

АКАДЕМИЯ НАУК РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН  
ИНСТИТУТ МАТЕМАТИКИ И ИНФОРМАЦИОННЫХ  
ТЕХНОЛОГИЙ

*На правах рукописи*  
УДК 622.234.42:519.688

**Жураев Тохиржон Мансурали уғли**

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ  
В НЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ  
ПРИНЯТИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ  
(на примере подземного выщелачивания)

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Ташкент – 2011

Работа выполнена в Институте математики и информационных технологий АН РУз.

Научный руководитель      доктор технических наук, профессор  
**Алимов Исмаилджан**

Официальные оппоненты:   доктор технических наук, профессор  
**Назаров Улугбек Султанович**  
  
кандидат технических наук, доцент  
**Абилкасимов Барат**

Ведущая организация      Среднеазиатский научно-исследовательский  
институт ирригации

Защита состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2011 года в \_\_\_\_ часов на заседании специализированного совета Д.015.17.02 при Институте математики и информационных технологий АН РУз по адресу: 100125, г. Ташкент, ул.Дурмон йули, 29.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института математики и информационных технологий АН РУз.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2011 г.

Ученый секретарь  
специализированного совета

Исмаилов М.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

**Актуальность работы.** Разработка месторождений полезных ископаемых методом подземного выщелачивания (ПВ) широко применяется в уранодобывающей промышленности, что имеет исключительно важное экономическое значение.

Потребность в энергии, основным источником которой является уран, неуклонно растет. Например, мировое потребление урана в 2000 году составило 64,59 тыс. тонн, в 2010 году составило 70,6 тыс. тонн, и по прогнозам специалистов в 2020 году<sup>1</sup> составит 73,74 тыс. тонн, так как «дальнейшее повышение конкурентоспособности нашей экономики, рост благосостояния населения во многом зависят от того, насколько бережно, экономно мы научимся использовать имеющиеся ресурсы и в первую очередь электро- и энергоресурсы»<sup>2</sup>. Данное размышление отражает важность научных исследований, связанных с использованием эффективных способов, в частности процесса подземного выщелачивания, в производстве ценных металлов.

Выбор оптимальной системы разработки – это самый ответственный шаг при проектировании будущей добычи руды. От системы разработки зависят все экономические показатели работы рудника (затраты по системе достигают 60% всех общерудничных затрат), безопасность труда горнорабочих, применение определенного горного оборудования.

Каждую систему можно применять только в определенных горно-геологических условиях. На выбор системы разработки наиболее существенное влияние оказывают мощность рудного тела, угол падения, устойчивость руды и вмещающих пород. Учёт этих факторов позволяет уточнить и конкретизировать выбор системы разработки, добавить некоторые детали, элементы в технологию добычи.

Основной особенностью этажной системы ПВ является отработка рудных залежей через этажно-расположенные фильтры технологических скважин (откачные фильтры под залежью, закачные – над ней, или наоборот). В системе выделяются три варианта скважинной отработки – этажный с однорядным расположением скважин (эксплуатационных ячеек), этажный и двухэтажный с шахматным или прямоугольным расположением скважин для отработки широких и двухкрыльевых рудных залежей.

Сложность процесса в условиях этажной системы разработки обуславливает необходимость разработки математических моделей и программного обеспечения для изучения всего цикла технологического процесса ПВ в реальных условиях и принятия решений в соответствии с целью управления. Основная цель создания модели – характеристика и прогнозирование некоторых объектов и технологических процессов. Модели, основанные на математической интерпретации проблемы, помогают в поиске

---

<sup>1</sup> [www.scgis.ru](http://www.scgis.ru). ИФЗ РАН. Сектор технологий электронных публикаций.

<sup>2</sup> Каримов И. А. Мировой финансово – экономический кризис. Пути и меры по его преодолению в условиях Узбекистана. – Ташкент, 2009.

необходимой информации для поддержки принятия технологических решений. Таким образом, разработка моделей для решения проблем анализа и принятия решений в управлении технологическими процессами ПВ при добыче полезных ископаемых в условиях этажной системы разработки, а также создание соответствующих вычислительных алгоритмов и программного обеспечения являются актуальной задачей.

**Степень изученности проблемы.** Основной процесс добычи полезного ископаемого методом ПВ в условиях этажной системы разработки сопровождают процессы движения выщелачивающего раствора в неоднородных средах сверху вниз, т.е. от нагнетательной скважины к эксплуатационной через рудоносные зоны; диффузионные процессы в рудоносной зоне обеспечивают переход вещества из одной фазы в другую.

В решение этих вопросов значительный вклад внесли зарубежные исследователи В.Ж. Аренс, В.Г. Бахуров, Н.П. Бусленко, Н.Н. Веригин, Л.Г. Ворошнин, В.С. Голубев, В.А. Грабовников, А.Н. Коновалов, Л. Лукнер, В.М. Шестаков, И.К. Луценко, В.И. Белецкий, В.А. Мамилов, В.Н. Николаевский, Г.Х. Хчян, И.С. Нафтулин, И.А. Чарный, Е.И. Рогов, В.Г. Языков, М.В. Шумилин, а также отечественные ученые В.К. Кабулов, В.Р. Рахимов, Ф.Б.Абуталиев, Н.М. Мухидинов, И. Алимов, Р. Садуллаев, Н. Равшанов, А.М.Сиддиков, Г.Н.Глотов и другие. Ими рассмотрены физико-математические основы геотехнологических процессов добычи полезных ископаемых, составлены основные уравнения и методы инженерного расчета тепловых, фильтрационных и других задач процессов подземной выплавки, растворения и выщелачивания, а также сформулированы задачи управления при использовании различных геотехнологических методов разработки.

Применительно этим областям разработаны многочисленные математические модели и вычислительные алгоритмы, когда объект рассматривается преимущественно в плане.

При таких условиях разработки придётся рассматривать модели не в плане, а в разрезе. К тому же в математической модели процесса выщелачивания необходимо дополнительно учитывать фактор силы гравитации, роль которой в значительной мере зависит от удельного веса закачиваемого раствора и разностей давления при различных глубинах месторождения.

Анализ моделей, разработанных до настоящего время, показал, что в них мало уделено внимание этажной системе разработки, которая с успехом применяется на практике. В связи с этим в данной диссертационной работе основное внимание уделяется задачам разработки компьютерных моделей управлений процесса ПВ, протекающего в условиях этажной системы разработки, а также сопряженным с ней задачам, таким как представление результатов в численном, двумерном и трехмерном графическом виде для поддержки принятия технологических решений и прогнозирования.

**Связь диссертационной работы с тематическими планами НИР.** Диссертационная работа выполнялась в соответствии с ГНТП № 14-020 по теме «Разработка и внедрение математических моделей, алгоритмов и

программных средств для управления процессом подземного выщелачивания (ПВ)» (2006-2008 гг.), гранта Фонда поддержки фундаментальных исследований 2008-2009 гг. по теме «Разработка эффективных вычислительных алгоритмов для математических моделей процесса подземного выщелачивания», ГНТП ФА-А17-Ф007 по теме «Разработка и внедрение объектно-ориентированных программных продуктов и баз данных для анализа динамического режима функционирования и принятия решений геотехнологических и экологических систем» (2009-2011 гг.).

**Цель исследования.** Разработка компьютерной модели процесса ПВ в неоднородных средах при реализации этажной системы разработки для анализа и поддержки принятия решений при управлении технологическим процессом ПВ.

**Задачи исследования.** В соответствии с целью в диссертационном исследовании следует решить следующие задачи:

- проведение системного анализа в качестве объекта исследования процесса ПВ в условиях использования этажной системы разработки;
- разработка вычислительного алгоритма для математических моделей компьютерного моделирования ПВ в условиях этажной системы разработки при различных предположениях, соответствующих реальным особенностям месторождений полезных ископаемых;
- разработка алгоритма и программ для автоматизации графического представления экспериментальных данных и расчетных значений параметров процесса ПВ;
- определение пригодности компьютерной модели технологического процесса ПВ для предоставления заключения, прогнозов и принятия решений применительно к конкретному объекту в реальных условиях.

