

На правах рукописи

Литвинова Виктория Андреевна



**МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОЛИТОСФЕРНОГО
МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАВКАЗСКИХ МИНЕРАЛЬНЫХ
ВОД С УЧЕТОМ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ**

*Специальность 2.3.1. Системный анализ, управление и об-
работка информации, статистика*

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2026

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент

Ильюшин Юрий Валерьевич

Официальные оппоненты:

Саратова Татьяна Евгеньевна

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет», кафедра прикладной математики, заведующий кафедрой;

Ремизова Ольга Александровна

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)», кафедра автоматизации процессов химической промышленности, доцент.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», Санкт-Петербург.

Защита состоится **16 сентября 2026 года в 13:30** на заседании диссертационного совета ГУ.12 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 1171.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 16 июля 2026 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ВАСИЛЬЕВА
Наталья Васильевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. На сегодняшний день, подземные воды, играют важную роль в качестве гидроминерального сырья. Они считаются наиболее перспективными источниками гидроминеральных ресурсов благодаря своим бальнеологическим свойствам.

Среди наиболее известных российских курортных регионов выделяется Кавказские Минеральные Воды, ставшие одним из ключевых центров лечения и отдыха.

В последние годы наблюдается стремительный рост туристического потока в регион, что усиливает необходимость поиска решений по оптимизации процесса добычи гидроминерального сырья. Особенно актуальными становятся вопросы рационального использования ресурсов, обеспечения устойчивости добывающих скважин, сохранения их эксплуатационной стабильности и бальнеологических свойств минеральной воды. В связи с этим важной задачей является разработка методов повышения эффективности добычи, а также мер по сохранению текущих скважин и предотвращению их преждевременного износа.

Данные исследования проводятся в рамках соглашения о сотрудничестве между Санкт-Петербургским горным университетом императрицы Екатерины II и АО «Нарзан» от 3 сентября 2015 года.

Степень научной разработанности темы исследования.

Первые исследования в области анализа гидрогеологических процессов принадлежат Бернулли Эйлеру. В основополагающем труде «Гидродинамика, или Записки о силах и движениях жидкостей» изданной в 1778 г. была заложена основа для описания «водных» процессов в «земной коре». В данной работе были впервые предложены дифференциальные уравнения гидродинамики Эйлера. В последующих работах данная группа уравнений претерпевала ряд изменений и дополнений. В частности, в работе Ландау Л.Д., Лифшица Е.М. «Гидродинамика», авторы, описали принципы поведения гидродинамических объектов. Особенно необходимо отметить работу Левина В.Г. «Физико-химическая гидродинамика», излага-

ются основы нового научного направления, возникшего на стыке физики и химии. Книга показывает, как движение жидкости влияет на химические реакции и физико-химические процессы, и, наоборот, как физико-химические свойства жидкости влияют на её движение. В 1912 году была издана одна из первых работ посвященная описанию гидрогеологических процессов в регионе Кавказских Минеральных Вод. Необходимо отметить работы следующих авторов Губкин И.М. Камартдинов М.Р., Пиннекер Е.В., Порошин Ю.В., Пресняков Е.А., Пчелинцев В.Ф., Васильевский М.М., Васильевский П.М., Гатуев С.А., Жириунский А.М., Жуков В.А., Зеленин П.Г., Игнатович Н.К., Лебедев Г.А., Лихарев Б.К., Саваренский Ф.П., Смолко Г.И., Терлецкий Б.К., Кулагина Т.Е., Мангазеев П.В., Панков М.В. Бобков Н.В., Буренин Г.С., Бутов П.И., Мазарович А.Н., Погребов Н.Ф., Фредерике Г.Н., Штукенберг А.А., Щеголев Д.И., Юдин Г.Л.

Основным недостатком всех перечисленных и проанализированных работ является учет только сезонных факторов, влияющих на состав гидроминерального сырья. К сожалению, в рамках быстрой застройки территории и развития промышленного комплекса, множество факторов не учитывается в данных системах, а часть из них, которая носит случайных (неопределённый) характер, исключается на этапе обработки статистических данных. Это делает невозможным прогнозирование уровня добычи на большой срок.

В данном исследовании предложен подход к организации и управлению процессом добычи гидроминерального сырья на примере ООО «Нарзан-гидроресурсы». Процедура для определения параметров модифицированного звена, учитывающего статические и динамические характеристики гидролитосферного процесса при различных коэффициентах фильтрации по пространственным координатам, была разработана в рамках данной задачи.

Объект исследования - добывающие скважины расположенные на территории ООО «Нарзан-гидроресурсы», Ставропольский край, г. Кисловодск.

Предмет исследования - гидродинамические процессы Кисловодского месторождения минеральных вод, с использованием методов исследования распределенных систем.

Целью исследования является разработка алгоритма определения параметров модифицированного звена, описывающего статические и динамические показатели гидrolитосферного процесса, при различных коэффициентах фильтрации по пространственным координатам.

