

Pyushin Yuriy Volerevich
E-mail: bdbyu@rambler.ru.
Phone: +79188668287.
The Department of CITS; Assistant.

УДК 556.3

А.В. Малков, В.В. Хмель

**ПРИМЕНЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРИ АНАЛИЗЕ ОПЫТА
ЭКСПЛУАТАЦИИ КИСЛОВОДСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ
МИНЕРАЛЬНЫХ ВОД**

Сложные геологические условия Кисловодского месторождения предполагают применение гидравлического метода оценки запасов минеральных вод. Анализ 25-летнего опыта эксплуатации Березовского участка показывает, что гидравлические модели дают достаточно точные прогнозы динамики уровня и минерализации подземных вод. Сопоставление расчетных и фактических понижений и минерализации по среднегодовым данным дают погрешность в расхождении параметров не более чем 10%. Гидравлический метод может использоваться при подсчете запасов и проектировании систем управления качественными показателями минерального состава.

Гидравлические модели; подземные воды; падение уровня; минеральный состав; гидрогеологические скважины.

A.V. Malkov, V.V. Khmel

**THE USING OF THE HYDRAULICALLY MODELS DURING THE ANALYSIS
OF THE EXPERIENCE OF THE EXPLOITATION OF THE KISLOVODSKY
RESOURCES OF THE MINERAL WATERS**

In the Kislovodsky deposit is used the hydraulic method of the appraisal of reserves of mineral waters because of the complex of geological conditions.

The analysis of 25 years of the experience of the Berezovsky area shows that the hydraulic models are given the exact forecast of the dynamics of the level and mineral composition of the underground waters. The comparison of the rated and actual falling and mineral composition by the average annual information is given the error no more then 10 %. The hydraulic method can be used during counting the reserves and planning the systems of the qualitative index of the mineral composition.

Hydraulic models, underground waters, falling of the level, mineral composition, hydrogeological pores.

На сегодняшний день в практике гидрогеологических исследований используются гидродинамические и гидравлические модели. Они имеют свои достоинства и недостатки.

Гидродинамические модели (в том числе и методы численного моделирования) широко используются при региональных построениях, позволяют достаточно полно отразить реальные особенности геолого-гидрогеологического строения и режимы эксплуатации объекта, однако и требуют соответствующего информационного обеспечения.

Гидравлические модели – мера вынужденная. Такие модели используются в очень сложных геолого-гидрогеологических условиях или условиях малой изученности, когда получение необходимого объема информации для построения тематической модели по каким-либо причинам невозможно или экономически

нецелесообразно. Гидравлические модели требуют минимального объема информации, основаны на фактически наблюдаемой реакции объекта на возмущение и экстраполяции этих данных на перспективу.

Основная расчетная зависимость, используемая в гидравлических расчетах, имеет вид [1]:

$$S_i = S_0 + \sum_{j=1}^n \nabla S_j + S_t \quad (1)$$

где S_i – общее понижение уровня в рассматриваемой скважине, которое складывается из срезок: S_0 – от работы рассматриваемой скважины; S_j – срезки уровня в рассматриваемой скважине от влияния взаимодействующих; S_t – срезка уровня, происходящая с течением времени; t – текущее время; n – количество взаимодействующих скважин. Знак « ∇ » под суммой указывает, что из нее исключается срезка от рассматриваемой скважины.

Все входящие в (1) величины определяются опытным путем по результатам наблюдений за понижениями уровня в различных точках пласта под влиянием эксплуатации. Конечно, гидравлические модели не раскрывают физической сути объекта, не дают возможности установить водный баланс, однако преимущество их заключается в том, что фактически установленные срезки комплексно учитывают все сложности объекта, а также влияние климатических факторов (неоднородность, граничные условия, инфильтрационное, глубинное питание, испарение и т.д.).

Основные сложности при использовании гидравлического метода связаны с определением временной срезки уровня S_t . Дело в том, что характер ее развития определяется не только фильтрационными параметрами пласта, но и граничными условиями пласта. В общем случае известны три схемы граничных условий:

- ◆ неограниченный, полуограниченный пласт с одной закрытой границей, пласт-квадрант. Временная срезка изменяется во времени по логарифмическому закону, и в координатах S – $Lg(t)$ представляет собой прямую, но с разными угловыми коэффициентами;
- ◆ пласт-полоса с двумя закрытыми параллельными границами. Характер развития временной срезки выражается степенной зависимостью вида $S - t^{0.5}$;
- ◆ пласт-круг (мульда). Срезка связана линейной зависимостью со временем.

