Русскоязычный перевод статьи DOI: 10.3390/w15122289 *

Моделирование распределенной системы управления сетью скважин минеральной воды

И.М. ПЕРШИН[1, 2], Е.Г. ПАПУШ[2], Т.В. КУХАРОВА[3] ✉, В.А. УТКИН[4]
[1] *Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия*
[2] *Пятигорский институт (филиал), Северо-Кавказский федеральный университет, Пятигорск, Россия*
[3] *Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия*
[4] *Пятигорский научно-исследовательский институт курортологии ФФГБУ СКФНКЦ ФМБА, Пятигорск, Россия*
✉ *unit-4@yandex.ru*

Ссылка для цитирования оригинальной статьи: Pershin, I.M.; Papush, E.G.; Kukharova, T.V.; Utkin, V.A. Modeling of Distributed Control System for Network of MineralWater Wells. *Water* 2023, 15, 2289. https://doi.org/10.3390/w15122289

Аннотация: Статья посвящена решению задачи проектирования распределенной системы управления сетью добывающих скважин на примере месторождений минеральных вод в регионе Кавказских Минеральных Вод, Россия. Целью работы являлось определение набора параметров системы управления для обеспечения технологически эффективных и безопасных режимов эксплуатации месторождений минеральных вод. Разработана математическая модель месторождения с учетом заданной конфигурации и дебита сети скважин. Представлен подробный алгоритм проектирования рассматриваемой системы управления, основанный на частотной концепции анализа и синтеза для распределенных систем управления. Экспериментальные испытания и валидация модели проводились на объекте эксплуатационных скважин «Нарзан», г. Кисловодск, Россия. Результаты моделирования и натурных экспериментов подтвердили адекватность математической модели и эффективность предложенного алгоритма. Авторы пришли к выводу, что адаптированная математическая модель может быть использована для создания региональной автоматизированной системы управления кустом месторождений для мониторинга, оперативного управления и прогнозирования характера реальных гидрогеологических процессов и обеспечения их устойчивости.

Ключевые слова: распределенная система управления; режимы работы месторождений минеральных вод; параметры контроллера

Modeling of Distributed Control System for Network of MineralWaterWells

Ivan M. PERSHIN[1, 2], Elena G. PAPUSH[2], Tatyana V. KUKHAROVA[3] ✉ and Vladimir A. UTKIN[4]
[1] *Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint Petersburg, Russia*
[2] *Pyatigorsk Institute (Branch), North Caucasus Federal University, Pyatigorsk, Russia*
[3] *Saint-Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia*
[4] *Pyatigorsk State Research Institute of Balneology by the Federal Medical and Biological Agency, Pyatigorsk, Russia*
✉ *unit-4@yandex.ru*

Abstract: The article is devoted to solving the problem of designing a distributed control system for a network of production wells on the example of mineral water deposits in the Caucasus Mineral Waters region, Russia. The purpose was to determine the set of parameters of the control system to ensure technologically effective and safe operating modes of mineral water deposits. A mathematical model of the deposit was developed taking into account the given configuration and production rate of the network of the wells. The detailed algorithm is presented for designing the control system under consideration based on the frequency concept of analysis and synthesis for distributed control systems. The experimental tests and model validation were performed at the production wells facility of "Narzan", Kislovodsk, Russia. The results of modeling and field experiments confirmed the adequacy of the mathematical model and the effectiveness of the proposed algorithm. The authors came to the conclusion that the adapted mathematical model can be used to create a regional automated field cluster management system for monitoring, operational management and forecasting the nature of real hydrogeological processes and ensuring their stability.

Keywords: distributed control system; operatingmodes ofmineralwater deposits; controller parameters.

* Перевод подготовлен для повышения интереса русскоязычной аудитории к данной статье.

© 2023 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).
© Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II (перевод), 2024.

1. Введение

Более 200 лет назад на юге России были разведаны месторождения минеральных вод (МВ), где образовался крупнейший курортный регион – Кавказские Минеральные Воды (КМВ). В этот регион входят такие всемирно известные города-курорты, как Кисловодск, Ессентуки, Пятигорск, Железноводск. Состояние бальнеологических ресурсов, в том числе месторождений МВ, используемых для промышленного розлива и санаторно-курортного лечения, во многом определяет экономическое и экологическое благополучие данного региона.

Рост технологической и техногенной нагрузки на гидрогеологическую систему закономерно вызывает негативные последствия для местных курортов. Строительство крупных санаторных корпусов в 50-70-х годах XX века, увеличение объемов добычи минеральной воды, ухудшение экологической обстановки в совокупности привели к ухудшению качественных показателей минерального состава для ряда источников МВ. За последние 25 лет переход к рыночной экономике сопровождался пополнением перечня недропользователей и значительным увеличением производства минеральных вод. Объем производства увеличился более чем в два раза, причем в ряде случаев такое увеличение происходило без серьезного обоснования режимов работы. В качестве примера можно привести скважину № 5/0-бис минеральной воды «Доломитный нарзан», которая не может быть использована для питья как по причине бактериологического загрязнения, так и из-за полной потери кондиций (к 2012 г, среднегодовые значения минерализации составили 1,16 г/дм^3 (норма 2-3 г/дм^3), растворенного диоксида углерода – 0,40 г/дм^3 (норма 1,0-2,5 г/дм^3) [1]. Динамика изменения минерализации и растворенного диоксида углерода в доломитовом нарзане и в сульфатном нарзане приведена в [1]. Существующие проблемы и пути их решения в отношении подземных вод в санаторно-курортных зонах подробно описаны в [1-3]. Проводились также исследования влияния промышленных объектов на качество воды, в частности, гравийных карьеров [4] и полигонов захоронения отходов [5]. Работы [6-8] посвящены изучению факторов, определяющих качество и изменение запасов подземных вод. Работы [9, 10] посвящены проблемам риска загрязненных вод для здоровья. Проблемы управления ресурсами трансграничных подземных вод рассматриваются в работах [11, 12].

В настоящее время существуют локальные системы контроля отдельных скважин, а также опорная сеть контрольных скважин для мониторинга состояния гидрогеологической системы [13, 14]. Важной практической и экологической задачей является создание единой системы оперативного мониторинга [15-17], прогнозирования [18, 19] и управления процессами в гидрогеологической системе региона ЦМВ.

Процедура разработки системы оперативного управления режимами работы скважин МВ включает следующие этапы:

- определение допустимых технологически безопасных режимов при эксплуатации месторождений МВ (формирование целевых функций для систем управления сетью скважин) [20, 21];
- определение оптимального количества добывающих скважин;
- расчет параметров распределенных контроллеров для локальных систем управления [1, 22, 23];
- мониторинг текущего состояния гидрогеологической системы;
- прогнозирование процессов в гидрогеологической системе на краткосрочную (до 10 лет) и долгосрочную (до 100 лет) перспективу.

На сегодняшний день разработано множество методов моделирования [24-26], анализа [27-29] и синтеза систем управления объектами с распределенными параметрами [30-32], в том числе гидрогеологическими процессами, а также технических средств для их реализации [1, 33, 34]. Алгоритм принятия управленческих решений по реализации таких проектов предложен в работе [35]. Методы оценки гидрогеологических параметров описаны в [36]. В работе [37] предложена имитационно-оптимизационная модель для определения неизвестных мест расположения скважин подземных вод и дебитов откачки для двумерных водоносных систем. Способ реализации мониторинга производительности процесса описан в [38].

При проектировании распределенной системы управления сетью эксплуатационных скважин МВ необходимо учитывать влияние дебита каждой отдельной скважины на уровень понижения в соседних скважинах. Очевидно, что дебит не может быть одинаковым для всех скважин и должен рассчитываться для каждой скважины с учетом их взаимного расположения. Решение для линейного расположения скважин приведено в [33, 39].