**Объект и предмет исследования.** Объектом исследования являются рудные месторождения, эксплуатируемые методом ПВ в условиях этажной системы разработки, а предметом исследования – фильтрационные и диффузионные процессы при ПВ.

**Методы исследования.** При проведении исследований использованы основы теории управления в технических системах, математического моделирования процессов фильтрации, диффузии и кинетики, а также конечно-разностные методы решения нелинейных уравнений переноса и вычислительный эксперимент.

**Гипотеза исследования.** Проверка возможности использования математических моделей, представляемых в виде систем дифференциальных уравнений в частных производных, для решения задач управления добычей полезных ископаемых, разрабатываемых методом ПВ в условиях этажной системы разработки.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

- методы системного анализа процесса ПВ в условиях реализации этажной системы разработки;
- двумерная математическая модель процесса ПВ, учитывающая влияние силы гравитации на процесс;

- методы и алгоритмы определения параметров, обеспечивающих повышение эффективности управления технологическими процессами ПВ в условиях использования этажной системы разработки;
- алгоритмы визуализации результатов исследования на основе компьютерных методов обработки информации в двух- и трехмерном виде;
- универсальная компьютерная модель процесса ПВ, учитывающая все виды систем разработки для поддержки принятия технологических решений.

**Научная новизна.** На основании решения задач управления технологическими процессами ПВ и поддержки принятия технологических решений в условиях этажной системы разработки получены следующие результаты:

- разработаны математическая модель и вычислительный алгоритм управления процессами ПВ в условиях этажной системы разработки;
- разработана компьютерная модель для проведения вычислительного эксперимента и визуализации результатов в двумерном и трехмерном представлении;
- исследована динамика изменения давления и концентрации компонентов при различных значениях параметров, влияющих на протекание технологического процесса ПВ в условиях этажной системы разработки;
- разработан программный комплекс процесса ПВ в условиях применения этажной системы разработки для поддержки принятия технологических решений, предназначенных для анализа и прогнозирования параметров управления разработкой месторождений полезных ископаемых.

#### **Научная и практическая значимость результатов исследования.**

Научная значимость результатов исследования заключается в том, что они позволяют усовершенствовать технологию проведения научных и практических экспериментов при разработке месторождений полезных ископаемых методом ПВ, функционирующих при различных условиях системы разработок. Разработанные модели и вычислительные алгоритмы служат развитию методов анализа функционирования, оптимального управления и прогнозирования технологических показателей процесса ПВ.

Практическая значимость результатов заключается в том, что созданная компьютерная модель позволяет улучшить применение новых информационных технологий, существенно сократить сроки проведения анализа и прогнозировать технологические показатели разработки объекта, а также даёт возможность разработать конкретные практические рекомендации по проектированию, анализу функционирования, корректировке, регулированию и оптимальному выбору технико-экономических показателей изучаемых процессов и явлений.

**Реализация результатов.** Основные результаты работы были апробированы в опытно-промышленном масштабе на базе Навоийского горно-металлургического комбината и подтверждены внедрением результатов НИР в месторождениях полезных ископаемых НГМК, разрабатываемых методом ПВ в условиях этажной системы разработки, получен акт о внедрении. Программное

средство защищено свидетельством Государственного патентного ведомства Республики Узбекистан (№ DGU 02026, 09.08.2010).

**Апробация работы.** Основные материалы диссертации докладывались и обсуждались на Международной конференции «Современные проблемы математической физики и информационной технологии» (Ташкент, 2005); Республиканской научно-практической конференция «Проблемы разработки нефтегазоконденсатных месторождений и пути их решения» (Ташкент, 2006); Международной научно-технической конференции «Современные проблемы и перспективы механики» (Ташкент, 2006); Республиканской научно-технической конференции (с международным участием) «Геотехнология: инновационные методы недропользования в XXI веке» (Москва-Навои, 2007); Республиканской научно-технической конференции «Современное состояние и пути развития информационных технологий» (Ташкент, 2008); Международной конференции по распространению упругих и упругопластических волн, посвященной столетию со дня рождения академика Х.А. Рахматулина (Бишкек, 2009); Республиканской научно-технической конференции «Моделирование и управление в реальном секторе экономики» (Ташкент, 2009); Международной научно-технической конференции «Современные техника и технологии горно-металлургической отрасли и пути их развития» (Навои, 2010); Международной научно-технической конференции «Рахматулинские чтения» (Бишкек, 2011); Республиканской научно-технической конференции «Современное состояние и перспективы развития информационных технологий» (Ташкент, 2011); а также на семинарах Института математики и информационных технологий АН РУз (2005-2011).

**Опубликованность результатов.** По теме диссертации опубликовано 3 журнальные статьи и 12 тезисов докладов на международных и республиканских конференциях. Получено свидетельство № DGU 02026, 09.08.2010 Государственного патентного ведомства Республики Узбекистан о регистрации программного средства.

**Структура и объём диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованной литературы из 115 наименований, 10 приложений. Общий объём работы – 136 страниц, включая 38 рисунков и 9 таблиц.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследования, описаны научная новизна и практическая значимость результатов работы, основные положения, выносимые на защиту, приводятся апробация работы и публикации ее результатов, а также краткое содержание работы.

**В первой главе** работы приведен обзор литературы по современному состоянию изученности вопросов компьютерного моделирования управления процессами подземного выщелачивания в условиях применения этажной системы разработки для поддержки принятия технологических решений. Анализированы основные научные результаты по этому направлению, методы

оптимального управления процессом подземного выщелачивания. Определены цель и основные задачи диссертационной работы.

В 1.1 приведен обзор литературы по теме работы, опубликованной за последние годы.

В 1.2 проведен системный анализ современного состояния проблемы управления процессами ПВ, где в качестве объекта исследования рассмотрены месторождения полезных ископаемых, разрабатываемые методом ПВ в условиях реализации этажной системы разработки.

В 1.3 уточнены основные задачи и цель исследования, произведена математическая постановка задачи об управлении процессом, определены основные параметры процесса ПВ, влияющие на процесс в условиях этажной системы разработки.

Неоднородность фильтрационного коэффициента руд и вмещающих пород отрицательно влияет на процесс выщелачивания. Технологический режим работы скважин определяет условия ее эксплуатации. На протяжении всего периода эксплуатации скважин необходимо получить максимально возможное количество полезных ископаемых при минимальных затратах рабочих агентов.

Для максимальной добычи полезных ископаемых требуется обеспечить равномерное выщелачивание разрабатываемого пласта без лишней затраты реагента. Исходя из технологии ПВ можно полагать, что управляющими факторами являются дебиты нагнетательных и эксплуатационных скважин, а также доля кислоты в выщелачивающем реагенте.

Эти цели реализуются путём решения следующих задач:

1) минимизировать целевую функцию R:

$$R(Q) = \int_0^T \sum_{i=1}^{M_t} [C_i(U_i, Q, t) - C_{ib}(U_i, Q, t)]^2 dt, \quad (1)$$

$$R^* = \min_{(x, z) \in G} R(Q),$$

выбором дебитов нагнетательных и эксплуатационных скважин при критерии

$$Q = \sum_{i=1}^{M_t} q_i, \quad q_{\min} \leq |q_i| \leq q_{\max}.$$

2) минимизировать целевую функцию R:

$$R(\gamma) = \int_0^T \sum_{i=1}^{M_t} [C_i(U_i, \gamma, t) - C_{ib}(U_i, \gamma, t)]^2 dt, \quad (2)$$

$$R^* = \min_{\gamma \in \Omega} R(\gamma),$$

выбором значения концентрации реагента  $\gamma$  до достижения требуемого (заданного) значения концентрации целевого продукта в эксплуатационных скважинах при критерии  $0 < \gamma < 10$ .

Здесь  $C_{ib}(U_i, Q, t)$  и  $C_{ib}(U_i, \gamma, t)$  – требуемые и заданные оптимальные значения полезной компоненты;  $U_i$  – координаты расположения нагнетательных и эксплуатационных скважин;  $q_i$  – дебит  $i$ -ой скважины;  $\gamma$  – концентрация кислоты в закачиваемом растворе.