В сложных условиях, когда (по крайней мере, на первых этапах изучения) граничные условия неизвестны, прогнозирование динамики понижения вызывает некоторые трудности. Во-первых, это связано с незнанием условий на границах пласта, во-вторых, неравномерной работой эксплуатационных скважин (сезонные и перспективные колебания уровня).

Общее решение, объединяющее все указанные схемы, может быть получено при переходе к логарифмической системе координат [2].

При условии $f_0 \geq 200$ ($f_0 = a^*t/r^2$, a^* – пьезопроводность; r – расстояние до точки наблюдения), в схеме 1 (неограниченный пласт, полуограниченный пласт, пласт-квадрант) логарифмическая функция может быть заменена степенной:

$$Lg(f_0) = \alpha \cdot (f_0)^\beta, \quad (2)$$

где α и β – эмпирические коэффициенты. При такой замене практически для всего диапазона реально встречаемых фильтрационных параметров и сроков прогнозирования, среднеквадратическая погрешность не превышает 4,0 %.

То же самое можно сказать и об остальных схемах, с той лишь разницей, что коэффициенты степенной функции для них известны, а сама связь является функциональной с нулевой погрешностью.

Понижения уровня при возмущении скважины с постоянным дебитом, например, для первой схемы, описывается уравнением:

$$S(t) = \frac{Q}{n \cdot km} Lg(f_0), \quad (3)$$

где n – коэффициент, определяемый краевыми условиями пласта ($n = 4\pi$ – неограниченный пласт), ($n = 2\pi$ – полуограниченный), ($n = \pi$ – пласт-квадрант); km – водопроводимость водоносного горизонта; Q – дебит откачки ($Q = const$).

Выражение (2) с учетом (3) можно представить следующим образом:

$$S(t) = \frac{Q}{n \cdot km} \alpha \cdot (f_0)^\beta. \quad (4)$$

Прологарифмировав обе части (4), получим

$$LgS(t) = Lg \frac{Q \cdot \alpha}{n \cdot km} + \beta \cdot Lg \left(\frac{2,25 \cdot a^*}{r^2} \right) + \beta \cdot Lg(t). \quad (5)$$

Объединив константы, (5) можно записать в ином виде:

$$Lg[S(t)] = A + \beta \cdot Lg(t). \quad (6)$$

Гидравлический метод, как уже указывалось, предполагает, что в процессе опытных работ продолжительностью (t_0) в заданном режиме водоотбора будет достигнуто некоторое понижение (S_0), которое фиксируется. Текущее понижение $S(t)$ рассчитывается исходя из характера развития временной срезки. То есть, в уравнении (1) первые два члена в правой части устанавливаются опытным путем непосредственными измерениями. Тогда из (6) можно получить

$$LgS(t) - LgS(t_0) = \beta \cdot Lg(t) - \beta \cdot Lg(t_0),$$

откуда после преобразований:

$$S(t) = S(t_0) \cdot \left(\frac{t}{t_0} \right)^\beta. \quad (7)$$

Зависимость (7) получена при условии постоянства дебита откачки. На практике это условие, как правило, не выполняется, поскольку всегда существуют сезонные и перспективные изменения дебита. Учет неравномерности работы водозаборов можно учесть через приведенное время откачки. Для квазистационарного режима приведенное время может быть рассчитано как весь отобранный объем воды на момент (t_0), деленный на последний дебит $Q(t_0)$. Тогда (7) может быть переписано в следующем виде:

$$\frac{S(t)}{Q(t)} = \frac{S(t_0)}{Q(t_0)} \cdot \left(\frac{t}{t_{np}} \right)^\beta, \quad (8)$$

где t_{np} – приведенное время эксплуатации:

$$t_{np} = \frac{V(t_0)}{Q(t_0)}. \quad (9)$$

Расчеты текущего понижения уровня могут быть рассчитаны по формуле

$$S(t) = \frac{S(t_0)}{Q(t_0)} \cdot Q(t) \cdot \left(\frac{t}{t_{np}} \right)^\beta \quad (10)$$

