

Исследование особенностей связи гидрогеологических объектов

А. В. Мартиросян¹, Т. В. Кухарова²

Санкт-Петербургский горный университет

¹ martalex11@mail.ru, ² kukharova_tv@mail.ru

М. С. Фёдоров

Санкт-Петербургский государственный

электротехнический университет

«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

mfd.sibur@gmail.com

Аннотация. В статье представлено новое перспективное исследование, направленное на изучение влияния параметров режима эксплуатации на гидродинамику связанных гидрогеологических объектов. Описаны предпосылки исследования и приведены аргументы, доказывающие его актуальность. Выполнена постановка задачи исследования. Проведен анализ методов математического моделирования, которые могут быть использованы для симуляции связи двух гидрогеологических объектов.

Ключевые слова: математическое моделирование; системы управления; месторождения минеральных вод; связь гидрогеологических объектов

I. ВВЕДЕНИЕ

Месторождения минеральных вод являются важным элементом сырьевой базы Российской Федерации (РФ). По данным на 2019 год, на территории страны функционировало 588 месторождений минеральных вод с общим суммарным дебитом 19,4 тыс. куб. м/сут. По данным отчета о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов российской федерации от 01.01.2020, на государственном балансе РФ зарегистрированы запасы минеральных вод в размере 296,5 тыс. куб. м/сут [1]. Наибольшим объемом запасов минеральных вод обладают Северо-Западный и Южный федеральные округа (рис. 1).



Рис. 1. Распределение эксплуатационных запасов минеральных вод по ФО РФ, тыс. куб. м/сут.

Несмотря на низкий показатель освоения запасов минеральных вод, который в 2019 году составил в среднем 7 % возможного объема добычи, сырьевой рынок минеральных вод ежегодно растёт на 3–4%.

Исследование выполнено за счет субсидии на выполнение государственного задания в сфере научной деятельности на 2021 год №FSRW-2020-001

Самый высокий объем добычи минеральных вод зафиксирован в Северо-Кавказском (СКФО) и Дальневосточном федеральных округах (рис. 2) (Источник: ГБЗ РФ (сводные данные)). Добыча минеральных вод в объеме, превышающем 0,5 тыс. куб. м/сут зафиксирована в Ставропольском крае, Кабардино-Балкарской Республике и Тюменской области [1].



Рис. 2. Распределение объема добычи минеральных вод по ФО РФ, тыс. куб. м/сут.

Ввиду следующих аспектов, предлагается более подробно рассмотреть месторождения Северо-Кавказского федерального округа:

1. Объем эксплуатационных запасов месторождений минеральных вод данного округа составляет только 14,1 % (41,9 тыс. куб. м/сут) от общего государственного запаса. В свою очередь, данный регион является лидером по объему добычи, который составляет 27,8 % (5,4 тыс. куб. м/сут) от суммарной добычи в РФ.

2. На территории СКФО находится особо охраняемый эколого-курортный регион Кавказские Минеральные Воды (КМВ). На территории данного региона находится более 120 месторождений минеральных вод, 5 из которых являются уникальными по химическому составу и не имеют аналогов в мире [2]. Ввиду особой ценности данных месторождений в регионе активно развиваются научные группы, занимающиеся разработкой новых методов моделирования и управления гидрогеологическими объектами.

3. Большинство месторождений данного региона имеют сложную гидрогеологическую структуру, обусловленную разнообразием геологической среды и изменчивостью ландшафта. В представленных условиях стандартные гидродинамические модели зачастую показывают недостаточную точность. Большая погрешность в процессе

расчета параметров добычи может привести к критическим нарушениям структурной целостности месторождения.

Представленные особенности месторождений региона КМВ подтверждают актуальность научных исследований в данной предметной области. За последние 20 лет были разработаны математические модели и системы управления для ряда месторождений региона (Кисловодское, Нагутское и др.) Исследования в данной области постоянно развиваются, так как с течением времени состояние ряда месторождений (Пятигорское, Ессентукское и др.) значительно ухудшается, что требует применения более точных методов расчета эксплуатационных параметров [4].

