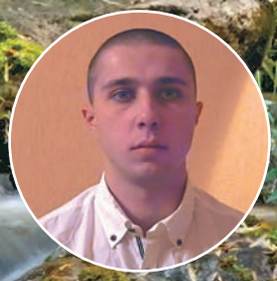
УДК 504.4.062.2;504.43



И.М. Першин
д–р техн. наук
профессор
СКФУ (Пятигорск)
заведующий кафедрой УТБС
ivmp@yandex.ru

А.В. Малков
д–р техн. наук
канд. геол.–мин. наук
СКФУ (Пятигорск)
профессор кафедры УТБС
ООО Нарзан–гидроресурсы
директор

М.И. Першин
ЮФУ (Таганрог)
аспирант

Оптимизация количества водозаборных скважин при эксплуатации месторождений подземных вод

Одной из первоочередных задач при проектировании и эксплуатации месторождений подземных вод является рациональное и экологически безопасное использование природных ресурсов. В статье рассмотрены критерии и методика выбора оптимального числа скважин, добывающих гидроминеральные ресурсы

One of the main task during planning and exploitation of underground waters deposits is the rational and ecologically safe using of the natural resources. In this article are considered the criterions and methodic to change the optimal quality of extractive hydromineral resource pores

Ключевые слова: месторождения подземных вод; водозаборные скважины; критерии оптимизации; понижение уровня
Keywords: underground waters deposits; water gather pores; criterions of optimization; falling of the level

Гидролитосфера – это одна из наиболее важных оболочек земли, от экологического состояния которой во многом зависят все живые существа и растительный мир. Верхняя зона литосферы на глубину 10–15 км пропитана водными растворами (флюидами), содержащими в растворенной форме различные минеральные вещества, микрофлору и микрофауну. Это и есть гидролитосфера, которая тесно связана с поверхностными водами рек, морей, океанов и атмосферными осадками. Многовековой равновесный баланс, установившийся между ее составляющими, определяет естественный режим фильтрации, а также химический и газовый состав флюидов. Интенсивное развитие промышленного производства, сбросы сточных вод в поверхност-

ные водоемы, законтурное заводнение нефтяных месторождений, постоянно увеличивающийся водоотбор подземных вод питьевого качества, шахтный водоотлив создают крайне сложную и опасную обстановку в гидролитосфере – развитие нестационарных процессов, приводящих к истощению ресурсов, ухудшению, а в ряде случаев и полной потере кондиционного состава подземных вод, активизации опасных техногенных процессов (суффозия, оползни, обрушение кровли горных выработок и др). Возросшие нагрузки на гидролитосферу характеризуются увеличением масштабности процессов, сегодня всерьез говорят о возможности изменения глобального круговорота воды, последствия которого трудно предсказать и оценить.

В связи с этим первоочередными задачами являются рациональное и экологически безопасное использование природных ресурсов, диагностика состояния основных параметров гидролитосферы, прогноз развития техногенных процессов и управление ими. Поскольку основные параметры гидролитосферных процессов описываются уравнениями в частных производных [1–4, 6, 7], т.е. принадлежат к объектам с распределенными параметрами, то и для исследования их необходимо применять аппарат систем с распределенными параметрами, обеспечивая при этом распределенное входное воздействие и распределенную функцию выхода. Распределенное входное воздействие обеспечивается совокупностью добывающих скважин. Чем больше скважин, тем точнее можно реализовать распределенное воздействие на объект управления, но тем больше и затраты на обустройство и эксплуатацию рассматриваемого числа скважин. Рассмотрим критерии и методику выбора оптимального числа добывающих скважин.

Методика выбора оптимального числа скважин. Определение дебитов добывающих скважин осуществим, исходя из условия, что рассматриваемый пласт неограничен в плане, изолирован в разрезе и имеет питающую границу.

