

На правах рукописи



**Дровосекова Татьяна Ивановна**

**РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И СИНТЕЗ  
СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГИДРОЛИТОСФЕРНЫМИ ПРОЦЕССАМИ  
ПЯТИГОРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ ВОД**

Специальность: 05.13.06 – Автоматизация и управление  
технологическими процессами и производствами  
(промышленность)

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

Санкт-Петербург - 2015

Работа выполнена на кафедре «Управление в технических и биомедицинских системах» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Северо-Кавказский федеральный университет».

**Научный руководитель: Малков Анатолий Валентинович,**  
доктор технических наук

**Официальные оппоненты:** Григорьев Валерий Владимирович, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, профессор кафедры систем управления и информатики

Ильюшин Юрий Валерьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры системного анализа и управления, Национальный минерально-сырьевой университет «Горный».

**Ведущая организация:** ФГАОУ ВО Южный федеральный университет,  
г.Ростов-на-Дону

Защита диссертации состоится 15 июня 2015 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.238.07 при Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина)» по адресу 197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина)» и на сайте СПбГЭТУ «ЛЭТИ» [www.eltech.ru](http://www.eltech.ru).

Отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просьба направлять по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5

Автореферат разослан 14 апреля 2015 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.238.07  
к.т.н., доцент



Цехановский Владислав  
Владимирович

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Регион Кавказских Минеральных Вод является уникальной здравницей, здесь насчитывается порядка 130 минеральных источников, разнообразных по химическому составу и температуре. Первоочередная задача региона – эксплуатировать запасы минеральных вод как можно более рационально.

В связи со сложностями, связанными с эксплуатацией месторождений минеральных вод важное значение приобретает математическое и компьютерное моделирование гидролитосферных процессов.

Исследования в этой области проводились многими специалистами. Данное направление активно развивается уже около пятидесяти лет. Однако, в этой области всё равно остаются нерешенные задачи.

Наиболее подробные базовые сведения о разработке моделей гидродинамических процессов приведены в работах Васильева В.В., Гензеля Г.Н., Карачевцева Н.Ф, Ломакина Е.А., Мироненко В.А., Шестакова В.М, Крашина И.И., Пересунько Д.И., Гавич И.К. Среди исследований последних лет особую важность имеет работа Малкова А.В. и Першина И.М., которые решают задачи совершенствования теоретических основ управления природными геологическими объектами в условиях интенсивного техногенного воздействия, повышение точности и оперативности управления процессами эксплуатации месторождений, обоснование условий разработки при минимальной экологической нагрузке.

В результате анализа изученности проблемы моделирования гидролитосферных процессов региона можно прийти к выводу, что несмотря на актуальность темы, задачи моделирования решаются лишь частично для отдельных участков. Следующим этапом в изучении задач моделирования представляется построение математической и компьютерной модели блочной структуры, оптимизация программного обеспечения, реализующего данную модель. Это позволит строить регуляторы для управления процессом водозабора крупного гидрогеологического объекта.

В данном исследовании была решена задача создания математической, дискретной и компьютерной модели гидролитосферных процессов на примере Пятигорского месторождения минеральных вод. Согласно теме диссертационного исследования требуется разработать компьютерную программу, моделирующую процессы водоотбора и влияние региональных особенностей рельефа, объемов водозабора и других факторов на гидролитосферные процессы Пятигорского месторождения минеральных вод.

При моделировании использовались следующие сведения: количество и геометрические размеры блоков, на которые можно разбить моделируемый участок в соответствии с особенностями рельефа, количество геологических пластов в каждом блоке, их форма, основные характеристики и параметры (например, являются ли породы, образующие этот пласт, водоупорными, малопроницаемыми, или данный геологический пласт является водоносным пропластком или коллек-

тором, для моделирования также требуются значения коэффициентов упругости водоносных и водоупорных горизонтов коэффициенты фильтрации для каждого пласта, скорости и направления перемещения жидкости в водоносных горизонтах.

**Целью работы** является:

- разработка математической и компьютерной моделей гидrolитосферных процессов для региона сложной геологической структуры;
- синтез системы управления гидrolитосферными процессами Пятигорского месторождения минеральных вод.

Для достижения вышеперечисленных целей в работе были **решены следующие задачи:**

- проведен системный анализ гидrolитосферных процессов Пятигорского месторождения минеральных вод, выявлены наиболее значительные факторы, влияющие на месторождение;
- разработана методика построения численных моделей месторождений минеральных вод на основе блочной структуры;
- разработан метод компьютерного моделирования объектов сложной структуры;
- создана компьютерная модель гидrolитосферных процессов Пятигорского месторождения минеральных вод;
- синтезирована система управления параметрами месторождения.

**Объектом исследования** служат гидrolитосферные процессы Пятигорского месторождения минеральных вод. **Предметом исследования** являются разработка и исследование математических пространственно-распределенных моделей управляемых гидrolитосферных процессов.

**Научная новизна:**

- Выявлены основные факторы, влияющие на гидроминеральную базу Пятигорского месторождения минеральных вод.
- Описаны граничные условия для региона сложной геологической структуры.
- С использованием ретроспективного материала осуществлена верификация рассмотренных моделей Пятигорского месторождения минеральных вод.
- Синтезирована распределенная система управления параметрами рассматриваемого месторождения.

На защиту выносятся следующие положения:

- математическая модель, описывающая гидrolитосферные процессы Пятигорского месторождения.
- дискретная модель, позволяющая использовать блочную структуру для моделирования гидrolитосферных процессов региона;
- методика построения вычислительной модели гидrolитосферных процессов на основе блочной структуры;
- алгоритм, реализующий модель региона блочной структуры;
- синтезированная распределенная система управления параметрами Пятигорского месторождения минеральных вод.

### **Практическая значимость и реализация работы:**

Рассматриваемая работа выполнена в рамках НИР, проводимой в СКФУ по сохранению гидроминеральной база региона Кавказских Минеральных Вод. Методика разработки моделей, предложенная в данном исследовании, доведена до конкретных конструктивных решений и может применяться в инженерной практике изучения водоносных горизонтов других месторождений региона КМВ.

Разработанные методы построения концептуальных, математических и компьютерных моделей распределенных гидролитосферных процессов внедрены в учебный процесс Северо-Кавказского федерального университета по направлению подготовки 27.03.04 – Управление в технических системах (применяются в учебном процессе магистратуры и бакалавриата, в курсовом и дипломном проектировании). Результаты диссертационного исследования внедрены в научную и проектную деятельность ООО «Нарзан-Гидроресурсы», г. Кисловодск, что подтверждается актом о внедрении результатов.

Разработанные положения диссертационного исследования могут применяться при создании математических моделей и систем управления на других геолого-гидрогеологических объектах. Результаты данного исследования применялись для оценки текущих объемов водозабора и эксплуатационных запасов Пятигорского месторождения.