Для определения значений  $C_i(U_i, Q, t)$  и  $C_i(U_i, \gamma, t)$  в (1) и (2) требуется решить следующие задачи в разрезе  $(x, z)$  в заданный момент времени  $t$ .

Уравнение математической модели, отражающее характер изменения фильтрационного потока в области разреза  $G = \{(x, z, t), a < x < b, c < z < d, 0 < t \leq T\}$  имеет следующий вид:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{kh}{\mu} \left( \frac{\partial P}{\partial x} - \chi_1 \right) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{kh}{\mu} \left( \frac{\partial P}{\partial z} - \chi_2 \right) \right) + \sum_{i=1}^M \delta(x - x_i, z - z_i^l) \frac{Q_i(t)}{L} = mh\beta \frac{\partial P}{\partial t}, \quad (3)$$

удовлетворяющее граничным  $(\bar{\alpha} \frac{\partial P}{\partial n} + (1 - \bar{\alpha})P) / \Gamma = \varphi(x, z)$  и начальным  $P(x, z, 0) = P_0(x, z)$  условиям.

После решения уравнения (3) с начальными и граничными условиями и определения поля давления  $P$  находится скорость фильтрации по закону Дарси:

$$v_x = -\frac{k_1}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x}, \quad v_z = -\frac{k_2}{\mu} \frac{\partial P}{\partial z}. \quad (4)$$

С целью определения распространения концентрации полезного компонента в пласте рассматривается уравнение конвективной диффузии:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D \frac{\partial C}{\partial z} \right) - \frac{\partial(v_x C)}{\partial x} - \frac{\partial(v_z C)}{\partial z} - \frac{\partial N}{\partial t} = m \frac{\partial C}{\partial t} \quad (5)$$

в области  $G$  с начальными  $C(x, z, 0) = C_0$  и граничными  $(\bar{\alpha} \frac{\partial C}{\partial n} + (1 - \bar{\alpha})C) \Big|_{\Gamma} = \psi(x, z, t)$ ,

а также внутренними  $C(x, z, t) \Big|_{(x, z) = (x_i, z_i^l)} = C_i$ ,  $\frac{\partial C}{\partial n} \Big|_{(x, z) = (x_j, z_j^l)} = 0$  условиями.

Граничное условие записано в обобщенном виде, которое позволяет отражать три возможных варианта условий в зависимости  $\bar{\alpha}$ : при  $\bar{\alpha} = 0$  – условия первого рода; при  $\bar{\alpha} = 1$  – условия второго рода; при  $\bar{\alpha} = 0,5$  – условия третьего рода.

Уравнение кинетики массообмена, определяющее скорость перехода вещества из одной фазы в другую, в целом, имеет вид

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \gamma(C) f(C, N, L, \Gamma), \quad N \Big|_{t=0} = N_0. \quad (6)$$

Здесь  $h$  – ширина разреза;  $k$  – коэффициент проницаемости;  $\mu$  – вязкость выщелачивающего раствора;  $m$  – коэффициент пористости;  $P$  – значение давления,  $\chi_{1,2}$  – удельный вес выщелачивающего реагента соответственно по направлениям;  $\beta$  – коэффициент упругости;  $L$  – число отверстий фильтра в  $i$ -й скважине;  $M$  – число нагнетательных и эксплуатационных скважин;  $v_x, v_z$  – составляющие вектора скорости фильтрации по направлениям соответственно;  $N$  – значение концентрации полезного компонента в твердой фазе;  $C$  – значение концентрации реагента.

**Во второй главе** диссертации проведён анализ возможностей решения уравнений, описывающих математических моделей управления процессом ПВ в условиях этажной системы разработки, с применением конечно-разностного

метода, а также проверена достоверность полученных численных результатов для пробных функций.

В 2.1 и 2.2 разработан вычислительный алгоритм для решения задачи управления процессом ПВ в условиях этажной системы разработки с учетом удельного веса выщелачивающего реагента.

В целях проверки соответствия результатов предлагаемой математической модели (3) и естественного процесса получены результаты решения гидродинамической задачи ПВ при применении этажной системы разработки.

Применение метода переменных направлений позволяет редуцировать решение двумерных уравнений гидродинамики (3) управления процессом ПВ в условиях этажной системы разработки к одномерному решению. В связи с этим, прежде чем приступить к решению двухмерной гидродинамической задачи, поставлена и решена одномерная тестовая задача с привлечением аналитических функций. В результате сопоставления результатов точных и приближенных решений выяснили, что сходство решений не превышало точность  $O(h^2)$ . И это служило основанием для вывода о том, что алгоритм можно применять для решения практических гидродинамических задач управления ПВ в неоднородных средах при условиях применения этажной системы разработки.

До применения конечно-разностных схем для решения уравнения (3) целесообразно ввести безразмерные переменные. Безразмерные переменные применительно к нашему случаю имеют вид:

$$\bar{x} = \frac{x}{L_x}; \bar{z} = \frac{z}{L_z}; \bar{P} = \frac{P}{P_x}; \bar{k} = \frac{k}{k_x}; \bar{h} = \frac{h}{h_x}; \bar{t} = \frac{t}{t_x}; \bar{\chi} = \frac{\chi}{\chi_x}; \bar{\beta} = \frac{\beta}{\beta_x}; \bar{\mu} = \frac{\mu}{\mu_x}; \bar{q} = \frac{q}{q_x},$$

где  $L_x, L_z, P_x, k_x, h_x, \beta_x, \mu_x, q_x, t_x, \chi_x$  – некоторые характерные величины.

Введем обозначения:

$$t = \bar{t} \cdot \frac{k_x t_x}{\beta_x \mu_x L_z^2}; \quad q_i(t) = \bar{q}_i(t) \cdot \frac{q_x \mu_x L_z^2}{k_x h_x P_x}; \quad \chi_1 = \bar{\chi} \cdot \frac{L_x \chi_x}{P_x};$$

$$\chi_2 = \bar{\chi} \cdot \frac{L_z \chi_x}{P_x}; \quad z = \bar{z} \cdot \frac{L_z^2}{L_x^2}.$$

Запишем уравнения в безразмерном виде и для удобства записи безразмерных задач опустим черточки, таким образом уравнения примут вид (3).

Для решения уравнения (3) применен метод переменных направлений с выходом к следующей системе уравнений для внутренних узлов расчета:

$$mh\beta \frac{P^{n+\frac{1}{2}} - P^n}{0,5\tau} = \Lambda_1 P^{n+\frac{1}{2}} + \Lambda_2 P^n + f^n, \quad (7)$$

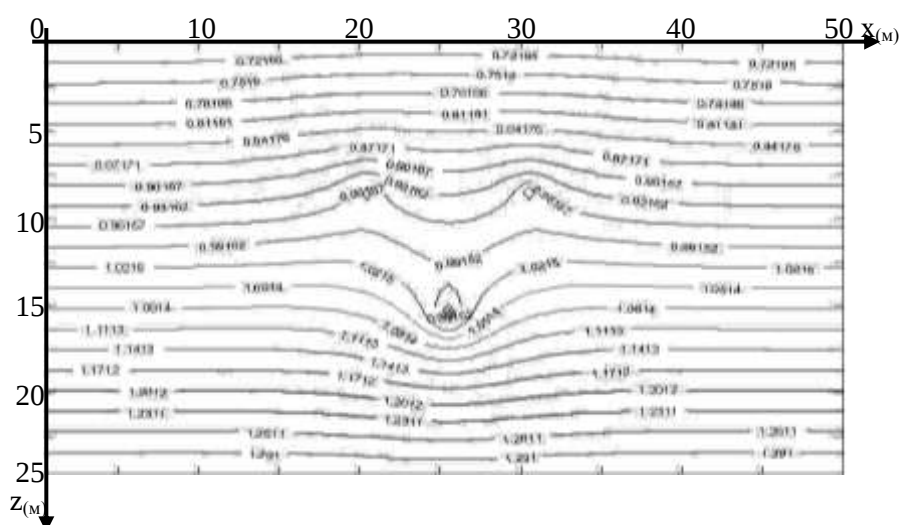
$$mh\beta \frac{P^{n+1} - P^{n+\frac{1}{2}}}{0,5\tau} = \Lambda_1 P^{n+\frac{1}{2}} + \Lambda_2 P^{n+1} + f^n, \quad (8)$$