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Регион КМВ расположен в предгорьях Кавказских гор. Рельеф региона в северо-восточной части равнинный с наличием лакколитов. Юго-западная часть региона характеризуется чертами горного ландшафта. Особенности рельефа региона определяют то, что изолинии пьезометрических уровней и уровней распространения минерализации подземных вод имеют форму, близкую к эллиптической [1]. Таким образом, на практике возникает проблема, когда необходимо создать распределенную систему управления действующим месторождением, в которой добывающие скважины расположены в эллипсе или круге заданных размеров. Такая конфигурация соответствует естественным границам многих разведанных месторождений полезных ископаемых и артезианских вод.

Отличием данной математической модели от ранее рассмотренных моделей является конфигурация сети эксплуатационных скважин МВ, расположенных на поверхности земли в форме эллипса.

Как правило, выбор целевой функции определяется экономическими интересами, а заданные ограничения диктуются экологическими требованиями. Целью данного исследования являлось определение оптимального количества эксплуатационных скважин МВ для сети эллиптической формы, обеспечивающих максимальную прибыль при заданном сроке эксплуатации залежи. Решение данной задачи ограничено допустимым понижением уровня воды в скважинах (менее 2 м). Представленная адаптированная модель может быть также использована для разработки региональной системы управления сетью эксплуатационных скважин МВ.

2. Материалы и методы

В основу разработки системы управления сетью добывающих скважин МВ положена концепция частотного анализа и синтеза для распределенных систем. Теоретические положения этого метода подробно изложены в [1]. Математическая модель гидрогеологического процесса для месторождения МВ может быть выражена в виде дифференциального уравнения переноса [1, 33]. Граничные условия выбираются на основе анализа строения водоносных горизонтов по результатам геологических исследований [33, 40, 41]. Физические характеристики водоносных горизонтов могут быть заданы с использованием метода оценки параметров водоносных горизонтов на основе экспериментальных фильтрационных работ в условиях гидравлической связи [1].

В данной работе динамические характеристики объекта управления определялись по результатам экспериментов на эксплуатационных скважинах МВ (Акционерное общество «Нарзан», г. Кисловодск, Россия). Гидрогеологический профиль Кисловодского месторождения приведен в [1, 39]. Оценка изменения динамических характеристик распределенных объектов при аппроксимации приведена в [1]. Для описания статических характеристик рассматриваемого объекта использовалось аппроксимирующее звено [42]. Входное воздействие на объект (скорость откачки) формируется в виде пространственных режимов [13].

В качестве объекта управления рассматривается гидрогеологический процесс для месторождения МВ, схема которого показана на рис. 1.

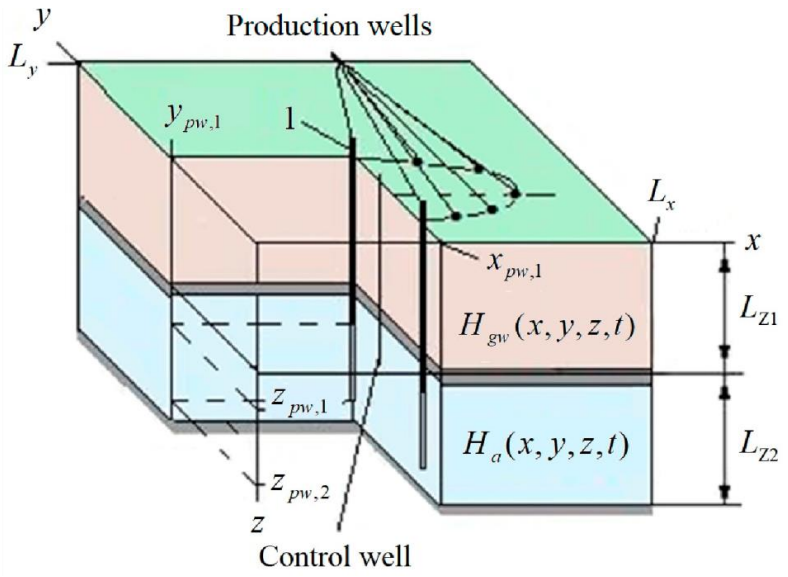


Рис. 1. Схема месторождения минеральной воды (МВ) с контрольными и эксплуатационными скважинами

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Поперечный разрез на рис. 1 показывает свободный водоносный горизонт и ограниченный водоносный горизонт, разделенные водоупорным слоем. По периметру эллипса расположены эксплуатационные скважины. Контрольная скважина используется для контроля снижения давления в замкнутом водоносном горизонте. Опишем потоки подземных вод в свободном водоносном горизонте, лежащем на первом от поверхности водоупорном слое, уравнением (1), а в замкнутом водоносном горизонте – уравнением (2) в соответствии с [1, 33].

$$\frac{\partial H_{gw}(x,y,z,t)}{\partial t} = k_{gw,x} \times \frac{\partial^2 H_{gw}(x,y,z,t)}{\partial x^2} + k_{gw,y} \times \frac{\partial^2 H_{gw}(x,y,z,t)}{\partial y^2} + k_{gw,z} \times \frac{\partial^2 H_{gw}(x,y,z,t)}{\partial z^2}, \quad 0 < x < L_x;\ 0 < y < L_y;\ 0 < z < L_{Z1}, \tag{1}$$

$$\frac{\partial H_a(x,y,z,t)}{\partial t} = \frac{1}{\eta_a} \times \left(k_{a,x} \times \frac{\partial^2 H_a(x,y,z,t)}{\partial x^2} + k_{a,y} \times \frac{\partial^2 H_a(x,y,z,t)}{\partial y^2} + k_{a,z} \times \frac{\partial^2 H_a(x,y,z,t)}{\partial z^2}\right) + V(x_{pw,i}, y_{pw,i}, t) \times \delta(x_{pw,i}, y_{pw,i}, z_{pw,1} \le z \le z_{pw,2}), \quad V(x_{pw,i}, y_{pw,i}, t) = K_i \times Q_i(t), 0 < x < L_x;\ 0 < y < L_y;\ L_{Z1} < z < L_{Z2}, \tag{2}$$

где: H_{gw} – напор в свободном водоносном горизонте, м; H_a – напор в замкнутом водоносном горизонте, м; $k_{gw,x}$, $k_{gw,y}$, $k_{gw,z}$ – гидравлические проводимости по пространственным координатам в свободном водоносном горизонте, м/сут, $k_{a,x}$, $k_{a,y}$, $k_{a,z}$ – гидравлические проводимости по пространственным координатам в замкнутом водоносном горизонте, м/сут; $x_{pw,i}$, $y_{pw,i}$ – координаты расположения эксплуатационных скважин, м; η_a – коэффициент упругой способности, м$^{-1}$, в данном случае η_a = 1,6 × 10^{-3} м$^{-1}$; x, y, z – пространственные координаты, м; N - количество скважин, [-]; i - порядковый номер добывающей скважины, i = 1 . . . N, [-]; t - время, сутки; функция $\delta(x_{pw,i}, y_{pw,i}, z_{pw,1} \le z \le z_{pw,2}) = 1$, если $x = x_{pw,i}$, $y = y_{pw,i}$, $z_{pw,1} \le z \le z_{pw,2}$ (что соответствует несовершенному водозабору из водоносного горизонта), и $\delta(x_{pw,i}, y_{pw,i}, z_{pw,i} \le z \le z_{pw,i}) = 0$ во всех остальных случаях, [-]; V - уменьшение высоты столба воды под влиянием дебита Q_i i-й скважины, м/сут; K_i – коэффициент, определяемый экспериментально, в данном случае K_i = 0,187 м$^{-2}$; $Q_i(t)$ – дебит добывающей скважины, м^3/сут. При моделировании принималось условие, что дебиты равномерно распределены по интервалу $z_{pw,1} \le z \le z_{pw,2}$.

Гидравлические проводимости (м/сут) по пространственным координатам приняты на основе экспериментальных данных: $k_{gw,x}$ = 0,099; $k_{gw,y}$ = 0,097; $k_{gw,z}$ = 0,095; $k_{a,x}$ = 0,199; $k_{a,y}$ = 0,197; $k_{a,z}$ = 0,108.