Идея заключается в усовершенствовании методики определения и обоснования количества добывающих скважин, за счет применения модифицированного аппроксимирующего звена, описывающего статические и динамические характеристики гидrolитосферного процесса, при различных коэффициентах фильтрации по пространственным координатам.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается решением следующих задач.

1. Выполнить многомерный корреляционно-регрессионный анализ для идентификации ключевых факторов, влияющих на эффективность добычи.

2. Разработать математическую модель системы управления процессом эксплуатации скважин, адекватно отражающую сезонные процессы и неопределенности.

3. Построить и верифицировать схему дискретной модели месторождения.

4. Разработать и апробировать методику определения параметров модифицированного аппроксимирующего звена на основе данных опытно-фильтрационных работ (ОФР).

5. Показать эффективность разработанной процедуры для решения практической задачи оптимизации количества добывающих скважин.

6. Сформировать рекомендации по повышению эффективности процесса добычи, с учетом влияющих факторов.

Научная новизна работы:

Разработана специализированная структура модифицированного распределенного звена, предназначенная для аппроксимации статических и динамических характеристик исследуемого процесса гидrolитосферной системы. Структура учитывает вариации параметров по осям x и y , что позволяет моделировать пространственные особенности реальных процессов.

Предложен метод определения параметров модифицированного распределенного звена, основанный на результатах опытно-фильтрационных работ (ОФР). Этот метод позволяет получать точные оценки и параметры модели, исходя из экспериментальных данных, что повышает надежность и практическую применимость модели.

Таким образом, разработанный подход предоставляет эффективный инструмент для более точного описания и прогнозирования гидролитосферных процессов, что существенно способствует развитию теоретической и прикладной гидрогеологии.

Соответствие паспорту специальности:

Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика по пунктам:

1. Теоретические основы и методы системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта.

3. Разработка критериев и моделей описания и оценки эффективности решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта.

11. Методы и алгоритмы прогнозирования и оценки эффективности, качества, надежности функционирования сложных систем управления и их элементов.

17. Прикладные статистические исследования, направленные на выявление, измерение, анализ, прогнозирование, моделирование складывающейся конъюнктуры и разработки перспективных вариантов развития сложных систем.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Разработан метод синтеза распределенных регуляторов для систем управления совокупностью добывающих скважин, при различных коэффициентах фильтрации по пространственным координатам рассматриваемого гидролитосферного процесса.

2. Разработан метод определения оптимального числа добывающих скважин на рассматриваемом отрезке, с учетом различных коэффициентов фильтрации по пространственным координатам.

Методология и методы исследования.

Для реализации исследования были применены различные методы, такие как методы исследования и синтеза распределенных систем управления. В рамках работы выполнена аппроксимация как динамических, так и статических характеристик гидролитосферных процессов, что позволило решить задачу оптимизации числа добывающих скважин на рассматриваемом отрезке, и задачу синтеза распределенного регулятора. Использование этих методов обеспечило комплексный и научно обоснованный подход к исследованию рассматриваемых гидролитосферных процессов, и решению задачи управления совокупностью добывающих скважин.

Положения, выносимые на защиту:

1. Метод синтеза распределенных систем управления гидролитосферными процессами при различных коэффициентах фильтрации по пространственным координатам, с использованием модифицированного аппроксимирующего звена, которое, позволяет учитывать анизотропию фильтрационных свойств пласта и описывать как статические, так и динамические характеристики объекта, на основе данных опытно-фильтрационных работ.

2. Метод определения оптимального числа скважин на рассматриваемом отрезке, базирующийся на матричном уравнении гидравлического взаимодействия скважин, что позволяет учитывать анизотропию коэффициентов фильтрации по пространственным координатам.

Апробация результатов диссертации

Рассматриваемая работа докладывалась на следующих конференциях:

1. Актуальные вопросы современной науки и образования. I Международной научно-практической конференции. Пенза.

2. Актуальные вопросы современных научных исследований. XX Международной научно-практической конференции. Пенза, 2025.

3. Всероссийская научная конференция по проблемам управления в технических системах. г. Санкт-Петербург, 2025.

4. Международная научная конференция по проблемам управления в технических системах. г. Санкт-Петербург, 2025.

5. Системный синтез и прикладная синергетика. XI Всероссийская научная конференция. Ростов-на-Дону - Таганрог, 2022.

6. Анализ и прогнозирование систем управления в промышленности, на транспорте и в логистике. XXII Международная научно-практическая конференция молодых ученых, студентов и аспирантов. Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I. г. Санкт-Петербург, 2022.

7. Системный синтез и прикладная синергетика. X Всероссийской научной конференции. Ростов-на-Дону, Таганрог, 2021.

8. Proceedings of 2021 IV International Conference on Control in Technical Systems (CTS). IEEE, г. Санкт-Петербург, 2021.

9. Международная научная конференция по проблемам управления в технических системах. г. Санкт-Петербург, 2021.

