

Казахский национальный исследовательский технический университет имени
К.И. Сатпаева

УДК 681.51:622.234.42(043)

На правах рукописи

ОРАКБАЕВ ЕРБОЛ ЖУМАГЕЛЬДИЕВИЧ

**Исследование и разработка эффективных систем управления процессом
подземного выщелачивания**

6D070200 – Автоматизация и управление

Диссертация на соискание степени
доктора философии (PhD)

Научный консультант
кандидат технических наук,
профессор Муханов Б.К.

Зарубежный научный консультант
доктор технических наук,
профессор Waldemar Wójcik

Республика Казахстан
Алматы, 2017

СОДЕРЖАНИЕ

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ.....	4
ОПРЕДЕЛЕНИЯ.....	5
ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ.....	6
ВВЕДЕНИЕ.....	7
1 ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОДЗЕМНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ.....	13
1.1 Описание технологии добычи урана методом подземного выщелачивания.....	13
1.2 Основные особенности метода ПВ.....	17
1.3 Современное состояние системы управления добычи	20
1.4 Выводы по разделу	24
2 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ПВ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ.....	25
2.1 Построение математической модели технологической цепочки «Закачная скважина – Рудное тело – Откачная скважина».....	25
2.2 Построение математической модели прогноза концентрации по ПР блока.....	30
2.3 Характеристики метода подземного выщелачивания как объект идентификации.....	31
2.4 Исследования модели технологической схемы ПВ на Matlab.....	36
2.5 Постановка задачи системы управления.....	38
2.6 Выводы по разделу.....	41
3 РАЗРАБОТКА ИЕРАРХИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ....	42
3.1 Разработка структуры иерархической системы управления.....	42
3.2 Разработка системы управления оптимального распределения растворов по закачным скважинам в блоке(нижний уровень).....	47
3.2 Разработка системы управления оптимального распределения растворов по блоком(средний уровень).....	49
3.3 Выводы по разделу.....	52
4 РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ВЕРХНИМ УРОВНЕМ УПРАВЛЕНИЯ ГТП.....	53
4.1 Основные уравнения фильтрации рудного тела. Закон Дарси.....	53
4.2 Исследование процесса подземного выщелачивания металлов с помощью численного моделирования в COMSOL Multiphysics.....	56
4.3 Создание структуры концептуальной модели для определение застойных зон в процессе ПВ.....	64
4.4 Синтез алгоритма определения режима работы блоков.....	76
4.5 Выводы по разделу.....	82
5 ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ.....	83
5.1 Применение результатов моделирования в разработке компьютерного виртуального тренажера для процесса ПВ урана.....	83
5.2 Разработка структуры комплекса технических систем для проведения	

промышленного эксперимента на руднике «Акдала».....	88
5.3 Выводы по разделу.....	94
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	95
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	96
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	102

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В настоящей диссертации использованы ссылки на следующие стандарты: «Инструкция по оформлению диссертации и автореферата», ВАК МОН РК, №377-Зж.

ГОСТ 7.32-2001 – Отчет о научно исследовательской работе. Структура и правила оформления.

ГОСТ 7.1 – 2003. Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В настоящей диссертации применяются следующие термины с соответствующими определениями:

Подземное выщелачивания – химический способ добычи полезных компонентов с помощью раствора реагента без извлечения руды на поверхность, через систему технологических скважин.

Реагент – химическое вещество в виде водного раствора, используемое для выщелачивания или ускорения извлечения полезного компонента.

Скважины закачные – скважины, через которые в рудные тела подается выщелачивающий раствор.

Скважины откачные – скважины, через которые из рудного горизонта выдается на поверхность продуктивный раствор. В практике подземного выщелачивания закачные и откачные скважины могут меняться назначением.

Продуктивный раствор – продукт химического взаимодействия активной примеси с материалом грунта.

Выщелачивающий раствор – раствор, содержащий необходимые для извлечения полезного компонента реагенты и подаваемый в закачные скважины.

Метод конечных разностей – численный метод решения дифференциальных уравнений, заключающийся в замене их разностными уравнениями.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

ПВ	– подземное выщелачивания;
ПСВ	– подземное скважинное выщелачивания;
ГТП	– геотехнологическое поле;
РТ	– рудное тело;
УПВР	– узел подготовки выщелачивающего раствора;
УППР	– узел приема продуктового раствора;
ТУЗ	– технологический узел закисления;
ПО ВР	– пескоотстойники выщелачивающего раствора;
ПО ПР	– пескоотстойники продуктивного раствор;
АСУТП	– автоматизированная система управления технологическим процессом;
ЭВМ	– электронно-вычислительная машина;
КСУ	– компьютерные системы управления;
КТК	– компьютерный тренажерный комплекс;
SCADA	– Supervisory Control And Data Acquisition (диспетчерское управление и сбор данных - название класса систем для комплексной автоматизации промышленного производства);
TCP/IP	– Transmission Control Protocol/Internet Protocol - протокол управления;
САУ	– системы автоматизированного управления;
МНК	– метод наименьших квадратов;
САПР	– система автоматизированного проектирования;
АСУ	– автоматизированная система управления;
АРМ	автоматизированное рабочее место;
КИП	контрольно-измерительные приборы.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы диссертационного исследования

Геотехнологический способ добычи ископаемых является наиболее эффективным и активно используется в Казахстане. Он характеризуется низкой себестоимостью и, что важно, позволяет использовать высокий уровень автоматизации, дает возможность вовлекать в отработку месторождения со сложными горнотехническими и гидрогеологическими условиями, в том же числе со значительными глубинами залегания рудных тел в обводненных высоконапорных горизонтах и за балансовым содержанием металла в рудах.

Особенность процесса подземного выщелачивания (ПВ) определяется процессом фильтрации жидкости в грунте. Проницаемость руд и вмещающих пород - одно из важнейших условий движения выщелачивающих растворов(ВР), поэтому при моделировании процессов ПВ, изучение фильтрационных свойств является одной из главных задач. Однако при использовании данного метода появляются невыработанные застойные зоны, в связи с чем, возникает необходимость проведения исследований, связанных с повышением степени извлечения минерала определением оптимальных систем управления электроприводов погружных насосов и режимов работы скважин, а также фильтрационными токами в пласте[1].

Эффективность работы этого способа добычи полезных ископаемых во многом определяется оперативной оценкой основных параметров гидродинамического состояния скважин и пластов, чтобы современно принимать те или иные технологические приемы и управление по устранению технологических нарушений.