### **Апробация работы:**

Материалы диссертационного исследования опубликованы в 12 научных печатных работах, пять из них в изданиях, включенных в перечень ведущих рецензируемых изданий, утвержденных ВАК.

### **Структура и объём работы:**

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка используемой литературы, содержащего 147 наименований, 2 приложений. Содержание работы изложено на 163 страницах, содержит 45 рисунков, 9 таблиц.

### **Содержание работы**

#### **Введение**

Обосновывается актуальность проблемы управления техногенными процессами в гидролитосфере, проведен анализ изученности проблемы, поставлены цели и задачи исследования, выделены объект, предмет, методы исследования, научная новизна, практическая ценность работы, основные научные результаты, полученные в диссертационной работе и результаты, выносимые на защиту.

**В первой главе** «Анализ гидролитосферных процессов Пятигорского месторождения минеральных вод» проанализированы процессы перемещения жидкостей в грунтах, рассмотрены методы, применяемые для моделирования этих процессов. Приведены основные параметры грунтов, которые следует учитывать при моделировании. В главе рассмотрены особенности моделирования гидролитосферных процессов и проблемы, возникающие при создании моделей.

На рисунке 1 показана схематическая карта Пятигорского месторождения минеральных вод со всеми водопунктами, в том числе используемыми для наблюдения. На разрезе (рис. 1) показано взаимное расположение геологических

пластов в регионе города Пятигорска и ряд скважин, которые эксплуатируются в этом регионе.

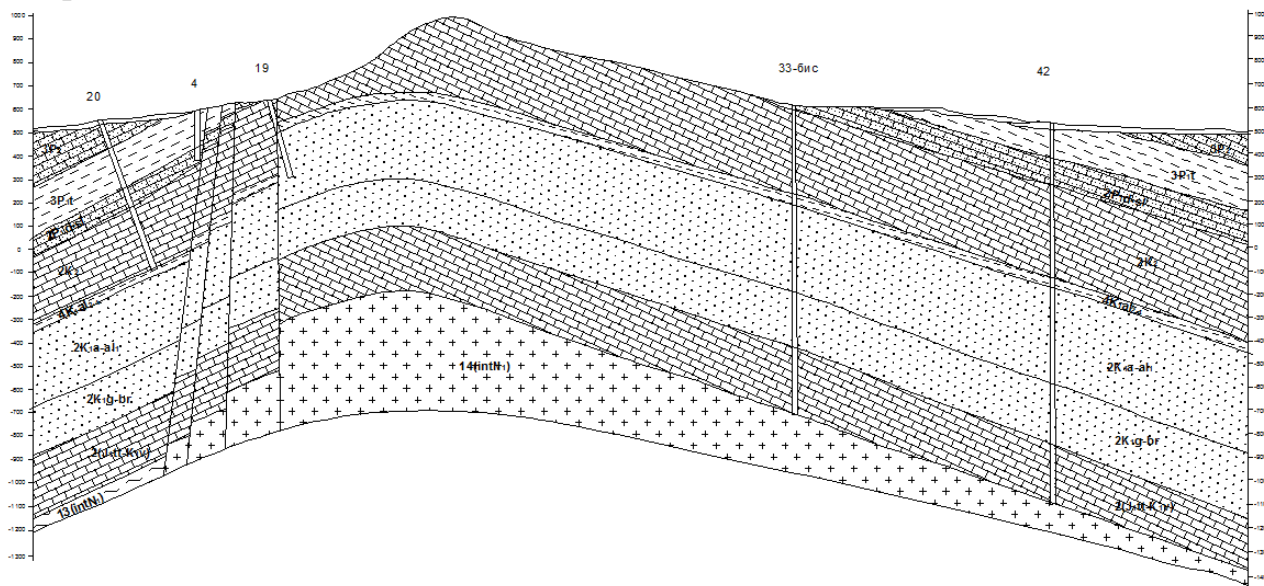


Рисунок 1. Разрез Пятигорского месторождения минеральных вод

В главе 1 приведены основные параметры геологических пластов в моделируемом регионе, их взаимосвязь. На основе этих данных далее будет разработана математическая модель объекта управления.

Объектом управления является верхнемеловой водоносный горизонт Пятигорского месторождения минеральных вод, на котором добыча минеральной воды осуществляется семью водозаборными скважинами, а измерение уровня понижения напора осуществляется в трёх контрольных скважинах.

**Вторая глава «Математическая модель объекта исследования».** Для создания математической и компьютерной модели в главе 2 описана структура Пятигорского месторождения минеральных вод, определены граничные условия для всех блоков месторождения. Добыча минеральной воды из рассматриваемого верхнемелового водоносного горизонта ведется из эксплуатационных скважин Провальская, №34, №40, №41, №29, №16, №24 на склонах и подошве горы Машук. Водозабор из этих скважин ведется с использованием погружного насосного оборудования. Контроль уровня понижения напоров в водоносном горизонте осуществляется посредством скважин государственной опорной наблюдательной сети, функционирующей в регионе КМВ, в том числе и на данном месторождении. Взаимное расположение эксплуатационных и наблюдательных скважин показано на рисунке 2.

Верхнемеловой водоносный горизонт снизу ограничен средневерхнеальбским водоупорным горизонтом, сверху расположен датско-зеландский (альбурганский) водоносный горизонт. На куполе горы Машук верхнемеловой горизонт выходит на поверхность, где и находится зона его местного питания.

Основными гидрогеологическими особенностями верхнемелового водоносного горизонта являются:

1) все месторождения минеральных вод региона объединяются геологической структурой, единым источником насыщения воды углекислым газом – кристаллическим фундаментом, где его накопление является следствием молодых магматических и термометаморфических процессов;