II. ОПИСАНИЕ ПРОБЛЕМЫ

В истории эксплуатации Нагутского месторождения минеральных вод произошел следующий инцидент: в процессе эксплуатации скважины произошла авария, вызвавшая самоизлив воды на поверхность. Нагутское месторождение характеризуется сложным гидрогеологическим строением ввиду нахождения на стыке тектонических плит. Добыча в данном месторождении ведется из скважин глубиной от 200 до 1500 метров. Вода из более глубоких водоносных горизонтов отличается высоким содержанием сульфатных соединений. В случае масштабного разлива воды с таким химическим составом почва становится непригодной для выращивания культур, а в некоторых случаях даже токсичной. Для ликвидации аварии и консервации скважины было использовано больше 100 тонн цемента. Одним из последствий аварии было исчезновение минеральной воды в бюветах Железноводска. Факт настолько сильного влияния на территориально удаленный объект стал предпосылкой к началу исследований связи между месторождениями.

Месторождения региона КМВ имеют гидравлическую связь, так как по всей площади региона добыча минеральной воды происходит из одних и тех же водоносных горизонтов. Примером служит добыча минеральной воды из титонского водоносного горизонта (J3tt). В районе Кисловодского месторождения откачка минеральной воды из титонского водоносного горизонта происходит на глубине от 800 до 1200 м. Из этого же водоносного горизонта на Нагутском месторождении добыча минеральных вод ведется на глубине от 1700 до 1800 метров. В свою очередь, мощность пласта в районе Кисловодского месторождения составляет от 100 до 900 метров, в то время как в Нагутском месторождении данный горизонт имеет стабильную по всей протяженности мощность в пределах 100–120 метров. Данные месторождения производят добычу минеральных вод на расстоянии 70 километров друг от друга.

На текущий момент исследований в данной области практически нет. Это может быть обусловлено следующими факторами:

1. Как было описано ранее в статье: показатель освоения запасов минеральных вод в 2019 году составил в среднем 7 % возможного объема добычи, что свидетельствует о том, что на данный момент объем значительно превышает спрос на данный ресурс. Данное

суждение справедливо, но необходимо учитывать, что, несмотря на усредненный показатель, локальный спрос на уникальные типы вод (Кисловодский Нарзан, Ессентуки 4, Ессентуки 17 и др.) постоянно растёт. Предприятия вынуждены постоянно искать способы наращивания объемов добычи с минимизацией рисков нарушения структурной целостности месторождений.

2. На территории РФ находится не так много месторождений, находящихся в такой территориальной близости друг к другу. Учитывая низкую динамику геофильтрационных процессов, любой устойчивый режим эксплуатации не будет оказывать влияние на объект находящийся на расстоянии свыше 200 километров. Большинство месторождений на территории страны имеют небольшую глубину залегания и активно подпитываются осадками и грунтовыми водами, что в случае больших расстояний может нивелировать перепад уровня в случае постоянной добычи.

3. Объем добычи минеральной воды составляет только 13% от общего объема использования сырьевой базы. Основной объем добычи составляют теплоэнергетические (66%) и питьевые/технические подземные воды (21%). Ввиду большого количества объемов и сравнительно низкого уровня спроса, добыча данных видов вод происходит в «спокойном» режиме. При отсутствии сложной геологической структуры, необходимости добычи из глубоких скважин и постоянной необходимости наращивания объемов, применение методов автоматизации, мониторинга или проведение дополнительных исследований и испытаний не является рентабельным [8]. В случае обнаружения каких-либо вышеуказанных проблем, экономически более эффективным вариантом является бурение новой скважины в более благоприятном регионе, чем проведение долговременных и дорогостоящих исследований по возможности адаптации технологического процесса к нестандартным условиям.

