидравлический метод	20
3.2.3. Совместное использование гидродинамического и гидравлического методов	21
3.2.4. Балансовый метод	23
3.2.5. Оценка региональных запасов промышленных вод в пределах артезианских структур	25
3.3. Использование ЭВМ при оценке запасов подземных вод	28
3.3.1. Основные программные средства	29
3.3.2. Определение фильтрационно-емкостных свойств водоносных горизонтов	31
3.3.3. Расчет и оптимизация водозаборов	33
3.3.4. Численное моделирование гидродинамических и гидрогеохимических процессов	37
Заключение	43
Литература	44

Рассказов Николай Михайлович
Букаты Михаил Болеславович

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ РЕСУРСОВ И ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД
Учебное пособие

Научный редактор профессор, д.г.-м.н. М.Б.Букаты
Редакторы Р.Д.Игнатова, Н.Я.Горбунова

Подписано к печати 24.04.2002.
Формат 60×84/16. Бумага офсетная.
Плоская печать. Усл. печ. л. 2,79. Уч.-изд. л. 2,53.
Тираж 150. Заказ 16. Цена С.
ИПФ ТПУ. Лицензия ЛТ N1 от 18.07.94.
Типография ТПУ. 634034, Томск, пр. Ленина, 30.