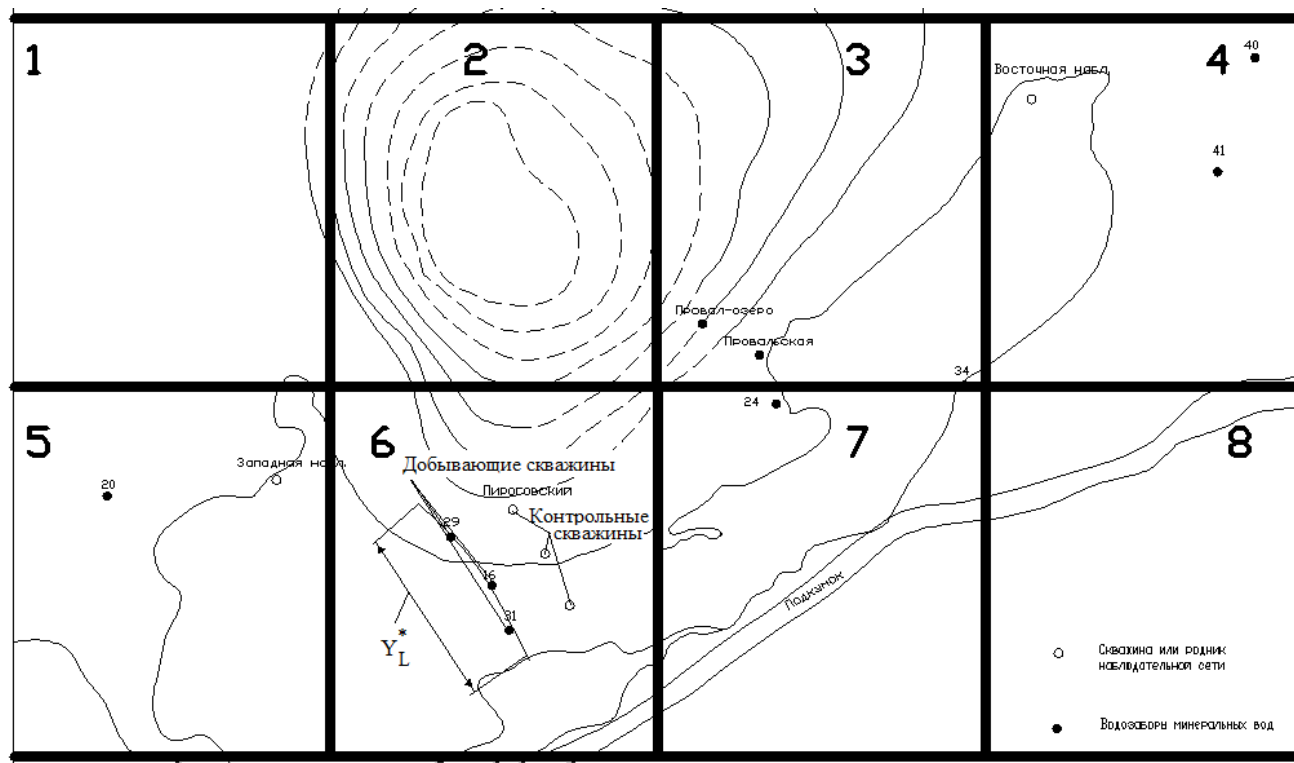


Рисунок 2. Схема Пятигорского месторождения минеральных вод

2) наличие глубоких поперечных долин и трещиноватость пород, многочисленные сбросы на склонах горы Машук способствуют проникновению атмосферных осадков и обуславливают высокую водообильность верхнемелового водоносного горизонта Пятигорского месторождения;

3) чередование в геологическом разрезе водопроницаемых и водоупорных пластов способствует формированию напорных водоносных горизонтов по всей площади месторождения;

4) важную роль в формировании месторождений минеральных вод играют тектонические разломы, рассекающие массивы осадочных отложений. Они способствуют перемещению из области питания в напорные горизонты большой массы воды, о чем свидетельствуют высокие дебиты скважин, вскрывающих в области напора эти разломы.

Горизонтальное движение вод происходит в северо-восточном направлении.

Для решения поставленной задачи регион был разделен на ряд блоков, взаимное расположение которых показано на рисунке 2. Геометрические размеры блоков были определены с использованием методов геологического районирования (исходя из рельефа местности и сложности геологических разрезов). Размеры

каждого блока следующие: высота до 1700 метров. Длина каждого блока (с севера на юг) 2500 м и ширина (с запада на восток) 2000 метров.

Рассмотрим постановку модели на примере третьего блока, где водозабор ведется посредством скважин Провальская и №34. Оценка понижения напоров за счет влияния этих скважин осуществляется, в первую очередь, наблюдательной скважиной Пироговской. Расчетная схема модели представлена на рисунке 3.

Требуется определить уменьшение значений напоров на заданном расстоянии от места водозабора.

Рассматриваемая задача может быть сформулирована следующим образом: требуется разработать модель объекта управления – Пятигорского месторождения минеральных вод – в виде дифференциального уравнения в частных производных, от которого необходимо перейти к системе обыкновенных дифференциальных уравнений в форме Коши и разработка на основе полученных уравнений компьютерной модели объекта для синтеза законов управления.

Целью функционирования синтезируемой системы является достижение минимального снижения значения напора в водоносном горизонте, отражающего желаемый технологический режим эксплуатации месторождения минеральных вод.

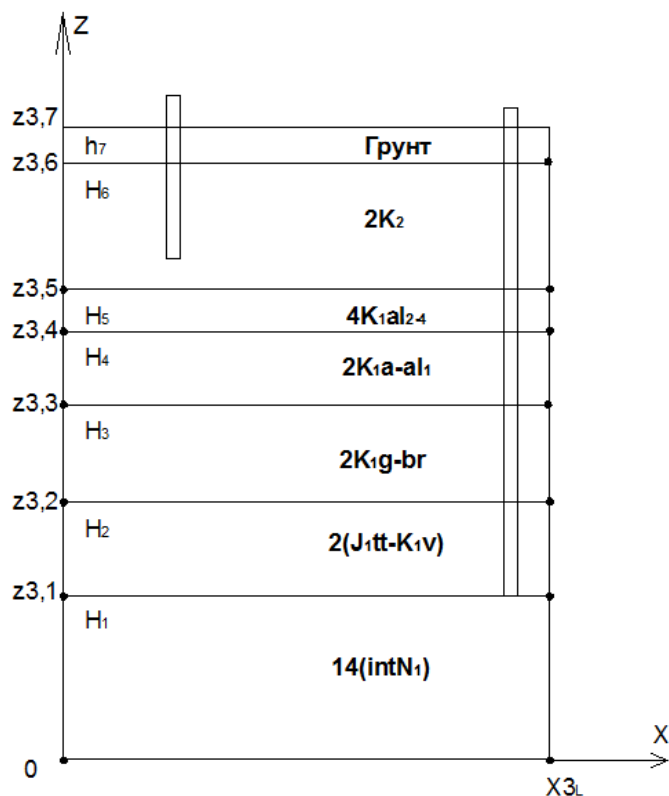


Рисунок 3. Расчетная схема для блока 3

Математическая модель объекта управления записывается в следующем виде. Нижний пласт – миоценовая интрузивная водоносная зона разломов  $14(intN_1)$ :



$$\frac{dH_1}{dt} = 1/\eta_1 * \left( \frac{d(k_{x1} \cdot dH_1(x, y, z, \tau))}{dx^2} + \frac{d(k_{y1} \cdot dH_1(x, y, z, \tau))}{dy^2} + \frac{d(k_{z1} \cdot dH_1(x, y, z, \tau))}{dz^2} \right) - F_{1,x} \cdot \frac{\partial H_1(x, y, z, \tau)}{\partial x}$$

$$0 < x < L_x ; 0 < y < L_y ; 0 < z < Z_{3,1}$$

Второй пласт – титонско-валанжинский водоносный горизонт 2(J1tt-K1v):

$$\frac{\partial H_2(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{\eta_2} \left( k_{2,x} \frac{\partial^2 H_2(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + k_{2,y} \frac{\partial^2 H_2(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + k_{2,z} \frac{\partial^2 H_2(x, y, z, \tau)}{\partial z^2} \right) - F_{2,x} \cdot \frac{\partial H_2(x, y, z, \tau)}{\partial x}, \quad 0 < x < L_x ; 0 < y < L_y ; 0 < z < Z_{3,2}$$