Далее предлагается выполнить постановку задачи исследования взаимосвязи месторождений минеральных вод.

III. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Цель исследования – разработать метод моделирования влияния параметров режима эксплуатации на гидродинамику связанных гидрогеологических объектов.

Для реализации поставленной цели необходимо выполнить ряд задач:

1. Определить характер и закономерности влияния параметров режима эксплуатации одного месторождения минеральных вод на другое.

2. Выполнить математическое описание влияния параметров режима эксплуатации одного месторождения минеральных вод на другое.

3. Провести анализ возможных методов моделирования связи гидрогеологических объектов.

4. Разработать систему автоматического управления, способную учитывать связь объекта управления с другими

объектами для корректировки параметров эксплуатации месторождения.

IV. МЕТОДЫ

Предлагается определить набор методов, посредством которых возможно описать влияние параметров режима эксплуатации на гидродинамику связанных гидрогеологических объектов.

В первую очередь было принято решение о выборе коэффициентов и параметров, посредством изменения которых можно задать характер и интенсивность взаимовлияния. В качестве основы описания гидродинамических процессов были выбраны следующие параметры:

- геометрические параметры объектов;
- расстояние между объектами;
- мощность пласта;
- коэффициент упругости пласта;
- коэффициент фильтрации;
- коэффициент перетекания;
- природные факторы;
- антропогенные факторы.

Представленный набор параметров используется в большинстве методов моделирования гидродинамических процессов. Комбинирование или использование всех параметров дает возможность многоаспектного описания как процессов, происходящих внутри месторождения, так и его реакции на воздействие внешних факторов.

Далее был проведен первичный анализ, в результате которого был определен набор методов, позволяющих рассчитать корректировочные параметры процесса добычи с учетом влияния одного гидрогеологического объекта на другой. Далее представлены краткая концепция и перспективы применения каждого метода.

A. Поправочный коэффициент

Разработка вычисляемого поправочного коэффициента, посредством которого может проводиться корректировка параметров режима эксплуатации может стать наиболее простым решением поставленной задачи. Использование такого коэффициента в расчетах параметров добычи не требует вмешательства или внесения изменений в технологический процесс. Проблемами применения данного метода являются:

- разработка нового коэффициента, позволяющего достоверно отражать интенсивность взаимовлияния двух гидрогеологических объектов, это многокомпонентный процесс, требующий абсолютного понимания гидродинамики объекта. Даже в случае успеха потребуется много времени, чтобы провести апробацию на реальных объектах, доказать целесообразность применения и внедрить его в практику расчета параметров добычи;

- для упрощения моделирования гидродинамические процессы часто представляют линейными, что допустимо в случае достаточной сходимости модельных и реальных данных. Допустимые показатели точности достигаются путем анализа большого количества ретроспективных данных. Несмотря на объективные преимущества данной концепции, на данный момент нет полной уверенности, что взаимовлияние группы связанных месторождений может быть описано вычисляемым коэффициентом.

B. Геофильтрационные модели

Одним из наиболее перспективных методов описания взаимовлияния гидрогеологических объектов является метод геофильтрационного моделирования.

Классический пример геофильтрационной модели представлен выражениями 1–4. Эффективность применения данного метода для описания гидродинамических процессов представлена в работах [5], [6], [7]. Объект представляется в виде совокупности граничных условий и системы уравнений в частных производных второго порядка, разработанной на основе уравнений теплопроводности [3].