Рис. 1.
Схема определения $\rho_{1,j}$

При выходе на квазистационарный режим понижение уровня в *i*-том каптажном сооружении (контрольной скважине) определяется суммой влияний *i*-й добывающей скважины, всех остальных добывающих скважин рассматриваемого пласта и питающей границы [2, 5]:

$$H_i = \frac{Q_i}{4\pi km} Ln\left(\frac{2,25\cdot a^*\cdot\tau}{r_i^2}\right) + \sum_{j=1,j\neq i}^{n} \frac{Q_j}{4\pi km} Ln\left(\frac{2,25\cdot a^*\cdot\tau}{\rho_{i,j}^2}\right) - \sum_{j=1}^{n} \frac{Q_j}{4\pi km} Ln\left(\frac{2,25\cdot a^*\cdot\tau}{R_j^2}\right) \quad (1)$$

(i = 1...n),

где H_i – понижение уровня в рассматриваемой скважине; r_i – расстояние до взаимодействующей скважины; R_j – расстояние от питающей границы до рассматриваемой *j*-той скважины; τ – время; *km* – водопроводимость рассматриваемого водоносного горизонта; a^* – пьезопроводность пласта; n – число скважин; Q_i – дебит i-ой заборной скважины; $\rho_{i,j}$ – расстояние от *j*-той взаимодействующей (заборной) скважины до рассматриваемой *i*-той контрольной скважины; Q_j – дебит j-ой заборной скважины; Ln – натуральный логарифм.

Схема определения параметров $\rho_{i,j}$ для случая четырех заборных и четырех контрольных скважин, приведена на ***рис. 1***.

$\rho_{1,2} = (\Delta x^2 + \Delta y^2)^{0,5}$, $\rho_{2,1} = (\Delta x^2 + \Delta y^2)^{0,5}$,
$\rho_{1,3} = [\Delta x^2 + (2\Delta y)^2]^{0,5}$, $\rho_{2,3} = (\Delta x^2 + \Delta y^2)^{0,5}$,
$\rho_{1,4} = [\Delta x^2 + (3\Delta y)^2]^{0,5}$; $\rho_{2,4} = [\Delta x^2 + (2\Delta y)^2]^{0,5}$;

$\rho_{3,1} = [\Delta x^2 + (2\Delta y)^2]^{0,5}$, $\rho_{4,1} = [\Delta x^2 + (3\Delta y)^2]^{0,5}$,
$\rho_{3,2} = (\Delta x^2 + \Delta y^2)^{0,5}$, $\rho_{4,2} = [\Delta x^2 + (2\Delta y)^2]^{0,5}$,
$\rho_{3,4} = (\Delta x^2 + \Delta y^2)^{0,5}$; $\rho_{4,3} = (\Delta x^2 + \Delta y^2)^{0,5}$.

В общем случае значение $\rho_{i,j}$ определяется из следующего соотношения:

$\rho_{i,j} = [\Delta x^2 + \text{abs(j-i)} \cdot \Delta y^2]^{0,5}$.

Полагая

$$C_1 = \frac{1}{4\pi km}, \quad C_2 = Ln\left(\frac{2,25\cdot a^*\cdot\tau}{r_i^2}\right),$$

$$C_{i,j} = Ln\left(\frac{2,25\cdot a^*\cdot\tau}{\rho_{i,j}^2}\right) - Ln\left(\frac{2,25\cdot a^*\cdot\tau}{R_j^2}\right)$$

уравнение (1) преобразуем к виду:

$$H_i = C_1 \cdot (\mathrm{Q}_i \cdot (C_2 - Ln\left(\frac{2{,}25 \cdot a^* \cdot \tau}{R_i^2}\right)) + \sum_{j=1, j\neq i}^{n} Q_j \cdot C_{i,j})$$

2),

где H_i – понижение уровня в точках установки контрольных скважин.

Запишем уравнение (2) в матричном виде для рассматриваемого выше случая (n = 4):

$$\begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ H_3 \\ H_4 \end{bmatrix} = C_1 \cdot \begin{bmatrix} C_2, C_{1,2}, C_{1,3}, C_{1,4} \\ C_{2,1}, C_2, C_{2,3}, C_{2,4} \\ C_{3,1}, C_{3,2}, C_2, C_{3,4} \\ C_{4,1}, C_{4,2}, C_{4,3}, C_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ Q_4 \end{bmatrix}.$$

Преобразуя, получим матричное уравнение для определения дебитов:

$$\begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \mathrm{Q}_3 \\ Q_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{C_1} \cdot \begin{bmatrix} C_2, C_{1,2}, C_{1,3}, C_{1,4} \\ C_{2,1}, C_2, C_{2,3}, C_{2,4} \\ C_{3,1}, C_{3,2}, C_2, C_{3,4} \\ C_{4,1}, C_{4,2}, C_{4,3}, C_2 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ H_3 \\ H_4 \end{bmatrix} \quad (3).$$