Личный вклад автора заключается в определении целей и задач диссертационного исследования, анализе научной литературы (как зарубежной и отечественной) по рассматриваемой теме, а также в разработке концептуальной модели системы управления процессом добычи гидроминеральных ресурсов в регионе Кавказских Минеральных Вод (КМВ). Кроме того, автор представил динамическую математическую модель эксплуатации добывающих скважин ООО «Нарзан-гидроресурсы», провел серию численных исследований и выявил основные факторы, определяющие эффективность процесса добычи и качество сырья. Разработал методику определения параметров модернизированного аппроксимирующего звена.

Публикации.

Результаты диссертационного исследования достаточно подробно отражены в 8 печатных работах, в том числе в 5 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук (далее – Перечень ВАК), в 3 статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получен 1 патент на изобретение.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 108 наименований, списка иллюстрационного материала и приложения. Диссертация изложена на 129 страницах

машинописного текста, содержит 57 рисунков и 13 таблиц.

Благодарности. Автор диссертации выражает благодарность коллективу кафедры системного анализа и управления Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II за помощь в выборе направлений для исследования, аспирантам за поддержку в период работы над диссертацией и сотрудникам ООО «Нарзан-гидроресурсы», д.г-м.н., профессору, Малкову А.В. и лично, директору ООО «Нарзан-гидроресурсы» Дубогрею Виталию Федоровичу, за помощь и предоставлении информации о физических процессах, протекающих в рассматриваемых водоносных горизонтах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена актуальность диссертационного исследования, определены цели, задачи.

В первой главе проведён анализ организационной структуры ООО «Нарзан-гидроресурсы», его элементов управления и задач. Представлен краткий обзор истории, направления деятельности и значения для региона. Также описаны физико-географические особенности территории, климат, природные ресурсы и геолого-экологические условия, что помогает понять контекст исследования.

Во второй главе представлен обзор литературных источников, исследований, патентов и материалов по добыче гидроминерального сырья. Рассмотрены методы гидравлического взаимодействия между скважинами с моделированием коэффициентов и графиков. Выявлены ключевые факторы, влияющие на эффективность и безопасность технологий, а также оценена точность моделей.

В третьей главе описано проектирование распределённой системы управления дебитом скважин для стабилизации добычи. Выполнена аппроксимация характеристик для создания точных моделей поведения объекта. Представлена схема расположения скважин, рассчитано влияние их географического положения на дебит, что помогает определить роль каждого элемента системы и разработать рекомендации по управлению.

В четвёртой главе предложено решение задачи оптимизации количества скважин для повышения экономической эффективности на месторождении. Использованы математические модели для опре-

деления оптимального числа и расположения скважин с учетом технологических, экономических и экологических факторов. Итоги помогают разработать стратегию эффективного использования ресурсов - увеличения прибыли.

В заключении представлены основные результаты, полученные в ходе исследований.

Основные результаты представлены в следующих защищаемых положениях.

1. Метод синтеза распределенных систем управления гидролитосферными процессами при различных коэффициентах фильтрации по пространственным координатам, с использованием модифицированного аппроксимирующего звена, которое, позволяет учитывать анизотропию фильтрационных свойств пласта и описывать как статические, так и динамические характеристики объекта, на основе данных опытно-фильтрационных работ.

Математическое моделирование гидролитосферных процессов в рассматриваемом месторождении можно записать в виде выражений (1, 2):

Верхний валанжин

$$\frac{\partial H_2(x,y,z,\tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{\eta^2} \left(k_{1,x} \frac{\partial^2 H_1(x,y,z,\tau)}{\partial x^2} + k_{1,y} \frac{\partial^2 H_1(x,y,z,\tau)}{\partial y^2} + k_{1,z} \frac{\partial^2 H_1(x,y,z,\tau)}{\partial z_1^2} \right), 0 < x < L_x, 0 < y < L_y, 0 < z < L_{z_1} \quad (1)$$

Нижний валанжин

$$\frac{\partial H_2(x,y,z,\tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{\eta^2} \left(k_{2,x} \frac{\partial^2 H_2(x,y,z,\tau)}{\partial x^2} + k_{2,y} \frac{\partial^2 H_2(x,y,z,\tau)}{\partial y^2} + k_{2,z} \frac{\partial^2 H_2(x,y,z,\tau)}{\partial z_2^2} \right) + V \times \delta(x_0, y_0), 0 < x < L_x, 0 < y < L_y, L_{z_1} < z < L_{z_2} \quad (2)$$

где: H_i – напор в изучаемом i -м водоносном горизонте ($i=1,2$) м.;

- $k_{i,x}, k_{i,y}, k_{i,z}$ – коэффициенты фильтрации по пространственным координатам i -го пласта ($i=1,2$) м/сут.;

- η_i – упругость i -го пласта ($i=1,2$) 1/м.;

- $V = -Q \times K_\phi$ – влияние эксплуатируемой скважины на напор (Q – дебит добывающей скважины м³/сут., K_ϕ – заданный безразмерный коэффициент);

- $\delta(x_0, y_0)$ – функция, равная единице, если $x=x_0, y=y_0$ и равная

нулю в других случаях (в рассматриваемой скважине 107Д осуществляется совершенный водозабор);

- x, y, z – пространственные координаты в м.;
- L_x, L_y, L_{z1}, L_{z2} – заданные значения в м.;
- τ – время (сут.)