Здесь:

$$\Lambda_1 P^{n+\frac{1}{2}} = \frac{1}{\Delta x} \left( \frac{k_{i+1,j} h_{i+1,j}}{\mu} \cdot \frac{P_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x} - \frac{k_{i,j} h_{i,j}}{\mu} \cdot \frac{P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - P_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x} \right); \quad (9)$$

$$\Lambda_2 P^{n+1} = \frac{1}{\Delta z} \left( \frac{k_{i,j+1} h_{i,j+1}}{\mu} \cdot \left( \frac{P_{i,j+1}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta z} - \chi \right) - \frac{k_{i,j} h_{i,j}}{\mu} \cdot \left( \frac{P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta z} - \chi \right) \right). \quad (10)$$

Проведенные вычислительные эксперименты на основе двумерной математической модели показали, что за счет распределения начального давления пласта значения его на эксплуатационных и нагнетательных скважинах отличаются между собой (рис. 1), притом давление в зоне эксплуатационной скважины больше чем в нагнетательных скважинах.



**Рис. 1. Изолинии поля давления на 30-й сутки работы скважин**

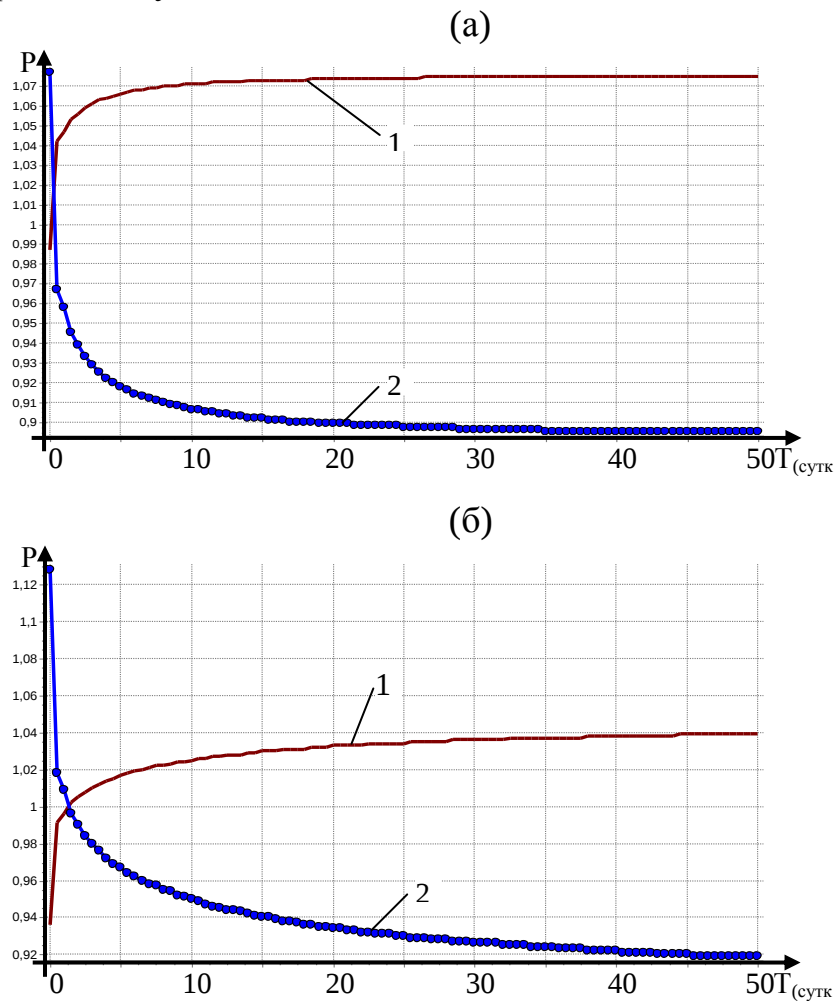
С течением времени в эксплуатационных скважинах значение давления падает, а в нагнетательных скважинах растет. Поэтому постепенно они уравниваются и, после этого, давление в зоне эксплуатационной скважины становится меньше чем в зоне нагнетательной скважины. Через несколько суток давление на пласте стабилизируется и при сохранении постоянных дебитов пластовое давление не изменяется.

Продолжительность этого процесса зависит от характеристик пласта, дебитов скважин, расстояний между эксплуатационной и нагнетательными скважинами, свойств фильтрационного течения, а также от других факторов.

Достоверность этих выводов подтверждается полученными результатами с помощью разработанных модели, алгоритма и программы. Например, установление давления в скважинах происходит через 30 суток, когда расстояние между нагнетательными и эксплуатационной скважинами равно 15м (рис.2а), и через 45 суток – 20 м (рис.2б).

Отсюда следует, что увеличение расстояния между нагнетательными и эксплуатационной скважинами приводит к увеличению времени установления давления в скважинах. Данный факт, вытекающий из результатов расчета,

согласуется с натурными наблюдениями в условиях этажной системы разработки в реальных условиях.



**Рис. 2. Динамика изменения давления в нагнетательных (1) и эксплуатационной (2) скважинах при разных расположениях скважин: расстояние между скважинами равно 15м (а), и – 20 м (б)**

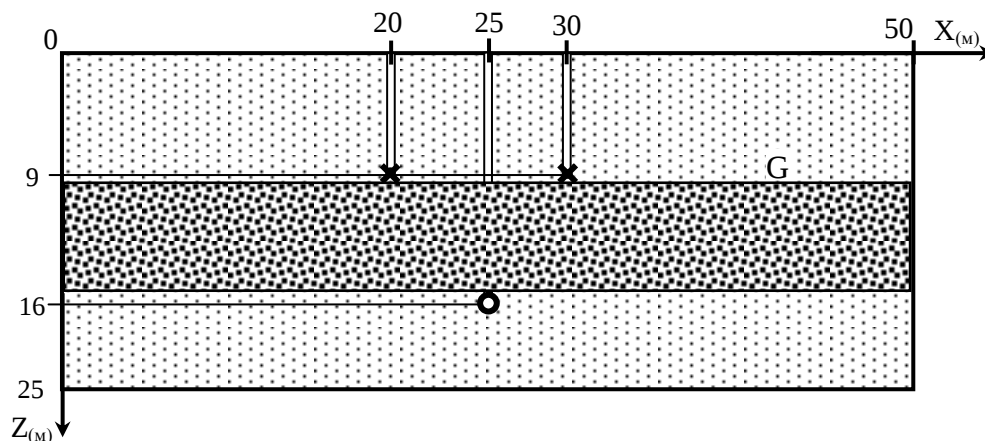
При решении задачи (5)-(6) использован метод переменных направлений с монотонной схемой для аппроксимации конвективного члена. При этом реализовали экономичные разностные схемы для уравнения параболического типа со смешанными производными, предложенные впервые А.А. Самарским.

Для определения поля концентрации полезных ископаемых с помощью разработанного алгоритма сначала необходимо выделить поля рудоносных зон, так как в условиях этажной системы разработки фильтрационные и рудоносные зоны имеют разные границы.

На рис. 3 представлен рудный пласт, разрабатываемый методом ПВ в условиях этажной системы разработки, установлены две нагнетательные и одна эксплуатационная скважины.

