

Оперативное управление режимами эксплуатации подземных вод

И. М. Першин¹, Е. Г. Папуш², А. В. Малков³

Северо-Кавказский федеральный университет

¹ivmp@yandex.ru, ²elenapapush@rambler.ru,

³anatol.malkov@yandex.ru

Т. В. Кухарова

Санкт-Петербургский горный университет

unit-4@yandex.ru

А. О. Спивак

Южный Федеральный университет

miss.alinalina@yandex.ru

Аннотация. Разработана концепция и структурная схема региональной системы управления для кластеров добывающих скважин. Особенностью региона Кавказских Минеральных Вод является наличие водоносных горизонтов со сложной конфигурацией границ (водоупорных слоев). В работе рассмотрено оперативное управление режимами эксплуатации подземных вод на примере месторождений региона. Отличием математической модели является описание водоносных горизонтов со сложной конфигурацией границ. Получена оценка влияния рассматриваемых границ на динамические характеристики объекта управления.

Ключевые слова: оперативное управление добывающими скважинами; региональная система управления; гидролитосферный процесс; водоносный горизонт; сложная конфигурация границ (водоупоров); совершенный водозабор

I. ВВЕДЕНИЕ

Практика использования гидроминеральных ресурсов региона КМВ показала, что для обеспечения экологической и технологической безопасности необходимо создание единой системы оперативного управления режимами эксплуатации подземных вод. На сегодняшний день существуют локальные системы управления отдельными скважинами, а также опорная сеть контрольных скважин для осуществления мониторинга общего состояния гидролитосферы этого региона.

Проведенный анализ за два последних десятилетия позволяет сделать вывод, что реальная картина гидролитосферы региона существенно отличается от ожидаемой. В настоящее время добыча гидроминерального сырья увеличилась более чем в два раза, что существенным образом изменило общую картину распределения природных вертикальных гидравлических градиентов в верхней части гидролитосферы. В ряде случаев такое увеличение производится без серьезного обоснования режимов эксплуатации [1, 2]. Таким образом, назрела необходимость создания единой системы оперативного мониторинга, управления и прогнозирования процессов в гидролитосфере региона.

II. КОНЦЕПЦИЯ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Объектом исследования являются месторождения региона Кавказских Минеральных Вод (КМВ). Структурная схема системы оперативного управления для кластеров добывающих скважин представлена на рис. 1.



Рис. 1. Структурная схема системы оперативного управления

Процедура создания системы оперативного управления режимами эксплуатации подземных вод включает в себя следующие этапы:

- определение оптимального числа добывающих скважин [2, 3];
- определение допустимых технологически безопасных режимов эксплуатации месторождений минеральных вод (определение целевых функций для систем управления параметрами месторождений) [4, 5];

- вычисление параметров распределенных регуляторов для использования в локальных системах управления [5–9];
- контроль текущего состояния гидrolитосферы и представление информации потребителям различных уровней [10, 11];
- прогнозирование развития процессов в гидrolитосфере на ближнюю (до 10 лет) и дальнюю (до 100 лет) перспективы.

На сегодняшний день разработаны методики анализа и синтеза систем управления гидrolитосферными процессами, а также технические средства их реализации. Технические средства включают в себя подсистемы телеметрического сбора, передачи и накопления информации. Например, комплекс Кедр–ДМ, устанавливая в заборных и контрольных скважинах, что позволяет измерять текущее понижение уровня (функцию выхода) в режиме реального времени.

Информация от технических средств телеметрического сбора поступает в вычислительный комплекс и далее обрабатывается в соответствии с алгоритмом, представленным на рис. 1.

III. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ ГИДРОЛИТОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Когда мы проектируем локальную систему управления, то особое значение имеет анализ динамических характеристик объекта управления. Традиционно при анализе гидrolитосферных процессов водоупорные пласты считаются расположенными горизонтально, т.к. это упрощает составление математической модели. Считается, что погрешность расчётов при подобном допущении не превышает допустимую. Однако данные геологических исследований свидетельствуют о том, что ряд месторождений КМВ, в том числе Кисловодское и Железноводское, характеризуются сложной конфигурацией водоносных горизонтов. Это усложняет поиск решений рассматриваемой задачи аналитическими методами. Рассмотрим влияние способов описания граничных условий на динамические характеристики объекта управления.