В общем случае матричное уравнение (3) может быть представлено в виде:

$$\begin{bmatrix} Q_1 \\ \bullet \\ \bullet \\ \bullet \\ Q_n \end{bmatrix} = \frac{1}{C_1} \cdot \begin{bmatrix} C_2, C_{1,2}, \bullet\ \bullet\ \bullet, C_{1,n} \\ C_{2,1}, C_2, \bullet\ \bullet\ \bullet, C_{2,4} \\ \bullet\ \bullet\ \bullet \\ C_{n,1}, C_{n,2}, \bullet\ \bullet\ \bullet, C_2 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} H_1 \\ \bullet \\ \bullet \\ \bullet \\ H_n \end{bmatrix}$$

(4).

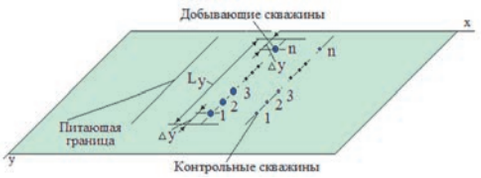


Рис. 2.
Расположение скважин

Соотношение (4) позволяет определить дебиты добывающих скважин.

Суммарный дебит (Q) может быть определен из соотношения:

$$Q = \sum_{j=1}^{n} Q_j \quad (5).$$

Для Кисловодского месторождения минеральных вод себестоимость 1 м^3 добытого сырья составляет 400 руб. Налог на недропользование – 7,5%. Затраты на бурение, обустройство и содержание скважины за 10 лет эксплуатации составляют 10 млн руб.

Доход за 10 лет эксплуатации рассматриваемого месторождения составит:

$D = Q \cdot 400 \cdot (365 \cdot 10) \cdot 0{,}925$ (6).

Постановка задачи оптимизации числа добывающих скважин. Для рассматриваемого месторождения требуется определить число добывающих скважин, обеспечивающих максимальный доход за 10 лет эксплуатации месторождения.

При этом параметры, используемые при расчете дебитов, соответственно, равны

$a_i^* = 10^4$ м^2/сут.;
km = 134 м/сут.;
H_i = 1 м;
$r_i = \Delta x$ = 50 м;
$R_j = 4\Delta x$;
L_y = 250 м.

Таблица 1.
Распределение дебитов добывающих скважин

Число добывающих скважин	Дебиты добывающих скважин в м^3/сутки							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	607,33							
2	399,4	399,4						
3	334,56	165,29	334,56					
4	303,72	112,09	112,09	303,72				
5	286,33	84,64	77,4516	84,64	286,33			
6	275,7	67,06	59,94	59,94	67,06	275,7		
7	269,05	54,71	48,7694	47,16	48,7694	54,71	269,05	
8	264,72	45,59	40,84	38,93	38,93	40,84	45,59	264,72

Рис. 3.
Результаты расчетов

Методика решения задачи оптимизации. Методика выбора оптимального числа скважин распадается на следующие этапы.

1. Для выбранного числа скважин *n* и заданного значения L_y, определим $\Delta y = L_y/(n + 1)$ (в рассматриваемом примере n = 1...8) (***рис. 2***).

2. По соотношениям (5) и (6) вычислим дебиты добывающих скважин и суммарный дебит. Результаты расчетов приведены в ***табл. 1*** и на ***рис. 3***.

3. Вычислим доход за 10 лет эксплуатации рассматриваемого месторождения (6). По результатам расчетов построен график, приведенный на ***рис. 4***.

Как следует из расчетов (***рис. 4***) при заданном значении L_y = 250 м, оптимальный вариант – 3 добывающие скважины, при этом *критерием оптимизации был выбран доход,* определяемый в соответствии с (5).

Рис. 4.
Результаты расчетов дохода

В качестве *критерия оптимизации* числа добывающих скважин может быть использован и *агрегатный критерий*, учитывающий доход и экологическую безопасность при эксплуатации гидроминеральной базы

$$F = \lambda_1 \cdot Q - \lambda_2 \cdot (\sum_{j=1}^{n} 1/\Delta H_j)/n \quad (7),$$

где λ_1, λ_2 – весовые коэффициенты; ΔH_j – экологическая составляющая (j = 1...n).

В качестве экологической составляющей может быть выбрано рассогласование между критическим значением понижения уровня в добывающих скважинах и его фактическим значением (***рис. 5***).