Граничные условия между пластами определяются условиями Дарси

(3, 4):

$$H_1(x, y, L_{z1}, r) = H_1(x, y, L_{z1}, r) + b_1 \times (H_2(x, y, 0, r) - H_1(x, y, L_{z1}, r)) \times \partial r \quad (3)$$

$$H_2(x, y, 0, r) = H_2(x, y, 0, r) - b_1 \times (H_2(x, y, 0, r) - H_1(x, y, L_{z1}, r)) \times \partial r \quad (4)$$

переменная b_1 описывает параметр перетекания.

$$\text{Верхняя граница верхнего пласта (5): } \partial H_1(x, y, 0, r) / \partial z = 0 \quad (5)$$

$$\text{Нижняя граница нижнего пласта (6): } \partial H_2(x, y, L_{z2}, r) / \partial z = 0 \quad (6)$$

Боковые грани описываются в виде (7)

$$H_1(0, y, z, r) = H_{1,0}, H_2(0, y, z, r) = H_{2,0} \\ \partial H_1(L_x, y, z, r) / \partial x = 0, \partial H_2(L_x, y, z, r) / \partial x = 0. \quad (7)$$

Параметры моделирования L_x и L_y были выбраны исходя из условия, что возмущающие воздействия от добывающей скважины оказывают малое воздействие на граничные условия пласта (8):

$$H_i(x, 0, z, r) = H_i(x, L_y, z, r) = H_{i,0}(x, y, z, r), (i = 1, 2) \quad (8)$$

где $H_{1,0}, H_{2,0}$ – начальные состояния грунтовых вод и пластов, которые описываются в виде (9):

$$H_{2,0}(x, y, z, 0) = 193 - 50 \times x / L_x, 0 \leq x \leq L_x, 0 \leq y \leq L_y, 0 \leq z \leq L_{z2} \quad (9)$$

Запишем дискретный аналог приведенной выше модели.

Верхний валанжин (10)

$$\frac{\Delta H_{1,\eta,\gamma,\xi}}{\Delta r} = \frac{1}{\eta_1} \left(k_{1,x} \frac{H_{1,\eta-1,\gamma,\xi} - 2 \cdot H_{1,\eta,\gamma,\xi} + H_{1,\eta+1,\gamma,\xi}}{(\Delta x)^2} + k_{1,x} \frac{H_{1,\eta-1,\gamma,\xi} - 2 \cdot H_{1,\eta,\gamma,\xi} + H_{1,\eta+1,\gamma,\xi}}{(\Delta y)^2} + \right. \\ \left. + k_{1,x} \frac{H_{1,\eta,\gamma,\xi-1} - 2 \cdot H_{1,\eta,\gamma,\xi} + H_{1,\eta,\gamma,\xi+1}}{(\Delta z_1)^2} \right) \quad (10)$$

$$2 < \eta < N_x - 1, \quad 2 < \gamma < N_y - 1, \quad 2 < \xi < N_z - 1$$

Нижний валанжин (11)

$$\frac{\Delta H_{2,\eta,\gamma,\xi}}{\Delta r} = \frac{1}{\eta_2} \left(k_{2,x} \frac{H_{2,\eta-1,\gamma,\xi} - 2*H_{2,\eta,\gamma,\xi} + H_{2,\eta+1,\gamma,\xi}}{(\Delta x)^2} + k_{2,x} \frac{H_{2,\eta-1,\gamma,\xi} - 2*H_{2,\eta,\gamma,\xi} + H_{2,\eta+1,\gamma,\xi}}{(\Delta y)^2} + \right. \\ \left. + k_{2,x} \frac{H_{2,\eta,\gamma,\xi-1} - 2*H_{2,\eta,\gamma,\xi} + H_{2,\eta,\gamma,\xi+1}}{(\Delta z)^2} \right) \quad (11)$$

$$2 < \eta < N_x - 1, 2 < \gamma < N_y - 1, 2 < \xi < N_z - 1$$

где N_x, N_y – количество дискретных точек по осям x и y ;

- N_{zi} – количество точек дискретизации для пласта i по z ($i=1,2$).

Граничные условия между пластами описаны в (12, 13)

$$H_{1,\eta,\gamma,N_{z1}} = H_{1,\eta,\gamma,N_{z1}} + b_1 \times (H_{2,\eta,\gamma,1} - H_{1,\eta,\gamma,N_{z1}}) \times \Delta r \quad (12)$$

$$H_{2,\eta,\gamma,N_{z1}} = H_{2,\eta,\gamma,N_{z1}} - b_1 \times (H_{2,\eta,\gamma,1} - H_{1,\eta,\gamma,N_{z1}}) \times \Delta r \quad (13)$$

Верхняя граница верхнего пласта (14)

$$H_{1,\eta,\gamma,1} = H_{1,\eta,\gamma,2}, \quad 2 < \eta < N_x - 1, \quad 2 < \gamma < N_y - 1 \quad (14)$$

