# ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ГЕОЛОГИЯ И РАЗВЕДКА

2012, № 2

# «HAP3AH-2011»

# ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕХНОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

УДК 556.49

### В.Г. КАЗЕЕВ<sup>1</sup>, Н.Н. КОВАЛЕНКО<sup>2</sup>, А.В. МАЛКОВ<sup>2</sup>

# КОРРЕКТИРОВКА ПАРАМЕТРОВ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ГЕОФИЛЬТРАЦИИ ПО ДАННЫМ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА (НА ПРИМЕРЕ ЮЖНО-МАНГЫШЛАКСКОГО АРТЕЗИАНСКОГО БАССЕЙНА)

Рассмотрен метод повышения точности дискретных математических моделей, основанный на методике подбора (на примере Южно-Мангышлакского артезианского бассейна). В качестве критерия выбора использовался минимум среднеквадратической погрешности модельных и фактических данных. Точность математической модели по ретроспективным данным составляет 12—14 %.

К лючевые слова: месторождение подземных вод; математическое моделирование; водоносный горизонт; фильтрационные параметры.

#### Геолого-гидрогеологическая характеристика объекта

Месторождение подземных вод «Куюлус» («К-М») расположено в пределах Южно-Мангышлакского артезианского бассейна (рис. 1), который входит в состав Среднекаспийской водонапорной системы.

Бассейн характеризуется довольно сложным гидрогеологическим строением. В его пределах выделяются две гидродинамические зоны, разделенные мошной толщей относительно водоупорных отложений позднемелового-палеогенового возраста [5].

В верхней гидродинамической зоне развиты грунтовые воды, представляющие собой единый водоносный горизонт, образовавшийся за счёт инфильтрационного питания. Движение грунтовых вод направлено с северо-востока на юго-запад, в сторону Каспийского моря и бессточных впадин, где и происходит разгрузка. Нижняя гидродинамическая зона характеризуется развитием напорных вод, питание которых также осуществляется за счёт инфильтрации атмосферных осадков в области выхода отложений на дневную поверхность в районе гор Каратау и Беке-Башкудукского поднятия. Движение вод этой зоны направлено от хребтов Каратау к центру бассейна.

К этой гидродинамической зоне относятся рабочие горизонты водозабора «К-М»: сеноманский, первый, второй и третий альбские водоносные горизонты, объединенные в виду схожести гидрогеологического строения и условий формирования в альб-сеноманский водоносный комплекс. Длительная эксплуатация подземных вод альб-сеноманского водоносного комплекса в значительной степени изменила естественную гидродинамическую обстановку, в результате чего движение подземных вод в настоящее время направлено от периферии бассейна к центру водозаборных сооружений.

Водозабор подземных вод «К-М» предназначен для хозяйственно-питьевого водоснабжения г. Актау и промышленного комплекса. В плане водозабор представляет собой систему водозаборных скважин, вытянутых линейно в субмеридиональном направлении по оси линзы слабосолоноватых вод, с шагом 1,5 км. Конструкция водозабора ярусная, т. е. каждая водозаборная скважина каптирует только какой-то один водоносный горизонт. Основными рабочими горизонтами являются (снизу вверх) второй, первый альбские и сеноманский водоносные горизонты, содержащие напорные воды.

Общее число водозаборных скважин 54: 31 оборудована фильтром на первый альбский, 14 — на сеноманский и 9 — на второй альбский горизонты. Условно водозабор разбит на три ветки: южную, северную и сеноманскую. Водоотбор из скважин осуществляется погружными насосными агрегатами типа ЭЦВ (первый подъём), установленными в скважинах на глубинах от 40 до 100 м ниже устья. Технологическая схема предполагает использование подземных вод в качестве добавки (17 %) в ди-