Третий пласт – готеривско-барремский водоносный горизонт 2K1g-br:

$$\frac{\partial H_3(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{\eta_3} \left( k_{3,x} \frac{\partial^2 H_3(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + k_{3,y} \frac{\partial^2 H_3(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + k_{3,z} \frac{\partial^2 H_3(x, y, z, \tau)}{\partial z^2} \right) - F_{3,x} \cdot \frac{\partial H_3(x, y, z, \tau)}{\partial x}, \quad 0 < x < L_x ; 0 < y < L_y ; 0 < z < Z_{3,3}$$

Четвертый пласт – аптско-нижнеальбский водоносный горизонт 2K1a-al1:

$$\frac{\partial H_4(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{\eta_4} \left( k_{4,x} \frac{\partial^2 H_4(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + k_{4,y} \frac{\partial^2 H_4(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + k_{4,z} \frac{\partial^2 H_4(x, y, z, \tau)}{\partial z^2} \right) - F_{4,x} \cdot \frac{\partial H_4(x, y, z, \tau)}{\partial x}, \quad 0 < x < L_x ; 0 < y < L_y ; 0 < z < Z_{3,4}$$

Пятый пласт – средне-верхнеальбский водоносный горизонт 4K1al2-4:

$$\frac{\partial H_5(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{\eta_5} \left( k_{5,x} \frac{\partial^2 H_5(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + k_{5,y} \frac{\partial^2 H_5(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + k_{5,z} \frac{\partial^2 H_5(x, y, z, \tau)}{\partial z^2} \right) - F_{5,x} \cdot \frac{\partial H_5(x, y, z, \tau)}{\partial x}, \quad 0 < x < L_x ; 0 < y < L_y ; 0 < z < Z_{3,5}$$

Шестой пласт – верхнемеловой водоносный горизонт 2K2:

$$\frac{\partial H_6(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{\eta_2} \left( k_{6,x} \frac{\partial^2 H_6(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + k_{6,y} \frac{\partial^2 H_6(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + k_{6,z} \frac{\partial^2 H_6(x, y, z, \tau)}{\partial z^2} \right) - F_{6,x} \cdot \frac{\partial H_6(x, y, z, \tau)}{\partial x} - \hat{H}(y, \tau) * \delta(x_{0j}, y_{0j}, z_{0j}), \quad 0 < x < L_x ; 0 < y < L_y ; 0 < z < Z_{3,6}$$

– слой грунта:

$$\frac{\partial h_7(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = k_{7,x} \frac{\partial^2 h_7(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + k_{7,y} \frac{\partial^2 h_7(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + k_{7,z} \frac{\partial^2 h_7(x, y, z, \tau)}{\partial z^2},$$

$$0 < x < L_x ; 0 < y < L_y ; 0 < z < Z_{3,6},$$

где  $h_7$  – напор в поверхностном горизонте грунтовых вод;

$H_i$  – функция напора в рассматриваемом верхнемеловом водоносном горизонте,  $i=1..6$ .

$\hat{H}(y, \tau) = \hat{H}(y_j, \tau)$  изменение функции напора под действием  $j$ -ой эксплуатационной

скважины;  $\delta(x_{0j}, y_{0j}, z_{0j})$ - функция, равная единице, если  $x=x_{0j}$ ,  $y=y_{0j}$ ,  $z=z_{0j}$ , и

равная нулю в других случаях;  $k_{i,x}$ ,  $k_{i,y}$ ,  $k_{i,z}$  – коэффициенты фильтрации по соот-

ветствующим координатам в горизонте грунтовых вод ( $i=1$ ) и остальных пластов

( $i=2..6$ );

$\eta_i$  – упругоёмкость верхнемелового горизонта ( $i=2..6$ );  $F_{i,x}$  – скорость течения с юга на север (в направлении оси X) в  $i$ -м водоносном горизонте ( $i=2..6$ );

$x, y, z$  – пространственные координаты;  $\tau$  – время.

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

$$k_{zi} \frac{dH_i(x, y, Z_i, \tau)}{dz} = k_{z,i+1} \frac{dH_{i+1}(x, y, Z_{i+1}, \tau)}{dz}, \quad (i=1..6), \quad (1)$$

$$0 < x < X_L, 0 < y < Y_L.$$

(на границе  $x=0$  приняты граничные условия первого рода, на остальных границах второго рода)

Рассмотрим граничные условия при формировании блоков.

Условия на границах блока согласуются с физическими условиями объекта управления и в рассматриваемом случае были заданы следующими.

На нижней границе (сторона S6 – нижняя граница пласта 14(int N1)) приняты граничные условия II рода (2). Аналогично задаются условия для верхней границы блока.

$$\frac{dH(x, y, z = 0, \tau)}{dz} = 0, \quad \frac{dH(x, y, z = Z_{3,7}, \tau)}{dz} = 0 \quad (2)$$

Блок расположен на северной стороне региона, следовательно, при  $X=0$  запада (S2) приток извне незначителен, поэтому граничные условия тоже приняты второго рода:

$$\frac{dH(0, y, z, \tau)}{dz} = 0$$

Южная сторона блока (S5) граничит с блоком 7, а западная и восточная с блоками 2 и 4 соответственно, поэтому граница выбрана таким образом, что, если породы в соседних блоках одинаковые, то расчет в следующем блоке продолжается с использованием предыдущего значения напора согласно уравнению фильтрации. Если же породы разные, то граничные условия задаются по закону Дарси (1). Расчетная схема для границ с другими блоками составляется для каждого пласта отдельно. Схема граничных условий для блока 3 приведена на рисунке 4.

Для остальных блоков граничные условия задаются аналогично. Исключение составляет южная граница месторождения, здесь в блоках 5-8 *граничные условия I рода* выражаются в форме сохранения на границе напора, постоянного или переменного во времени, в общем виде они выглядят так:

$$H = const, H = f(\tau).$$

В данном случае принимаем на границе  $H(X_L, y, z) = 0$ .

Начальные условия имеют вид:  $\tau = 0, Q = 0, H = H_{ст}$ .