В качестве объекта было выбрано Железноводское месторождение минеральных вод. Особенностью рассматриваемого месторождения является сложная конфигурация водоносных пластов. Схема месторождения и реализации пространственных мод приведена на рис. 2. Водоносный пласт отделен водоупорным слоем от грунтовых вод. Добыча минеральной воды осуществляется тремя добывающими скважинами. Измерение уровня давления в водоносном пласте осуществляется в зоне расположения добывающих скважин.

При моделировании объекта контроля использованы геометрические параметры объекта управления, полученные в результате геологических исследований месторождения [12]. На рассматриваемом месторождении реализован совершенный водозабор, т.е. водоносный

горизонт вскрывается полностью (рис. 2). Геометрические параметры объекта управления приведены в таблице.

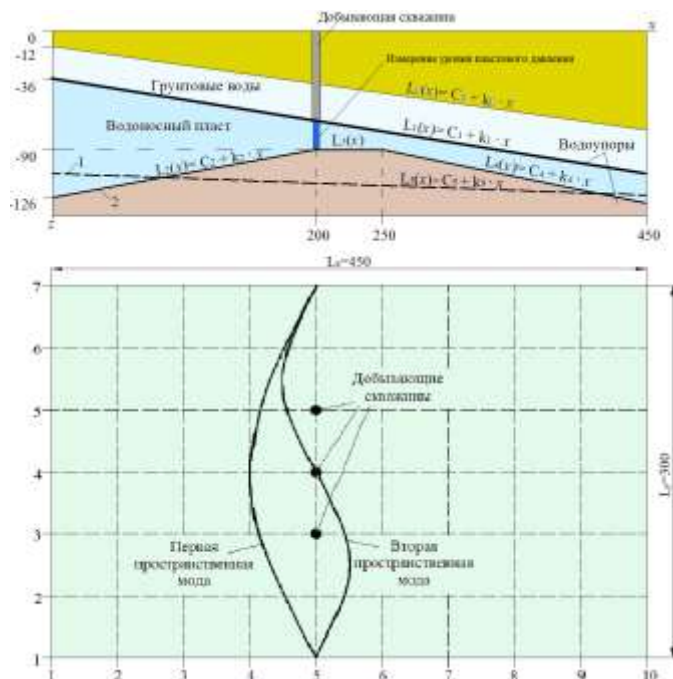


Рис. 2. Схема месторождения и реализации пространственных мод

ТАБЛИЦА I
ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Геометрические параметры, м								Коэффициенты линейных уравнений						
L_x	L_y	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	k_0	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	
300	450	-12	-36	-126	-90	-90	-108	-0.15	-0.16	0.18	0	-0.20	-0.037	

Целью исследования является определение параметров нестандартного распределённого звена, описывающего динамические характеристики объекта управления.

При описании водоупорных слоев для математической модели мы аппроксимируем их в виде прямых линий $L_i(x)$, ($i=1,5$) (рис. 2). Уровень грунтовых вод также описывается линейным уравнением $L_0(x)$.

Математическая модель гидrolитосферных процессов рассматриваемого месторождения может быть записана в виде уравнения в частных производных [4, 9, 13].

Грунтовые воды:

$$\frac{\partial h_1(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = k_{1,x} \cdot \frac{\partial^2 h_1(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + k_{1,y} \cdot \frac{\partial^2 h_1(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + k_{1,z} \cdot \frac{\partial^2 h_1(x, y, z, \tau)}{\partial z^2},$$

$$0 < x < L_x, \quad 0 < y < L_y, \quad L_0(x) < z < L_1(x).$$

Водоносный пласт:

$$\frac{\partial H_2(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = \frac{k_{2,x}}{\eta} \cdot \frac{\partial^2 H_2(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + \frac{k_{2,y}}{\eta} \cdot \frac{\partial^2 H_2(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + \frac{k_{2,z}}{\eta} \cdot \frac{\partial^2 H_2(x, y, z, \tau)}{\partial z^2} + q(x, y, \tau) \cdot \delta(x_{0,y}, y_{0,y}, z),$$

$$0 < x < L_x, \quad 0 < y < L_y, \quad L_1(x) < z < L_w(x),$$

где: h_1 – напор в грунтовых водах, м;