Процессы перетекания между свободным водоносным горизонтом и верхней границей замкнутого водоносного горизонта представлены в следующем виде:

$$\frac{\partial H_{gw}(x,y,L_{Z1},t)}{\partial t} = b_o \times \left(H_a(x,y,L_{Z1},t) - H_{gw}(x,y,L_{Z1},t)\right), \quad \frac{\partial H_a(x,y,L_{Z1},t)}{\partial t} = -b_o \times \left(H_a(x,y,L_{Z1},t) - H_{gw}(x,y,L_{Z1},t)\right), \tag{3}$$

где b_o = 3 × 10-5 сут$^{-1}$ – параметр утечки. Для нижней границы замкнутого водоносного горизонта

$$\frac{\partial H_a(x,y,L_{Z2},t)}{\partial z} = 0. \tag{4}$$

Для боковых границ рассматриваемой области:

$$H_{gw}(0,y,z,t) = H_{gw}(L_x,y,z,t) = H_{gw}(x,0,z,t) = H_{gw}(x,L_y,z,t) = h_{gw,0}, \quad H_a(0,y,z,t) = H_a(L_x,y,z,t) = H_a(x,0,z,t) = H_a(x,L_y,z,t) = H_{a,0}. \tag{5}$$

При задании граничных условий по координате y предполагалось, что толщина ограниченного водоносного горизонта достаточна для того, чтобы возмущения от эксплуатационных скважин не влияли на состояние пласта в граничных точках.

Начальные условия для ненарушенных водоносных горизонтов:

$$h_{gw,0}(x,y,z,0) = z,\ 0 \le x \le L_x,\ 0 \le y \le L_y,\ 0 \le z \le L_{Z1}, \quad H_{a,0}(x,y,z,0) = 70 - 8 \times x/L_x,\ 0 \le x \le L_x,\ 0 \le y \le L_y,\ L_{Z1} \le z \le L_{Z2}. \tag{6}$$

Геометрические данные месторождения МВ: L_x = 150 м; L_y = 120 м; L_{z1} = 55 м; L_{z2} = 85 м.

Эксплуатационные скважины расположены по периметру эллипса, полуоси которого a = 35 м, b = 20 м. Контрольная скважина смещена по оси y на расстояние 10 м относительно скважины 1.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

3. Результаты

3.1. Исследование характеристик гидрогеологического процесса

Обычно при разработке месторождения минеральных вод оборудуют эксплуатационную и контрольную скважины. В данном случае добывающая скважина и контрольная скважина имеют оборудование для измерения понижения уровня. На первом этапе моделировалась работа только этих двух скважин с целью изучения функциональной зависимости между понижением уровня в одной скважине и дебитом другой скважины с учетом расстояния между ними.

В ходе экспериментальных исследований на объекте контроля был обеспечен постоянный дебит откачки в добывающей скважине, равный Q_1 = 100 м^3/сут. Это значение использовалось для определения статических коэффициентов переноса $K_р$ и $K_с$ соответственно для добывающей и контрольной скважин. Статический коэффициент переноса равен установившемуся изменению уровня в соответствующей скважине, измеренному в средней точке $z = (z_{pw,1} + z_{pw,2})/2$ м, деленному на дебит откачки (входное воздействие) Q_1:

$$K_p = -0.512/(-100) = 5.12 \times 10^{-3}\ \mathrm{m}^{-2};\ K_c = -0.202/(-100) = 2.02 \times 10^{-3}\ \mathrm{m}^{-2}. \quad (7)$$

Структурные схемы аппроксимирующих звеньев для распределенных объектов были рассмотрены в работах [33,42]. В этих работах показано, что в случае двух скважин при описании статических характеристик объекта можно рекомендовать следующую структуру аппроксимирующего звена:

$$W_{ap} = \frac{K}{\sqrt{B}} \times \exp\left(-\sqrt{B} \times \Delta y\right), \quad (8)$$

где: W_{ap} – передаточная функция аппроксимирующего звена; s – дифференциальный оператор; K, B – параметры, значения которых определяются по экспериментальным данным или с помощью численного моделирования. Для нахождения параметров аппроксимирующего звена в уравнение (8) необходимо подставить следующие данные: статические коэффициенты передачи $K_р$, $K_с$, а также геометрические данные: радиус скважины Δy_1 = 0,2 м [1] и расстояние между добывающей скважиной 1 и контрольной скважиной Δy_2 = 10 м.

$$\begin{cases} 5.012 \times 10^{-3} = \frac{K}{\sqrt{B}} \times \exp\left(-\sqrt{B} \times 0.2\right), \\ 2.02 \times 10^{-3} = \frac{K}{\sqrt{B}} \times \exp\left(-\sqrt{B} \times 10\right). \end{cases} \quad (9)$$

Решение системы уравнений (9) таково: K = 4,9522 × 10-4 м$^{-2}$; B = 9,007 × 10^{-3} [-]. Таким образом, коэффициент статической передачи объекта можно записать в виде уравнения (10):

$$W_{ap} = \frac{4.9522 \times 10^{-4}}{\sqrt{9.007 \times 10^{-3}}} \cdot \exp\left(-\sqrt{9.007 \times 10^{-3}} \times \Delta y\right) = 5.218 \times 10^{-3} \times \exp(-0.0949 \times \Delta y), \quad (10)$$

где Δy – расстояние от скважины до рассматриваемой точки, м.

По результатам моделирования был представлен график статического коэффициента передачи объекта в зависимости от расстояния между скважиной и рассматриваемой точкой (рис. 2).

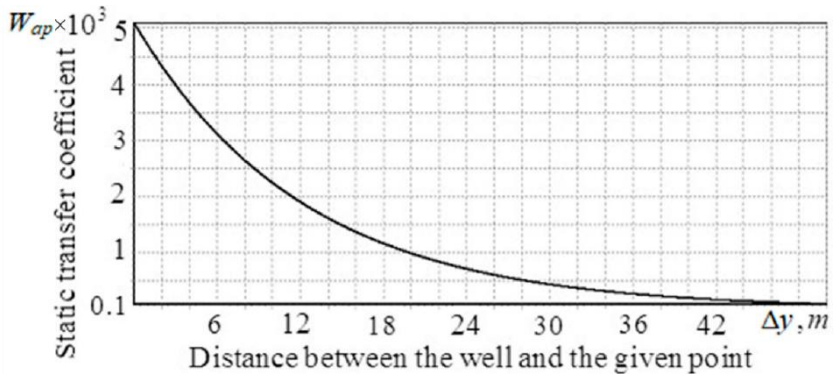


Рис. 2. Статический коэффициент передачи W_{ap} (Δy) в зависимости от расстояния

3.2. Определение оптимального количества добывающих скважин

На втором этапе разработки системы управления было проведено моделирование совместной работы сети скважин МВТ в форме эллипса. Схема расположения представлена на рис. 3.

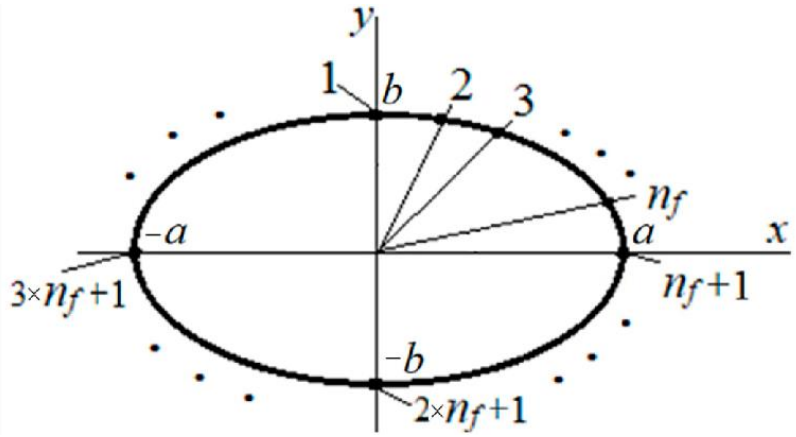


Рис. 3. Схема расположения скважин

Координаты эксплуатационных скважин определяются следующим образом: первая скважина располагается в точке 1 ($x = x_1 = 0$; $y = y_1 = b$); затем угол π/2 рад делится на n_f частей. Для определения координат второй скважины используются каноническое уравнение эллипса и уравнение прямой линии

$$\begin{cases} y_i = x_i \times tg\left(\frac{\pi}{2} \times \left(1 - \frac{(i-1)}{n_f}\right)\right), \\ \frac{x_i^2}{a^2} + \frac{y_i^2}{b^2} = 1. \end{cases} \quad (11)$$

Решение системы уравнений (11) для заданных значений a, b, n_f и i дает координаты точки i (x_i, y_i). Аналогичным образом определялись координаты остальных точек эллипса. Всего было получено $4n_f$ точек.