Далее была выполнена дискретизация математической модели по методу конечных разностей. Вся область фильтрации разбивалась равномерной сеткой с шагом по плановым координатам  $\Delta x = 40$  м,  $\Delta y = 50$  м (160×100 ячеек),  $\Delta z$  вычисляется для каждого пласта отдельно и составляет 20-30 метров, количество шагов задано (78 ячеек). На сетку по координатам наносились контуры месторождения и принятые условия на границах.

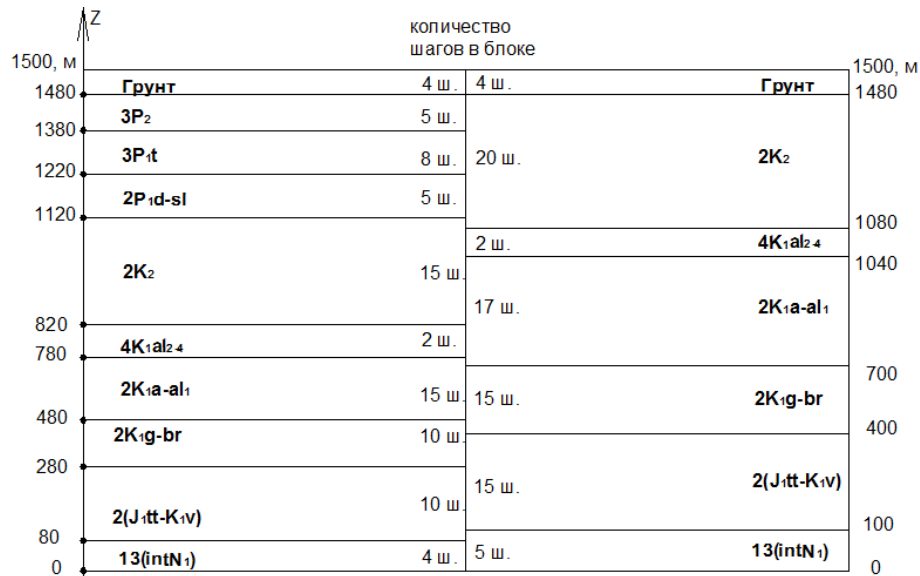


Рисунок 4. Граница между блоками 1 и 2

Дискретная модель, описывающая процессы в первом пласте имеет вид:

$$\Delta H_1[i, j, k] = \Delta t \cdot ((1/\eta_1[i, j, k]) \cdot (\Delta h_1[i, j, k] + \Delta h_2[i, j, k] + \Delta h_3[i, j, k]))$$

$$\text{где } \Delta h_1[i, j, k] = K_1[i, j, k] \cdot (H_1[i-1, j, k] - 2 \cdot H_1[i, j, k] + H_1[i+1, j, k]) / \Delta x^2$$

$$\Delta h_2[i, j, k] = K_2[i, j, k] \cdot (H_1[i, j-1, k] - 2 \cdot H_1[i, j, k] + H_1[i, j+1, k]) / \Delta y^2$$

$$\Delta h_3[i, j, k] = K_3[i, j, k] \cdot (H_1[i, j, k-1] - 2 \cdot H_1[i, j, k] + H_1[i, j, k+1]) / \Delta z^2$$

$$i = \overline{1, I} \quad j = \overline{1, J} \quad k = \overline{k_1 + 1, k_2 - 1}$$

Остальные пласты описываются аналогично.

При составлении модели из-за особенностей рельефа (наличия интрузивной возвышенности – горы Машук) возникла необходимость для расчета величины шагов по вертикали задавать границы пластов с помощью математических функций. Из экспериментальных данных известно значение высоты контура пласта над уровнем моря в нескольких точках, но когда для двумерной модели требуется знать значение в 100 точках для каждого контура пласта, в итоге требуется хранить 1200 значений высоты над уровнем моря, а в случае задания таких значений для трехмерной модели трудоемкость возрастает на несколько порядков. Таким образом возникает необходимость подобрать функции двух переменных  $Z(x, y)$ , с достаточной точностью описывающие контуры геологических пластов в блоках 2, 3, 5, 6.

В результате применения метода наименьших квадратов для описания границ верхнемелового водоносного горизонта получены следующие функции:

$$\begin{pmatrix} a2 \\ b2 \\ c2 \\ d2 \\ e2 \\ k2 \end{pmatrix} := \text{Minerr}(a2, b2, c2, d2, e2, k2) = \begin{pmatrix} 0 \\ -3.966 \times 10^{-14} \\ 4.577 \times 10^{-8} \\ -3.27 \times 10^{-4} \\ 0.582 \\ 615.573 \end{pmatrix}$$

$$f1(x, y) := [a2 \cdot (x)^5 + b2 \cdot (x)^4 + c2 \cdot (x)^3 + d2 \cdot x^2 + [e2 \cdot (x)]^1 + k2] + [b2(y)^4 + c2 \cdot (y)^3 + d2 \cdot y^2 + [e2 \cdot ((y))]^1 + k2]$$

$$\begin{pmatrix} a1 \\ b1 \\ c1 \\ d1 \\ e1 \\ k1 \end{pmatrix} := \text{Minerr}(a1, b1, c1, d1, e1, k1) = \begin{pmatrix} 0 \\ -4.327 \times 10^{-14} \\ 4.551 \times 10^{-8} \\ -3.103 \times 10^{-4} \\ 0.455 \\ 480.904 \end{pmatrix}$$

Контуры пласта представляют собой следующие поверхности:

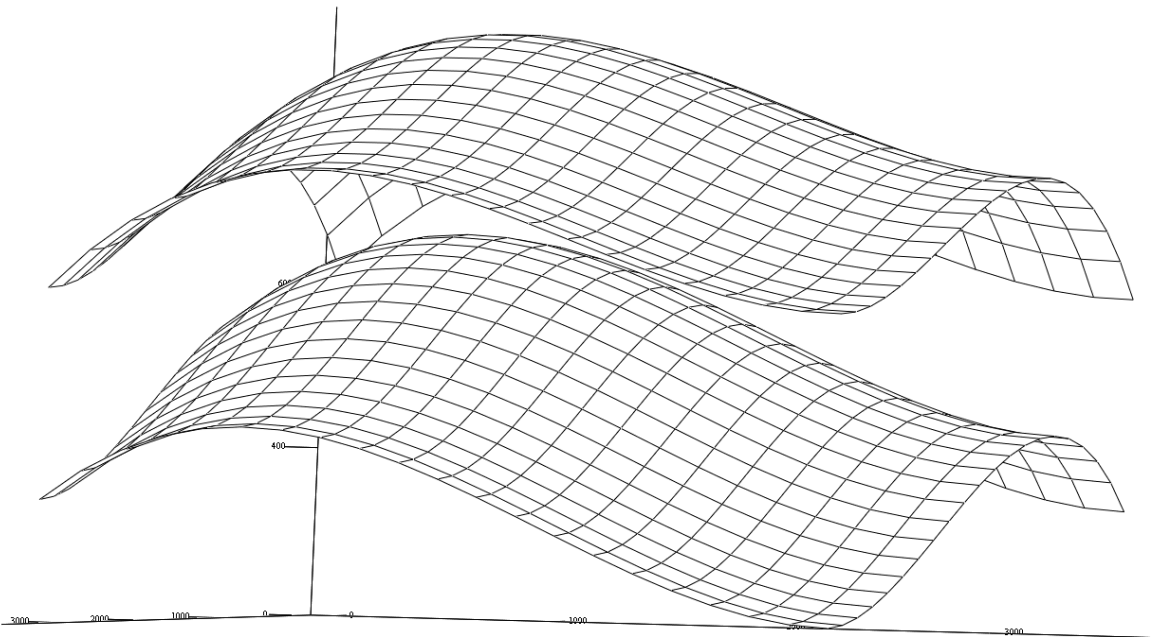


Рисунок 5. Поверхности, ограничивающие верхнемеловой горизонт Пятигорского месторождения минеральных вод

В результате можно вычислить высоту и определить величину шага дискретизации в любой точке сетки XY. Для остальных пластов высота определена аналогично.

**Третья глава** «Разработка компьютерной модели и анализ результатов моделирования гидролитосферных процессов» посвящена описанию алгоритма компьютерной модели месторождения.

Для описания отдельных пластов в программе создан массив большой размерности, в котором хранятся текущие значения напоров, и второй массив для хранения разностей между текущим и следующим значением напоров во всем объеме моделируемого объекта. Также в отдельных хранятся коэффициенты фильтрации  $k_x$ ,  $k_y$  и  $k_z$  для каждого блока. Общее количество блоков, которое было создано для реализации модели, составляет  $4 \times 2$  по координатам  $x, y$ . По вертикали количество блоков не фиксировано, так как на разных участках месторождения оно не совпадает. Общее число шагов по оси  $Z$  – 78.

Были разработаны отдельные процедуры, рассчитывающие фильтрацию внутри блоков, на граничных условиях между блоками по горизонтали и вертикали.

Для снижения затрат времени на расчет компьютерной модели был рассмотрен ряд методов.

1. Применение распределенных вычислений посредством вычислительной сети признано неэффективным вследствие больших временных затрат на передачу данных по сети.
2. Применение многопоточных вычислений для многоядерных процессоров позволяет получить прирост скорости вычислений до 37%.
3. Использование 64-разрядной операционной системы дает возможность адресации свыше 4 Гб оперативной памяти, что позволяет использовать массивы большой размерности не ограничивая сложность модели.

Протестировав полученную программу с разным количеством используемых потоков мы получили следующие данные, приведенные в таблице 1.

Таблица 1 Сравнение скорости расчетов с использованием разного числа потоков

	Оригинальная программа	Потоки - 1	Потоки -2	Потоки -3	Потоки -4
Потоков	1	1	2	3	4
Среднее время выполнения	166500	153505	120540	105225	112081
% базовой скорости работы программы	100%	92%	72%	63%	67%
Прирост производительности	0%	8%	28%	37%	33%

В результате без существенного изменения алгоритма вычислений был получен прирост скорости вычислений до 37% только за счет использования многопоточных вычислений.

По ретроспективным данным была выполнена верификация модели с целью уточнения значений коэффициентов фильтрации для моделируемых пластов. За-

дача верификации решалась на модели путем прогонки ряда вариантов с различными значениями цифровых параметров водоносных горизонтов, вводимых по определенному алгоритму. В качестве критерия адекватности использовалось среднеквадратичное отклонение модельных данных от фактических (ретроспективных данных, которыми располагает геологический фонд КМВ).

#### Четвертая глава «Синтез распределенной системы управления гидролитосферными процессами»

Результатом исследования является система оперативного контроля и управления гидродинамическим режимом Пятигорского месторождения минеральных вод, которая позволяет определить предельно допустимые уровни снижения напора для рассмотренного месторождения.

Постановка задачи следующая - существует объект управления с определённым вектор входных воздействий и вектором функций выхода. Требуется разработать высокоточный распределенный регулятор, осуществляющий приведение вектора функции выхода объекта управления к заданному режиму работы, путем изменения вектора входных воздействий.

В общем виде схема системы управления показана на рисунке 6.

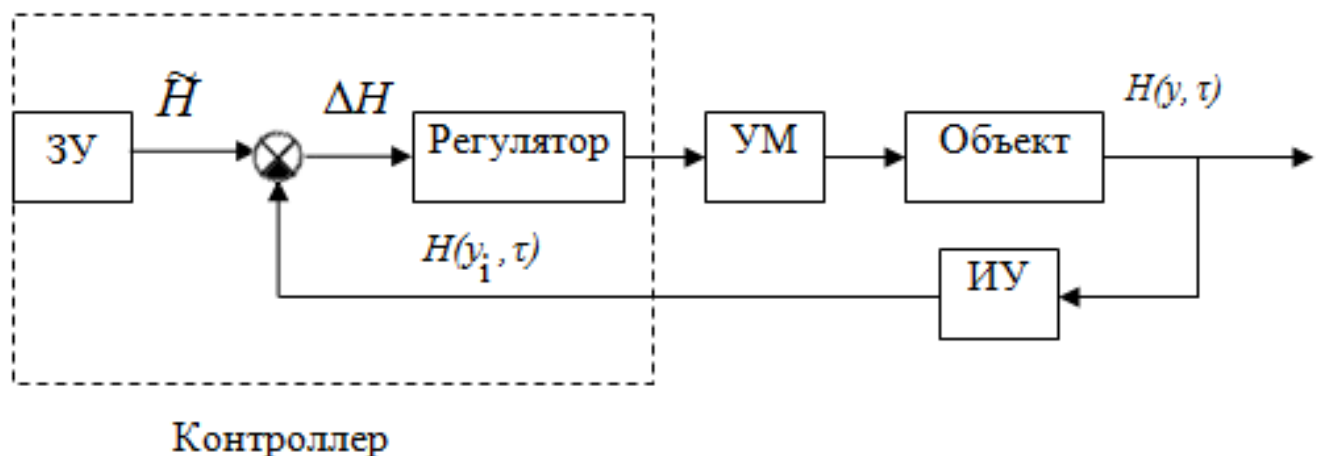


Рисунок 6. Структурная схема системы управления (ЗУ – задающее устройство, УМ- усилитель мощности, ИУ - измерительное устройство (контрольные скважины))

В данном случае объектом управления в системе являются гидролитосферные процессы. Усилитель мощности используется для того, чтобы маломощное управляющее воздействие, вырабатываемое регулятором, преобразовывать в воздействие для управления двигателем, перемещающим заслонку крана скважины. Измерительное устройство – это приборы КЕДР-DM, устанавливаемые в контрольных скважинах. Они оснащены датчиками, измеряющими уровень давления и другие параметры, а также приборы оснащены преобразователями аналогового сигнала в цифровой. Задающее устройство вырабатывает желаемое изменение уровня напора в точках расположения контрольных скважин. Расчет желаемых уровней напора осуществляется с учетом норм санитарно-эпидемиологического контроля, геологического районирования и т.д.