Нижняя граница нижнего пласта (15)

$$H_{2,\eta,\gamma,N_{z2}} = H_{2,\eta,\gamma,N_{z2}-1}, \quad 2 < \eta < N_x - 1, \quad 2 < \gamma < N_y - 1, \quad (15)$$

$$H_{2,\eta,\gamma,N_{z2}} = H_{2,\eta,\gamma,N_{z2}-1}$$

Считая, что возмущающие воздействия от добывающей скважины никак не влияют на состояние пласта в граничных точках, запишем соотношение (16):

$$h_{1,\eta,1,\xi} = h_{1,\eta,N_y,\xi} = h_{1,1,\gamma,\xi} = h_{1,0,\xi}, \quad H_{1,\eta,1,\xi} = H_{i,\eta,N_y,\xi} = H_{i,1,\gamma,\xi} = H_{i,0}, \\ (i = 2..3), \quad 2 < \eta < N_x - 1, \quad 2 < \xi < N_{z3} - 1, \quad h_{1,\eta,\gamma,1} = 0 \quad (16)$$

$$H_{i,N_x,\gamma,\xi} = H_{i,N_x-1,\gamma,\xi}, \quad (i = 2..3), \quad 2 < \gamma < N_y - 1, \quad 2 < \xi < N_z - 1$$

На основе результатов ОФР на рассматриваемом месторождении, были определены количественные значения параметров, применяемых при моделировании объектов управления, которые приведены в таблице 1 (показатели даны в системе «СИ»).

Таблица 1 – Значения физических параметров объекта

Верхний пласт	Нижний пласт
$k_{x1} = 148.4/86400;$	$k_{x2} = 148.4/86400;$
$k_{y1} = 24.64/86400;$	$k_{y2} = 24.64/86400;$
$k_{z1} = 14.64/86400;$	$k_{z2} = 14.64/86400;$
$\eta_1 := 0.00012$	$\eta_2 := 0.00012;$
	$b_1 := 0.00128/86400$

При моделировании процесса гидrolитосферы выбрано следующее число дискретных точек по координатам пространства (17):

$$x \rightarrow \eta = 1,107; \gamma \rightarrow \gamma = 1,76; z_i \rightarrow \xi = 1,9; i = 1,2 \quad (17)$$

Координаты добывающей скважины, заданы в виде: $\eta = 50$; $\gamma = 38$. Определение функции выхода ($H_{2,\eta,\gamma,\xi}(\tau)$) будем осуществлять в точке: $\eta = 45$; $\gamma = 38$; $\xi = 5$.

2. Метод определения оптимального числа скважин на рассматриваемом отрезке, базирующийся на матричном уравнении гидравлического взаимодействия скважин, что позволяет учитывать анизотропию коэффициентов фильтрации по пространственным координатам.

В гидрогеологии гидравлические параметры, дебиты измеряются в суточном диапазоне, а в вычислительной технике - применяется секундный диапазон. В связи с чем, будем представлять вычисленные и используемые параметры в рассматриваемых диапазонах.

Положим, что ОФР были проведены с использованием добывающей и контрольных скважин, приведенных на рисунке 2. При учете, что в результате ОФР получены следующие параметры:

- $K_1 = 0.003$ (удельное понижение уровня скважины – (понижение уровня в добывающей скважине(м.)/ (дебит ($\text{м}^3/\text{сут.}$)));
- радиус колодца добывающей скважины $r_0 = 0.2$ м. (внутри колодца на плоскости x, y понижение уровня - постоянное);
- $K_2 = 0.0003$ (коэффициент гидравлического взаимодействия добывающей скважины и контрольной скважины 1, $L_x = 18$ м.);
- $K_3 = 0.00015$ (коэффициент гидравлического взаимодействия добывающей скважины и контрольной скважины 2, $L_y = 20$ м.);
- График изменение уровня в колодце добывающей скважины, при гармоническом входном воздействии ($Q(\tau) = Q + 0.2 \cdot Q \cdot \sin(\omega \cdot \tau)$, $\omega = 0.0002$ 1/сек. (или $\omega = 17.28$ 1/сут.), $Q = 100$ $\text{м}^3/\text{сут.}$ (или $Q = 100/(3600 \cdot 24)$ $\text{м}^3/\text{сут.}$)).

Методика синтеза распределенных систем управления включает в себя следующие этапы:

1. Расчет параметров аппроксимирующего звена, структура которого представлены в виде (18):

$$W_a = \frac{K}{\beta} \times \exp(-\beta \times (x^2 + (K_p \times y)^2)^{0.5}), \beta = (S/a + D)^{1/2}, (x^2 + y^2) \geq r_0$$

$$W_a(s) = \frac{K}{\beta} \times \exp(-\beta \times r_0), \beta = (S/a + D)^{1/2}, (x^2 + y^2) < r_0 \quad (18)$$

С целью определения параметров аппроксимирующего звена,

представим систему уравнений (19):

$$\begin{cases} K_1 = \frac{K}{\beta} \times \exp(-\beta \times r_0) \\ K_2 = \frac{K}{\beta} \times \exp(-\beta \times L_x) \\ K_3 = \frac{K}{\beta} \times \exp(-\beta \times K_p \times L_y) \end{cases} \quad \beta = (D)^{1/2} \quad (19)$$

Подставим полученные в результате ОФР значения параметров и, решая полученную систему, придем к следующему результату: $D=0.01673368$, $K= 0.00039825$, $K_p=1.1679167$.