H_2 – напор в изучаемом водоносном пласте, м;

k_{ix}, k_{iy}, k_{iz} – коэффициенты фильтрации, м/сут, по пространственным координатам в грунтовых водах ($i = 1$) и водоносном горизонте ($i = 2$);

η – коэффициент упругости водоносного горизонта, м⁻¹;

$q(y, \tau) = 0,0083 Q_1(\tau)$ – понижение напора, вызванное воздействием γ -ой добывающей скважины, м; в рассматриваемом случае $\gamma = 1..3$, а $Q_1(\tau)$ – входное воздействие (дебит добывающих скважин) [4,5,12];

$\delta(x_{0,y}, y_{0,y}, z)$ – функция, равная единице, если $x = x_{0,y}$, $y = y_{0,y}$, $L_1(x) < z < L_w(x)$, и равная нулю в других случаях; в рассматриваемом случае ($x_{0,y} = 200$ м, $y_{0,1} = 100$ м, $y_{0,2} = 150$ м, $y_{0,3} = 200$ м);

x, y, z – пространственные координаты; τ – время;

γ – номер добывающей скважины, $\gamma = 1..3$.

При моделировании были использованы два способа описания граничных условий (водоупоров). В первом случае водоупор сложной конфигурации традиционно аппроксимирован прямой линией (линия 1, рис. 2). Математически это описано в виде:

$$L_w(x) = L_5(x) = -108 - 0.03667 \cdot x, \quad 0 \leq x \leq 450.$$

Во втором случае тот же водоупор описан ломаной линией 2 (рис. 2):

$$L_w(x) = \begin{cases} L_2(x) = -126 + 0.18 \cdot x, & 0 \leq x < 200; \\ L_3(x) = -90, & 200 \leq x \leq 250; \\ L_4(x) = -90 - 0.20 \cdot (x - 250), & 250 < x \leq 450. \end{cases}$$

Граничные условия между рассматриваемыми слоями задаются в следующем виде (условия Дарси):

$$\frac{\partial h_1(x, y, L_1(x), \tau)}{\partial \tau} = b_1 \cdot (H_2(x, y, L_1(x), \tau) - h_1(x, y, L_1(x), \tau)),$$

$$\frac{\partial H_2(x, y, L_1(x), \tau)}{\partial \tau} = b_1 \cdot (h_1(x, y, L_1(x), \tau) - H_2(x, y, L_1(x), \tau)),$$

$$0 < x < L_x, \quad 0 < y < L_y.$$

Нижняя граница водоносного пласта

$$\frac{\partial H_2(x, y, L_w(x), \tau)}{\partial z} = 0, \quad 0 < x < L_x, \quad 0 < y < L_y.$$

Верхняя граница грунтовых вод:

$$h_1(x, y, L_0(x), \tau) = z, \quad 0 < x < L_x, \quad 0 < y < L_y.$$

Боковые грани:

$$h_1(0, y, z, \tau) = h_1(L_x, y, z, \tau) = z,$$

$$0 \leq y \leq L_y, \quad L_0(x) \leq z \leq L_1(x).$$

$$h_1(x, 0, z, \tau) = h_1(x, L_y, z, \tau) = z,$$

$$0 < x < L_x, \quad L_0(x) \leq z \leq L_1(x).$$

$$H_2(0, y, z, \tau) = 135.9, \quad 0 \leq y \leq L_y, \quad L_1(x) \leq z \leq L_w(x).$$

$$H_2(L_x, y, z, \tau) = 131.6, \quad 0 \leq y \leq L_y, \quad L_1(x) \leq z \leq L_w(x).$$

$$H_2(x, 0, z, \tau) = H_2(x, L_y, z, \tau) = 135.9 - 0.009556 \cdot x,$$

$$0 < x < L_x, \quad L_1(x) \leq z \leq L_w(x).$$

Начальные условия:

$$h_1(x, y, z, 0) = z, \quad 0 \leq x \leq L_x, \quad 0 \leq y \leq L_y, \quad L_0(x) \leq z \leq L_1(x).$$

$$H_2(x, y, z, 0) = 135.9 - 0.009556 \cdot x,$$

$$0 \leq x \leq L_x, \quad 0 \leq y \leq L_y, \quad L_1(x) \leq z \leq L_w(x).$$

Входное воздействие на распределенный объект управления сформировано в виде пространственных мод [1, 6, 9, 14] (рис. 2).

В соответствии с граничными условиями пространственные моды записываются в виде $Q_j = A_j \sin(\psi_j y_j)$, $\psi_j = \pi j / L_y$, ($j = 1, 2, 3$), $y_1 = 2 \cdot \Delta y$, $y_2 = 3 \cdot \Delta y$, $y_3 = 4 \cdot \Delta y$. Полагаем, что $G_j = \psi_j^2$, j – номер пространственной моды.

В результате моделирования для первого случая получены следующие параметры: статический коэффициент усиления по первой пространственной моде входного воздействия $K_1 = 530.945$, по второй $K_2 = 319.49$. Сдвиг по фазе сигнала выхода относительно входного воздействия по первой пространственной моде $\Delta \varphi = -1.35$. Аналогично для второго случая получено: $K_1 = 254.21$, $K_2 = 57.41$, $\Delta \varphi = -1.25$.

Понятие обобщенной координаты G , которая содержит весь дискретный спектр G_j , введено в работах [3, 4, 9]. Структурные схемы для аппроксимирующих звеньев в случае распределённых объектов описаны в [15, 16]. Показано, что рассмотренные аппроксимирующие звенья наиболее полно описывают динамические характеристики в случае распределённых объектов. Для гидrolитосферных процессов аппроксимирующее звено записывается в следующем виде [17]:

$$W(G, s) = \frac{K}{\beta(G, s) + 1} \exp(-\beta(G, s) \cdot \Delta z), \quad \beta = \left(\frac{s}{a^*} + G \right)^{0.5},$$

$$(G_n \leq G \leq \infty),$$

где: s – оператор Лапласа;

K , Δz , a^* – параметры, значения которых определяются с помощью экспериментальных исследований и численного моделирования.

Звено, которое аппроксимирует динамические характеристики для дискретной модели объекта управления с линейными границами, записывается в виде:

$$W_a(G, s) = \frac{882.447}{\beta(G, s)} \cdot \exp(-\beta(G, s) \cdot 47.519), \quad (1)$$

$$\beta_{n,r} = \left(\frac{s}{0.012078} + G \right)^{\frac{1}{2}}.$$

Звено, которое аппроксимирует динамические характеристики для дискретной модели рассмотренного здесь объекта управления с переменными границами можно представить как:

$$W_a(G, s) = \frac{1125.756}{\beta(G, s)} \cdot \exp(-\beta(G, s) \cdot 141.103), \quad (2)$$

$$\beta_{n,r} = \left(\frac{s}{0.083176} + G \right)^{\frac{1}{2}}.$$

Сравним полученные результаты звеньев (1) и (2). Как следует из вычислений: коэффициент усиления K для рассмотренных звеньев увеличился в 1.28 раза; параметр a , описывающий динамику распространения депрессионной воронки увеличился в 6,89 раза; параметр Δz увеличился в 2,97 раза. Это позволяет сделать вывод о том, что представление водоносных слоев в виде горизонтальных пластов является чрезмерным упрощением и вносит существенную погрешность в динамические характеристики модели объекта управления.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показана структурная схема системы оперативного управления режимами эксплуатации подземных вод на примере месторождений региона КМВ. Реализация представленной структурной схемы позволит: осуществлять контроль текущего состояния гидролитосферы региона; представлять информацию потребителям различных уровней; выполнять прогнозирование развития процессов в гидролитосфере на ближнюю (до 10 лет) и дальнюю (до 100 лет) перспективы. Технологически и технически не существует проблем, препятствующих решению поставленной задачи: - сохранения гидроминеральных источников региона. Представленная схема может быть реализована для кластеров месторождений различного типа.