Входным воздействием на систему управления является понижение уровня

напора в точках расположения эксплуатационных скважин ( $H_j$ ), которое связано следующим соотношением с объемом дебита ( $Q_j$ ):

$$H(y_j, \tau) = \frac{0.183 \cdot Q_j}{km} \cdot \text{Lg} \frac{2.25 \cdot a^* \cdot t}{R^2 \cdot (1 + 1.78 \cdot b \cdot t / \mu^*)}$$

Изменяя расход, управляем уменьшением напора в зоне контрольных скважин.

Вектором функций выхода системы управления является текущее изменение напора в зоне расположения контрольных скважин.

Далее определены динамические характеристики объекта управления. Для этого входное воздействие (уменьшение значения напора в зоне местонахождения эксплуатационных скважин) было задано в следующем виде:

$$\hat{H}_j = C_m \cdot \sin(\psi_\eta \cdot y_j), \quad (3)$$

$$\psi_\eta = \frac{\pi \cdot \eta}{Y_L^*},$$

где  $C_m$  - значение обычно выбирается в пределах 10% от рабочего режима эксплуатации;  $y_j$ -точки нахождения эксплуатационных скважин.

Была определена реакция объекта управления на две пространственные моды ряда (3).

Для определения динамических характеристик объекта управления по выбранным пространственным модам  $\eta = 1, 2$ , была разработана численная модель водозабора из скважин верхнемелового водоносного горизонта, с помощью которой определялась реакция объекта управления на каждую составляющую ряда (3).

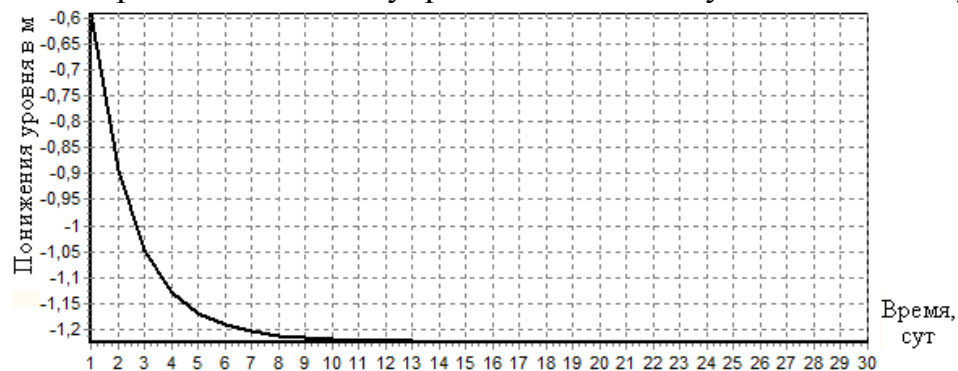


Рисунок 7. График значения функции выхода по моде 1

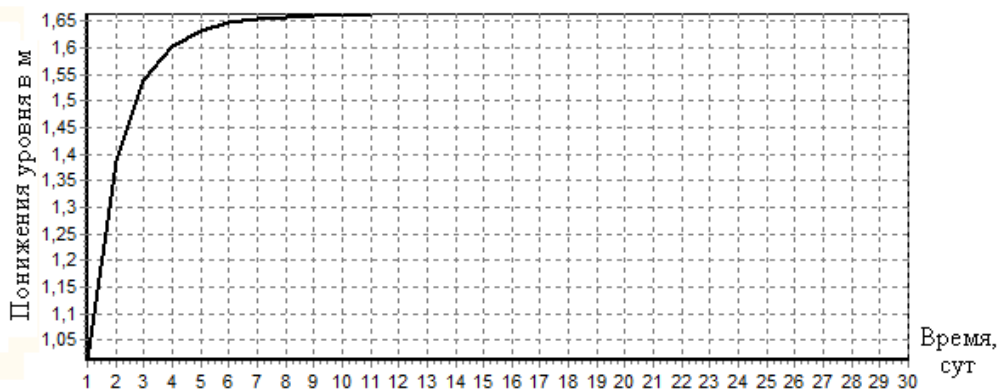


Рисунок 8. График значения функции выхода по моде 2

Для двух выбранных пространственных мод входного воздействия ( $\eta=1,2$ ) были выполнены экспериментальные исследования и построены графики значений функции выхода. Из графиков 7 и 8 можно получить параметры  $H_\eta$ ,  $\tau_\eta$ :

$$T_1=81,6154 \text{ часа; } \tau_1=4.3 \text{ часа; } K_1=35.46$$

$$T_2=65.3215 \text{ часа; } \tau_2=3.1 \text{ часа; } K_2=6.23$$

Подавая на вход распределенного высокоточного регулятора входное воздействие  $F(x,s)$ , на выходе получим:

$$U(x, y, s) = D_1(x, y, s) + \frac{D_4(x, y, s)}{s} + D_2(x, y, s) \cdot s, \quad (4)$$

$$\text{где } D_i(x, y, s) = E_i \left[ \frac{n_i - 1}{n_i} \cdot F(x, y, s) - \frac{1}{n_i} \cdot \nabla^2 F(x, y, s) \right]; (i = 1, 2, 4).$$

Дискретное представление алгоритма управления (4) имеет следующий вид:

$$U(x_v, y_\xi, s) = D_1(x_v, y_\xi, s) + \frac{D_4(x_v, y_\xi, s)}{s} + D_2(x_v, y_\xi, s) \cdot s,$$

$$\text{где } D_i(x_v, y_\xi, s) = E_i \left[ \frac{n_i - 1}{n_i} \cdot F(x_v, y_\xi, s) - \frac{1}{n_i} \cdot \nabla^2 F(x_v, y_\xi, s) \right], (i = 1, 2, 4),$$

$$\nabla^2 F(x_v, y_\xi, s) = \frac{F(x_{v-1}, y_\xi, s) - 2 \cdot F(x_v, y_\xi, s) + F(x_{v+1}, y_\xi, s)}{\Delta x^2} + \frac{F(x_v, y_{\xi-1}, s) - 2 \cdot F(x_v, y_\xi, s) + F(x_v, y_{\xi+1}, s)}{\Delta y^2},$$

$I < v < N_x, I < \xi < N_y,$

где  $x_v, y_\xi$  - точки дискретизации по осям координат  $x$  и  $y$ ;  $\Delta x, \Delta y$  - значение шагов дискретизации по соответствующим осям координат.

