

Проблемы проектирования систем управления гидrolитосферными процессами водоносных горизонтов глубокого залегания в трещиноватых горных породах

И. А. Бондин¹, Н. В. Остапенко², Д. А. Бондина³

¹ЮФУ, ИКТИБ, кафедра синергетики и процессов управления

²ООО «Холдинг Аква»

³АО «Нарзан»

bondin@sfsedu.ru

Аннотация. В процессе исследования и разработки отдельных участков месторождений с более глубоким залеганием водоносных горизонтов в регионе Кавказских минеральных вод появляются геологические факторы, которые ранее были неизученные либо слабоизученные. В частности, это высокий газовый фактор, сложная гидравлическая связь между скважинами рассматриваемого пласта, изменение гидрохимических характеристик добываемого гидроминерального сырья. В связи с этими факторами разработана методика описания математических моделей рассматриваемых гидrolитосферных процессов (с использованием кусочной аппроксимации характеристик процессов) и методика проектирования систем управления.

Ключевые слова: минеральные воды; Ессентукское месторождение; математическая модель; кусочная аппроксимация характеристик; схема системы управления

1. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОЛИТОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ ГЛУБОКОГО ЗАЛЕГАНИЯ, ОФР

На протяжении векового изучения вод региона Кавказские Минеральные Воды (КМВ) учеными гидрогеологами исследовались условия формирования разнообразных по составу и минерализации гидроминеральных источников. Но даже сейчас изучая этот вопрос, ученые до сих пор не пришли к единому мнению, поскольку имеются колоссальные расхождения во мнениях происхождения углекислого газа (путей и места проникновения в продуктивные горизонты), взаимовлияние участков месторождений, а также условия формирования в пластах состава минеральных вод.

Район КМВ в гидрогеологическом отношении представляет собой так называемый артезианский склон, в пределах которого выделяются основные водоносные горизонты в верхнемеловых трещиноватых известняках, в валанжинских доломитизированных трещиноватых известняках (Рис. 1) и водоносные зоны, связанные с тектоническими разломами в палеозойском фундаменте.



Рис. 1. Пример трещиноватости горных пород

Питание водоносных горизонтов и зон происходит в южных частях района, а разгрузка — в северной его половине (источники Кисловодска, Ессентуков, Пятигорска, Железноводска и др.). При этом движение вод в трещинных породах наиболее активно происходит по зонам тектонических нарушений.

Процессы, протекающие при строительстве и эксплуатации гидрогеологических скважин региона КМВ, требуют постоянного контроля, а также совершенствование решение задач исследования скважин. При проведении опытно-фильтрационных работ (ОФР) скважинам задают последовательность постоянных дебитов добывающих скважин и наблюдают за изменением уровня в наблюдательных скважинах (давление для скважины с избыточным уровнем), с постоянным контролем следующих параметров в добычной скважине: температура, давление, дебит, газовый фактор, состав воды и газа. В результате сравнения данных испытания с теоретическими определяют основные параметры водоносного пласта (коэффициент фильтрации, коэффициент водопроводимости, пьезопроводность, уровнепроводность), а следовательно, продуктивность скважины.

1. Коэффициент фильтрации — показатель, который отражает скорость прохождения жидкости в горных породах при их полном водонасыщении.

2. Коэффициент водопроводимости — показатель, характеризующий способность пород пропускать то или иное количество воды в единицу времени.

3. Пьезопроводность – показатель скорости изменения напора (гидростатического давления) в продуктивном горизонте.

4. Уровнепроводность – для безнапорных вод данный показатель показывает скорость распространения возмущения в пласте.

Опытно-фильтрационные работы являются весьма ответственной и сравнительно дорогостоящей частью гидрогеологических работ. Этим и объясняется повышенный интерес к совершенствованию методики их проведения и обработки данных [1–10].

Для скважин Ессентукского месторождения, поскольку они напорные, необходимо определить коэффициенты фильтрации и водопроводимости, а также пьезопроводность.

В настоящее время на Ессентукском месторождении перспективные являются скважины с глубиной залегания от 685-865 метров. Поскольку водоносные горизонты с более высоким залеганием более подвержены антропогенным воздействиям. Скважины высокодебитные с избыточным напором +50 м. Данные скважины выводят на поверхность углекислые хлоридно-гидрокарбонатные (хлоридно-гидрокарбонатно-натриевые) воды с минерализацией от 8,5-13,9 гр./л.