Задача оптимизации количества добывающих скважин имеет следующую постановку: для рассматриваемого месторождения (рис. 1 и 3) необходимо определить количество добывающих скважин ($4n_f$), обеспечивающих наибольшую прибыль за период эксплуатации месторождения, с учетом описанных ниже ограничений.

При этом должны выполняться следующие условия: максимально допустимое понижение уровня в эксплуатационных скважинах Δh = 2 м; радиус скважины r_w = 0,2 м; скважины МВ работают 24 часа в сутки в течение 10 лет (3650 суток); стоимость 1 м^3 добытой минеральной воды p_1 составляет 350 рублей; затраты на содержание зданий и оборудования и персонала за 10 лет эксплуатации C_p составляют 520 млн. рублей, затраты на бурение, строительство, оборудование и обслуживание каждой скважины C за 10 лет составляют 45 млн. рублей; налог на пользование недрами составляет 7,5 % [43].

Статический коэффициент передачи объекта записывается уравнением (10). Влияние дебита закачки добывающих скважин на понижение уровня в i-й добывающей скважине в соответствии с [42] можно представить в виде уравнения (12):

$$\Delta h = \frac{K_i \times Q_i}{\sqrt{B}} \times \exp(-\beta \times \Delta r_w) + \sum_{j=1, j\neq i}^{4nk} \frac{K_j \times Q_j}{\sqrt{B}} \times \exp(-\beta \times \Delta r_{i,j}),\ i = 1, \ldots 4n_f, \quad (12)$$

где: Δh – понижение уровня в i-й скважине (i = 1 ... 4n$_k$), м; r_W – радиус скважины, м; $\Delta r_{i,j}$ – расстояние от i-й до j-й взаимодействующих скважин, м; Q_i, Q_j – дебиты откачки i-й и j-й скважин, м^3/сут.

В математической модели уравнение (7) было представлено в матричной форме. Общий дебит Q может быть определен как сумма дебитов n скважин:

$$Q = \sum_{i=1}^{4n_f} Q_i. \quad (13)$$

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Зная суммарный объем добычи, можно оценить наибольшую прибыль за 10 лет эксплуатации месторождения, используя уравнение (14):

$$P = 3650 \times Q \times p_1 (1 - 0.075) - C_p - 4 \times C \times n_f. \quad (14)$$

По результатам расчетов изменение суммарного дебита Q и прибыли P в зависимости от количества скважин представлено на рис. 4.

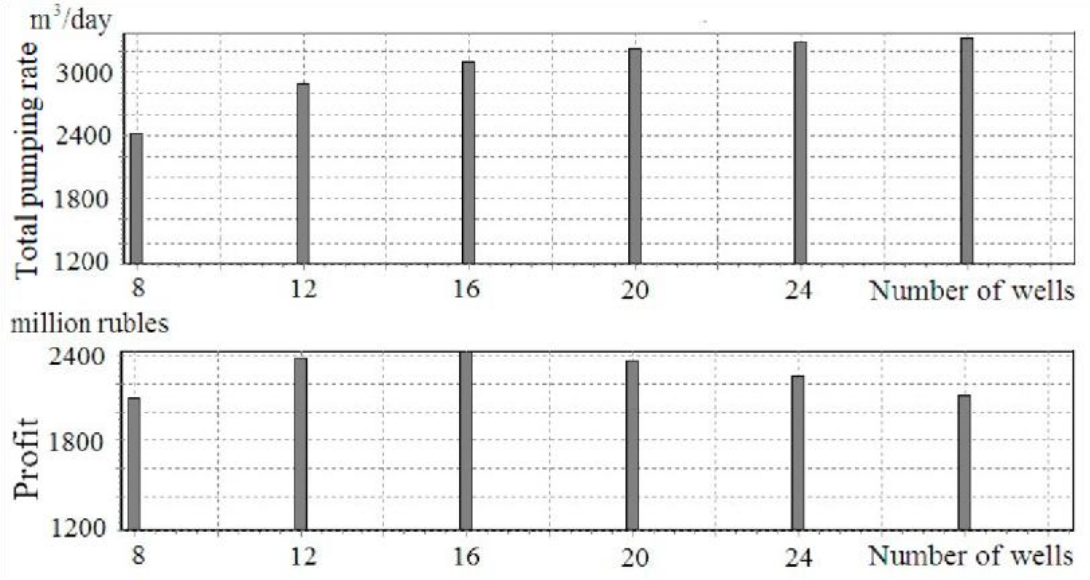


Рис. 4. Изменение суммарного дебита Q и прибыли P в зависимости от количества скважин

Как следует из графиков, максимальная прибыль достигается при использовании шестнадцати добывающих скважин. Прогнозируемый доход от эксплуатации месторождения МВ за 10 лет составит 2428,846 млн. руб. при суммарном дебите Q = 3104 м^3/сут.

3.3. Синтез распределенного контроллера

Методика синтеза распределенных контроллеров изложена в [1]. В этих научных исследованиях описывается ряд динамических распределенных звеньев по аналогии с типовыми динамическими звеньями. Эти звенья могут быть использованы для управления объектами с распределенными параметрами. Также в работе [1] исследованы характеристики динамических распределенных звеньев, представлено обоснование их выбора и применения. Методика моделирования и перехода от сосредоточенных систем к системам с распределенными параметрами была показана в [44].

Разработка системы управления линейным расположением скважин описана в [33]. В случае эксплуатационных скважин, расположенных в форме эллипса, необходимо внести следующие изменения.

Пространственные режимы входного воздействия формируются следующим образом

$$U_i = Q \times \cos(\psi_j \times \gamma_i\ );\ \psi_j = 2 \times \pi \times j/L;$$
$$\gamma_i = \Delta\gamma \times (i - 1);\ i = 1,\ 2\ , \ldots 16;\ j = 1,\ 2,\ \ldots, \quad (15)$$

где: ψ_j – пространственная частота; γ_i – расстояние между двумя рассматриваемыми скважинами; $\Delta\gamma$ – расстояние между соседними скважинами.

Пространственная мода входного воздействия на рассматриваемый объект управления распределена по периметру эллипса L, который равен 176,5 м. Формирование первой моды (j = 1) входного воздействия показано на рис. 5. Аналогичным образом формируются и другие пространственные моды (j = 2, 3, ...).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