Методика использовалась при анализе опыта эксплуатации Березовского участка Кисловодского месторождения минеральных углекислых вод. Участок эксплуатируется скважиной № 7-РЭ с 1961 г. Динамика водоотбора по годам довольно неравномерна, и объясняется, в основном, нуждами Кисловодских курортов и завода промышленного розлива. Для анализа использовались данные 1966–1990 гг. как

наиболее представительные. Основные сведения о режимах эксплуатации (средне-годовые) скважины № 7-РЭ представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Основные сведения о режиме эксплуатации Березовского участка
Кисловодского месторождения (среднегодовые данные)**

Т, год	$t_{он}$, год	$t_{оп}$, сут	Дебит скважины Q м ³ /сут	Понижение уровня S , м	Минерализация M , г/дм ³	Годовые осадки W , мм/год
1966	5	1825	228	17,2	2,36	655
1967	6	2190	245	18,8	2,40	785
1968	7	2555	277	18,2	2,35	700
1969	8	2920	240	21,0	2,10	601
1970	9	3285	235	21,0	2,20	716
1971	10	3650	240	20,0	2,40	526
1972	11	4015	229	22,0	2,35	585
1973	12	4380	235	21,0	2,15	735
1974	13	4745	197	16,0	2,20	695
1975	14	5110	223	20,0	2,35	640
1976	15	5475	152	13,0	2,60	665
1977	16	5840	103	9,0	2,70	840
1978	17	6205	123	11,0	2,60	606
1979	18	6570	139	12,0	2,60	456
1980	19	6935	163	16,3	2,60	671
1981	20	7300	163	18,4	2,60	765
1982	21	7665	170	17,5	2,63	777
1983	22	8030	198	19,0	2,65	574
1984	23	8395	176	18,0	2,40	801
1985	24	8760	160	17,3	2,38	734
1986	25	9125	160	15,4	2,40	486
1987	26	9490	163	16,0	2,50	816
1988	27	9855	188	17,4	2,53	625
1989	28	10220	170	16,0	2,41	671
1990	29	10585	80	10,0	2,60	677

Расчеты проводились по описанной методике и сведены в табл. 2. По рассчитанным значениям $Lg(t_{онnp})$ и $Lg(S/Q)$ построен вспомогательный график (рис. 1), с которого снят угловой коэффициент β . Его величина равна $\beta = 0,1525$.

Расчетные понижения уровня ($S_{расч}$) определялись по формуле (10):

$$S(t) = \frac{S(t_0)}{Q(t_0)} \cdot Q(t) \cdot \left(\frac{t}{t_{np}}\right)^\beta = 0,0754 \cdot Q(t) \cdot \left(\frac{t_{np}}{1825}\right)^{0,1525}$$

Цифровой материал также приведен в табл. 2.

Таблица 2

Определение расчетного понижения уровня в скважине № 7-РЭ

Т, год	$t_{он}$, сут	Q м ³ /сут	S , м	$Lg(t_{он})$	$t_{онnp}$	$Lg(t_{онnp})$	S/Q	$Lg(S/Q)$	$S_{расч}$
1966	1825	228	17,2	3,2613	1825	3,261	0,0754	-1,122	17,20
1967	2190	245	18,8	3,3404	2063	3,315	0,0767	-1,115	18,83
1968	2555	277	18,2	3,4074	2190	3,340	0,0657	-1,182	21,49
1969	2920	240	21,0	3,4654	2893	3,461	0,0875	-1,058	19,42
1970	3285	235	21,0	3,5165	3319	3,521	0,0894	-1,049	19,42