Существующая практика систем управления геотехнологическим полем (ГТП) характеризуется тем, что управление технологическим процессом подземного выщелачивания заключается в основном, в поддержании балансовых расходных характеристик по выщелачивающим и продуктивным растворам(ПР). Задания по расходам формируются на основе геотехнологических данных, опыта, и навыков геотехнолога рудника. В этом случае ведение процесса осуществляется в условиях информационной неопределенности текущих характеристик фильтрующих свойств среды, таких как проницаемость рудного тела, связывающих скорость фильтрации с градиентом напора.

Даже учитывая то, что технология добычи металла достаточно хорошо развита, предприятия – производители уже сегодня нуждаются в эффективных инструментах оптимизации стратегии его добычи и снижении себестоимости и, как результат, более рациональном, комплексном использовании недр. В связи с этим актуальна разработка эффективных систем управления ПВ.

В данной работе, для оценки параметров ПВ предлагается разработать алгоритмическое, информационное и техническое обеспечение системы по определению данных характеристик, работающих в рамках существующих

SCADA – систем, что позволяет синтезировать эффективную иерархическую систему управления процессами ПВ.

Разработка и моделирование алгоритмов эффективного управления процессом подземного выщелачивания на геотехнологических полях рудников «Казатомпрома» является актуальной задачей.

Цель работы. Разработать иерархическую систему управления обеспечивающую эффективный режим подземного скважинного выщелачивания металлов.

Основная идея работы. Разработка трехуровневой системы управления для оптимального распределения выщелачивающих растворов и синтез систем управления методом эффективного извлечения, путем определения «застойных зон» на основе численного моделирования. Построение математических моделей и идентификация аналитических зависимостей для обоснования оптимального управления технологии подземного выщелачивания, направленных на эффективную эксплуатацию.

Задачи исследования. В соответствии с поставленной целью определены следующие научные задачи, которые необходимо решить в настоящей работе:

- идентификация (оценка) фильтрационных свойств рудного тела (коэффициент пористости) по каждой закачной скважине блока ГТП;
- оптимальное распределение ВР по закачным скважинам блока, в соответствии с заданием, полученном от среднего уровня управления;
- разработка прогнозной модели процесса выщелачивания по блоку;
- реализация алгоритмов распределения ВР по блокам ГТП по показаниям содержания готового продукта в ПР;
- изучение влияния изменения дебитов скважин на проработку выщелачивающими растворами гидродинамических застойных («мертвых») зон, формируемых линиями тока, в ряду (створе) нагнетательных скважин;
- разработка модели управления, созданных с помощью численных методов;
- разработка программного обеспечения, реализующего алгоритмы в промышленных контроллерах;
- проведение испытаний алгоритмов в промышленных условиях.

Объект исследования. Объектом исследования является процесс подземного выщелачивания и технологической системы трубопроводов по подаче и откачке растворов. А также модель ПВ (фильтрации) представленная с помощью программного комплекса Comsol.

Методы исследований. В ходе решения поставленных задач будут использованы теория автоматического управления, методы математического моделирования, моделирование объектов в частных производных, численное моделирование с помощью методов конечных элементов, методы идентификации, методы гидродинамического исследования скважин, методы обработки сигналов.

В качестве инструментов моделирования применялись современные пакеты прикладных программ: Matlab, Comsol Multiphysics.

Научная новизна работы

- разработана алгоритмическая трехуровневая система управления процессом подземного выщелачивания;
- разработаны методы оценок фильтрующих свойств рудного тела (задача параметрической идентификации) в процессе подземного выщелачивания;
- предложены методы и средства разработки математических моделей процесса управления объектом;
- разработано алгоритмическое обеспечение задачи распределения выщелачивающих растворов;
- разработаны алгоритмы идентификации гидросопротивления в прискважинной зоне;
- разработаны алгоритмы оценки концентрации металла в продуктивных растворах.
- построены численные модели для выявления застойных зон ПВ в среде Comsol;
- предложены режимы работы (стационарный и нестационарный) закачных скважин для повышения эффективности процесса подземного выщелачивания на уровне ГТП;
- обработаны и проанализированы полученные результаты промышленных испытаний алгоритмов идентификации и управления для корректировки алгоритмического и программного обеспечений систем.

На защиту выносятся следующие научные положения

- алгоритмическая трехуровневая система управления процессом подземного выщелачивания для оптимального распределения выщелачивающих растворов;
- идентификация (оценка) фильтрационных свойств рудного тела (коэффициент пористости) по каждой закачной скважине блока ГТП, путем измерения уровня ВР в скважине (бюджетный вариант уровнемера), расхода ВР и решение задачи ГДИС (гидродинамические исследования скважин);
- результаты численных моделей, которые показывают застойные зоны при существующих режимах работы подземного выщелачивания в среде Comsol Multiphysics;
- режимы работы (стационарный и нестационарный) скважин для повышения эффективности процесса подземного выщелачивания на уровне ГТП;
- полученные результаты промышленных испытаний алгоритмов идентификации и управления для корректировки алгоритмического и программного обеспечений систем;

Практическая значимость результатов проведенных исследований

Разработанные средства измерения и методы управления позволят апробировать бюджетный вариант измерения уровня в закачных скважинах. Используя показания уровня и расходных характеристик выщелачивающего

раствора (ВР), разработан алгоритм оценки фильтрующих свойств среды (рудного тела). На основе полученных оценок текущих фильтрующих свойств рудного тела разработаны алгоритмы оптимального распределения ВР по блокам геотехнологического поля. Кроме этого, на верхнем уровне управления будут решены задачи и разработаны алгоритмы по выбору стационарного или нестационарного режима выщелачивания для вымывания застойных зон рудного тела по блокам ГТП. Разработанная система оптимального управления процессами добычи урана позволит снизить затраты материальных и энергетических ресурсов производства, повысить качество продукции и снизить экологические последствия применяемых технологий.

Полученные результаты оптимального алгоритма распределения выщелачивающего раствора по закачным скважинам и эффективные режимы работы погружных насосов откачной скважины использованы при разработке НИР: «Разработка сетевых моделей синтеза системы оптимального управления подземной добычи урана», № Госрегистрации 0113РК00566, 2013-2015гг.

Получен акт внедрения алгоритмов идентификации и управления процессом подземного выщелачивания.