Рис. 1. Схема водозабора «Куюлус»: 1 – область отсутствия водоносных отложений мелового возраста; 2 – область выхода водоносных отложений мелового возраста на дневную поверхность; 3 – изолинии понижения уровня первого альбского водоносного горизонта; 4 – наблюдательная скважина и ее номер; 5 – линейный ряд водозаборных скважин; 6 – контур линзы подземных вод с минерализацией до 3,0 г/дм<sup>3</sup>; 7 – насосная станция II подъема; 8 – магистральный водовод; 9 – линия геологического разреза



**Рис. 2. Динамика суммарного водоотбора из месторождения** «К-М»: *I* – суммарный водоотбор из скважин альбского водоносного горизонта; *2* – суммарный водоотбор из скважин сеноманского водоносного горизонта.

стиллят для получения питьевой воды, а также как техническую, для санитарно-гигиенических целей. Основное требование к качеству подземных вод заключается в поддержании солесодержания общего потока на уровне до 4,0 г/дм<sup>3</sup>, что объясняется технологическими особенностями водоснабжения.

Водозабор эксплуатируется с 1962 г. Суммарный дебит постоянно наращивался по мере сооружения и ввода в эксплуатацию новых скважин. К 1976 г. суммарная производительность достигла проектной величины — 50—58 тыс. м<sup>3</sup>/сут. (рис. 2).

Интенсивная эксплуатация водоносных горизонтов привела к формированию депрессионной воронки уровня подземных вод. Радиус и величина понижения уровня в пределах воронки определяются в первую очередь длительностью эксплуатации, пространственными координатами и фильтрационными свойствами горизонтов. На первых этапах эксплуатации темпы снижения уровня составляли до 10-15 м/год. По мере роста радиуса воронки темпы несколько стабилизировались, однако стационарный режим достигнут не был. Это объясняется тем, что величина водоотбора значительно превышает величину инфильтрационного питания горизонтов за счёт природных факторов. Подобная ситуация сохранялась на протяжении всего периода эксплуатации. В результате образовалась обширная депрессионная воронка радиусом до 70 км и максимальным понижением уровня в центре до 180 м. Контроль за динамикой уровня осуществлялся по сети наблюдательных скважин, расположенных на различных расстояниях от водозаборных сооружений. Фактическое понижение уровня в наблюдательных скважинах представлено в таблице. Анализ данных свидетельствует, что наиболее интенсивно динамический уровень снижался в западном, южном и юго-западном направлениях, наиболее удаленных от областей питания.

Обобщение материала позволяет заключить, что формирование эксплуатационных запасов подземных вод происходит за счёт сработки упругих запасов центральной части депрессионной воронки, гравитационных вод в области выхода отложений на дневную поверхность и перетоков из смежных горизонтов.

Анализ данных свидетельствует также о том, что основной проблемой при эксплуатации месторождения является истощение эксплуатационных за-

| Год  | Понижения уровня в наблюдательных скважинах, м (среднегодовые) |       |       |       |       |       |
|------|--|-------|-------|-------|-------|-------|
|      | 47-Γ   | 29-Г  | 7-Γ   | 45-Γ  | 44-Γ  | 25-Г  |
| 1963 | 0,00   | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  |
| 1964 | 1,90   | 4,70  | 4,00  | 10,80 | 4,30  | 10,00 |
| 1966 | 5,10   | 12,60 | 12,00 | 26,80 | 5,80  | 23,20 |
| 1968 | 10,90  | 23,20 | 25,00 | 36,80 | 7,10  | 32,00 |
| 1970 | 17,90  | 32,40 | 38,10 | 50,70 | 7,50  | 39,70 |
| 1972 | 25,30  | 42,70 | 39,30 | 55,90 | 10,10 | 46,00 |
| 1974 | 32,40  | 49,60 | 43,00 | 67,30 | 10,20 | 55,30 |
| 1976 | 41,10  | 57,00 | 56,00 | 75,50 | 11,80 | 65,00 |
| 1978 | 43.00  | 64.00 | 63.00 | 81.90 | 13.00 | 67.00 |

Динамика снижения уровня в наблюдательных скважинах

пасов. Из этих соображений в качестве целевой функции рассматривалась предельно допустимое снижение уровня в водоносных горизонтах.