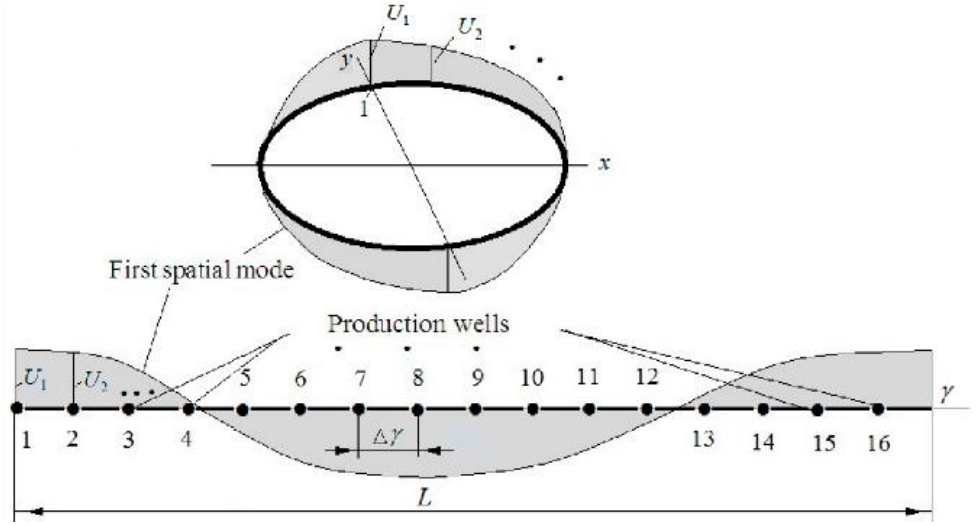


Рис. 5. Формирование первой пространственной моды

Как правило, в соответствии с методом синтеза распределенных систем управления необходимо определить реакцию объекта на любые два пространственных режима. Первый режим формируется в пространстве $\{\gamma\}$ и реализуется в заданных точках ($x_{pW,i}$, $y_{pW,i}$) в пространстве $\{x, y\}$ (в точках расположения добывающих скважин). Если вычисленное значение Ui (i = 1 ... 16) отобразить в пространство $\{x, y\}$, то можно получить следующее выражение:

$$U(x_{pw,i}, y_{pw,i}) = U_i,\ V(x_{pw,i}, y_{pw,i}, t) = K_i \times U(x_{pw,i}, y_{pw,i}),\ i = 1 \ldots 16. \quad (16)$$

Математическое моделирование позволяет определить отклик объекта на первый и второй пространственные режимы (уравнение (15)), а также рассчитать коэффициент передачи объекта управления для рассматриваемых режимов входного воздействия. Расчетные значения коэффициентов передачи (K_1 и K_2) и обобщенной координаты (G_1 и G_2) определялись как

$$K_1 = 775.0\ \text{m}^{-2};\ G_1 = \psi_1^2 = (2 \times \pi \times 1/L)^2 = 1.003 \times 10^{-3}\ [\text{-}];\ K_2 = 583.3\ \text{m}^{-2};\ G_2 = \psi_2^2 = (2 \times \pi \times 2/L)^2 = 4.01 \times 10^{-3}\ [\text{-}]. \quad (17)$$

На основе моделирования были построены графики входного воздействия и выходной функции для всех скважин, что позволило определить фазовый сдвиг выходной функции относительно входного воздействия. Графики входного воздействия и выходной функции для добывающей скважины 8 приведены на рис. 6.

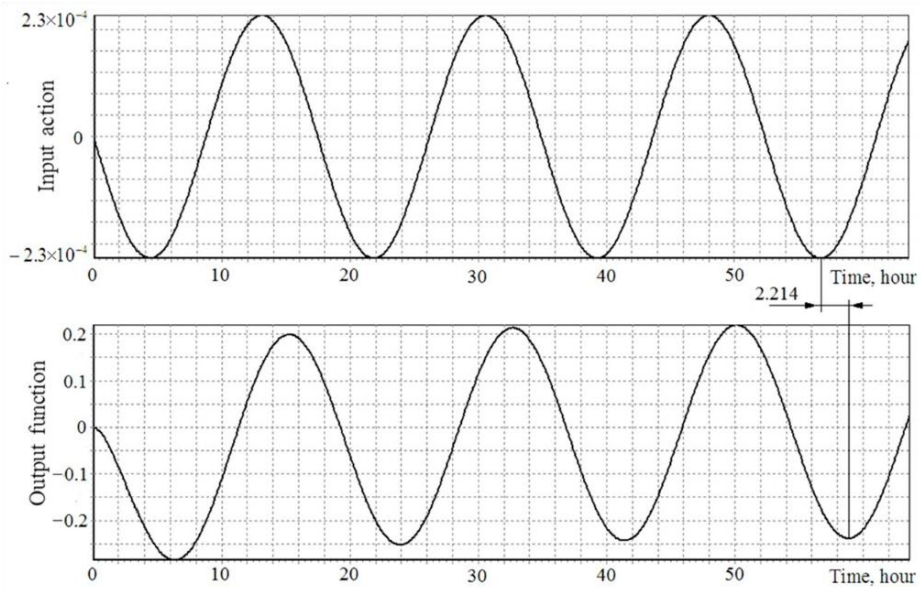


Рис. 6. Графики входного воздействия и выходной функции

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Далее графически определяется фазовый сдвиг выходной функции относительно входного воздействия:

$$\Delta\varphi = 2 \times \pi \times (-2.214)/17.45 = -0.797 \text{ rad.} \quad (18)$$

В работах [33, 39] показано, что динамические характеристики объектов с линейным расположением сети скважин могут быть описаны аппроксимирующими звеньями следующей структуры:

$$W_{ap}(s, G) = \frac{K}{\beta + 1} \times \exp(-\beta \times D_\gamma),\ \beta = \left(\frac{s}{a} + G\right)^{0.5},\ G_j \le G \le \infty, \quad (19)$$

где: K, a, D_γ – определяемые параметры. Используя ранее рассчитанные значения K_1 = 775,0 м$^{-2}$; G_1 = 1,003 × 10^{-3} [-]; K_2 = 583,3 м$^{-2}$; G_2 = 4,01 × 10^{-3} [-]; $\Delta\phi$ = -0,797 рад, была определена аппроксимационная модель объекта управления:

$$W_{ap}(s, G) = \frac{1030.67}{1 + \sqrt{\frac{s}{5.916 \times 10^{-3}} + G}} \times \exp\left(-8.02 \times \sqrt{\frac{s}{5.916 \times 10^{-3}} + G}\right),\ G_1 \le G \le \infty. \quad (20)$$

Передаточная функция распределенного регулятора [1,13] может быть записана в виде:

$$W(\gamma, s) = E_a \times \left(\frac{n_a - 1}{n_a} - \frac{1}{n_a}\nabla^2\right) + E_i \times \left(\frac{n_i - 1}{n_i} - \frac{1}{n_i}\nabla^2\right) \times \frac{1}{s} + E_d \times \left(\frac{n_d - 1}{n_d} - \frac{1}{n_d}\nabla^2\right) \times s, \quad (21)$$

где: E_a, E_i, E_d – суммарные коэффициенты усиления пространственно усиливающего, пространственно интегрирующего и пространственно дифференцирующего звеньев соответственно; γ – пространственная координата; s - дифференциальный оператор; ∇_2 – лапласиан; n_a, n_i, n_d – весовые коэффициенты пространственно усиливающего, пространственно интегрирующего и пространственно дифференцирующего звеньев.

При синтезе распределенного регулятора необходимо учитывать следующие ограничения: запас устойчивости по фазе $\Delta\phi \ge \pi/6$ рад; запас устойчивости по модулю $\Delta L \ge 10$ дБ; параметр, учитывающий параметрические возмущения объекта управления Δ = 2,5 [-]. В результате реализации процедуры синтеза получены параметры распределенного регулятора (уравнение (21)): Ea = 0,22999 м^2, E_i = 0,00108 м^2, E_d = 7,71 м^2, n_a = 1,065 [-], n_i = 1,0859 [-], $n_d \to \infty$ [-].

4. Обсуждение

Таким образом, при формировании управляющего воздействия для каждой из точек расположения скважины будет учитываться рассогласование и накопленная ошибка как в данной, так и в соседних точках, а дифференциальное звено будет формировать соответствующую составляющую управляющего воздействия только на основе скорости изменения рассогласования в данной точке.