Критическое значение определяется физическими параметрами эксплуатируемого пласта и соответствует нарушению нормального функционирования пласта (недопустимо большой переток из смежных горизонтов, обрушение кровли пласта или проникновение в пласт техногенных отходов). Чем меньше ΔH_j, тем ближе подходим к критическому значению уровня.

Выбор весовых коэффициентов в критерии (7) потребует дополнительных исследований.

Для примера выберем следующие весовые коэффициенты:

Рис. 5.
Схема определения ΔH_j

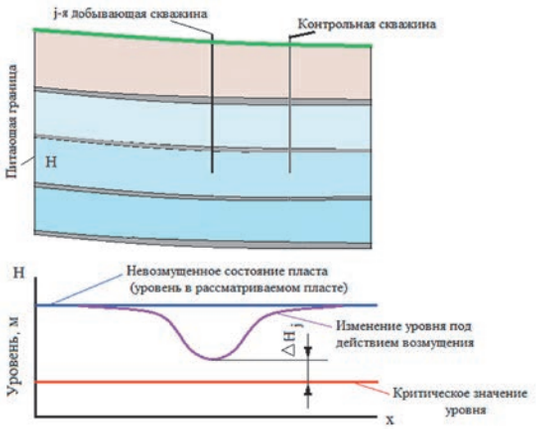
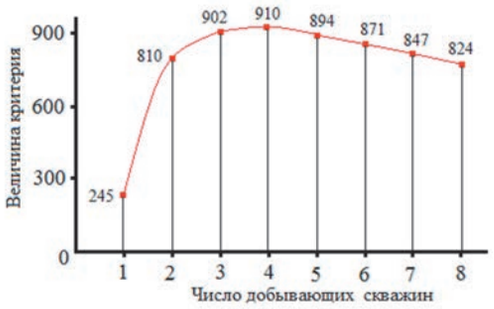


Рис. 6.
Вычисленные значения критерия



$\lambda_1 = 1$ [1/ млн руб.];
$\lambda_2 = 500$ [1/м].

Значение критического уровня выберем меньше значения невозмущенного состояния пласта на 5 м.

Определим значения понижения уровня около добывающей скважины ($r_i = 0{,}5$), с учетом дебитов, приведенных в ***табл. 1***, – H_i (1) и ΔH_i. Результаты вычислений ΔH_i приведены в ***табл. 2***. Вычисленные значения критерия (7) показаны на ***рис. 6***. В рассматриваемом случае, оптимальное число добывающих скважин равно 4.

Результаты расчетов показывают, что распределенное управляющее воздействие на пласт (размещение нескольких добывающих скважин вместо одной) обеспечивает наибольший возможный доход и экологическую безопасность при эксплуатации гидроминеральной базы.

При заданном суммарном дебите, распределяя его на несколько добывающих скважин, удается понизить локальные воздействия на пласт по сравнению с воздействием одной добывающей скважины, реализующей заданный суммарный дебит.

Число добывающих скважин	ΔH_i (м)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0,885							
2	2,015	2,015						
3	2,351	3,184	2,351					
4	2,497	3,426	3,426	2,497				
5	2,572	3,53	3,582	3,530	2,572			
6	2,611	3,582	3,644	3,644	3,582	2,611		
7	2,632	3,608	3,672	3,688	3,672	3,608	2,632	
8	2,641	3,62	3,684	3,707	3,707	3,684	3,62	2,641

Таблица 2.
Распределение дебитов добывающих скважин

Литература

1. Першин И.М. Синтез систем с распределенными параметрами: проблемы и перспективы //Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. № 6. С. 2–10.
2. Малков А.В., Першин И.М. Системы с распределенными параметрами. Анализ и синтез. М. : Научный мир, 2012. 476 с.
3. Бутковский А.Г. Структурная теория распределенных систем. М. : Наука, 1977. 320 с.
4. Сиразетдинов Т.К. Оптимизация систем с распределенными параметрами. М. : Наука, 1977. 479 с.
5. Бочевер Ф.М. Теория и практические методы гидрогеологических расчетов эксплуатационных запасов подземных вод. М. : Недра, 1968. 325 с.
6. Першин М.И. Проектирование систем управления параметрами Кисловодского месторождения минеральных вод // Технологии развития курортно-рекреационного комплекса СКФО. Сб. науч. тр. Т. 1. Изд.-во СКФУ 2014. С. 141–154.
7. Першин И.М., Малков А.В., Першин М.И. Оперативное и стратегическое управление режимами эксплуатации гидролитосферных объектов //Недропользование XXI век. 2014. № 6а (январь). С. 40–47.