II. МЕТОДИКА КУСОЧНОЙ АППРОКСИМАЦИИ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГИДРОЛИТОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ

При проведении ОФР, вычисление коэффициента передачи (пьезопроводности) по координате x осуществлялось с использованием результатов измерений параметров гидролитосферного процесса в четырех скважинах (рис. 2). Параметры исследования рассматриваемого водоносного горизонта, полученные в результате ОФР, приведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА I. ПАРАМЕТРЫ ИССЛЕДОВАНИЯ РАССМАТРИВАЕМОГО ВОДОНОСНОГО ГОРИЗОНТА (СЕНОМАН-МААХСТРИКСКИЙ)

Дебит скв. №1-бис-Э (м³/сут.)	Понижение уровня в скв. № 1-бис-Э(м.)	Понижение уровня в скв. № 2-бис-Э(м.)	Понижение уровня в скв. № 49-Э (м.)	Понижение уровня в скв. № 46-Э (м.)
65	45	12	7	10
Статические коэффициенты передачи				
	$K_1=45/65=0.6923$	$K_2=12/65=0.1846$	$K_3=7/65=0.1077$	$K_4=10/65=0.1538$

Проблема 1. ОФР показывают, что известные методы описания гидролитосферных процессов [1–17], в виде уравнений в частных производных, не применимы в рассматриваемом случае. Для описания математических моделей используем методику кусочной аппроксимации статических характеристик на рассматриваемых интервалах ($0 < x \leq 11, 11 < x \leq 2560$), приведенную в [11–19]:

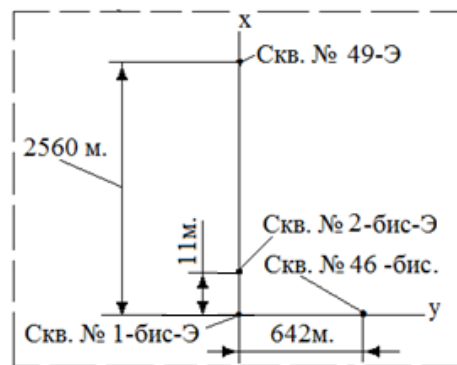


Рис. 2. Вариант расчетов параметров звеньев

Рассматриваемая методика распадается на следующие этапы:

III. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Вычисление параметров аппроксимирующего звена для первого интервала ($r_0 \leq x \leq L_2$). Приравняв статические коэффициенты усиления аппроксимирующего звена (полагая, радиус депрессионной воронки $r_0=0.2$ м) значениям K_1 и K_2 , и полагая, что $L_1=11$ м получим систему уравнений:

$$\begin{cases} K_1 = \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot r_0) \\ K_2 = \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot L_1) \end{cases} \quad \beta = (D)^{1/2} \quad (1)$$

Решая полученную систему (1), определим значения параметров $D_1=D$ и $K_1=K$ на первом интервале ($r_0 \leq x \leq L_1$).

Подставляя исходные данные, получим:

$$\begin{cases} 0.6923 = \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot r_0), \\ 0.1846 = \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot L_1), \end{cases} \quad \beta = (0.12239)^{1/2}, \quad K = 1.32182$$

Статический коэффициент передачи аппроксимирующего звена на первом интервале записывается в виде:

$$W_a = \frac{1.32182}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot x^2); \quad \beta = (0.12239)^{1/2} \quad (2)$$

Вычисление параметров аппроксимирующего звена для второго интервала ($L_1 \leq x \leq L_2$).

$$\begin{cases} K_2 = \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot L_1), \\ K_3 = \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot L_2) \end{cases} \quad \beta = (D)^{1/2}$$

Подставляя исходные данные и решая полученную систему, определим значения параметров на втором интервале ($L_1 \leq x \leq L_2$).

$$\begin{cases} 0.1856 = \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot L_1), \\ 0.1077 = \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot L_2) \end{cases}$$

$$\beta = (0.12239)^{1/2}, K = 0.00003911$$

Статический коэффициент передачи аппроксимирующего звена на втором интервале записывается в виде:

$$W_a = \frac{0.00003911}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot x^2); \quad (3)$$

$$\beta = (0.12239)^{1/2}$$

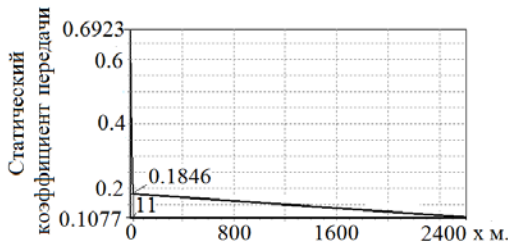


Рис. 3. График понижения уровня, полученный с использованием методики кусочной аппроксимации

Обобщение алгоритма кусочной аппроксимации на многомерный случай, для описания статических коэффициентов передачи, для N скважин, рассмотренных на рис. 4. При этом, будем полагать, что 1-добывающая скважина, а 2, 3,.. N скважины не участвуют в добыче гидроминерального сырья.