Конкретное личное участие автора в получении научных результатов заключается в:

- постановке задач исследований и способов их реализации;
- разработке и построения математических моделей скважин и рудного тела, идентификации параметров ПВ;
- разработке алгоритма иерархической системы управления процессом подземного выщелачивания;
- определении и оценке прогнозной модели при численном моделировании выявления застойных зон ПВ в среде Comsol Multiphysics;
- определении режимов работы скважин для повышения эффективности процесса подземного выщелачивания на уровне ГТП;
- практической реализации эффективного распределения выщелачивающих растворов и при разработке беспроводного гидростатического датчика уровня.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на Международной научно-практической конференции «Роль и место молодых ученых в реализации новой экономической политики Казахстана» Международных Сатпаевских Чтений (Алматы, 2015); на The 15th International Scientific Conference Information Technologies and Management (Riga, 2017); на Международной научно-практической конференции «Математические методы и информационные технологии макроэкономического анализа и экономической политики» (к 80-летию академика А. Ашимова) (Алматы, 2017); на Lubelskie Dni Nauki i Biznesu. Pod patronatem honorowym Polskiego stowarzyszenia tomografii procesowej I Komitetu elektrotechniki polskiej akademii nauk. Warsztaty doktoranckie. WD2016. Science conference (Lublin, 2016); на Environmental

engineering V : proceedings of the fifth National Congress of Environmental Engineering, (Lublin, Poland, 2016).

Публикации: по теме диссертации опубликовано 13 печатных работ.

Из них – 6 тезисов докладов на конференциях, в том числе 4 международного уровня, 1 статья опубликованы по итогам зарубежных конференции (Польша, Люблин), 3 статьи - журналах, рекомендованных ВАК, 1 статья в инженерно-техническом журнале, 3 статьи опубликованы в зарубежных изданиях, входящих в международную базу данных по цитируемости Scopus.

Структура и объем диссертации: диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов основного содержания, заключения и приложений, библиографического списка из 71 наименования и содержит 113 страниц, 67 рисунков и 2 таблиц.

В первом разделе приведено подробное описание технологического процесса добычи урана методом подземного выщелачивания, представлены схемы технологического процесса, описаны особенности и приведены основные преимущества метода подземного выщелачивания, а также недостатки метода. Описаны современные методы и проблемы управления подземного выщелачивания, в котором отсутствуют возможности прямого оперативного контроля и большая инерционность процесса, растянутость его во времени делает управление добычей сложной задачей.

Во втором разделе диссертации были построены модели: технологической цепочки «закачная скважина – рудное тело - откачная скважина»; модели прогноза концентрации по продуктивным растворам блока; Проведена параметрическая идентификация закачной, откачной скважины и рудного тела. Определены зависимости гидросопротивления призабойной зоны на расход выщелачивающего раствора в закачной скважине. Предложена методика определения расходно-напорной характеристики по откачной скважине. Построенные математические модели исследованы в среде MATLAB. На основе построенных математических моделей выявлена постановка задачи системы управления.

В третьем разделе предложена структура иерархической системы распределения выщелачивающих растворов, которая состоит из трех уровней управления. Разработана блок-схема алгоритма управления нижнего уровня, где решается задача оптимального распределения выщелачивающих растворов по закачным скважинам. Построен алгоритм среднего уровня управления, где поставлена задача оптимального распределения ВР по блокам ГТП. Сформированы потоки данных, которые передаются для анализа на верхний уровень управления.

В четвертом разделе смоделирован процесс подземного выщелачивания, который относится к классу сложных и нелинейных объектов. Представлены также результаты численного моделирования определение застойных зон при стационарном режиме управления геотехнологическим полем. Проанализированы методы вымывания слабопроницаемых зон при

гексагональной схеме процесса добычи подземного выщелачивания. Определены эффективные режимы работы закачных скважин для оптимального извлечения минерала. Построены геометрические модели определения застойных зон.

В пятом разделе указано, что поставленные цели исследования были выполнены, а разработанные алгоритмы идентификации и управления проверены в промышленных условиях на руднике «Акдала». Результаты математических и численных моделей использовались при создании компьютерного тренажера для операторов. Промышленные испытания показали эффективность предложенных подходов к системе управления.

В заключении диссертации по результатам представленных и обсуждённых разработок и исследований сформулированы основные выводы работы.

1 ТЕХНОЛОГИЯ ПОДЗЕМНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ

1.1 Описание технологии добычи урана способом подземного выщелачивания

Казахстан имеет 12% мировых запасов урана и расширяющийся горнодобывающий сектор, произвел его в 2016 году около 24 575 тонн. С 2009 года Республика стала ведущим мировым производителем урана с почти 28% уровнем мирового производства. В 2010 году он составил 33%, увеличившись до 41% в 2014 году и до 39% в 2015 и 2016 годах. За период с 2001 по 2016 год производство урана выросло с 2022 тонн до 24575 тонн в год, что делает Казахстан ведущим мировым производителем. Из 17 рудников его добыче пять полностью принадлежат «Казатомпрому», а 12 – это совместные предприятия с иностранным участием, причем некоторые из них работают по номинальной мощности. В 2016 году «Казатомпромом» было добыто 12,986 тыс. тонн – 21% мирового производства, опередила «Камеко», а затем «Арева» и «АРМЗ-Уран-1»[6].

В последнее десятилетие в Казахстане все более активно внедряется и используется геотехнологический способ добычи полезных ископаемых. Распределение концентрации урана, показателей проницаемости среды и других геотехнологических показателей восстанавливается путем статистической обработки данных геологического опробования, произведенного в отдельных разрозненных точках его месторождений.

Необходимым условием для применения способа ПВ является возможность движения выщелачивающего реагента в рудной зоне, т.е. рудоносные породы должны обладать естественной или искусственно созданной проницаемостью. В отличие от традиционной схемы добычи и переработки руд технологическая схема подземного выщелачивания из пластовых месторождений, продуктивный горизонт которых обводнен, не требует сложного комплекса сооружений по водоснабжению и очистке промышленных стоков, так как они в процессе отсутствуют. С экологических позиций способ ПВ можно отнести к безотходным способам добычи полезных ископаемых.

Предприятия подземного выщелачивания включают в себя два основных комплекса: добычной и перерабатывающую технологическую установку. Добычной комплекс – это технология и технические средства для извлечения из недр полезных ископаемых в виде растворов и доставки их на перерабатывающую установку. Добычной комплекс состоит из двух частей: подземной и поверхностной[7].

Подземная часть включает в себя технологические скважины и их оборудование, с помощью которых обеспечиваются вскрытие продуктивного горизонта, подготовка рудного тела к выщелачиванию, сам процесс выщелачивания и подъем продуктивного раствора через скважины.

Скважины являются основным звеном в техническом оснащении предприятий подземного выщелачивания. Удельный вес затрат на бурение в

себестоимости конечной продукции составляет 15-30% в зависимости от глубины залегания месторождения[9].

С помощью скважин производят разведку и определяют запасы месторождения, уточняют геометрические формы рудных тел, осуществляют вскрытие и подготовку рудных залежей к выщелачиванию. В технологическом процессе через скважины в пласт подают выщелачивающий раствор и отбирают из пласта продуктивные металлосодержащие растворы, контролируют движение технологических растворов в продуктивном горизонте и полноту извлечения полезного ископаемого. Через скважины осуществляют и различные мероприятия с целью предохранения недр и окружающей среды от загрязнения. Отработка месторождения способом подземного выщелачивания в зависимости от его масштабов требует сооружения от нескольких сотен до нескольких тысяч скважин[8].