#### Математическая модель объекта

Исходя из описания, следует рассматривать многопластовую схему с перетеканием между первым альбским и сеноманским водоносными горизонтами. Второй альбский горизонт может рассматриваться как изолированный. Учитывая, что практически 90 % водоотбора приходятся на первые два, в работе рассматривалась двухпластовая плоско-пространственная модель. Второй альбский горизонт, характеризующийся хорошей гидравлической изоляцией от вышележащих, в расчётах не учитывался. Кроме того, достаточно точная и представительная информация по скважинам режимной сети имеется только для первого альбского горизонта. Динамика уровня охарактеризована в нём по шести точкам (скважинам), в связи с чем верификация модели выполнялась только для первого альбского горизонта.

Рассматривалась плоско-пространственная математическая модель, описываемая дифференциальным уравнением [1—4]:

$$\mu^* \frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( km_x \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( km_y \frac{\partial S}{\partial y} \right) -$$
(1)  
$$-b_k \left( S_k - S \right) - b_n \left( S_n - S \right),$$

где S — понижение уровня в рассматриваемом водоносном горизонте;  $\mu^*$  — водоотдача данного водоносного горизонта; km — водопроводимость данного водоносного горизонта;  $b_k$ ,  $b_n$  — параметры перетекания относительно водоупорных отложений, залегающих соответственно в кровле и подошве рассматриваемого горизонта;  $S_k$ ,  $S_n$  — понижение уровня в водоносных горизонтах, залегающих над кровлей и в подошве рассматриваемого.

Вся область фильтрации была разбита неравномерной прямоугольной сеткой (рис. 3) с шагом 5000×5000 м в центральной части и — 5000×10000 м на периферии. Исходя из геологического строения, рассматривалась схема полуограниченного пласта.

Северная граница модели задана как непроницаемая (ГУ II). В остальных направлениях модель принята как неограниченная. В вертикальном разрезе границы на кровле сеноманского и подошве первого альбского приняты также как ГУ II, между сеноманским и первым альбским горизонтами как границы ГУ III.

Фильтрационная область разбита на шесть кусочно-однородных зон, в пределах которых параметры модели считаются постоянными по пространственным координатам.

Параметры модели в первоначальном варианте установлены по результатам опытно-фильтрационных работ, режим водоотбора задан ступенчатым, в соответствии с фактическими среднегодовыми значениями.



Рис. 3. Фильтрационная схема Куюлусского месторождения артезианских вод: 1 -область выхода отложений мелового возраста на дневную поверхность; 2 -эксплуатационные скважины альбского водоносного горизонта; 3 -эксплуатационные скважины сеноманского водоносного горизонта; 4 -наблюдательные скважины; 5 -зоны модели с различными гидродинамическими параметрами:  $1 - km = 120 \text{ м}^2/\text{сут}; \mu^* = 0,0003; b = 0,000001 \text{ сут}^-1; II - km = 60 \text{ м}^2/\text{сут}; \mu^* = 0,0001; b = 0,000002 \text{ сут}^-1; II - km = 30 \text{ м}^2/\text{сут}; \mu^* = 0,00003; b = 0 \text{ сут}^-1; IV - km = 110 \text{ м}^2/\text{сут}; \mu^* = 0,00003; cyr^-1; VI - km = 350 \text{ м}^2/\text{сут}; \mu^* = 0,0003; b = 0,000004 \text{ суr}^{-1}; VI - km = 100 \text{ м}^2/\text{сут}; \mu^* = 0,00002; b = 0,000001 \text{ суr}^{-1}; VI - km = 350 \text{ м}^2/\text{сут}; \mu^* = 0,21; b = 0 \text{ суr}^{-1}; 6 -$ границы зон различных гидродинамических параметров; 7 -дискретная сетка модели

Параметры сеноманского горизонта приняты постоянными: водопроводимость 35 м<sup>2</sup>/сут; водоотдача 0,0001. Перетекание между горизонтами отсутствует.