АООН НАЭН: план конференций, семинаров и форумов на 2015 год

Название мероприятия	Место проведения	Дата проведения
УВС и ТПИ: бухгалтерский учет в новых условиях, введенных с 1 января 2015 г.	Москва	март
Семинар «Традиционные методы оценки запасов ТПИ – практика ГКЗ»	Москва, ГКЗ	11–12 марта
Конференция «Чистые устойчивые технологии недропользования»	Москва, ГКЗ	19 марта
Конференция «Запасы нетрадиционных залежей: проблемы и методики их оценки»	Москва, ГКЗ	25–26 марта
Новая схема НДПИ	Москва	апрель
Учредительная конференция «Саморегулирование в сырьевом секторе»	Сибирский Федеральный округ	апрель
Тегеранская геологическая (сырьевая) конференция	Тегеран	апрель
Семинар «Современные технологии разведки и оценки месторождений ТПИ»	Москва, ГКЗ	8–9 апреля
Конференция «Прорывные инновационные технологии модернизации отрасли»	Москва, ГКЗ	16 апреля
Семинар «Методические основы применения новой классификации запасов УВ. Оценка извлекаемых запасов нефти и конденсата в рамках Новой классификации (КИН, КИК)»	Москва, ГКЗ	22–23 апреля
Форум HR: кадровая политика и корпоративное образование в нефтегазовом секторе и горной промышленности	Москва	Май
Конференция «Прогноз цен на нефть»	Санкт–Петербург	Май
Конференция «Прогноз цен на биржевые металлы»	Санкт–Петербург	Май
Форум «Вода – основа жизни и промышленности»	Санкт–Петербург	май
Конференция «Экологическое строительство объектов недропользования»	Москва, ГКЗ	14 мая
Новые классификации запасов УВС и ТПИ	Москва	май
Сотрудничество России и Индии в сфере УВС и ТПИ	Дели	июнь
Утилизация отходов и рекультивация земель	Москва	июнь
Семинар «Оценка ресурсов и запасов угольных месторождений»	Москва, ГКЗ	3–4 июня
Конференция «Электронные закупки для добывающих компаний»	Москва	июль
Агропромышленный форум «Калий и фосфаты»	Саратов	3–4 июля
Железнодорожные перевозки УВС и ТПИ: проблема ж/д–тарифов и списания старых вагонов	Москва	август
Экспортная сырьевая конференция в Стамбуле Экспортная сырьевая конференция в Шанхае Экспортная сырьевая конференция в Вене	Стамбул – Шанхай – Вена	8–15 сентября
Инвестиционная конференция «Разработка новых месторождений»	Сингапур	сентябрь
Семинар «Опыт и нововведения в области экспертизы запасов месторождений УВС»	Москва, ГКЗ	9–10 сентября
Семинар «Опыт и нововведения в области экспертизы запасов месторождений ТПИ»	Москва, ГКЗ	16–17 сентября
Форум по информационным технологиям в сырьевом секторе	Москва	октябрь
Семинар «Нововведения при подготовке проектной документации и согласовании технических проектов разработки месторождений УВС»	Москва, ГКЗ	7–8 октября
Семинар «Современный подход к подсчету запасов на основе геолого–математического моделирования (геостатистика, блочное моделирование)»	Москва, ГКЗ	21–22 октября
Форум Нефтегаз–2015	Москва	ноябрь
Модернизация ТЭК и горно–рудной промышленности: «перезагрузка» рынка	Москва	ноябрь
Конференция механиков. Обслуживание и ремонт оборудования добывающих компаний	Москва	ноябрь
Конференция энергетиков добывающих компаний	Москва	ноябрь
Конференция ICSF: сырье для черной и цветной металлургии		ноябрь
Семинар «Оперативный подсчет запасов нефти и газа»	Москва, ГКЗ	11–12 ноября
Семинар «Вопросы геологии и подсчета запасов месторождений ТПИ»	Москва, ГКЗ	11–12 ноября
Угольный форум		декабрь

На все ваши вопросы ответит **Александра Жданова**, начальник отдела образовательных программ АООН НАЭН. Тел.: +7 (495) 789-33-12, zhdanova@naen.ru