Выход даже одной скважины из строя или неправильная их эксплуатация отрицательно влияет на технологию процесса ПВ и требует оперативной перестройки режимов эксплуатации производственной ячейки или блока. За последние годы существенно улучшились технико-экономические показатели строительства скважин. Применяются новые трубные материалы, позволяющие оборудовать скважины глубиной до 650 м и повысить качество их эксплуатации[10].

Поэтому технико-экономические показатели метода добычи металла подземным выщелачиванием во многом зависят от качества сооружения скважин, их стоимости, режимов работы и схем расположения. Как правило, при подземном выщелачивании полезных ископаемых рудное тело(РТ) вскрывается скважинами, пробуренными с поверхности земли. И очень редко используются существующие горные выработки для подготовки из них рудных залежей к выщелачиванию[11].

В зависимости от функционального назначения технологические скважины делятся на две группы: эксплуатационные и вспомогательные.

Эксплуатационные скважины непосредственно участвуют в добыче металла из недр. Через них осуществляется транспортирование растворов и регулирование гидродинамического режима в продуктивном пласте. По назначению эксплуатационные скважины подразделяются на откачные и закачные[12].

Откачные скважины (иногда их называют разгрузочными) предназначены для подъема продуктивных (металлосодержащих) растворов из продуктивного пласта на поверхность. Закачные скважины (иногда их называют нагнетательные) предназначены для подачи в продуктивный пласт (рудную залежь) выщелачивающих растворов (растворителя)[13].

В то же время и эксплуатация закачных скважин осуществляется в различных технологических режимах. Подача выщелачивающих растворов в продуктивный горизонт может производиться свободным наливом или нагнетанием под избыточным давлением на устье скважины, с постоянным

расходом или определенными порциями, с равномерной или цикличной подачей[14].

Группа вспомогательных скважин непосредственного участия в добыче металла не принимает. Большая роль отводится им при изучении месторождения, подготовке пласта к выщелачиванию, охране и очистке недр от загрязнения, контроле за процессом ПВ и др. К этой группе относятся: скважины для подготовки месторождения и рудных залежей к подземному выщелачиванию металла из недр (разведочные, анкерные и скважины для изменения коллекторских свойств пласта); скважины, ограничивающие движение технологических растворов в пласте; скважины, с помощью которых осуществляется контроль за технологическим процессом ПВ (наблюдательные и контрольные).

Наблюдательные скважины предназначаются для наблюдений и контроля за условиями формирования продуктивных растворов в пределах эксплуатационных блоков, гидродинамическим состоянием продуктивного горизонта, растеканием технологических растворов за пределы эксплуатационных участков и их возможным перетеканием в выше- или нижележащие горизонты[15].

Проектирование конструкций скважин невозможно без учета основных факторов, влияющих на процесс их сооружения (геологические, гидрогеологические, технологические, географические, экономические, физико-механические). К геологическим факторам относятся все сведения, характеризующие район месторождения: литологический разрез, форма рудных тел, минералогический состав перекрывающих рудовмещающих и подстилающих пород. Исходные данные по геологии влияют на конструкцию скважины, выбор бурового оборудования и различных материалов, необходимых при сооружении скважин[16].

К гидрогеологическим исходным данным относятся сведения о проницаемости руд и вмещающих пород, положение пьезометрического уровня подземных вод, величина напоров различных водоносных горизонтов, встречающихся в разрезе месторождения, и характер их связей друг с другом, температура и состав подземных вод. Эти данные нужны для определения зон изоляции в скважинах, выбора числа колонн при проектировании скважин, определения типа скважинного насоса для откачки продуктивных растворов и подбора конструкции приемной части скважин (конструкции фильтра)[17].

К технологическим исходным данным относятся: тип и концентрация растворителя (выщелачивающего раствора), наличие окислителя и его тип, технологическая схема выщелачивания, производительность скважин, число скважин по назначению, требуемых для ведения технологического процесса. Технологические исходные данные используются для выбора материала эксплуатационной колонны и фильтра, насосного оборудования, конструирования скважинного оборудования. Кроме того, эти данные позволяют правильно организовать технологию изоляционных работ в скважинах[18].

Сведения о климате, рельефе района, наличии вблизи водоисточников позволят правильно выбрать тип буровой установки, укрытия, организовать глино и водоснабжение бурового цеха. Физико-механические свойства горных пород, слагающих месторождение (плотность, трещиноватость, крепость, склонность к обрушению, гранулометрический состав и т.д.), являются определяющими при выборе промывочного реагента, подборе породоразрушающего наконечника и разработке режима бурения[19].

Основным параметром, определяющим конструкцию откачной скважины, является ее производительность, а закачной – приемистость.

Если откачка раствора из скважин осуществляется погружными насосами, то при выборе их типа нужно знать уровень, химический состав раствора и его температуру. По технической характеристике насоса (напор, подача, температурное и коррозионностойкое исполнение) подбирают его марку. Например, технологическая производительность откачных скважин 5 м³ч; выщелачивающий раствор – 3-5%-ный раствор H₂SO₄: температура пластовой воды 22 С; уровень раствора в скважине расположен на глубине 180 м.

Реже применяются т.н. гексагональные ячейки, состоящие из шести закачных скважин, в узлах шестиугольника, и одной откачной, в центре. Режим подачи раствора реагента может быть как постоянным, так и варьироваться; иногда даже используется т.н. реверсивный режим, когда через откачные скважины подают раствор, а через закачные – поднимают.

В качестве реагента, как правило, применяют слабый раствор серной кислоты (7-8 г/дм³). Реже, в зависимости от свойств руд, применяются технологии карбонатного (бикарбонатного) выщелачивания с окислителем и «безреагентного» выщелачивания, с использованием кислорода воздуха в качестве окислителя.

Минералы, в которых уран находится в шестивалентном состоянии, хорошо растворяются в растворах серной кислоты. Реакции взаимодействия раствора с четырехвалентным ураном идут существенно медленнее. Важно учесть, что реакции растворения урановых соединений являются обратимыми и при увеличении рН выше предельного значения, достаточного для удержания урана в растворенном состоянии (рН = 2-2,5), происходит лавинное выпадение осадка. Это явление оказывает существенное влияние на динамику ПВ, меняет характеристики проницаемости среды, приводит к перераспределению концентрации урана в твердой фазе. На повышение рН может повлиять ряд внешних факторов, таких как разбавление растворов пластовыми водами, расходование реакционной способности реагента на соединения примесей и т.д. Аналогичный эффект наблюдается при снижении насыщенной концентрации урана в растворе из-за других причин, отличных от изменения уровня рН, например, снижения давления[20].