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial S_1}{\partial t} &= \frac{1}{\eta_1} * \left(\frac{\partial(k_{x1} \cdot \partial S_1)}{\partial x^2} + \frac{\partial(k_{y1} \cdot \partial S_1)}{\partial y^2} + \frac{\partial(k_{z1} \cdot \partial S_1)}{\partial z^2} \right); \\ \frac{\partial S_2}{\partial t} &= \frac{1}{\eta_2} * \left(\frac{\partial(k_{x2} \cdot \partial S_2)}{\partial x^2} + \frac{\partial(k_{y2} \cdot \partial S_2)}{\partial y^2} + \frac{\partial(k_{z2} \cdot \partial S_2)}{\partial z^2} \right) - \\ &- F_{x2} \cdot \frac{\partial S_2}{\partial x} \frac{\partial S_3}{\partial t} - \hat{S}(t) \cdot \delta(x_j, y_j, z_j); \\ &\dots \\ \frac{\partial S_n}{\partial t} &= \frac{1}{\eta_n} * \left(\frac{\partial(k_{xn} \cdot \partial S_n)}{\partial x^2} + \frac{\partial(k_{yn} \cdot \partial S_n)}{\partial y^2} + \frac{\partial(k_{zn} \cdot \partial S_n)}{\partial z^2} \right); \end{aligned} \right. \quad (1)$$

$$0 < x < L_x, 0 < y < L_y, 0 < z < L_z,$$

где S_j – понижение уровня, м; j – индекс пласта; k_x, k_y, k_z – коэффициенты фильтрации, м/сут; η_j – упругость пласта, м²/сут; F – скорость потока, м/сут. Данный параметр присутствует только в уравнениях системы, описывающих водоносные слои месторождения. Скорость потока в водонепроницаемых пластах принята равной 0; $\hat{S}(t)$ – управляющее воздействие, которое с использованием дельта-функции возможно приложить в любой точке дискретизации. В точке воздействия дельта-функция равна единице ($\delta(x, y, z) = 1$), в остальных случаях $\delta(x, y, z) = 0$.

Начальные условия представлены как:

$$\begin{aligned} S_j(x, y, z, 0) &= 0; \\ 0 < x < L_x, \quad 0 < y < L_y, \quad 0 < z < L_z, \\ j &= (1, 2 \dots n). \end{aligned} \quad (2)$$

Граничные условия, описывающие крайние поверхности пластов имеют вид:

$$\begin{aligned} k_z \frac{\partial S_j(x, y, L_z, t)}{\partial z} &= k_z \frac{\partial S_j(x, y, L_z, t)}{\partial z}; \\ \frac{\partial S_j(x, y, z, t)}{\partial z} &= 0; \\ \frac{\partial S_n(x, y, L_z, \tau)}{\partial z} &= 0; \\ S_j(x, 0, z, \tau) &= S_j(x, L_y, z, \tau) = S_j(0, y, z, \tau), \\ 0 < x < L_x, \quad 0 < y < L_y, \quad j &= (1, 2 \dots n). \end{aligned} \quad (3)$$

Связь соседних пластов описывается с помощью уравнений Дарси и имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} S_j(x, y, L_z, \tau) &= S_j(x, y, L_z, \tau) + \\ &+ b_j(S_{j+1}(x, y, 0, \tau) - S_j(x, y, L_z, \tau)); \\ S_{j+1}(x, y, 0, \tau) &= S_{j+1}(x, y, 0, \tau) - \\ &- b_j(S_{j+1}(x, y, 0, \tau) - S_j(x, y, L_z, \tau)), \end{aligned} \quad (4)$$

где $j = (1, 2 \dots n)$.

В классическом методе геофильтрационного моделирования месторождение описывается как одиночный объект, внешнее воздействие на который задано граничными условиями, а также входным и управляющим воздействием. Данная концепция не подразумевает включение в модель еще одного объекта (системы уравнений). С другой стороны, данный метод представляет объект, как совокупность скважин, расположенных в прямоугольной фигуре конечных размеров. Такой уровень абстракции дает возможность представить второй объект в виде удаленной группы скважин. В качестве исходных данных модели используются реальные геометрические параметры объекта. Влияние другого гидрогеологического объекта может быть представлено как входное воздействие поданного не на одну из группы скважин месторождения, а в скважину, находящуюся на расстоянии. Таким образом возможно проследить динамику изменения уровня жидкости в пласте, представляя два объекта, как две (или более) скважины. Для большего соответствия модельного объекта реальному возможно менять параметры модели в точках дискретизации между рассматриваемыми скважинами, что позволит отразить геологические и гидродинамические отличия объектов.