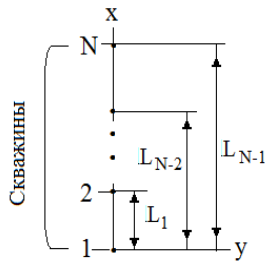


Рис. 4. Схема расположения N скважин

Полагая, что вычислены статические коэффициенты передачи для рассматриваемых скважин. Вычисление параметров аппроксимирующего звена для первого интервала ($r_0 \leq x \leq L_1$). Приравняв статические коэффициенты усиления аппроксимирующего звена (полагая, радиус депрессионной воронки $r_0=0.2$ м.) значениям K_1 и K_2 , и полагая, что расстояние между скважинами 1 и 2 составляет L_1 , получим систему уравнений:

$$\begin{cases} K_1 = \frac{\hat{K}_1}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot r_0), \\ K_2 = \frac{\hat{K}_1}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot L_1) \end{cases} \quad (4)$$

$$\beta = (D_1)^{1/2}$$

Решая полученную систему, определим значения $\hat{K}_1$ и D_1 на первом интервале (L_1)

Запишем систему уравнений, позволяющую вычислить $\hat{K}_i$ и D_i на остальных интервалах ($i=2 \dots N-1$). Приравняв статические коэффициенты усиления аппроксимирующего звена значениям K_i и K_{i+1} , и полагая, что расстояние между скважинами i и $i+1$ составляет L_i , получим систему уравнений:

$$\begin{cases} K_i = \frac{\hat{K}_i}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot L_i), \\ K_{i+1} = \frac{\hat{K}_i}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot L_{i+1}), \end{cases} \quad (5)$$

$$\beta = (D_i)^{1/2}.$$

Решая полученную систему (5), определим значения $\hat{K}_i$ и D_i на i интервале (L_i)

IV. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Звено, аппроксимирующее статические коэффициенты и динамику рассматриваемого объекта на i -м интервале, может быть записано в виде [14]:

$$W_i = \frac{\hat{K}_i}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot x), \quad \beta = \left(\frac{s}{a_i} + D_i \right)^{1/2};$$

$$i = \overline{1, \dots, N-1}, \quad L_{i-1} \leq x < L_i, \quad L_0 = r_0. \quad (6)$$

$$\Delta \varphi_i = -\operatorname{Im}(\beta) \cdot x - \arctan \left(\frac{\operatorname{Im}(\beta)}{\operatorname{Re}(\beta)} \right)$$

$$\beta = \left(\frac{j\omega_i}{a_i} + D \right)^{1/2}, \quad L_{i-1} \leq x < L_i; \quad L_0 = r_0$$

где: s — оператор Лапласа; a_i — определяемый параметр.

Изменяя значение дебита в скважине 1-бис-Э ($Q=40+25 \cdot \sin(3.6 \cdot 24 \cdot t)$, t —время (сут.) и измеряя колебательный процесс в скважине 2-бис-Э, для первого интервала был вычислен сдвиг по фазе ($\Delta \varphi_1=-1.12$) и, в соответствии с (6) определено значение параметра $a_1=0.0000324 \text{ м}^2/\text{сек}$.

$$W_a = \frac{1.32182}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot x^2); \quad \beta = \left(\frac{s}{a_1} + 0.12239 \right)^{1/2} \quad (7)$$

V. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ РАССМАТРИВАЕМЫМИ ПРОЦЕССАМИ

Проблема 2. В практике возникают проблемы при оценке уровня в зоне расположения добывающей скважины. Эта проблема связана с процессом перехода углекислого газа из жидкого состояния (при давлении более 6 атм.) в газообразное состояние (при давлении менее 6 атм.). При этом, объемы углекислого газа в добываемом сырье, изменяются во времени случайным образом. Рассмотренные процессы вносят существенную помеху в процесс измерения уровня, при расположении измерительного устройства в верхней части добывающей скважины. В рассматриваемом случае датчик измерения уровня будем располагать в скважине 2-бис –Э, которая не используется в процессе добычи гидроминерального сырья (запасная скважина), а управлять будем дебитом скважины 1-бис –Э (рис. 5).