1.2 Основные особенности метода ПВ

Подземное выщелачивание обладает рядом очевидных преимуществ по сравнению с традиционными способами добычи полезных ископаемых. При

организации добычи методом ПВ из состава капитальных затрат исключаются дорогостоящие горно-капитальные работы, строительство отделений дробления, измельчения и обогащения руд. Сокращается транспортная инфраструктура и потребность в электроэнергии. Не требуется строительство гидросооружений для складирования хвостов. В результате при строительстве предприятия обрабатывающего месторождения способом ПВ, объем капитальных затрат сокращается в 2-4 раза по сравнению с традиционным, срок строительства сокращается. Уменьшается численность рабочих. Аналогичная тенденция прослеживается и в отношении эксплуатационных затрат. Низкая себестоимость - не просто дополнительная прибыль предприятия - недропользователя. Снижение затрат позволяет вовлечь в переработку более бедные, упорные и труднодоступные руды, что обеспечивает рациональное и комплексное использование недр, продлевает срок эксплуатации рудников[4].

Подземное выщелачивание считается одним из наиболее экологически чистых способов добычи полезных ископаемых, т.к. оно не сопровождается образованием отходов и нарушением целостности почвы.

В то же время ПВ обладает рядом характерных особенностей, делающих его применение специфичным и требующим специальных знаний и инструментов анализа и управления процессом. Прежде всего, в отличие от традиционных видов добычи, при проведении подземного выщелачивания инженер, управляющий процессом, лишен возможности наблюдать за его течением. Распространение реагента и химические реакции протекают глубоко в недрах, и о состоянии процесса можно судить лишь по отдельным косвенным и неполным показателям. Число скважин на одном месторождении обычно составляет несколько сотен, а срок отработки – в среднем от 3 до 5,5 лет[21].

Подземное выщелачивание, возникшее как идея в 50-х годах в США, сегодня превратилось в признанный способ получения урана, конкурентоспособный по отношению к традиционному горно-химическому.

На Евразийском континенте приоритет в освоении и промышленной эксплуатации урановых руд способом подземного скважинного выщелачивания до настоящего времени остается за некоторыми странами СНГ, среди которых ведущая роль по объемам производства принадлежит Казахстану[22].

Из достоверно разведанных запасов урана Казахстана 75% относятся к пластово-инфильтрационному типу, пригодному для отработки способом подземном-скважинным выщелачиванием(ПСВ). Начиная с 1998 года, практически весь уран, произведенный в Республике, был добыт этим способом. Отсюда, перспективы Казахстана, как одного из основных депозитариев урана, в первую очередь, связаны именно с отработкой пластово-инфильтрационных месторождений[23].

Проводимые научно-исследовательские, опытно-промышленные и промышленные работы, касающиеся различных аспектов способа ПСВ, позволили выявить главнейшие его особенности, преимущества и недостатки перед традиционным горным способом.

Основные преимущества способа ПСВ заключаются в[5]:

- сокращении капиталовложений и сроков строительства в 2-3 раза вследствие отсутствия сложных капитальных сооружений, неизбежных при проходке всех видов горных выработок, добыче руды, ее транспортировке, переработке и создании хвостохранилищ;
- повышении в несколько раз производительности труда за счет исключения целого ряда трудоёмких процессов и переделов;
- снижении себестоимости продукции в 2 - 2,5 раза, несмотря на то, что руды месторождений, обрабатываемые способом ПСВ, гораздо беднее по содержанию урана;
- высокой (80-90 %) степени извлечения урана из недр;
- возможности отработки месторождений со сложными горно-геологическими и гидрогеологическими условиями залегания;
- исключении из цикла добычи урана самых дорогостоящих и опасных по исполнению подземных горных работ, которые заменяются бурением скважин с поверхности;
- возможности полной автоматизации процессов добычи и переработки урансодержащих концентратов вплоть до получения конечной продукции;
- щадящем воздействии на недра и окружающую среду.

Наряду с указанными преимуществами способа, в процессе проведения работ по ПСВ выяснилось, что подземное выщелачивание через скважины не так просто в своем исполнении, как кажется на первый взгляд. Способ требует более пристального к себе внимания и творческого подхода во всех звеньях геотехнологической цепи, начиная от ранних этапов разведки месторождений и до получения химических концентратов природного урана[25].

Прежде всего, установлена значительная неоднородность минерально-петрографических, геотехнологических, фильтрационных свойств руд и рудовмещающих горизонтов, как в плане, так и в разрезе, что при отсутствии надежных методов контроля за движением рабочих растворов делает процесс ПСВ трудно управляемым, а также усложняет гидродинамические расчеты его параметров. Отсюда вытекает одно из важнейших положений, сводящееся к тому, что для успешной работы предприятий по добыче урана способом ПСВ необходима более полная и детальная информация о недрах, чем это требуется при традиционном горном способе. В течение нескольких лет кислотный метод подземного выщелачивания проходил на всех этапах исследований, разработок и промышленного внедрения. В течение этого периода выяснилось, что из-за уникальных и переменных характеристик каждого уранового месторождения требуется большое внимание и творческое решение проблемы для успешного внедрения и эксплуатации технологии подземного выщелачивания.

Основываясь на сравнении опыта между обычным и подземным выщелачиванием добычи урана (как кислотного, так и щелочного), было

обнаружено, что добыча подземного выщелачивания имеет следующие преимущества:

- низкие капитальные и операционные расходы по проекту;
- низкое энергопотребление и меньшее требуемое оборудование;
- сокращение продолжительности разработки и запуска проекта;
- высокий денежный поток в течение одного года;
- быстрая окупаемость инвестиций.

В дополнение к обширному применению кислоты при подземном выщелачивании, карбонатное (щелочное) выщелачивание проводилось советскими специалистами на месторождениях Суграли и Канимех в Узбекистане. На основе сравнения результатов этих операций можно перечислить преимущества и недостатки технологий кислотного и карбонатного подземного выщелачивания. Преимущества кислотного выщелачивания:

- более высокая степень извлечения урана из руды (70-90%);
- благоприятная кинетика выщелачивания (при 80%-ном восстановлении количество объемов пор циркулирующего раствора выщелачивания составляет 3-4, по сравнению с 10-12 для карбонатных растворов);
- сравнительно короткий период выщелачивания - до 2-5 лет для кислоты (в зависимости от размера скважины, проницаемости руды, структуры скважины и т. д.);
- возможность извлечения побочных продуктов;
- ограниченное просачивание за пределы поля выщелачивания из-за образования низкопроницаемых химических осадков, которые блокируют поток;
- добавление окислителей не требуется из-за широкого присутствия оксида железа в рециркулируемых растворах;
- возможность самовосстановления (или самозатухания) оставшегося раствора выщелачивания из-за самоочистки или «повторной циркуляции» загрязненных растворов через прилегающие бесплодные породы.