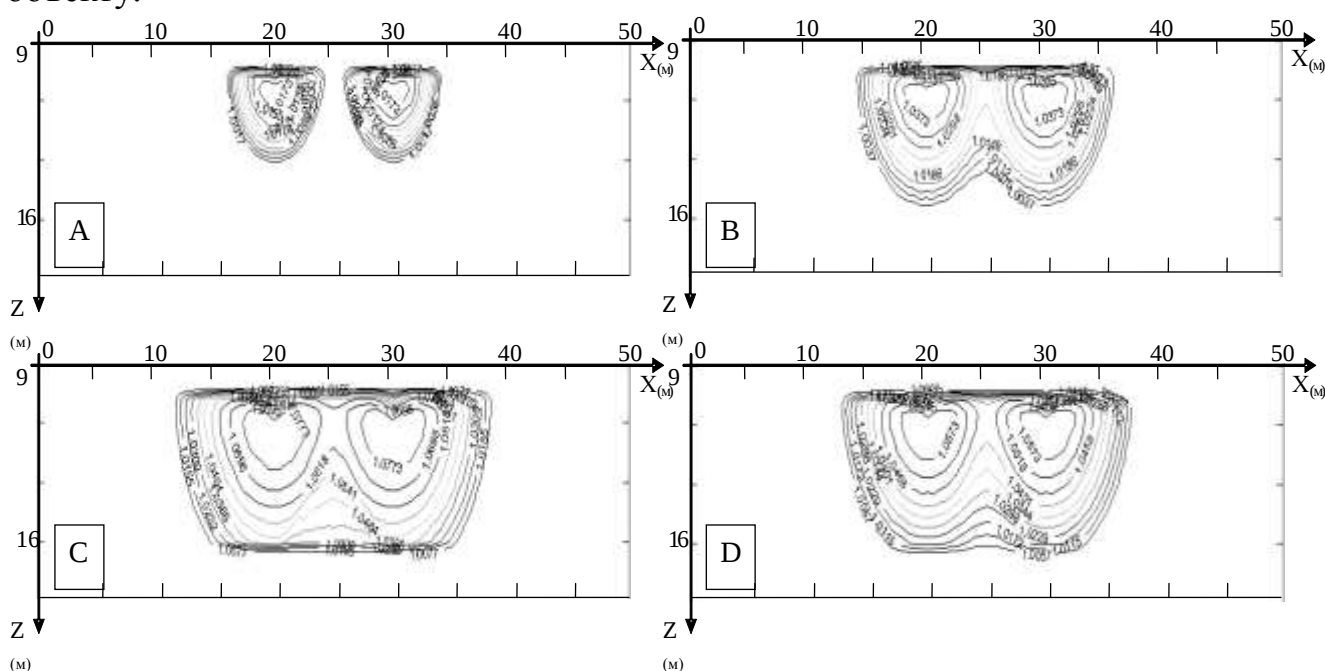
Как видно рис. 3, мощность горизонта отличается от мощности рудоносной зоны, а также их границы различны. Фильтры нагнетательных скважин расположены сверху рудоносной зоны, а фильтр эксплуатационной скважины – внизу рудоносной зоны. Нагнетаемый раствор, продвигаясь по

рудоносной зоне, захватывает полезные ископаемые и движется в сторону эксплуатационной скважины.



**Рис. 3. Схема расположения рудоносного слоя**  
 - внерудная фильтрационная зона,  - рудный слой

С помощью разработанного алгоритма получены результаты в различные моменты времени на основе тестовых данных, соответствующих реальному объекту.



месторождения ПИ методом ПВ в условиях этажной системы разработки, а также использовать в задачах управления процессом ПВ в реальных условиях.



**Рис. 5. Укрупненная блок-схема компьютерной модели управления процессом ПВ с учетом системы разработки**

В 2.3 разработана компьютерная модель управления процессом ПВ в условиях использования этажной системы разработки. Общая схема этой модели приведена на рис. 5.

В третьей главе работы изложено практическое применение моделей и алгоритмов, построенных для управления разработкой месторождений полезных ископаемых методом ПВ в условиях этажной системы разработки,

для поддержки принятия технологических решений. При этом основное внимание уделено визуализации численных данных на двумерном и трехмерном графическом виде, чтобы облегчит деятельность разработчиков месторождений ПИ. В этой же главе приведены результаты, подтверждающие достоверность разработанных алгоритмов и программного обеспечения для принятия решений в управлении технологическими процессами.

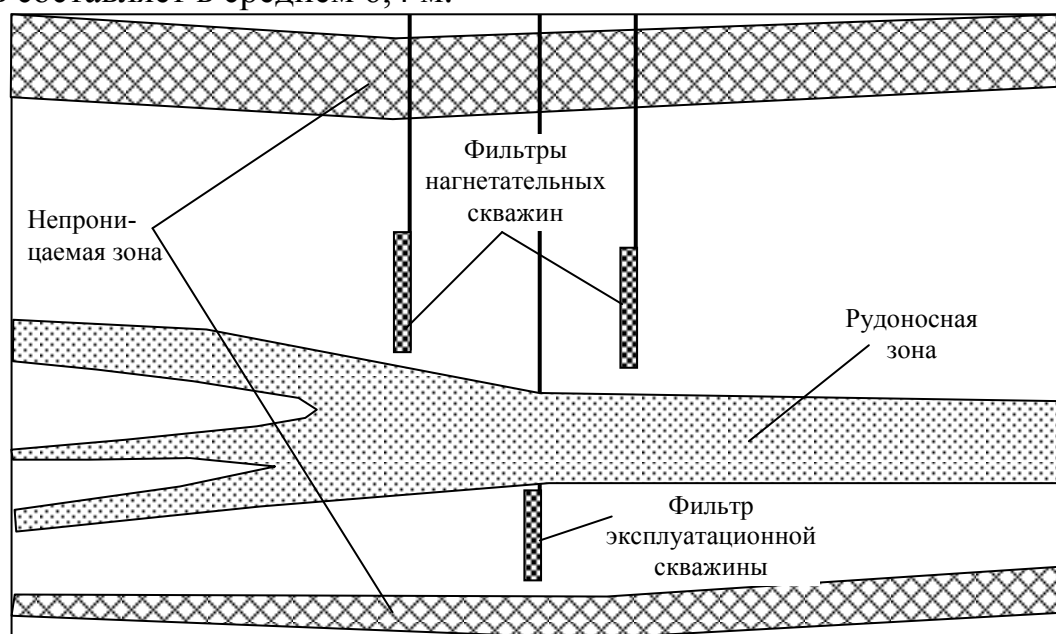
В 3.1 приведены общие данные о месторождении, уточнены и проведены вычислительные работы над основными геологическими и геотехнологическими параметрами управления процессом ПВ на эксплуатационном блоке 1-80-1 месторождения Северный Букинай, являющегося исследовательским объектом.

В 3.2 разработана графическая визуализация данных в двумерном и трехмерном виде для поддержки принятия технологических решений.

В 3.3 сделаны расчеты и прогнозированы параметры процесса ПВ в разрезе II-II эксплуатационного блока 1-80-1 месторождения Северный Букинай, разрабатывающий в условиях этажной системы.

На рис. 6 представлена геологическая схема разреза II-II эксплуатационного блока 1-80-1. На разрезе работают один эксплуатационный и две нагнетательные скважины.

Длина фильтров нагнетательных и эксплуатационной скважин составляет около 6,2 м, площадная продуктивность составляет в среднем  $3,5 \text{ кг/м}^3$ , рудная мощность составляет в среднем 6,4 м.