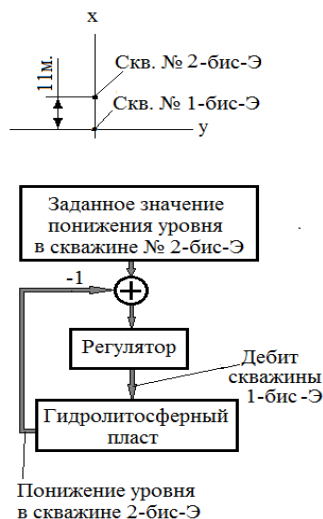


Рис. 5. Общая схема системы управления

Используя передаточную функцию (7), разработана программа, позволяющая определить параметры регулятора, при проектировании системы управления рассматриваемым процессом. Передаточная функция регулятора записывается в виде:

$$R(s) = 104.12 + 21.025 \cdot s + 0.004756/s,$$

s - оператор ллапласа

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основная сложность, при проектировании систем управления гидролитосферными процессами глубокого залегания заключается в определении статических и динамических характеристик рассматриваемого процесса, а также решения проблемы оценки текущего уровня.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Asadulagi M.A.M., Pershin I.M., Tsapleva V.V. Research on Hydrolithospheric processes using the results of groundwater inflow testing // Water. 2024. Vol. 16. № 3. P. 487.
- [2] Drovosekova T.I., Pershin I.M. Peculiarities of modelling hydro-lithospheric processes in the region of Caucasus mineral springs. // Proceedings of the 19th International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2016. 2016. P. 215–217.
- [3] Kukharova T.V., Pershin I.M., Malkov A.V. The Study of Periodic Effects on Parameters of Hydrolytospheric Processes // 2019 International Science and Technology Conference "EastConf". 2019. P. 7.
- [4] Kukharova T.V., Pershin I.M., Utkin V.A. Modeling of a decision support system for a psychiatrist based on the dynamics of electrical conductivity parameters // Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2021. 2021. P. 975–978.
- [5] Makarova A.A., Kaliberda I.V., Pershin I.M., Kovalev D.A. Modeling a production well flow control system using the example of the

verkhneberezhovskaya area // Proceedings of the 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2022. 2022. P. 760–764.

- [6] Pershin I.M., Papush E.G., Malkov A.V., Kukharova T.V., Spivak A.O. Operational control of underground water exploitation regimes // Proceedings of 2019 3rd International Conference on Control in Technical Systems, CTS 2019. 2019. P. 77–80.
- [7] Pershin I.M., Pervukhin D.A., Ilyushin Y.V., Afanaseva O.V. Design of distributed sys-tems of hydrolithosphere processes management. A synthesis of distributed management systems // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 87 (2017) 032029 d o i :10.1088/1755-1315/87/3/032029 (skop).2017. P.P 1-7.
- [8] Бондин И.А. Системный анализ гидролитосферных процессов Ессентукского месторождения минеральных подземных вод (Новоблагодарненский участок)// Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. 2025. № 2. С. 5–15.
- [9] Бондин И.А., Снурницын Г.К. Автоматизация системы управления добычи и мониторинга скважин Ессентукского месторождения минеральных подземных вод // Геология и недропользование. 2023. № 3. С. 159–165.
- [10] Бондин И.А., Снурницын Г.К. Системный анализ процессов в гидролитосфере Ессентукского месторождения минеральных подземных вод // XII Всероссийской научной конференции «Системный синтез и прикладная синергетика». Сборник материалов конференции. 2024. С. 224–230.
- [11] Малков А.В., Першин И.М. Синтез распределенных регуляторов для систем управления гидролитосферными процессами: монография. М.: Научный мир, 2007. 252 с.
- [12] Малков А.В., Першин И.М. Системы с распределенными параметрами анализ и синтез: монография. М.: Научный мир, 2012. С. 472.
- [13] Малков А.В., Першин И.М., Помеляйко И.С. Анализ экологического состояния гидроминеральной базы курорта Кисловодск // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2016. № 1. С. 12–22.
- [14] 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: монография. М.: Наука, 2015. 283 с.
- [15] Першин И.М., Веселов Г.Е., Першин М.И. Аппроксимационные модели передаточных функций распределенных объектов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2015. № 7 (168). С. 126–138.
- [16] Першин И.М., Веселов Г.Е., Першин М.И. Методы аппроксимации передаточных функций распределенных объектов // Системный синтез и прикладная синергетика. Сборник научных трудов VII Всероссийской научной конференции. 2015. С. 106–117.
- [17] Першин И.М., Кузьмин Н.Н., Малков А.В. Формирование целевых функций в задачах управления гидролитосферными процессами // 5-я Российская мультikonференция по проблемам управления. Сборник материалов конференции «Информационные технологии в управлении» (ИТУ-2012). 2012. С. 622–632.
- [18] Першин И.М., Малков А.В., Криштал В.А. Построение системы управления параметрами эксплуатации системы добычи минеральной воды в регионе КМВ // Современная наука и инновации. 2013. № 1 (1). С. 17–23.
- [19] Першин И.М., Носова В.А., Русак С.Н. Определение параметров распределенных звеньев, аппроксимирующих гидролитосферные процессы // Современная наука и инновации. Вып. №2(34), 2021. С. 10-16