Начальные условия следующие: t = 0; Q = 0; S = 0.

# Алгоритм корректировки параметров модели объекта

Процесс корректировки параметров осуществлялся по данным эпигноза с использованием методики подбора.

Задача решалась на модели методом подбора, путём прогонки ряда вариантов с различными значениями цифровых параметров водоносных горизонтов вводимых по определенному алгоритму. В качестве критерия адекватности использовалось среднеквадратичное отклонение модельных данных от фактических:

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n} (S_{jM} - S_{j\Phi})^{2}}{m}},$$
 (2),

где  $S_{jn}$ ,  $S_{j\phi}$  — соответственно модельное и фактическое понижение уровня в рассматриваемой наблюдательной скважине (блоке); n — число точек наблюдения в выбранном диапазоне временного интервала.

Моделирование может выполняться с помощью любой из программ, описывающих планово-пространственную фильтрацию.

Решения задачи выполнялось по схеме снизу вверх. При этом принималось допущение, что подпитка из недр в самый нижний изучаемый горизонт не происходит или ею можно пренебречь. Процедура решения задачи представляет собой однотипный алгоритм, который реализуется в несколько этапов: 1. В модель вводятся гидродинамические параметры смежных водоносных горизонтов, полученные по результатам опытно-фильтрационных работ. Для самого нижнего водоносного горизонта задается некоторый диапазон значений параметров по схеме (рис. 4). Параметры смежных горизонтов при этом не меняются.

2. На модели воспроизводится фактический режим эксплуатации за определенный период времени. Для каждого из выбранного набора параметров в интересующем диапазоне временного интервала определяют понижение уровня в блоках, моделирующих наблюдательные скважины (для нижнего водоносного горизонта). При сопоставлении модельных и фактических понижений на одноименные равные моменты времени, рассчитывается среднее значение стандартного отклонения (δ).

3. Если полученные решения изобразить графически, то для каждого параметра  $(b_n)$  можно построить унимодальную поверхность (рис. 5). Проекция точек поверхности, имеющих минимальные погрешности, на плоскость  $km \div \mu^*$  даёт некоторую кривую AB, у которой в точке С будет наблюдаться наименьшее из всех значение стандартной ошибки. Таким образом, для каждого фиксированного параметра перетекания  $(b_i)$  найдётся своё соотношение водопроводимости и водоотдачи, обеспечивающее минимум погрешности. Выполнив аналогичные расчёты для нескольких выбранных произвольно параметров перетекания (b<sub>i</sub>), получим несколько подобных линий, на одной из которых находится искомое решение в точке с минимумом среднеквадратической погрешности.

Решение можно найти, если поверхности спроецировать на плоскости  $km \div \delta$  и  $\mu^* \div \delta$ . В результате получится серия кривых с экстремумом в некоторой точке (рис. 6).

4. Установив водопроводимость и водоотдачу по минимуму квадратичной ошибки, вводят их в модель, прогоняют режим возмущения при различных значениях параметра перетекания по той же схеме. Параметр перетекания опре-

деляют аналогично по минимуму квадратичной погрешности графика *b*÷δ.

5. Изменение параметров в отдельных блоках или в разрезе модели приведёт к изменению фильтрационных потоков и пьезометрических напоров, т. е. будет сказываться параметрическое возмущение пласта. По этой причине приходится прибе-



Рис. 4. Схема задания параметров при направленном поиске



Рис. 5. Зависимость стандартной ошибки от параметров горизонта

гать к итерационному процессу. Суть его заключается в следующем:

1) отыскание параметров выполняется последовательно для каждой кусочно-однородной зоны при фиксированных параметрах в остальных;

2) после того как процесс отыскания в данной зоне завершен, полученные параметры вводятся в