Окончание табл. 2

Г, год	$t_{он,сут}$	Q м ³ /сут	S , м	$Lg(t_{он})$	$t_{он}^{np}$	$Lg(t_{он}^{np})$	S/Q	$Lg(S/Q)$	$S_{расч}$
1971	3650	240	20,0	3,5623	3615	3,558	0,0833	-1,079	20,09
1972	4015	229	22,0	3,6037	4154	3,618	0,0961	-1,017	19,58
1973	4380	235	21,0	3,6415	4413	3,645	0,0894	-1,049	20,28
1974	4745	197	16,0	3,6762	5629	3,750	0,0812	-1,090	17,65
1975	5110	223	20,0	3,7084	5338	3,727	0,0897	-1,047	19,81
1976	5475	152	13,0	3,7384	8196	3,914	0,0855	-1,068	14,42
1977	5840	103	9,0	3,7664	12460	4,096	0,0874	-1,059	10,42
1978	6205	123	11,0	3,7927	10799	4,033	0,0894	-1,049	12,17
1979	6570	139	12,0	3,8176	9921	3,997	0,0863	-1,064	13,58
1980	6935	163	16,3	3,8410	8825	3,946	0,1000	-1,000	15,64
1981	7300	163	18,4	3,8633	9190	3,963	0,1129	-0,947	15,73
1982	7665	170	17,5	3,8845	9177	3,963	0,1029	-0,987	16,41
1983	8030	198	19,0	3,9047	8244	3,916	0,0960	-1,018	18,80
1984	8395	176	18,0	3,9240	9639	3,984	0,1023	-0,990	17,11
1985	8760	160	17,3	3,9425	10968	4,040	0,1081	-0,966	15,87
1986	9125	160	15,4	3,9602	11333	4,054	0,0963	-1,017	15,95
1987	9490	163	16,0	3,9773	11490	4,060	0,0982	-1,008	16,28
1988	9855	188	17,4	3,9937	10327	4,014	0,0926	-1,034	18,47
1989	10220	170	16,0	4,0095	11785	4,071	0,0941	-1,026	17,04
1990	10585	80	10,0	4,0247	25409	4,405	0,1250	-0,903	9,02
2015	19710	250		4,2947	17256	4,237			26,57

Сопоставление фактических и расчетных понижений уровня даны на рис. 2. Среднеквадратическая погрешность составляет 10,6 %, что можно рассматривать как хороший результат.

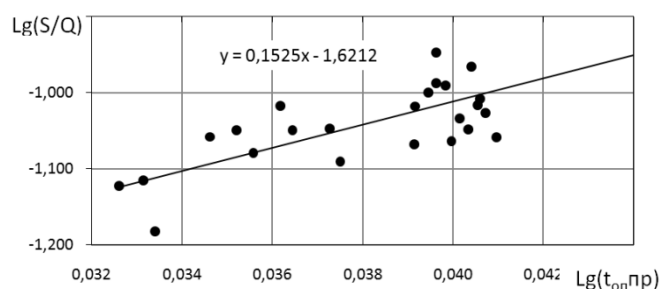


Рис. 2. Вспомогательный график для определения β

Прогноз изменения минерализации подземных вод осуществлялся на основе многофакторного регрессионного анализа. В качестве действующих факторов рассматривались дебит скважины, время эксплуатации и атмосферные осадки. Каждый из указанных факторов имеет гидрогеологическое обоснование и прямо или косвенно влияет на показатели минерального состава подземных вод. Дебит формирует понижение уровня и активизирует вертикальные перетоки через относительно водоупорные кровлю и подошву пласта. Время эксплуатации предполагает скорость продвижения из периферийных зон некондиционных минеральных вод,

а атмосферные осадки – интенсивность разбавления минеральных вод более пресными водами инфильтрационного происхождения.

В качестве прогнозной рассматривалась модель первого порядка с тремя независимыми переменными:

$$M = A + B \cdot Q + C \cdot t_{он} + D \cdot W,$$

где A, B, C, D – некоторые искомые константы; $Q, t_{он}, W$ – действующие факторы. Для отыскания констант применялся метод наименьших квадратов с использованием процедуры Гаусса (метод исключения) [3]. В результате обработки фактического материала получено уравнение регрессии:

$$M = 2,90 - 0,0024 \cdot Q + 0,00042 \cdot t_{он} - 0,00002 \cdot W$$



Рис. 2. Сопоставление расчетных и фактических понижений уровня по скважине № 7-РЭ (среднегодовые данные)

Для наглядности расчетные и фактические значения минерализации подземных вод по скважине № 7-РЭ изображены графически на рис. 3. Среднеквадратическая погрешность расчетов составляет 4,9 %.