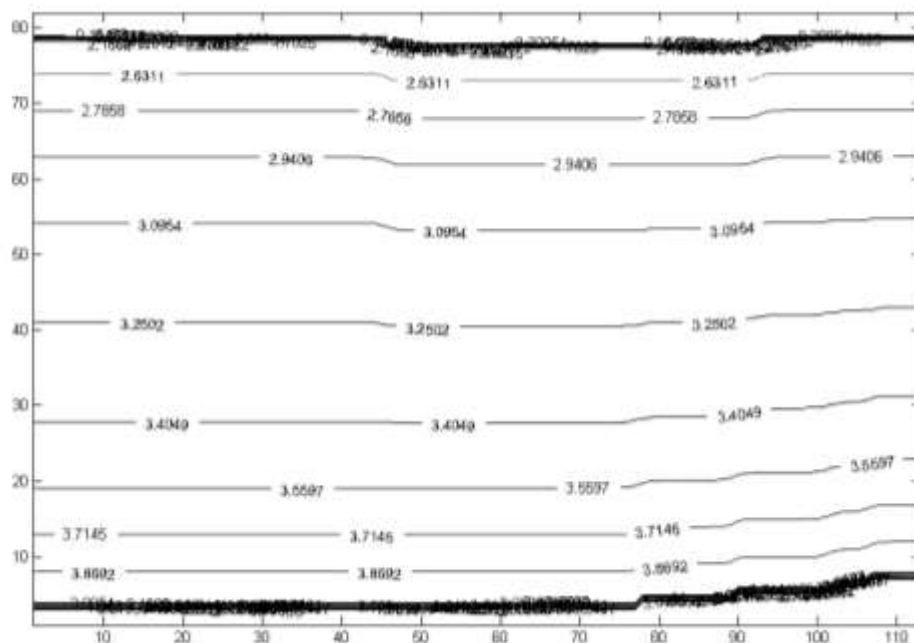


**Рис. 6. Разрез II-II эксплуатационного блока 1-80-1**

Помимо прочих положительных гидрогеологических показателей для ПВ, горизонт имеет высокую проницаемость (средний  $n_{\text{ср}}=5,8 \text{ м/сут}$ ) и слабоминерализованной ( $1,7-2,0 \text{ г/л}$ ) воды сульфатно-хлоридно-натриево-кальциевого состава с содержанием урана  $2-6 \cdot 10^{-5} \text{ г/л}$  и температурой  $19-21^\circ\text{C}$ , а сами пески анизотропные в фильтрационном отношении, т.е. менее

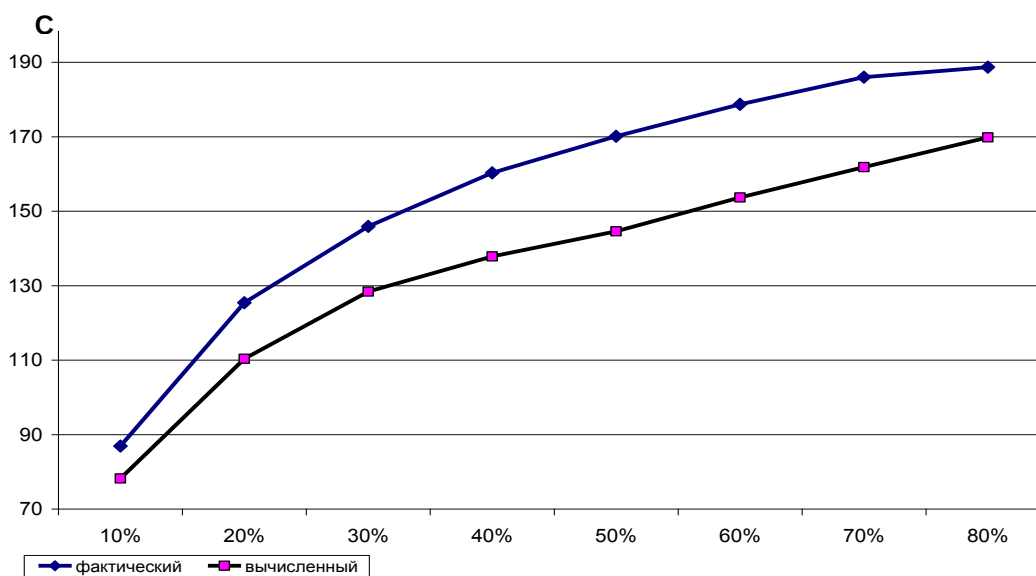
проницаемы вкрест наслоения, чем по наслоению ( $K_a=1:5$ ). Активная (открытая) пористость песков слабо меняется, составляя 0,30-0,35.

Начальное распределение давления в разрезе II-II представлено в рис. 7.



**Рис. 7. Состояние начального давления в разрезе II-II эксплуатационного блока 1-80-1**

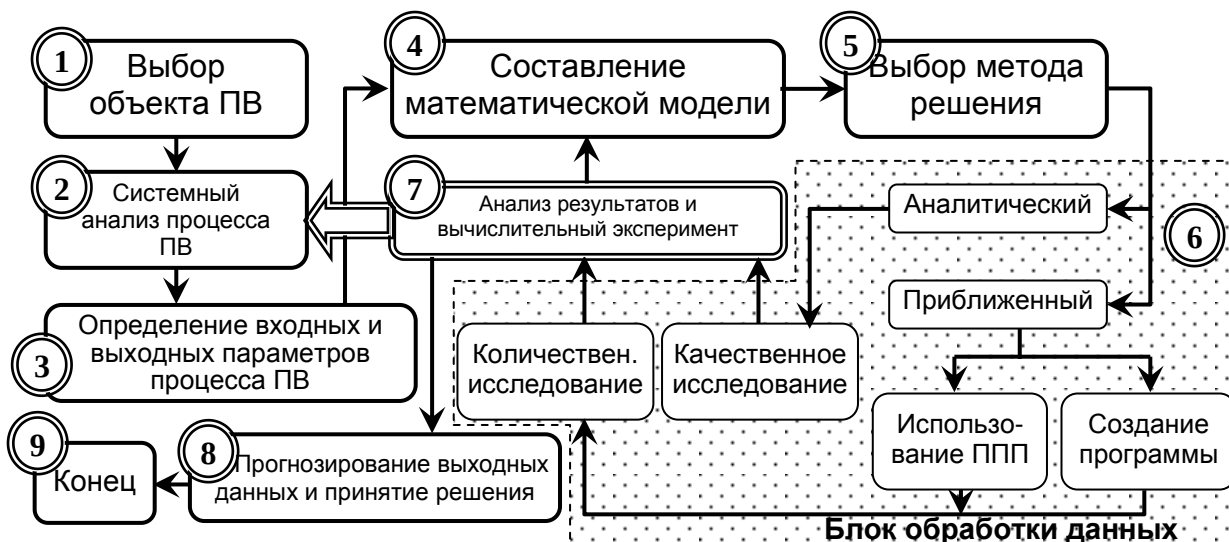
Результаты фактических и вычисленных значений концентрации сопоставлены на рис. 8.



**Рис.8. График сопоставления фактических и вычисленных значений концентрации**

Сопоставления фактических и вычисленных результатов показали, что на основе разработанной компьютерной модели управления можно прогнозировать дальнейшее состояние пласта в процессе ПВ, что даёт возможность управлять процессом исходя из прогнозных результатов.

Обычно в системах управления влияние управляющего воздействия проявляется не сразу. Оно должно оцениваться спустя некоторое время после воздействия. И обязательно в нем будут присутствовать обратная связь и процесс исправления. Это можно изобразить с помощью основных компонентов процессов управления (рис. 9).



**Рис. 9. Общая схема компьютерной модели управления процессом ПВ в условиях применения этажной системы разработки.**

Здесь в качестве начальных данных используются сведения о различных входных параметрах математической модели управления технологическим процессом ПВ на основе принятого решения. Путем решения перечисленных выше моделей изучаем воздействие параметров на физический процесс и в конечном результате получаем определенную базу данных о принятии решений для достижения поставленной цели. Созданное нами программное обеспечение позволяет расширить и пополнить базу данных. Приведем пример, который подтверждает данное суждение.

Пусть, требуется управлять процессом ПВ в условиях использования этажной системы разработки (подобрать значение концентрации кислоты в выщелачивающем реагенте и дебитов нагнетательных и эксплуатационных скважин), чтобы через 270 суток среднее значение концентрации полезного компонента в эксплуатационной скважине достигла заранее заданное значение концентрации, т.е.  $C_{\text{ср}}=155,2$  мг/л.

Для решения этой задачи управления с помощью вышеприведенного вычислительного алгоритма необходимо уточнять входные параметры. В нашем случае требуется определить значения  $\gamma$  ( $\gamma \in [a; b]$ ) и  $Q$  ( $Q \in [c; d]$ ), где  $a=0,05 \cdot 10^{-3}$ ,  $b=0,5 \cdot 10^{-3}$  (в виде безразмерных величин),  $c=4,4$  м<sup>3</sup>/ч,  $d=5,4$  м<sup>3</sup>/ч.