Недостатком данного метода является необходимость закупки и установки дополнительного программного и аппаратного обеспечения, полноценное внедрение которого требует установку и использование разработанного программного обеспечения профильными предприятиями.

С. Регрессионный анализ

Методы регрессионного анализа активно применяются для прогноза уровня воды в скважинах или группе скважин в условиях влияния внешних факторов. Наиболее значимые исследования в данной области были проведены на базе ОАО «Нарзан» применительно к Кисловодскому месторождению минеральных вод [2]. Предлагается более подробно рассмотреть одну из разработанных моделей.

Основой модели является уравнение, описывающее динамику уровня подземных вод в i -ой скважине, которое имеет следующий вид:

$$H_i = H_0 + aW_1 + bW_2 + cW_3 - \sum(\beta Q_j) - \gamma Q_n,$$

где H_0 - начальный уровень воды в скважине; W_1 - объем осадков текущего месяца; W_2 - объем осадков прошлого месяца; W_3 - объем осадков позапрошлого месяца; Q_j - дебит j -ой скважины; Q_n - дебит скважин Нарзан; a, b, c, β, γ - коэффициенты регрессии.

Путем изменения коэффициентов регрессии возможна корректировка степени влияния конкретного фактора на изменение уровня воды в скважине. В результате анализа внешних факторов было установлено, что наиболее значимым фактором, влияющим на уровень воды в месторождении, являются атмосферные осадки. Атмосферные осадки текущего месяца в большей степени влияют на уровень рек и грунтовых вод, а осадки прошлого месяца больше влияют на интенсивность инфильтрационного питания. Количественная оценка данных факторов в совокупности с учетом взаимовлияния скважин дает возможность прогнозирования изменений уровня воды с учетом воздействия процесса эксплуатации.

У данного метода есть несколько недостатков:

- необходимость большого объема исходных данных, что потребует проведения дополнительных опытно-фильтрационных и измерительных работ;
- высокая сложность и стоимость внедрения системы мониторинга на основе регрессионной модели ввиду необходимости организации бесперебойного процесса считывания и обработки данных;
- отсутствие возможности использования разработанной модели в качестве основы системы автоматического управления параметрами режима эксплуатации.

Несмотря на выявленные недостатки при решении поставленной задачи, данный метод может быть полезен для поиска и расчета закономерностей взаимовлияния соседних месторождений.

Д. Символьные вычисления

Использование методов символьных вычислений для решения задач расчета гидродинамических параметров

является качественно новым и экспериментальным подходом к моделированию гидродинамических процессов. Концепция применения данного метода заключается в возможности представить процесс взаимодействия нескольких гидрогеологических объектов, параметров режима эксплуатации и внешних факторов, как совокупность логических отношений. В случае достоверного отражения семантики объекта, применение данного метода способно значительно ускорить процесс вычислений. Недостатком геофильтрационных моделей, наиболее часто применяемых для моделирования гидродинамических процессов, это значительное увеличение времени расчета при добавлении дополнительных параметров. Успешная реализация данного подхода может дать возможность одновременного учета в модели огромного набора факторов, параметров и показателей, в условиях ограничений на время вычислений.

Недостатком данного метода является высокая сложность описания природных процессов и внешних воздействий, как единого вычислительного алгоритма. Параметрические возмущения и неопределенность природных факторов значительно усложняют процесс определения логических связей между объектами и факторами потенциальной модели.

V. ОБСУЖДЕНИЕ

Автоматизация и информатизация сырьевой области является популярным и актуальным направлением научных исследований. Учитывая постоянно растущий спрос на минеральную и питьевую воды, предприятия вынуждены работать на верхних отметках допустимых объемов добычи. Применение современных методов моделирования, прогнозирования и расчета могут значительно повысить экономическую эффективность деятельности профильных предприятий.