Используя передаточную функцию синтезированного регулятора

$$W(x, y, s) = 507 \cdot [-\nabla^2] + 0.00846 \cdot \left[ \frac{0.00579}{1.00579} - \nabla^2 \right] \cdot \frac{1}{s} + 10.89 \cdot s,$$

запишем алгоритм управления во временной области

$$U(x_v, y_\xi, \tau) = 507 \cdot [-\nabla^2 F(x_v, y_\xi, \tau)] + \sum_{\tau} 0.00846 \cdot \left[ \frac{0.00579}{1.00579} - \frac{1}{1.00579} \nabla^2 F(x_v, y_\xi, \tau) \right] \cdot \Delta \tau + 10.89 \cdot \frac{F(x_v, y_\xi, \tau) - F(x_v, y_\xi, \tau - \Delta \tau)}{\Delta \tau},$$

$$I < v < N_x, I < \xi < N_y$$

где

$$\nabla^2 F(y_\xi, \tau) = \frac{F(y_{\xi-1}, \tau) - 2 \cdot F(y_\xi, \tau) + F(y_{\xi+1}, \tau)}{\Delta y^2}$$

$$F(y_\xi, \tau) = H^*(y_\xi, \tau) - H(x^*, y_\xi, Z^*, \tau),$$



$H^*(y_\xi, \tau)$  – заданное значение напора,

$H(x^*, y_\xi, Z^*, \tau)$  – текущее значение напора.

С использованием полученных численных моделей объекта управления и регулятора, было выполнено моделирование функционирования замкнутой системы управления.

Результаты испытания модели замкнутой системы показывают, что полученная система управления достаточно динамична, а значение ошибки регулирования близко к нулю. В практических реализациях в системах управления с использованием распределенных высокоточных регуляторов (РВР), ошибка регулирования сопоставима с ошибкой наблюдения.

**В заключении** к диссертации изложены основные итоги работы. Итогом диссертационного исследования являются следующие результаты.

Выполнен анализ предметной области, разработана математическая модель, которая позволила оценить воздействие водозабора семи эксплуатационных скважин на гидролитосферу региона, с учетом инфильтрации атмосферных осадков и граничных условий, соответствующих реальным параметрам региона.

Создана математическая модель гидролитосферного процесса Пятигорского месторождения минеральных вод и выполнена дискретизация модели.

Разработана блочная программа, реализующая модель гидролитосферных процессов, которая позволяет задать различное количество пластов и разные граничные условия для отдельных участков региона.

Разработанная численная модель позволит определить развитие гидролитосферных процессов Пятигорского месторождения минеральных вод на близкую и отдаленную перспективы, а так же исследовать динамику рассматриваемых процессов.

Синтезирована распределенная система управления водозаборными скважинами.

**В приложения** вынесен код модулей программы, реализованной в среде разработки Embarcadero RAD Studio 2010, листинг аппроксимации контуров пластов в среде MathCAD 15.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Дровосекова Т.И. Разработка компьютерной модели гидролитосферных процессов [Текст]/Т.И. Дровосекова // В мире научных открытий. Красноярск: Научно-инновационный центр, 2013. № 2(38). С. 177-188.
2. Дровосекова Т.И., Жерносек И.А. Моделирование гидролитосферных процессов региона Кавказских Минеральных Вод [Текст]/Т.И. Дровосекова, И.А. Жерносек // В мире научных открытий. Красноярск: Научно-инновационный центр, 2013. № 2(38). С. 164-177.
3. Дровосекова Т.И., Сизов С.Б. Параллельные вычисления в приложении к задаче моделирования физических процессов [Текст]/Т.И. Дровосекова, С.Б. Сизов//В мире научных открытий Красноярск: Научно-инновационный центр, 2014. № 6.1 (54). С. 338-349.

4. Drovosekova T.I. Development of a computerized model of hydrolithospheric processes (Создание компьютерных моделей гидролитосферных процессов)// In the world of scientific discoveries, Series B. 2013. vol. 1, № 1 - pp.36-43.
5. Drovosekova T.I., Zhernosek I.A. Modeling of hydrolithospheric processes from the Caucasian Mineralnye Vody Region (Разработка моделей гидролитосферных процессов для региона Кавказских Минеральных Вод)// In the world of scientific discoveries, Series B. 2013. vol. 1, № 1 - pp. 44-52.

#### **Публикации в других изданиях**

6. Дровосекова Т.И. Математическая модель гидрогеологических процессов / [Текст]/Т.И. Дровосекова //Материалы международной научной конференции «Системный синтез и прикладная синергетика», Пятигорск, 2010 г. –С. 76-80.
7. Дровосекова Т.И., Клименчук О.А. Обоснование необходимости моделирования гидрогеологических процессов региона КМВ / [Текст]/Т.И. Дровосекова, О.А.Клименчук//Материалы международной научной конференции «Системный синтез и прикладная синергетика», Пятигорск, 2010 г. – С.80-88.
8. Дровосекова Т.И. Методы управления гидролитосферными процессами / [Текст]/Т.И. Дровосекова // Научные труды №35 (часть III) «Дни науки» - Пятигорск: издательство «Технологический университет», 2012. -С. 60-63
9. Дровосекова Т.И., Жерносек И.А., Собачкин М.А. Состояние изученности проблемы моделирования гидролитосферных процессов [Текст]/Т.И. Дровосекова, И.А.Жерносек, М.А.Собачкин// Материалы всероссийской научной конференции «Вузовская наука Северо-Кавказскому федеральному округу», Пятигорск, 2013. – С. 104-107.
10. Дровосекова Т.И. Оптимизация исходного кода программ, реализующих модели физических процессов в сложных объектах [Текст]/Т.И. Дровосекова // Материалы всероссийской научной конференции «Вузовская наука Северо-Кавказскому федеральному округу», Пятигорск, 2013. – С. 112-117.
11. Дровосекова Т.И., Русак С.Н. Формирование граничных условий при моделировании гидролитосферных объектов сложной структуры [Текст]/Т.И. Дровосекова, С.Н.Русак // Материалы всероссийской научной конференции «Вузовская наука Северо-Кавказскому федеральному округу», Пятигорск, 2013. – С. 108-111.
12. Дровосекова Т.И., Стригун Н.С. Экспресс-оценка оптимальности алгоритмов [Текст]/Т.И. Дровосекова, Н.С.Стригун // Материалы 2-й ежегодной научно-практической конференции преподавателей, студентов и молодых ученых СКФУ «Университетская наука – региону», Пятигорск, 2014. – С. 117-122.