Если будем принимать  $n=7$ , тогда придется подбирать значений  $\gamma$  и  $Q$  из следующих значений:

$\gamma_1=0,05 \cdot 10^{-3}$ ,  $\gamma_2=0,125 \cdot 10^{-3}$ ,  $\gamma_3=0,2 \cdot 10^{-3}$ ,  $\gamma_4=0,275 \cdot 10^{-3}$ ,  $\gamma_5=0,35 \cdot 10^{-3}$ ,  $\gamma_6=0,425 \cdot 10^{-3}$ ,  $\gamma_7=0,5 \cdot 10^{-3}$ ;  $q_1=4,4$ ;  $q_2=4,57$ ;  $q_3=4,73$ ;  $q_4=4,9$ ;  $q_5=5,07$ ;  $q_6=5,24$ ;  $q_7=5,4$ ;  $\varepsilon=0,0001$ .

На основе этих значений определяется значение концентрации в эксплуатационной скважине путем решения задачи (1)-(6) в разрезе II-II эксплуатационного блока 1-80-1.

Результаты вычисления приведены на табл.1.

**Таблица 1**

**Результаты решения задачи управления**

| Q<br>(м <sup>3</sup> /ч) | $\gamma_i$ ( $\times 10^{-3}$ ) кг/л |       |       |              |       |       |       |
|--------------------------|--------------------------------------|-------|-------|--------------|-------|-------|-------|
|                          | 0,05                                 | 0,128 | 0,2   | <b>0,275</b> | 0,35  | 0,425 | 0,5   |
| 4,4                      | 120,6                                | 129,8 | 135,1 | 139,4        | 141,7 | 152,5 | 168,5 |
| 4,57                     | 122,4                                | 132,2 | 136,2 | 144,7        | 145,0 | 154,4 | 173,2 |
| 4,73                     | 124,3                                | 136,1 | 139,7 | 147,9        | 149,9 | 160,6 | 175,0 |
| 4,9                      | 127,6                                | 139,0 | 144,3 | 152,2        | 154,4 | 164,4 | 179,3 |
| <b>5,07</b>              | 128,5                                | 142,8 | 146,5 | <b>155,6</b> | 156,2 | 169,2 | 183,8 |
| 5,24                     | 131,8                                | 144,6 | 148,4 | 157,6        | 160,8 | 173,3 | 186,4 |
| 5,4                      | 136,1                                | 148,7 | 150,8 | 160,7        | 164,7 | 175,6 | 188,7 |

Анализ полученных результатов показывает, что самые близкие к требуемому  $C_{cp}=155,2$  мг/л значения концентрации получены при следующих значениях управляющих факторов  $\gamma$  и  $q$ :  $\gamma=0,275 \cdot 10^{-3}$ ;  $q=5,07$  м<sup>3</sup>/ч.

Таким образом, можно утверждать, что с помощью разработанной компьютерной модели можно прогнозировать и управлять процессом ПВ в условиях этажной системы разработки, принимать технологических решений на основе многовариантных вычислительных результатов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным результатом диссертационной работы является решение научно-технической задачи создания компьютерной модели управления процессом ПВ в неоднородных средах в условиях этажной системы разработки для поддержки принятия технологических решений.

При этом получены следующие научные и практические результаты:

1. На основе анализа современного состояния управления процессами ПВ в неоднородных средах обоснована необходимость учитывать особенности применяемой системы разработки.
2. Приведено и исследовано математическое описание задачи оптимизации функционала выбором дебитов скважин и значения концентрации реагента, сформулирована задача управления процессом ПВ в условиях использования этажной системы разработки. Дан общий вид математической модели при различных начальных, граничных, а также внутренних условиях.
3. Разработан эффективный вычислительный алгоритм для решения одно- и двумерных гидродинамических задач управления процессами ПВ в условиях применения этажной системы разработки с учетом удельного веса реагента. А также проведены вычислительные эксперименты для проверки достоверности разработанных вычислительных алгоритмов.

4. Разработан эффективный вычислительный алгоритм для решения двумерной диффузионной задачи управления процессом ПВ в условиях реализации этажной системы разработки с учетом кинетики растворения.
5. Определена степень адекватности разработанных математических моделей управления процессом ПВ и сформированы рекомендации для их использования на конкретных объектах.
6. Модели управления процессом ПВ адаптированы к конкретному объекту ПВ, который разрабатывается в условиях этажной системы разработки, сделаны прогнозы и представлен пример принятия технологического решения.
7. Для поддержки принятия технологических решений разработаны алгоритм и модуль программного продукта трехмерной визуализации двумерно заданных поверхностей показателей процесса ПВ.
8. На основе компьютерной модели управления процессом ПВ в условиях применения этажной системы разработки осуществлено прогнозирование изменений основных параметров разработки эксплуатационного блока 1-80-1 месторождения Северный Букинай.

### **СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ**

1. Алимов И., Жураев Т.М., Эргашев Б.Б. Информационные аспекты моделирования процесса фильтрации жидкостей и газов // Современные проблемы и перспективы механики: Материалы научно-технической конференции. – Ташкент, 2006. – С. 79.
2. Пирназарова Т.Е., Жураев Т.М. Математические модели разработки нефтегазоконденсатных месторождений // Проблемы разработки нефтегазоконденсатных месторождений и пути их решения: Материалы республиканской научно-практической конференции. – Ташкент, 2006. – С. 24-27.
3. Алимов И., Жураев Т.М. Учет основных свойств процесса подземного выщелачивания при моделировании // Геотехнология: инновационные методы недропользования в XXI веке: Материалы международной научно-технической конференции. – Москва-Навоий, 2007. – С. 76-77.
4. Алимов И., Жураев Т.М. Нефть конлариди солиштирма оғирлик кучини ҳисобга олган ҳолда нефть фильтрацияси модели ва алгоритми // Узбекский журнал «Проблемы механики» – Ташкент, 2007. – № 4. – С.53-56.
5. Жураев Т.М. Решение двумерных задач подземного выщелачивания методом Бубнова-Галёркина // Вестник ТашГТУ. – Ташкент, 2007. – № 3. – С. 3-10.
6. Алимов И., Жураев Т.М., Исманова К.Д. Оценка геотехнологических параметров, влияющих на изменение динамики концентрации // Современное состояние и пути развития информационных технологий: Материалы республиканской научно-технической конференции. – Ташкент, 2008. – С. 194-197.

7. Алимов И., Жураев Т.М. Уточнение параметров процесса подземного выщелачивания // Современное состояние и пути развития информационных технологий: Материалы республиканской научно-технической конференции. – Ташкент, 2008. – С. 199-202.
8. Алимов И., Жураев Т.М. Выбор вычислительный эксперимент по аппроксимации функции неоднородности в задачах фильтрации жидкости // Труды международной конференции по распространению упругих и упругопластических волн, посвященной 100-летию со дня рождения академика, Героя социалистического труда Х.А.Рахматулина. – Бишкек, 2009. – С. 111-113.
9. Алимов И., Жураев Т.М. Совершенствование алгоритма решения задачи процесса подземного выщелачивания для точного принятия решения // Моделирование и управление в реальном секторе экономики: Материалы республиканской научно-технической конференции. – Ташкент, 2009. – С. 123-125.
10. Жураев Т.М., Исманова К.Д. Решения задач процесса подземного выщелачивание при условии этажной систем разработки // Современные техника и технологии горно-металлургической отрасли и пути их развития: Материалы международной научно-технической конференции. – Навои, 2010. – С. 94-96.
11. Пирназарова Т.Е., Жураев Т.М., Атаханов М.Х. Программа расчета параметров разработки поэтажно расположенных рудных месторождений с применением геотехнологических методов // Государственное патентное ведомство республики Узбекистан. Свидетельство № DGU 02026. 09.08.2010 г.
12. Жураев Т.М. Модель и вычислительный алгоритм решения задач геотехнологического процесса в кусочно-неоднородных пластах // Узбекский журнал «Проблемы информатики и энергетики». – Ташкент, 2010. - №5. – С. 18-23.
13. Алимов И., Жураев Т.М. Физико-химическая технология процесса подземного выщелачивания // Труды международной конференции «Рахматулинские чтения». – Бишкек, 2011. – С. 134-136.
14. Жураев Т.М. Модели и алгоритмы управления процессом ПВ в условии этажной системы разработки // Современное состояние и перспективы развития информационных технологий: Материалы республиканской научно-технической конференции. – Ташкент, 2011. – С. 81-86.
15. Жураев Т.М., Атаханов М.Х. Разработка программного обеспечения для визуализации двумерных численных результатов в трехмерном графическом виде // Современное состояние и перспективы развития информационных технологий: Материалы республиканской научно-технической конференции. – Ташкент, 2011. Том 1, – С. 27-30.