Недостатками кислотного процесса являются:

- потребление кислоты в карбонатно-содержащих рудах (то есть содержание CO_2 более 1,5-2,0%) увеличивает химические затраты и может сделать процесс неэкономичным;
- риск закупорки пор (химическими и газовыми пузырьками);
- повышенная концентрация растворенных твердых веществ в рециркулированных выщелачивающих растворах (до 15-25 г / л);
- обязательное использование коррозионно-стойких материалов и оборудования;
- сравнительно высокая стоимость реагента.

Имеются геотехнологические факторы (параметры и характеристики), определяющие принципиальную возможность разработки месторождений способом ПСВ (обводненность продуктивного горизонта, наличие водоупоров, продуктивность пласта, проницаемость вмещающих пород и

самих руд, масштабы месторождения), влияющие на интенсивность и скорость протекания процесса ПСВ (мощность продуктивного горизонта, коэффициент фильтрационной неоднородности, степень извлечения урана, расположение рудных тел в вертикальном разрезе) и влияющие на тип применяемого выщелачивающего реагента (вещественный состав рудовмещающего горизонта).

Другие геотехнологические параметры, такие как ширина рудных залежей, глубина их залегания, морфология рудных тел, глубина залегания уровня подземных вод, определяют выбор рациональной схемы для расположения технологических скважин, способов подъема и закачки технологических растворов и т.д. К настоящему времени на основании лабораторных экспериментов, натуральных опытов по подземному скважинному выщелачиванию, выполненных при разведке месторождений, и главное, наблюдений в процессе их эксплуатации, сформулирован ряд основных закономерностей ПСВ урана.

1.3 Современное состояние системы управления добычи урана

Отсутствие возможности прямого оперативного контроля, большая инерционность процесса, растянутость его во времени делают управление добычей сложной задачей. И цена ошибки высока[2].

Возможность применения и эффективность способа ПВ зависят от широкого комплекса факторов, определяемых геологическими, гидрогеологическими и другими особенностями конкретных месторождений.

В. Ж. Аренс и А. М. Гайдин предложили выделить по степени влияния на процесс ПВ решающие, главные и второстепенные факторы. Решающие факторы определяют принципиальную возможность применения способа ПВ для разработки месторождения, главные – обуславливают экономику процесса, второстепенные – должны правильно учитываться при проектировании и эксплуатации для обеспечения максимального эффекта освоения.

Все природные факторы могут быть объединены в пять групп, определяемых[30]:

- геологическим строением месторождения, вещественным составом руд и вмещающих пород;
- гидрогеологическими особенностями месторождения;
- инженерно-геологическими особенностями месторождения;
- морфологией, размером и параметрами рудных тел;
- географо-экономическими и социально-экономическими условиями района месторождения.

Полнота и детальность изученности этих факторов обуславливают возможность оценки промышленного значения гидрогенных месторождений для разработки методом ПВ и проектирование соответствующих предприятий. Вместе с тем на основе изучения только природных факторов в большинстве случаев удается получить лишь качественную оценку основных геотехнологических параметров процесса. Количественная их оценка,

необходимая для проектных расчетов, получается при проведении натуральных опытов[31].

Эффективность работы во многом определяется своевременной определением (оценкой) параметров гидродинамического состояния скважин и пластов, чтобы своевременно принимать те или иные технологические приемы и управление по устранению технологических нарушений. С этой целью через скважины, пробуренные с поверхности, в рудную зону подают химический реагент, способный переводить минералы полезного ископаемого в растворимую форму. Раствор, пройдя путь от закачной скважины к откачной, поднимается с помощью технических средств на поверхность и далее по трубопроводам транспортируется к установкам для переработки[32].

Сделав какое-либо управляющее воздействие, инженер-оператор увидит отклик системы на это воздействие с большой временной задержкой и весьма неоднозначно. Среди основных параметров, которые можно наблюдать - поступление продуктивного раствора из откачных скважин и концентрация в нем урана и других элементов. Инструментарий оператора для воздействия на процесс тоже весьма невелик. Это выбор типа сети, расположения и количества скважин, состав реагентного раствора и режим его закачки и откачки[33].

Наиболее распространенные проблемы – кальмотация, иначе говоря забивание пор и трубок тока раствора с переходом урана в трудно растворимые соединения. Также существует и обратная проблема – образование «промоин» - каналов, по которым раствор достигает откачных скважин, не проработав нужного количества руды. В обоих случаях приходится менять конфигурацию сети, порой пробуривая новые скважины. К всему этому добавляется традиционная для горной промышленности неполнота и ограниченность исходных данных о геологической среде. Существующая практика и системы управления геотехнологическим полем характеризуются тем, что управление технологическим процессом подземного выщелачивания заключается, в основном, в поддержании балансных расходных характеристик по выщелачивающим и продуктивным растворам. Задания по расходам формируются на основе геотехнологических данных и опыта, и навыков геотехнолога рудника. В этом случае ведение процесса осуществляется в условиях информационной неопределенности текущих характеристик фильтрующих свойств среды, таких как проницаемость рудного тела, связывающей скорость фильтрации с градиентом напора[34].

Основной областью использования урана сегодня является изготовление топлива для ядерных электрогенерирующих реакторов. Геотехнологические поля представляют собой территориально распределенную сеть закачных и откачных скважин, топологически связанную с выделением геологических блоков и «залежей», оснащенную емкостями и технологическим оборудованием для закисления выщелачивательных растворов, их подачи в рудные горизонты и откачки продуктивных растворов[35].

Задачи оперативно-диспетчерского управления таким сложным геотехнологическим комплексом разветвленной структуры заключаются в составлении производственной программы и текущем контроле состояния технологических процессов и оборудования на основе иерархической двухуровневой сети операторских (диспетчерских) пунктов и применения технических средств автоматизации. На нижнем уровне (оператора), персоналом осуществляется контроль и регистрация (при отсутствии возможности автоматической регистрации и передачи данных) сведений о значениях технологических переменных и состоянии оборудования[36].

Значительная удаленность от центральной промплощадки и протяженность ГТП осложняют автоматическую передачу данных о значениях расходов выщелачивающих и продуктивных растворов на верхние уровни управления. Кроме того, кислотность и содержание урана в растворах определяются химическим анализом и затем передаются и вводятся в электронно-вычислительную машину (ЭВМ) в ручном режиме. Планирование производственной программы осуществляется на основе прогнозных данных запасов урана по блокам и текущей оценке содержания урана в продуктивных растворах. Выполняются балансовые расчеты по добыче, переработке и выпуску продукции.