Блок-схема распределенной системы управления сетью скважин МВ, расположенных в форме эллипса, представлена на рис. 7. Для анализа работы замкнутой системы управления на вход контроллера подается сигнал $\Delta H_a(i,t)$, который представляет собой рассогласование между желаемым значением уровня $H_{ad}(i,t)$ в зонах расположения скважин и текущим значением уровня $H_a(i,t)$:

$$\Delta H_a(i,t) = H_{ad}(i,t) - H_a(i,t), \quad i = 1, 2, \ldots, 16. \quad (22)$$

На выходе получается функция Q_i (дебит i-й добывающей скважины):

$$\begin{gathered} Q_i(t) = 0.22999 \times \left(\frac{0.065}{1.065} \times \Delta H_a(i,t) - \frac{1}{1.065} \times \nabla^2 \Delta H_a(i,t)\right) + \\ +0.00108 \times \int_0^t \left(\frac{0.0859}{1.0859} \times \Delta H_a(i,\tau) - \frac{1}{1.0859} \times \nabla^2 \Delta H_a(i,\tau)\right) d\tau + 7.71 \times \frac{d\Delta H_a(i,t)}{dt}, \\ i = 1, \ldots 16, \end{gathered} \quad (23)$$

$$\begin{gathered} \nabla^2 \Delta H_a(i,t) = \frac{\Delta H_a(i-1,t) - 2 \times \Delta H_a(i,t) + \Delta H_a(i+1,t)}{\Delta\gamma^2},\ i = 2, \ldots 15, \\ \nabla^2 \Delta H_a(1,t) = \frac{\Delta H_a(16,t) - 2 \times \Delta H_a(1,t) + \Delta H_a(2,t)}{\Delta\gamma^2}, \\ \nabla^2 \Delta H_a(16,t) = \frac{\Delta H_a(15,t) - 2 \times \Delta H_a(16,t) + \Delta H_a(1,t)}{\Delta\gamma^2}. \end{gathered} \quad (24)$$

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

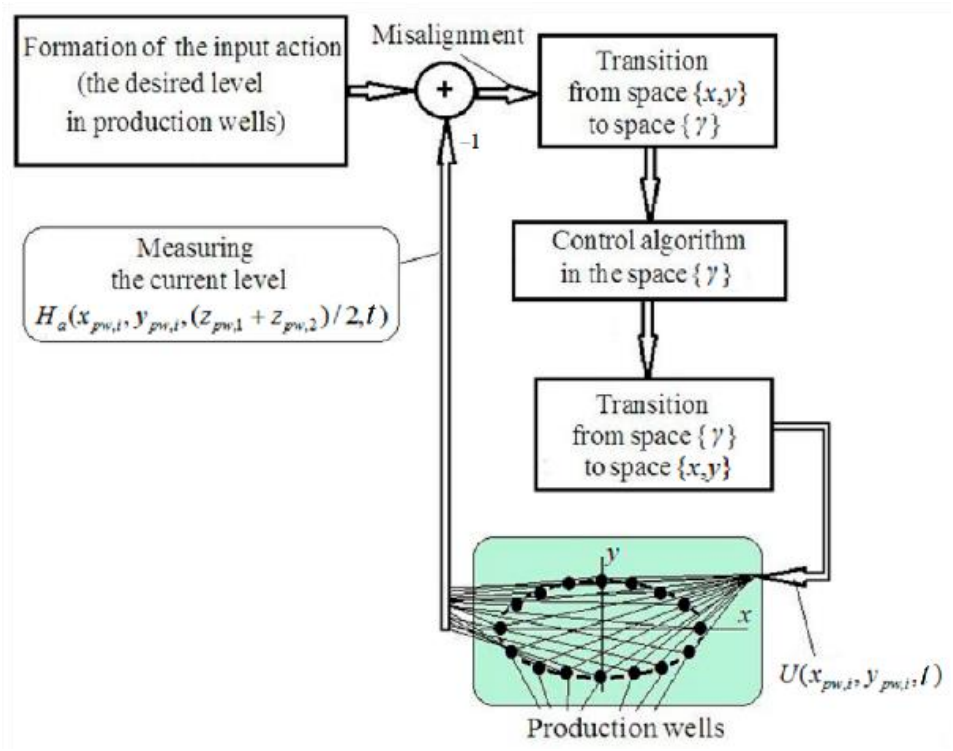


Рис. 7. Блок-схема распределенной системы управления сетью скважин МВ

По результатам моделирования работы замкнутой системы регулирования были получены графики переходных процессов для всех скважин, что позволило оценить качество регулирования. График переходных процессов для скважины МВ 13 представлен на рис. 8.

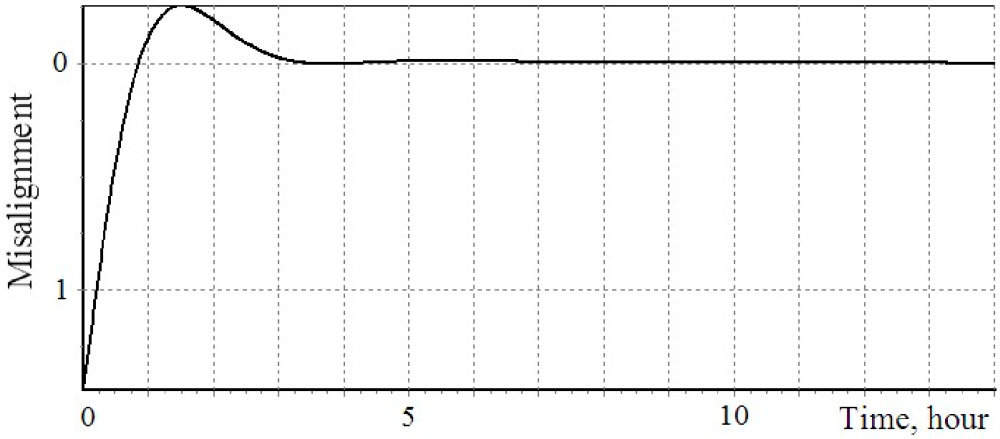


Рис. 8. График переходных процессов для скважины 13

По графику видно, что уровень стабилизации (нулевое смещение) может быть достигнут через 13,25 ч при подаче входного воздействия, и можно сделать вывод, что полученные параметры регулятора могут обеспечить устойчивую работу системы управления при заданных ограничениях.

Таким образом, разработана модель распределенной системы управления сетью скважин по добыче минеральной воды. Новизна предложенной модели заключается в том, что по сравнению с предыдущими моделями с линейной конфигурацией сети МВ исследована эллиптическая форма расположения скважин МВ. Эллиптическая конфигурация более точно отражает естественные границы разведанных месторождений минеральных и артезианских вод [1]. В связи с рассмотрением другого участка месторождения МВ количественное сравнение данной модели с моделью, представленной в исследовании [33], не представляется возможным. Однако линейная конфигурация скважин при разработке месторождения не всегда возможна из-за особенностей рельефа

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

рассматриваемого региона и необходимости сохранения памятников природы, а также объектов историко-культурного наследия. Кроме того, эллиптическое расположение эксплуатационных скважин позволит оборудовать месторождение МВ исходя из условий близости уровней минерализации и пьезометрических уровней в скважинах месторождения, если изолинии этих уровней близки к эллиптическим, что является обычным для рассматриваемого региона [1].

В статье впервые представлен алгоритм разработки распределенной системы управления для рассматриваемой сети скважин, а также решение практических задач, включая определение динамических характеристик для исследуемого объекта управления и расчет параметров распределенного регулятора. По результатам моделирования работы замкнутой системы управления получены графики переходных процессов, что позволяет оценить показатели качества процесса управления. При исследовании гидрогеологических процессов необходимо учитывать влияние случайных факторов. Вопросы управления гидродинамическими процессами при случайных воздействиях в водоносных горизонтах месторождений минеральных вод рассмотрены в [45]. Влияние случайных факторов может быть в значительной степени нивелировано путем введения в систему обратной связи, что и реализовано в данной работе.

Преимуществами системы с обратной связью являются регулирование по отклонению от заданного значения и робастность. Регулирование по отклонению от заданного значения (т.е. по результатам текущих измерений) позволяет учесть изменения производительности в процессе эксплуатации месторождения. Робастность (низкая чувствительность к параметрическим возмущениям) дает возможность поддерживать заданное значение выходной функции (понижение уровня в добывающих скважинах) при некотором изменении параметров объекта, например, гидропроводности. Степень робастности синтезированной системы может стать объектом дальнейших исследований.

Также было найдено оптимальное количество добывающих скважин, исходя из условия получения максимальной экономической прибыли за заданный период эксплуатации месторождения (за 10 лет). При решении задачи учтено ограничение в виде допустимого понижения уровня в добывающих скважинах. Прогнозируемый доход от эксплуатации месторождения за 10 лет составляет примерно 2428,846 руб. при суммарном дебите МВт Q = 3104 м^3/сут.