Техника фанлари номзоди илмий даражасига талабгор Жўраев Тоҳиржон Мансурали ўғлининг 05.13.01 – тизимли таҳлил, бошқарув ва ахборотни қайта ишлаш ихтисослиги бўйича “Технологик қарорлар қабул қилишни қўллаб-қувватлаш учун биржинсли бўлмаган муҳитларда динамик жараёнларни моделлаштириш (ерости қориштириш мисолида)” мавзусидаги диссертациясининг

## РЕЗЮМЕ СИ

**Таянч сўзлар:** ерости қориштириш (ЕҚ), ишлаб чиқишнинг қаватли тизими, реагентнинг солиштирма оғирлиги, гидродинамика, концентрация, компьютер модели, сонли-тақрибий усул, потоки ҳайдаш, ўзгарувчан йўналишли усул, бошқарувчи параметрлар, қарорлар қабул қилишни қўллаб-қувватлаш, бошқариш схемаси.

**Тадқиқот объектлари:** ЕҚ усули ёрдамида қаватли тизим шароитида ишлаб чиқилувчи рудали конлар.

**Ишнинг мақсади:** биржинсли бўлмаган муҳитда ЕҚ технологик жараёнини бошқаришни таҳлил қилиш ва қарорлар қабул қилишни қўллаб-қувватлаш учун қаватли тизим шароитида ЕҚ жараёнининг компьютер моделини ишлаб чиқиш.

**Тадқиқот методлари:** бошқариш назарияси усуллари, математик моделлаштириш, чекли-айирмалар усуллари ва сонли тажрибалар.

**Олинган натижалар ва уларнинг янгилиги:** ишлаб чиқишнинг қаватли тизим шароитида ЕҚ жараёнини бошқаришнинг математик модели ишлаб чиқилди; ишлаб чиқишнинг қаватли тизими шароитида ЕҚ технологик жараёнига таъсир этувчи параметрларнинг турли қийматларида реагент концентрацияси ва босим қийматининг динамикаси тадқиқ қилинди; сонли тажрибаларни ўтказиш ва натижаларни икки ва уч ўлчовли график кўринишда визуализация қилиш учун компьютер модели ишлаб чиқилди; ишлаб чиқишнинг қаватли тизим шароитида фойдали қазилма конларини ишлаб чиқишни бошқаришда технологик қарорларни қабул қилишни қўллаб-қувватлаш учун ЕҚ жараёнининг дастурий мажмуаси ишлаб чиқилди.

**Амалий аҳамияти:** ишлаб чиқилган ҳисоблаш алгоритмлари ва компьютер моделини ЕҚ нинг қаватли тизим шароитида ишлаб чиқилувчи реал конлардан фойдали қазилмаларни мақбул олиш мақсадида уларнинг параметрларини бошқариш бўйича қарорлар қабул қилишда, таҳлил қилишда ва ЕҚ жараёнининг параметрларини башоратлашда қўллаш мумкин.

**Татбиқ этиш даражаси ва иқтисодий самарадорлиги:** олинган натижалар НКМК Шимолий Букинай конини ишлаб чиқишда қўлланилди, қўлланилганлиги тўғрисида татбиқ акти олинди. Яратилган дастурий восита Ўзбекистон Республикаси Давлат патент идорасида рўйхатга олинган.

**Қўлланиш соҳаси:** ЕҚ усули билан ишлаб чиқилувчи фойдали қазилма конлари.

## Р Е З Ю М Е

диссертации Жураева Тохиржона Мансурали угли на тему: «Моделирование динамических процессов в неоднородных средах для поддержки принятия технологических решений (на примере подземного выщелачивания)» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.01 - системный анализ, управление и обработка информации

**Ключевые слова:** подземное выщелачивание (ПВ), этажная система разработки, удельный вес реагента, гидродинамика, концентрация, компьютерная модель, численно-приближенный метод, потоковая прогонка, метод переменных направлений, целевая функция, управляющие параметры, поддержка принятия решений, схема управления.

**Объекты исследования:** рудные месторождения, эксплуатируемые методом ПВ в условиях использования этажной системы разработки.

**Цель работы:** разработка компьютерной модели процесса ПВ в неоднородных средах при реализации этажной системы разработки для анализа и поддержки принятия решений при управлении технологическим процессом ПВ.

**Методы исследования:** методы теории управления, математического моделирования, конечно-разностные методы и вычислительный эксперимент.

**Полученные результаты и их новизна:** разработана математическая модель управления процессом ПВ в условиях этажной системы разработки; исследована динамика изменения давления и значения концентрации реагента при различных значениях исходных параметров, влияющих на протекание технологического процесса ПВ в условиях этажной системы разработки; разработана компьютерная модель для проведения вычислительного эксперимента и визуализации результатов в двумерном и трехмерном графическом виде; разработан программный комплекс процесса ПВ в условиях этажной системы разработки для поддержки принятия технологических решения при управлении разработкой месторождений полезных ископаемых.

**Практическая значимость:** разработанные вычислительные алгоритмы и компьютерную модель можно применить при анализе, прогнозировании параметров процесса выщелачивания и при принятии решений по управлению его параметрами в целях оптимального извлечения полезных ископаемых из реальных месторождений в условиях этажной системы разработки.

**Степень внедрения и экономическая эффективность:** полученные результаты применены при разработке месторождения Северный Букинай НГМК, получен акт о внедрении. Созданное программное средство зарегистрировано Государственным патентным ведомством РУз.

**Область применения:** месторождения полезных ископаемых эксплуатируемых методом ПВ.

## RESUME

Thesis of Juraev Tohirjon Mansurali ugli on the scientific degree competition of the doctor of philosophy on technical sciences on speciality 05.13.01 – System analysis, management and information professions, subjects: “Modeling dynamic processes in heterogeneous environments for supporting to make technological decisions (on the example of underground leaching)”

**Key words:** underground leaching (UL), horizon mining system, reagent ratio, hydrodynamics, concentration, computer modeling, numerical-approximate method, stream running, method of the variable directions, target function, controlling parameters, decision making support, scheme of control.

**Subjects of research:** ore deposit, exploited methods of UL on the conditions of using horizon mining system.

**Purpose of work:** developing computer model of UL in heterogeneous environments in the realization of horizon mining systems for the analysis and decision making support in the control of technological processes of UL.

**Methods of research:** methods of control theory, mathematical modeling, finite-difference methods and computational experiment.

**The results obtained and their novelty:** mathematical model of controlling UL processes was developed on the conditions of horizon mining systems; dynamics of pressure change and the values of reagent concentration in the various values of outcome parameters, influencing on the behavior of technological process of UL on the conditions of horizon mining systems, was studied; computer model for carrying out computational experiments and visualizing the results in two dimensional and three dimensional graphics was developed; software package of UL process in the conditions of horizon mining systems for supporting making technological decisions in the control of mine workings was developed.

**Practical value:** developed computational algorithms and computer model can be applied for the analysis, prognosis of the parameters of leaching process and decision making for controlling its parameters on the purpose of optimal extraction of minerals from real deposit mines on the conditions of horizon mining systems of mine workings.

**Degree of embed and economical effectivity:** obtained results were applied in the mine North Bukinai NMSK, the act of applications was taken. Developed software was registered by Government Patent Committee of Uzbekistan.

**Field of application:** mineral deposit mines exploited by the method of UL.

Подписано к печати 28.11.2011 г. формат 60x84,1/16.  
Бумага офсетная. Усл.печ.л.1,75. тираж 100. Заказ \_\_\_\_.  
Отпечатано в типографии Института математики и  
информационных технологии. Ташкент ул. Дурмон йули, 25.