Несмотря на то, что мировая сырьевая база этого металла достаточно хорошо развита, предприятия - производители уже сегодня нуждаются в эффективных инструментах оптимизации стратегии его добычи, снижении себестоимости и, как результат, более рационального, комплексного использования недр. Математическое моделирование динамики скважинного подземного выщелачивания как раз является одним из таких инструментов.

Современное состояние проблемы математического моделирования динамики ПСВ. Как уже отмечалось, исследование проблем математического моделирования ПВ ведется с начала 80-х годов прошлого столетия. К настоящему времени, судя по опубликованным работам, сформировались два основных типа моделей выщелачивания: детерминированные и вероятностно-статистические. Детерминированные модели разрабатываются на основе закономерностей протекания физических и химических процессов. В основе вторых - установленные опытным путем зависимости между природными управляемыми параметрами процесса и результатами, получаемыми «на выходе».

Большинство из рассмотренных работ посвящено детерминированным подходам в моделировании. Статистическим же посвящено сравнительно мало публикаций. Однако это не означает, что такие модели не находят применения в практике добывающих предприятий. Напротив, статистические модели успешно используются при оценке интегральных характеристик процесса. Например, для определения прогнозного срока отработки того или иного блока, среднего значения необходимого количества раствора реагента, которое должно проконтактировать с единицей массы руды (т.н. показатель «жидкое к твердому», или Ж:Т) и т.д.

Статистические модели хорошо зарекомендовали себя в практике добывающих предприятий как инструмент прогнозирования ключевых интегральных характеристик процесса. Они с успехом применяются для решения задач раннего прогнозирования, на этапе проектирования системы отработки эксплуатационных блоков, а также, иногда, в составе САПР и АСУ. Однако расчет динамики процесса, анализ частных случаев, специфичных наличием зон фильтрационной неоднородности, зон возможного переотложения растворенных соединений, проигрывание различных сценариев управления подземным выщелачиванием, лежит вне области их применения.

Детерминированные модели лучше описаны в литературе. Судя по публикациям, интенсивные работы по данной тематике велись в работах [24-30]. Следует отдать должное следующим исследователям, внесшим вклад в становление и развитие математического моделирования подземного выщелачивания: Г. Н. Глотов, А. В. Канцель, А. Н. Колчин, В. П. Коптелов, Л. А. Линцер, Д. П. Лобанов, В. С. Ломовский, Ю. В. Нестеров, В. В. Новосельцев, С. Н. Пыхарев, Е. А. Толстов, М. И. Фазлуллин, В. Я. Фарбер, и другим. В зарубежной периодике чаще всего встречаются работы авторов - сотрудников University of Texas at Austin (P. M. Bommer, R. S. Schechter, L. W. Lake и др. [24-26]), US Bureau of Mines, Minneapolis (R. D. Schmidt, S. E. Follin и др. [28-30]), и Research Institute of University of Petroleum Minerals, Saudi Arabia.

Большинство работ, посвященных детерминированным моделям ПВ, имеют некоторые общие черты. Практически везде гидродинамика процесса описывается с помощью закона Дарси (раздел 4.1) и уравнения неразрывности потока. При этом используются различные предположения об однородности свойств проницаемости пласта, размерности задачи и стационарности процесса. Уравнение неразрывности решается, как правило, аналитически при допущении однородности пласта. Строятся т.н. ленты (или трубки) тока. Далее рассматривается модель кинетики химического взаимодействия и массопереноса продуктов выщелачивания и реагента. Уравнения этой модели упрощаются до одномерных, и они решаются вдоль рассчитанных на первом шаге лент тока раствора. Далее для откачных скважин рассчитывается выходная концентрация урана как результат смешивания растворов, поступающих в данную скважину по всем входящим в нее лентам.

Изучение эффективности процесса подземного выщелачивания возможно двумя подходами. Первым является экспериментальный подход и результаты, полученные на его основе, – эмпирические. Построенные на основе этого подхода модели не объясняют механизм процесса, но достаточно точно отражают изменения на выходе из системы, как следствие изменений, указанных на входе. Второй подход – теоретический, который заключается в применении к процессу методов математического моделирования с анализом его механизмов, рассмотрен в настоящей работе.

Первоначально экспериментальные исследования закономерностей ПВ проводились исключительно в лабораторных условиях. Это обуславливалось простотой проведения эксперимента в необходимом

диапазоне параметров технологического процесса. Однако такие результаты не всегда правомерны и не могут быть использованы для реальных месторождений. В результате, от лабораторных экспериментов перешли к натурным. В свою очередь, при проведении натуральных экспериментов возникает ряд трудностей, связанных со значительной внутренней неоднородностью натуральных систем ПВ, невозможностью контролировать ход процесса непосредственно в активной зоне, большой инерционностью таких систем, которая не дает возможности однозначно связывать задаваемые изменения на входе с выходными данными.

Таким образом, математическое моделирование процесса ПВ является востребованным инструментом для проектирования, оптимизации и контроля добычи полезного компонента. На стадии проектирования участка ПВ имитационное моделирование позволяет выбрать оптимальную конфигурацию сети технологических скважин, определить режимы их работы. На стадии добычи математическая модель может быть использована для мониторинга и управления процессом ПВ.

1.4 Выводы по разделу

В первом разделе приведено подробное описание технологического процесса добычи урана методом подземного выщелачивания, представлены схемы технологического процесса, описаны особенности и приведены основные преимущества метода подземного выщелачивания, а также его недостатки и проблемы управления процедурой выщелачивания, в которой отсутствуют возможности прямого оперативного контроля, большая инерционность процесса, растянутость его во времени делает управление добычей сложной задачей.

2 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ПВ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ

2.1 Построение математической модели технологической цепочки «Закачная скважина – Рудное тело – Откачная скважина»

Подземное выщелачивание имеет ряд характеристик, которые также требуют конкретных и эффективных средств проектирования и контроля. Подземное выщелачивание происходит под землей и не может непосредственно наблюдаться и контролироваться. Контроль подземного выщелачивания ограничивается закачкой выщелачивающего раствора в нагнетательные скважины и откачкой продуктивных растворов из восстановительных скважин, а также ограниченным количеством наблюдательных скважин[38].

Поэтому, чтобы получить предварительное представление о технико-экономической целесообразности, выбрать процедуру выщелачивания и рассчитать ожидаемые результаты, необходимо провести специальные исследования и моделирование процесса. Исследования и моделирование проводятся до и во время процесса подземного выщелачивания, а также после его прекращения. Они позволяют анализировать динамику процесса, оценивать объем и массу руд и пород, подлежащих выщелачиванию, и прогнозировать извлечение урана, эффективность выщелачивания и его влияние на грунтовые воды и породы[39].