Показано, что разработка локальных систем управления опирается на статические и динамические характеристики объекта управления.

По результатам моделирования получена оценка влияния способа описания границ водоносных пластов (водоупоров) на динамические характеристики объекта управления, в том числе на параметры нестандартных аппроксимирующих звеньев.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Малков А.В., Першин И.М., Помеляйко И.С., Уткин В.А., Королев Б.И., Дубогрей В.Ф., Хмель В.В., Першин М.И. Кисловодское месторождение углекислых минеральных вод: системный анализ, диагностика, прогноз, управление. М.: Наука, 2015. 285 с.
- [2] Першин И.М., Малков А.В., Першин М.И. Оптимизация количества водозаборных скважин при эксплуатации месторождений минеральных вод // Недропользование XXI век. Межотраслевой научно-технический журнал. 2015. № 1 (51). С. 100-104.
- [3] Pershin I.M., Pervukhin D.A., Ilyushin Y.V., Afanaseva O.V. Design of distributed systems of hydrolithosphere processes management. Selection of optimal number of extracting wells // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2017. 87(3). 032030.
- [4] Першин И.М., Малков А.В., Першин М.И. Математические модели гидролитосферных процессов // Недропользование XXI век. Межотраслевой научно-технический журнал. № 3. 2018. С. 56-65.
- [5] Першин И.М., Малков А.В., Веселов Г.Е., Першин М.И. Автоматизация технологических процессов добычи гидроминерального сырья // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2018. № 5(199). С. 198-210.
- [6] Веселов Г.Е., Першин М.И. Проектирование распределенных систем управления гидролитосферными процессами // Известия вузов. Геология и разведка. 2016. № 1. С.99-105.
- [7] Pershin I.M., Malkov A.V., Pomelyayko I.S. Designing a Control System for Underground Water Intakes // International science and technology conference "Earth science". IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 272. 022026.
- [8] Pershin I.M., Pervukhin D.A., Ilyushin Y.V., Afanaseva O.V. Design of distributed systems of hydrolithosphere processes management. A synthesis of distributed management systems // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2017. 87(3). 032029.
- [9] Малков А.В., Першин И.М. Системы с распределенными параметрами. Анализ и синтез. М.: Научный мир, 2012. 476с.
- [10] Pervukhin D.A., Ilyushin Y.V. A parallel analysis of hydrolithospheric beds geodata of narzan mineral water Kislovodsk deposit. // Journal of Mining Institute. 2016. vol. 221. pp. 706-711.
- [11] Pershin I.M., Malkov A.M., Drovosekova T.I. The study of periodic effects on parameters of hydrolytospheric processes // 2019 International Science and Technology Conference "EastConf", EastConf 2019. 8725353.
- [12] Малков А.В., Першин И.М., Помеляйко И.С. Методика оценки параметров водоносных горизонтов по данным опытно-фильтрационных работ в условиях гидравлической связи // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2018. № 1. С. 36-42.
- [13] Pershin I.M., Drovosekova T.I. Peculiarities of modelling hydrolithospheric processes in the region of Kavkazskiy Mineralnye Vody (Caucasus Mineral Waters) // Proceedings of the 19th International Conference on Soft Computing and Measurements. SCM 2016. 7519732. pp. 215-217.
- [14] Kukharova T.V., Pershin I.M. Conditions of Application of Distributed Systems Synthesis Methods to Multidimensional Object // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2018. 8602749.
- [15] Першин И.М., Веселов Г.Е., Першин М.И. Аппроксимационные модели передаточных функций распределенных объектов // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2015. № 7 (168). С. 126-138.
- [16] Першин М.И. Исследование погрешностей динамических характеристик распределенных объектов при аппроксимации // Современная наука и инновации. 2014. №4(8). С. 46-50.
- [17] Pershin M.I., Papush E.G., Spivak A.O. Approximation Models for the Hydrolithospheric Processes // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2018. 8602437. pp. 1-6.