С применением динамических характеристик (рисунок 2), определим сдвиг по фазе сигнала выхода относительно входного сигнала (период колебаний входного сигнала составляет 8.72 час.) (20).

$$\Delta\varphi = -2\pi \cdot 0.98 / 8.72 = -0.706 \text{ рад.} \quad (20)$$

Полагая что $s=j\omega$, запишем соотношение для определения фазы аппроксимирующего звена (21)

$$\Delta\varphi = -Im(\beta) \times r_0 - \arctan(Im(\beta)/Re(\beta)), \beta = (\frac{j\omega}{a} + D)^{1/2} \quad (21)$$

Подставляя исходные параметры:

$\Delta\varphi = -0.706$ рад.; $D=0.01673368$, $K= 0.00039825$, $K_p=1.1679167$; $\omega=0.0002$ 1/с. и решая уравнение численным методом, получим: $a=0.002761$ м²/с., (или $a=238.55$ м²/с.).

При разработке месторождения, участок расположения добывающих скважин определяется с учетом дополнительных условий (рельефа местности, графиков пьезометрического уровня и др.). Положим, что на рассматриваемом участке будет располагаться «п» добывающих скважин, на участке расположения скважин, который показан на рисунке 3.

2. Оптимизация числа добывающих скважин.

Постановка задачи оптимизации числа добывающих скважин: для рассматриваемого месторождения требуется определить число добывающих скважин (п), расположенных по периметру круга радиуса $R=15$ м. (рисунок 3) и обеспечивающих максимальный доход (DD) за 10 лет эксплуатации месторождения. При этом будем полагать: добыча осуществляется в течение 3650 суток; $r_{0,i} = 0.2$ м. (радиусы колодцев); N -стоимость 1м³ сырья - 300/1000000 млн. руб.; C_{sk} -затраты на обустройство и содержание одной скважины в течение 10 лет со-

ставляют 6 млн. руб.; налог на недропользование 7.5 %; P_z - постоянные затраты в течении 10 лет составляют 87 млн. руб. При этом значения понижений уровней (ΔH_i) в зонах расположения добывающих скважин $\Delta H_i=12$ м. (при ($f_s=15^\circ$, рисунок 3).

Влияние γ -й добывающей скважины на понижение уровня в i -добывающей скважине, описывается соотношением (22):

$$\Delta H_i = \frac{K \times Q_i}{\beta} \times \exp(-\beta \times (r_{0,i})) + \sum_{j=1, j \neq i}^n \frac{K \times Q_j}{\beta} \exp(-\beta \times (r_{i,j})), \quad \beta = D^{\frac{1}{2}}$$

$$r_{i,j} = (x_i^2 + (K_p \times y_j)^2)^{0,5}, \quad i = 1 \dots n, \quad (22)$$

Прибыль за 10 лет эксплуатации месторождения составит (23):

$$DD = (Q \times N - Q \cdot N \times 0.075) \times 3650 - C_{sk} \times (n-1) - P_z, \quad Q = \sum_{\eta=1}^N Q_{\eta} \quad (23)$$

$D=0.01673368$, $K=0.00039825$, $K_p=1.1679167$ и воспользовавшись разработанной программой расчета прибыли, определим оптимальное число добывающих скважин. По результатам расчетов построен график (рисунок 1) и схема расположения добывающих скважин (рисунок 2). Оптимальное число добывающих скважин - 5, суммарный дебит - 103565 м³/сут., а прибыль - 1016.8 млн. руб. за 10 лет эксплуатации. На рассмотренном месторождении эксплуатируемые скважины можно разместить в диапазоне f_s , на отрезке длиной L_{sk} (рисунок 3.). Изменение суммарного дебита приведено на рисунке 4.

В диссертации приведен метод определения параметров аппроксимирующих звеньев, при изменении коэффициента фильтрации по двум пространственным координатам, рассмотрено решение задачи выбора оптимального числа добывающих скважин для месторождения и приведено решение задачи синтеза распределенного регулятора для системы управления дебитами добывающих скважин.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной диссертационной работе было рассмотрено географическое положение объекта исследования, в ходе исследования были подробно проанализированы показатели качества воды, ее состав, температура и другие ключевые параметры. Важным результатом стало выявление показателей, которые превышают допустимые нормы и требуют немедленного вмешательства со стороны предприятия. Проведен многомерный корреляционно-регрессионный анализ

для идентификации ключевых факторов, влияющих на эффективность добычи.

Разработана структура и описана процедура определения параметров звена, аппроксимирующего коэффициенты гидравлического взаимодействия добывающих скважин, а также, приведено решение задачи оптимизации расположения и выбора числа добывающих скважин, обеспечивающих максимальную прибыль за 10 лет эксплуатации рассматриваемого месторождения.