В основу разработки положена концепция частотного анализа и синтеза распределенных систем управления. Важным преимуществом метода синтеза частотного регулятора является возможность разработки математических моделей на основе динамических характеристик объекта, полученных экспериментально.

5. Выводы

В статье представлено решение теоретической задачи разработки алгоритма синтеза распределенной системы управления с расположением добывающих скважин в виде эллипса. Также решены практические задачи. Определены оптимальное количество и дебиты добывающих скважин в сети скважин, обеспечивающие максимальную прибыль предприятия в заданный период эксплуатации месторождения. Рассчитаны динамические характеристики для рассматриваемого объекта управления, а также параметры распределенного регулятора для системы управления сетью скважин минеральной воды.

Разработанный алгоритм синтеза распределенной системы управления месторождением, в котором добывающие скважины расположены по периметру эллипса, может быть применен как к свободным, так и к замкнутым водоносным горизонтам с различной толщиной, протяженностью, литологией, гидравлической проводимостью путем внесения соответствующих изменений в исходную математическую модель. Описание граничных условий также может быть изменено при рассмотрении другого (или большего) участка месторождения, что может являться направлением для дальнейших исследований, но не влечет за собой ограничений в применении предложенного алгоритма для синтеза системы управления сетью скважин минеральной воды.

Эффективность предложенного подхода подтверждается результатами моделирования.

Предложенная модель может быть использована для оперативного мониторинга и прогнозирования гидрогеологических процессов и создания региональной системы управления добычей минеральной воды в сети разведанных месторождений.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

***Вклад авторов**: Концептуализация, И.М.П. и Е.Г.П.; методология, И.М.П.; программное обеспечение, Е.Г.П. и Т.В.К.; валидация, Е.Г.П. и В.А.У.; формальный анализ, Т.В.К.; исследование, Е.Г.П.; ресурсы, И.М.П. и Е.Г.П.; курирование данных, В.А.У.; написание – подготовка первоначального проекта, Е.Г.П.; написание-первоначальная подготовка проекта, Т.В.К.; рецензирование и редактирование, Т.В.К.; визуализация, Е.Г.П. и Т.В.К.; руководство, И.М.П. и В.А.У.; администрирование проекта, И.М.П. и Т.В.К. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.*

***Финансирование**: Данное исследование не получало внешнего финансирования.*

***Заявление о доступности данных**: Не применимо.*

***Благодарности**: Экспериментальная часть исследования выполнена на установке эксплуатационных скважин МВ, являющейся собственностью ЗАО «Нарзан», г. Кисловодск, Россия.*

***Конфликты интересов**: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

ЛИТЕРАТУРА

1. Malkov, A.V.; Pershin, I.M.; Pomelyayko, I.S.; Utkin, V.A.; Korolev, B.I.; Dubogrey, V.F.; Khmel, V.V.; Pershin, M.I. *Kislovodsk Carbon Dioxide Mineral Water Field: System Analysis, Diagnostics, Forecast, Control*; Nauka: Moscow, Russia, 2015; ISBN 978-5-02-039162-8. (In Russian)
2. Pomelyaiko, I.S.; Malkov, A.V. Quality Problems of Surface Water and Groundwater at the Health Resorts in the Regions of Caucasian Mineral Waters and Ways to Their Solution. *Water Resour*. 2019, 46, 214–225. https://doi.org/10.1134/S009780781902012X
3. Drovosekova, T.I.; Rusak, S.N.; Harish, N.P. Issues of and outlook for using geothermal water. In Proceedings of the 2019 International Science and Technology Conference "EastConf", Vladivostok, Russia, 1–2 March 2019; p. 8725307. https://doi.org/10.1109/EastConf.2019.8725307
4. Karlović, I.; Marković, T.; Smith, A.C.; Maldini, K. Impact of Gravel Pits onWater Quality in Alluvial Aquifers. *Hydrology* 2023, 10, 99. https://doi.org/10.3390/hydrology10040099
5. Semyachkov, A.I.; Pochechun, V.A.; Semyachkov, K.A. Hydrogeoecological conditions of technogenic groundwater in waste disposal sites. *J. Min. Inst*. 2023, 260, 168–179. https://doi.org/10.31897/PMI.2023.24
6. Wang, J.; Xu, J. Spatial Distribution and Controlling Factors of Groundwater Quality Parameters in Yancheng Area on the Lower Reaches of the Huaihe River, Central East China. *Sustainability* 2023, 15, 6882. https://doi.org/10.3390/su15086882
7. Ostad, H.; Mohammadi, Z.; Fiorillo, F. Assessing the Effect of Conduit Pattern and Type of Recharge on the Karst Spring Hydrograph: A Synthetic Modeling Approach. *Water* 2023, 15, 1594. https://doi.org/10.3390/w15081594
8. Ahamed, A.; Knight, R.; Alam, S.; Morphew, M.; Susskind, T. Remote Sensing-Based Estimates of Changes in Stored Groundwater at Local Scales: Case Study for Two Groundwater Subbasins in California's Central Valley. *Remote Sens*. 2023, 15, 2100. https://doi.org/10.3390/rs15082100
9. Ramos, E.; Bux, R.K.; Medina, D.I.; Barrios-Piña, H.; Mahlknecht, J. Spatial and Multivariate Statistical Analyses of Human Health Risk Associated with the Consumption of Heavy Metals in Groundwater of Monterrey Metropolitan Area, Mexico. *Water* 2023, 15, 1243. https://doi.org/10.3390/w15061243
10. Gad, M.; Gaagai, A.; Eid, M.H.; Szűcs, P.; Hussein, H.; Elsherbiny, O.; Elsayed, S.; Khalifa, M.M.; Moghanm, F.S.; Moustapha, M.E.; et al. Groundwater Quality and Health Risk Assessment Using Indexing Approaches, Multivariate Statistical Analysis, Artificial Neural Networks, and GIS Techniques in El Kharga Oasis, Egypt. *Water* 2023, 15, 1216. https://doi.org/10.3390/w15061216
11. Golovina, E.; Shchelkonogova, O. Possibilities of Using the Unitization Model in the Development of Transboundary Groundwater Deposits. *Water* 2023, 15, 298. https://doi.org/10.3390/w15020298
12. Golovina, E.; Pasternak, S.; Tsiglianu, P.; Tselischev, N. Sustainable Management of Transboundary Groundwater Resources: Past and Future. *Sustainability* 2021, 13, 12102. https://doi.org/10.3390/su132112102
13. Shestopalov, M.Y.; Pershin, I.M.; Tsapleva, V.V. Distributed Control Systems Designing. In Proceedings of the 2019 III International Conference on Control in Technical Systems (CTS), St. Petersburg, Russia, 30 October–1 November 2019; pp. 85–88. https://doi.org/10.1109/CTS48763.2019.8973370
14. Pershin, I.M.; Papush, E.G.; Malkov, A.V.; Kukharova, T.V.; Spivak, A.O. Operational Control of Underground Water Exploitation Regimes. In Proceedings of the 2019 III International Conference on Control in Technical Systems (CTS), St. Petersburg, Russia, 30 October–1 November 2019; pp. 77–80. https://doi.org/10.1109/CTS48763.2019.8973323
15. Grigorev, G.S.; Salishchev, M.V.; Senchina, N.P. On the applicability of electromagnetic monitoring of hydraulic fracturing. *J. Min. Inst*. 2021, 250, 492–500. https://doi.org/10.31897/PMI.2021.4.2
16. Zhukovskiy, Y.L.; Korolev, N.A.; Malkova, Y.M. Monitoring of grinding condition in drum mills based on resulting shaft torque. *J. Min. Inst*. 2022, 256, 686–700. https://doi.org/10.31897/PMI.2022.91
17. Martirosyan, A.V.; Ilyushin, Y.V. The Development of the Toxic and Flammable Gases Concentration Monitoring System for Coalmines. *Energies* 2022, 15, 8917. https://doi.org/10.3390/en15238917
18. Zakharov, L.A.; Martyushev, D.A.; Ponomareva, I.N. Predicting dynamic formation pressure using artificial intelligence methods. *J. Min. Inst*. 2022, 253, 23–32. https://doi.org/10.31897/PMI.2022.11
19. Arefiev, I.B.; Afanaseva, O.V. Implementation of Control and Forecasting Problems of Human-Machine Complexes on the Basis of Logic-Reflexive Modeling. *Lect. Notes Netw. Syst*. 2022, 442, 187–197. https://doi.org/10.1007/978-3-030-98832-6_17
20. Kovalev, D.A.; Rusinov, L. Increase in environmental safety of recovery boiler. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci*. 2022, 990, 012068. https://doi.org/10.1088/1755-1315/990/1/012068
21. Veselov, G.E.; Sinicyn, A. Synthesis of sliding control system for automotive suspension under kinematic constraints. *J. Vibroengineering* 2021, 23, 1446–1455. https://doi.org/10.21595/jve.2021.22083
22. Pershin, I.M.; Liashenko, A.L.; Papush, E.G. General Principles for Designing Distributed Control Systems. In Proceedings of the 2020Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF), St. Petersburg, Russia, 1–5 June 2020; pp. 1–6. https://doi.org/10.1109/WECONF48837.2020.9131485

 Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

23. Makarova, A.A.; Kaliberda, I.V.; Kovalev, D.A.; Pershin, I.M. Modeling a Production Well Flow Control System Using the Example of the Verkhneberezovskaya Area. In Proceedings of the 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, St. Petersburg, Russia, 25–28 January 2022; pp. 760–764. https://doi.org/10.1109/ElConRus54750.2022.9755852

24. Sizov, S.; Drovosekova, T.; Pershin, I. Application of Machine Learning Methods in Modeling Hydrolithospheric Processes. *Commun. Comput. Inf. Sci*. 2021, 1395, 422–431. https://doi.org/10.1007/978-981-16-1480-4_38

25. Tsapleva, V.V.; Masyutina, G.V.; Danchenko, I.V. Construction of a mathematical model for the extraction of mineral raw materials. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci*. 2020, 613, 012154. https://doi.org/10.1088/1755-1315/613/1/012154

26. Pershin, I.; Sidyakin, P.; Belaya, E.; Shchitov, D. Modeling the formation of acoustic resonant waves in a closed space. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng*. 2019, 698, 077054. https://doi.org/10.1088/1757-899X/698/7/077054

27. Martirosyan, A.V.; Martirosyan, K.V.; Mir-Amal, A.M.; Chernyshev, A.B. Assessment of a Hydrogeological Object's Distributed Control System Stability. In Proceedings of the 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, St. Petersburg, Russia, 25–28 January 2022; pp. 768–771. https://doi.org/10.1109/ElConRus54750.2022.9755601

28. Grigoriev, V.V.; Bystrov, S.V.; Mansurova, O.K.; Pershin, I.M.; Bushuev, A.B.; Petrov, V.A. Exponential stability regions estimation of nonlinear dynamical systems. *Mekhatronika Avtom. Upr*. 2020, 21, 131–135. https://doi.org/10.17587/mau.21.131-135

29. Dagaev, A.; Pham, V.D.; Kirichek, R.; Afanaseva, O.; Yakovleva, E. Method of Analyzing the Availability Factor in a Mesh Network. *Commun. Comput. Inf. Sci*. 2022, 1552, 346–358. https://doi.org/10.1007/978-3-030-97110-6_27

30. Liashenko, A.L.; Pershin, I.M.; Moreva, S.L. Development of a Distributed System of Control of the Supply of the Coolant in Steam Generator Installations. In Proceedings of the 2020 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF), St. Petersburg, Russia, 1–5 June 2020; pp. 1–5. https://doi.org/10.1109/WECONF48837.2020.9131445

31. Fetisov, V.; Ilyushin, Y.V.; Vasiliev, G.G.; Leonovich, I.A.; Müller, J.; Riazi, M.; Mohammadi, A.H. Development of the automated temperature control system of the main gas pipeline. *Sci. Rep*. 2023, 13, 3092. https://doi.org/10.1038/s41598-023-29570-4 https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/36813790

32. Martirosyan, A.V.; Ilyushin, Y.V.; Afanaseva, O.V. Development of a Distributed Mathematical Model and Control System for Reducing Pollution Risk in Mineral Water Aquifer Systems. *Water* 2022, 14, 151. https://doi.org/10.3390/w14020151

33. Pershin, I.M.; Malkov, A.V.; Pomelyayko, I.S. Design of a Distributed Debit Management Network of Operating Wells of Deposits of the CMW Region. *Commun. Comput. Inf. Sci*. 2021, 1396, 317–328. https://doi.org/10.1007/978-981-16-1483-5_29

34. Satsuk, T.P.; Sharyakov, V.A.; Sharyakova, O.L.; Kovalev, D.A.; Vorob'ev, A.A.; Makarova, E.I. Erratum to: Automatic Voltage Stabilization of an Electric Rolling Stock Catenary System. *Russ. Electr. Eng*. 2021, 92, 349. https://doi.org/10.3103/S1068371221300015

35. Tsiglianu, P.; Romasheva, N.; Nenko, A. Conceptual Management Framework for Oil and Gas Engineering Project Implementation. *Resources* 2023, 12, 64. https://doi.org/10.3390/resources12060064

36. González de Vallejo, L.I.; Ferrer, M.; Ortuño, L.; Oteo, C. *Ingeniería Geológica*; Prentice Hall-Pearson Educación: Madrid, Spain, 2002; p. 750.

37. Ayvaz, M.T.; Karahan, H. A Simulation/Optimization Model for the Identification of Unknown Groundwater Well Locations and Pumping Rates. *J. Hydrol*. 2008, 357, 76–92. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.05.003

38. Ilyushin, Y.V.; Afanaseva, O.V. Development of scada-model for trunk gas pipeline's compressor station. *J. Min. Inst*. 2019, 240, 686–693. https://doi.org/10.31897/PMI.2019.6.686

39. Ilyushin, Y.V.; Asadulagi, M.-A.M. Development of a Distributed Control System for the Hydrodynamic Processes of Aquifers, Taking into Account Stochastic Disturbing Factors. *Water* 2023, 15, 770. https://doi.org/10.3390/w15040770

40. Li, Y.; Zhou, Z.; Zhuang, C.; Dou, Z. Estimating Hydraulic Parameters of Aquifers Using Type Curve Analysis of Pumping Tests with Piecewise-Constant Rates. *Water* 2023, 15, 1661. https://doi.org/10.3390/w15091661

41. Angelaki, A.; Bota, V.; Chalkidis, I. Estimation of Hydraulic Parameters from the SoilWater Characteristic Curve. *Sustainability* 2023, 15, 6714. https://doi.org/10.3390/su15086714

42. Pershin, M.I.; Papush, E.G.; Spivak, A.O. Approximation Models for the Hydrolitospheric Processes. In Proceedings of the 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon 2018), Vladivostok, Russia, 2–4 October 2018; pp. 1–6. https://doi.org/10.1109/FarEastCon.2018.8602437

43. Nosova, V.A.; Pershin, I.M. Determining the optimal number of wells during field development. In Proceedings of the 2021 4th International Conference on Control in Technical Systems (CTS 2021), St. Petersburg, Russia, 21–23 September 2021; pp. 42–44. https://doi.org/10.1109/CTS53513.2021.9562965

44. Ilyushin, Y.V.; Afanasieva, O.V. Synthesis of a distributed control system. *Int. J. Control Theory Appl*. 2016, 9, 41–60.

45. Asadulagi, M.M.; Ioskov, G.V. Simulation of the control system for hydrodynamic process with random disturbances. Topical Issues of Rational Use of Natural Resources. In Proceedings of the International Forum-Contest of Young Researchers, St. Petersburg, Russia, 18–20 April 2018; pp. 399–405.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0