Представленное исследование актуально не только для месторождений региона Кавказских минеральных вод. В случае успешной реализации результаты могут быть масштабированы на любой комплекс месторождений мира. 20 лет назад профильные предприятия начали постепенное внедрение информационных технологий в процесс добычи минеральных вод. На данный момент, практически все организации данной отрасли используют системы прогнозирования, мониторинга (SCADA-системы) и системы автоматического управления. Управление месторождением как единым объектом, а не совокупностью скважин позволяет повысить точность вычисления целевых значений. Следующим этапом может быть разработка системы управления комплексом месторождений минеральных вод. Применение такой системы позволит значительно повысить качество оценки комплексного состояния гидроминеральной базы региона, упростит государственный контроль объемов добычи и обеспечит возможность оперативного реагирования на отклонения от заданных контрольных параметров.

Несмотря на существующую вероятность того, что влияние одного гидрогеологического объекта на другой

незначительно и должно быть учтено только для редких пар/групп объектов, решение данной научной задачи необходимо. Если плановая интенсивность добычи на одном месторождении слабо влияет на соседние, то в случае аварийной ситуации или консервации месторождения необходимо иметь возможность прогнозирования последствий. Четкое понимание природы взаимосвязи месторождений позволит значительно снизить риски критических изменений в гидродинамике соседних объектов в случае ликвидации или консервации скважин.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлено новое направление исследований в области управления и контроля месторождений минеральных вод. Выполнена постановка задачи исследования. Для решения поставленной задачи предложен набор методов моделирования, способных достаточно точно описать взаимодействие двух гидрогеологических объектов. Для каждого метода проведен краткий анализ преимуществ и недостатков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Аксенов С.А., Мельников П.Н., Алексеев Я.В., Милетенко Н.В., Анненков А.А., Орел А.В., Варламов А.И., Порожун В.И., Давыденко Б.И., Петров Е.И., Данилов А.П., Петров С.В., Ерофеева Н.Л., Рогожин А.А., Зублюк Е.В., Руднев А.В., Иванов А.И., Сарычева Е.С., Казанов О.В., Скворцов М.Б., Каспаров О.С., Спектор С.В., Киржиганов М.Г., Танин Е.В., Козловский Д.С., Темнов А.В., Куликов Д.А., Черных А.И., Лаптева А.М., Чернова А.Д. О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2019 году: Государственный доклад. Москва: Всероссийский институт минерального сырья, 2020. 498 с.
- [2] Помеляйко И.С., Малков А.В. / Проблемы качества поверхностных и подземных вод курортов региона Кавказских Минеральных Вод и пути их решения // Водные ресурсы. 2019. Т. 46. №2. С. 178-190. doi: 10.31857/S0321-0596462178-190
- [3] Ilyushin Y.V., Novozhilov I.M. Temperature Field Control of a Metal Oil-well Tubing for Producing of High-Paraffin Oil // Proceedings of 2020 23rd International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2020, 2020, P. 149–152.
- [4] Ilyushin Y., Afanaseva O. Development of a spatial-distributed control system for preparation of pulse gas // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM, 2020, 2020-August(2.1), P. 475–482.
- [5] Ilyushin Y., Afanaseva O. Modeling of a spatial distributed management system of a preliminary hydro-cleaning gasoline steam column // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM, 2020, 2020-August(2.1), P. 531–538.
- [6] Martirosyan K.V., Chernyshev A.B., Martirosyan A.V., Tatyana, K.V. Formation of the Anterior Heating Function under the Action of Uniformly Distributed Sources // Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIConRus 2020, 2020, P. 755–760.
- [7] 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.
- [8] Vasilenko N., Khaykin M., Kirsanova N., Lapinskas A., Makhova L. Issues for development of economic system for subsurface resource management in Russia through lens of economic process servitization // International Journal of Energy Economics and Policy, 2020, 10(1), P. 44–48.