В работе использованы различные методы анализа данных, включая статистические модели и математические алгоритмы. В процессе работы на поставленной задаче, были рассмотрены многие факторы, влияющие на процесс добычи гидроминеральной воды, такие как гидрогеологические особенности месторождения, характеристики грунтовых вод, а также потенциал добычи на каждой из скважин. Была построена и верифицирована схема дискретной модели месторождения, а также, разработана и апробирована методика определения параметров модифицированного аппроксимирующего звена на основе данных ОФР.

На основании полученных данных была выбрана оптимальная схема расположения скважин, которая позволит максимально эффективно добывать гидроминеральное сырье. В четвертой главе показано, как имея возможность перемещать скважины в пространстве (x, y) , изменяется взаимовлияние добывающих скважин, а также общий дебит.

В работе разработана специализированная структура модифицированного распределенного звена, предназначенная для аппроксимации статических и динамических характеристик исследуемого процесса гидролитосферной системы. Структура учитывает вариации параметров по осям x и y , что позволяет моделировать пространственные особенности реальных процессов.

Таким образом, разработанный подход предоставляет эффективный инструмент для более точного описания и прогнозирования гидролитосферных процессов, что существенно способствует развитию теоретической и прикладной гидрогеологии.

Проведенное диссертационное исследование было направлено на решение актуальной научно-практической задачи повышения

эффективности добычи гидроминерального сырья на примере Кисловодского месторождения ООО «Нарзан-гидроресурсы». В результате выполненной работы были достигнуты следующие ключевые результаты:

1. Представлена разработанная научно обоснованная концептуальная и математическая модель системы управления технологическим процессом эксплуатации добывающих скважин. Модель отличается комплексным учетом входных, внутренних, управляемых параметров и факторов неопределенности, что позволило существенно повысить точность описания и прогнозирования гидролитосферных процессов, включая их сезонную динамику.

2. Автором предложен и апробирован новый методический подход, центральным элементом которого является модифицированное аппроксимирующее распределенное звено. Данный подход позволяет учитывать вариации фильтрационных параметров по пространственным координатам и эффективно аппроксимировать как статические, так и динамические характеристики гидролитосферной системы.

3. Разработан и реализован метод параметризации предложенного модифицированного звена на основе данных опытно-фильтрационных работ (ОФР). Это обеспечивает высокую точность модели и ее практическую применимость для решения конкретных инженерных задач.

4. Решена задача оптимизации количества добывающих скважин на рассматриваемом месторождении. С использованием созданного математического аппарата определено экономически оптимальное число скважин (5 единиц), их рациональное расположение и режимы эксплуатации, что обеспечивает максимизацию дохода при соблюдении технологических и экологических ограничений.

5. Выполнен синтез распределенного регулятора для системы управления группой скважин и проведен анализ устойчивости замкнутой системы, который подтвердил ее работоспособность и надежность.

Таким образом, поставленная цель диссертационной работы достигнута, а все сформулированные задачи успешно решены. Разра-

ботанные в исследовании методы, модели и методики вносят существенный вклад в развитие системного анализа и управления в области гидрогеологии и создают научно-технический задел для повышения эффективности и устойчивости добычи ценных гидроминеральных ресурсов на курортах региона Кавказских Минеральных Вод.

Перспективным направлением для дальнейших исследований является разработка методологий и алгоритмов принятия решений, направленных на повышение безопасности процесса добычи гидроминерального сырья с учетом влияния внешних факторов

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях их перечня ВАК

1. Першин, И.М. Исследование распределенных объектов и систем с использованием пространства $\{G, RE, IM\}$ / И.М. Першин, **В.А. Носова** // Современная наука и инновации. – 2024. – № 3 (47) . – С. 50-64.

2. Першин, И.М. Самонастраивающиеся распределенные системы управления / И.М. Першин, **В.А. Носова**, В.В. Цаплева // Современная наука и инновации. – 2023. – № 1 (41). – С. 15-28.

3. Першин, И.М. Математическое моделирование гидролитосферных процессов с учетом процессов в "колодцах" / И.М. Першин, **В.А. Носова**, В.В. Цаплева // Современная наука и инновации. – 2022. – № 3 (39). – С. 54-61.

4. **Носова, В.А.** Определение параметров распределенных звеньев, аппроксимирующих гидролитосферные процессы/ **Носова В.А.**, Першин И.М., Русак С.Н. // Современная наука и инновации. – №2(34). – 2021. – С.10-16.

5. Першин, И.М. Верификация дискретных моделей гидролитосферных процессов / И.М. Першин, **В.А. Носова**, В.В. Цаплева // Современная наука и инновации. – 2021. - № 4 (36). - С. 31-38.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

6. Ilyushin, Y. Application of Systems Analysis Methods to Construct a Virtual Model of the Field / Y. Ilyushin, **V. Nosova**, A. Krauze // Energies. – 2025. – Vol. 18 – P. 1012. – DOI: 10.3390/en18041012.