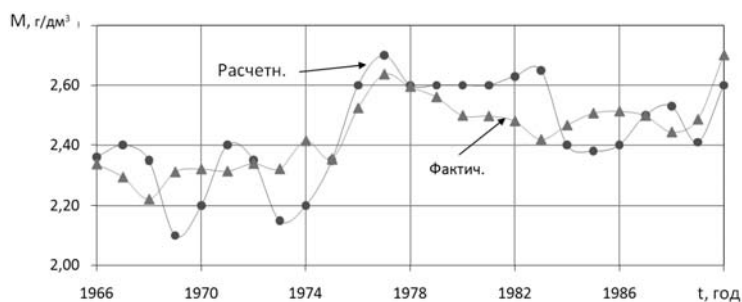


Рис. 3. Сопоставление расчетной и фактической минерализации.

Анализ коэффициентов модели показывает следующее.

1. Основные изменения минерализации подземных вод связаны с интенсивностью нагрузки на скважину. Чем больше дебит, тем ниже значение минерализации. При проектной нагрузке, равной $250 \text{ м}^3/\text{сут}$. Снижение минерализации составит $0,60 \text{ г/дм}^3$. Это объясняется нисходящим перетоком опресненных вод из вышележащего грунтового горизонта, фильтрационные свойства которого на порядок выше подстилающих обводненных отложений.

2. Подземные воды рабочего горизонта обогащены диоксидом углерода и представляют собой слабый раствор угольной кислоты, обладающей повышенной агрессивностью к горным породам. Очевидно, скорость химических реакций, происходящих в водоносном горизонте в зоне интенсивного выделения диоксида углерода, сопоставима со скоростью стягивания контура кондиционных минеральных вод. В результате отмечается слабая тенденция к росту минерализации со скоростью $0,00042 \text{ г/дм}^3/\text{год}$.

3. Рабочий горизонт является слабонапорным. Статические уровни располагаются на отметках, близких к отметкам поверхности земли, а в кровле залегает грунтовый водоносный горизонт. По этой причине атмосферные осадки практически не влияют на запасы подземных вод рабочего горизонта.

Выводы. Анализ двадцати пяти лет эксплуатации Березовского участка показывает, что гидравлическая модель достаточно точно описывает динамику изменения уровня подземных вод и минерализацию и может использоваться при переоценке запасов и управления качественными показателями минеральных вод на последующую перспективу.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Бочвер Ф.М.* Теория и практические методы гидрогеологических расчетов эксплуатационных запасов подземных вод. – М.: Недра, 1968. – 325 с.
2. *Комаров И.С., Хайме Н.М., Бабенышев А.П.* Многомерный статистический анализ в инженерной геологии. – М.: Недра, 1976. – 198 с.
3. Гидравлический метод оценки эксплуатационных запасов подземных вод // Разведка и охрана недр. – 2009. – № 11. – С. 45-50.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Н.Н. Ефимов.

Малков Анатолий Валентинович

ООО «Нарзан-гидроресурсы».

E-mail: narzan-gidroresursy@yandex.ru.

357743, г. Кисловодск, Ставропольский край, ул. Кирова, 43.

Директор; д.т.н.

Хмель Владимир Викторович

Аспирант, инженер-гидрогеолог.

Malkov Anatoly Valentinovich

Company «Narzan-hydroresurs».

E-mail: narzan-gidroresursy@yandex.ru.

43, Kirov Street, Kislovodsk, Stavropolsky region, 357743, Russia.

Director; Dr. of Eng. Sc.

Khmel Vladimir Victorovich

Postgraduate Student; Engineering and Hydrogeology.

УДК 681.5

О.И. Золотов, А.Л. Ляшенко

АНАЛИЗ СИСТЕМ С РАСПРЕДЕЛЁННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ НА ЗАПАС УСТОЙЧИВОСТИ ПО ПОКАЗАТЕЛЮ КОЛЕБАТЕЛЬНОСТИ

Рассмотрена возможность использования аппарата расширенных частотных характеристик (РЧХ) для анализа систем с распределенными параметрами (СРП). Введено понятие пространственной М-окружности. Рассмотрено применение распределённого пространственного годографа и пространственной М-окружности для оценки устойчивости систем. Сформулирована и решена задача по разработке методики оценки запаса устойчивости СРП по показателю колебательности, рассмотренная на примере замкнутой системы управления с распределенным пропорциональным регулятором. Разработанная методика позволят рассчитывать настройки распределённых пропорциональных регуляторов.

Системы с распределенными параметрами; расширенные частотные характеристики; расширенный пространственный годограф; передаточные функции распределенных объектов; показатель колебательности.