Рис. 6. Характер среднеквадратической погрешности от параметров пласта:  $km_1 = 60 \text{ M}^2/\text{сут}; km_2 = 80 \text{ M}^2/\text{сут}; km_3 = 100 \text{ M}^2/\text{сут}; \mu_1^* = 0,0004; \mu_2^* = 0,0006; \mu_3^* = 0,0008$ 

модель и переходят к аналогичной процедуре в следующей зоне;

3) счёт заканчивается после выполнения условия:

$$\Delta = \frac{\delta^{k+1} - \delta^k}{\delta^k} \le \varepsilon, \tag{3}$$

где  $\delta^{k+1}, \delta^k$  — минимальная погрешность после *k*- и *k*+1-го шагов итерации; є — заданная точность.

6. Определив параметры самого нижнего горизонта, их вводят в модель и приступают к анало-

гичной процедуре определения параметров водоносного горизонта, располагающегося выше по разрезу.

#### Результаты моделирования

Для достижения требуемой точности потребовалось всего два цикла итерации. Результаты моделирования с параметрами, установленными после второго цикла итерации, представлены на рис. 7.

Как следует из расчетов, сходимость фактических и модельных понижений по наблюдательным



Рис.7. Сопостаавление модельных и фактических понижений уровня по наблюдательным скважинам: *1* – фактические понижения; *2* – модельные понижения



Рис. 8. Характер распределения относительной погрешности по наблюдательным скважинам (%): I - ckb. No 45-г; 2 - ckb. No 7-г; 3 - ckb. No 29-г; 4 - ckb. No 47-г; 5 - ckb. No 25-г; 6 - ckb. No 44-г.

скважинам хорошая. Среднеквадратическая погрешность составляет 14 %. Анализ относительных ошибок показывает, что серьезные расхождения между модельными и фактическими данными относятся в основном к начальному этапу эксплуатации (рис. 8), когда метрологическое обеспечение работ и информативность остаются низкими из-за интенсивности буровых работ.

Если согласиться с тем, что точность измерения уровня в полевых условиях составляет 5 %, дебита (с учётом среднегодового осреднения) — 10 %, точность решения конечно-разностных уравнений — 4 %, то средняя погрешность расчётов должна находиться в диапазоне значений:  $\delta = \sqrt{25 + 100 + 16} \approx 12\%$ . Таким образом, выполненные расчёты вполне соответствуют точности решения задачи.

Следует отметить, что несмотря на некоторую громоздкость, предлагаемая методика подбора параметров довольно просто реализуется на компьютере, поскольку представляет собой однотипный алгоритм решения задачи.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Бочевер Ф.М., Гармонов И.В., Лебедев А.В., Шестаков В.М. Основы гидрогеологических расчетов. М.: Недра, 1965. 305 с.
- Бочевер Ф.М. Теория и практические методы гидрогеологических расчетов эксплуатационных запасов подземных вод. М.: Недра, 1968. 325 с.
- Гавич И.К. Моделирование гидрогеологических процессов М.: Московский геологоразведочный институт, 1977. 101 с.
- 4. Гавич И.К. Теория и практика применения моделирования в гидрогеологии. М.: Недра, 1980. 358 с.
- Изучение гидрогеологических условий Южно-Мангышлакского артезианского бассейна и выбор оптимального режима комплексной эксплуатации подземных вод альб-сеноманского водоносного комплекса в связи с водоснабжением

г. Шевченко / Гавич И.К., Ленченко Н.Н., Лисенков А.Б., Михайлова А.В. и др. / М., 1973. 224 с.

<sup>1</sup>ФГУП Российский федеральный ядерный центр — ВНИИТФ (456770, Челябинская обл., г. Снежинск, ул. Васильева, 13)

<sup>2</sup>ООО «Нарзан-гидроресурсы», (357743, Ставропольский край, г. Кисловодск, ул. Кирова 43, e-mail: Anatol.Malkov@yandex.ru)

Рецензент — А.Б. Лисёнков