7. Ilyushin, Y.V. Development of Mathematical Model for Forecasting the Production Rate. / Y.V. Ilyushin, **V.A. Nosova** // International Journal of Engineering. – 2025. – Vol. 38(8). – P. 17491757. – DOI:10.5829/ije.2025.38.08b.02

8. Ilyushin, Y.V. Methodology to Increase the Efficiency of the Mineral Water Extraction Process / Y.V. Ilyushin, **V.A. Nosova** // Water. – 2024. – Vol. 16. – P. 1329. – DOI:10.3390/w16101329.

Патент:

9. Патент № 2840569 Российская Федерация, СПК G01K 3/00 (2025.01); G01K 7/00 (2025.01); G01K 2213/00 (2025.01); G01K 2217/00 (2025.01); G01K 13/00 (2025.01). Устройство для диагностики пространственно-распределенного температурного поля. Заявка №2024119623 : заявл. 12.07.2024 : опубл. 26.05.2025 / Т.В. Кухарова, Ю.В. Ильюшин, **В.А. Носова**: заявитель/патентообладатель федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». – 9 с.

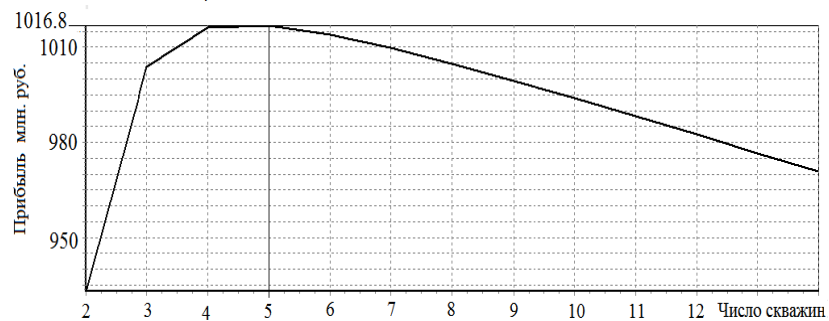


Рисунок 1 - Оптимизация числа скважин

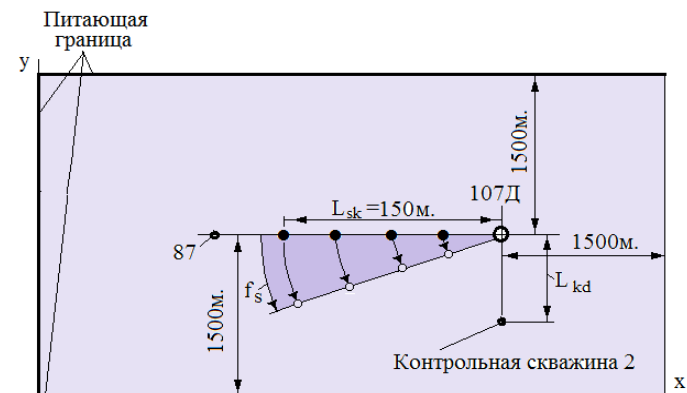


Рисунок 3 - Расположение скважин в секторе f_s

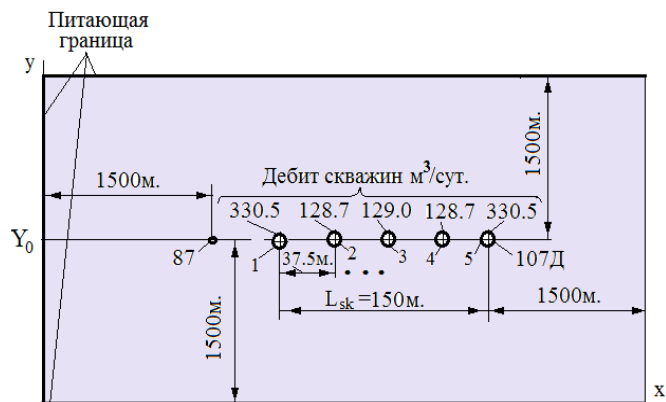


Рисунок 2 - Расположение добывающих скважин

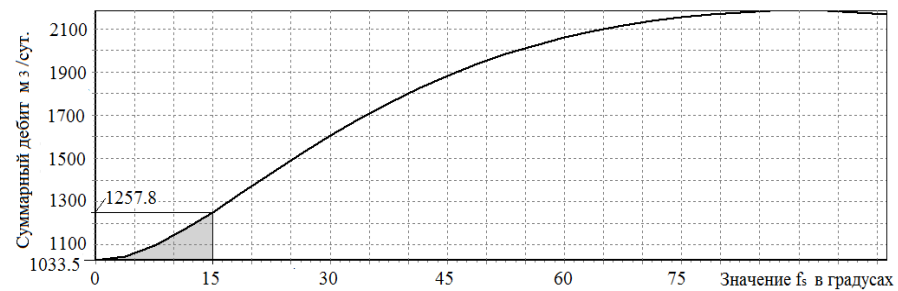


Рисунок 4 - Изменение суммарного дебита.