Подземное выщелачивание требует различных видов моделирования, как математических, так и физических. Математическое моделирование подземного выщелачивания включает расчеты, которые определяют гидродинамику процесса, растворимость, конвективное и диффузионное движение растворимых компонентов.

Рассмотрим процесс ПВ как объект математического моделирования, с описанием структуры математической модели динамики процесса ПВ и принятых в ней ограничений и допущений[40].

Элементы технологической схемы ПВ. Методом скважинного подземного выщелачивания разрабатывают месторождения урана, в которых рудное тело находится в хорошо проницаемой геологической среде, как правило, в подземном водоносном пласте (5) как показано на рисунке 1. Извлечение урана из рудного тела (4) происходит с помощью системы технологических скважин, которые объединяются в технологические ячейки и блоки. Через закачные (нагнетательные) скважины (1) в продуктивный горизонт нагнетается выщелачивающий (рабочий) раствор, содержащий реагенты, способные растворять минералы урана. В результате физико-химического взаимодействия урановых минералов и вмещающих пород с выщелачивающими реагентами в подземном водоносном горизонте образуется содержащий уран продуктивный раствор, который выдается на поверхность посредством системы откачных скважин(3). В процессе переработки продуктивного раствора из него извлекается уран, а оставшиеся маточные

растворы доукрепляются выщелачивающими реагентами и снова подаются в нагнетательные скважины в качестве рабочего раствора. В настоящее время в качестве рабочих агентов (рабочих растворов) при подземном выщелачивании урана применяются слабые водные растворы серной кислоты.

Для обеспечения необходимого дебита откачных скважин и возможности транспортировки продуктивных растворов до сборника промплощадки принят способ подъема растворов с использованием глубинных насосов (2). Подача (нагнетание) выщелачивающих растворов в скважины осуществляется закачными скважинами. Управление скважинными глубинными насосами осуществляется от узла приема продуктивных растворов.

На рисунке 2 представлен разрез закачной и откачной скважины при подземном выщелачивании урана.

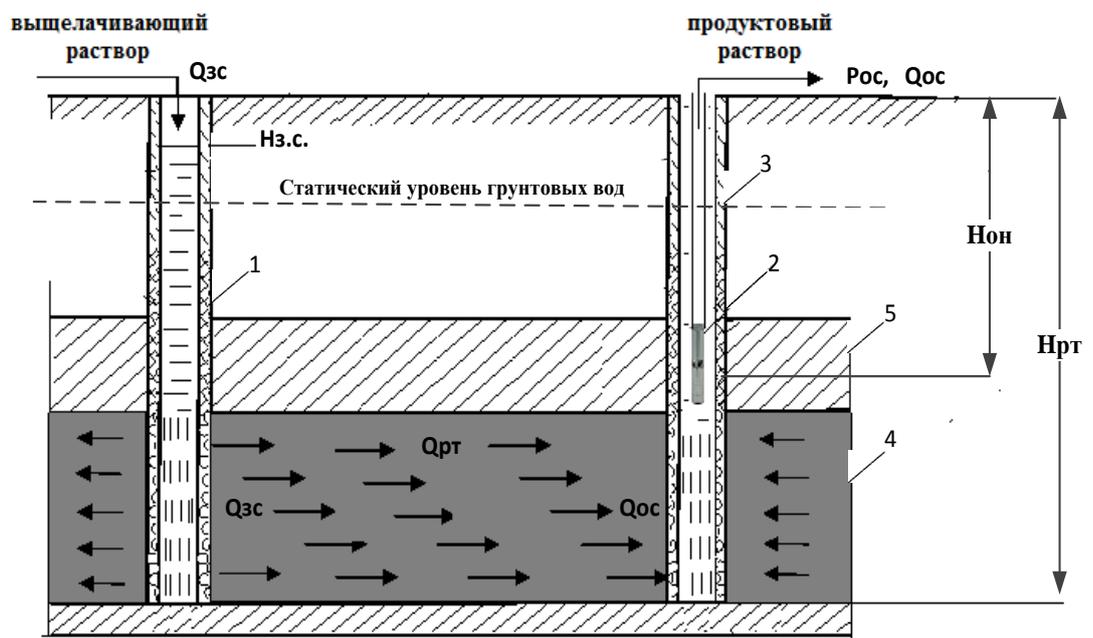


Рисунок 2.1 – Технологическая схема подземного выщелачивания урана

Построение математической модели технологической системы подземного выщелачивания

Закачная скважина. Закачная скважина представляет собой вертикальный трубопровод и здесь определяющим в формировании перепада давления является столб жидкости.

Как известно, столб жидкости высотой 9,8 м давит на устье с силой 0,01 МПа.

Поэтому модель скважины можно представить в виде:

$$W \frac{dH_{zci}}{dt} = Q_{zci} - Q_{pmi}, \quad (2.1)$$

где

H_{zci} – уровень выщелачивающего раствора закачной скважины (м);

W – емкость закачной скважины (м^3);

$Q_{зci}$ – расход выщелачивающего раствора падающего в закачную скважину ($\text{м}^3/\text{час}$);

Q_{pmi} – расход выщелачивающего раствора, поступающего из закачной скважины в рудное тело через фильтр скважины ($\text{м}^3/\text{час}$);

Если расход закачной скважины равен расходу рудного тела $Q_{зci} = Q_{pmi}$, тогда уровень закачной скважины стабилен $H_k = H_{зci}$. Давление, которое создает закачная скважина при установившемся режиме работы рассчитывается:

$$P_{зci} = H_{зci} \rho g \quad (2.2)$$

При этом оставшийся резерв высоты закачных скважин рассчитывается:

$$D_{ij} = H_{\text{пред},ij} + H_{зij} \quad (2.3)$$

где

$H_{\text{пред},i}$ – предельный уровень в i -ной закачной скважине.

Расход выщелачивающего раствора при стабилизации уровня скважин равен расходу оттока от предфильтровой зоны скважины на рудное тело.

Если закачная скважина работает на одну ячейку, то формула расчета расхода ВР рудного тела на каждую ячейку определяется:

$$Q_{pmi} = \frac{P_{зci}}{R_i(H_{зci})} \quad (2.4)$$

Если на две ячейки, то

$$Q_{pmi} = \frac{1}{2} \frac{P_{зci}}{R_i(H_{зci})} \quad (2.5)$$

Если на три ячейки, то

$$Q_{pmi} = \frac{1}{3} \frac{P_{зci}}{R_i(H_{зci})} \quad (2.6)$$

Определение гидросопротивления фильтра закачного раствора рассчитывается:

$$R_i(H_{зci}) = b_1 + b_2 H_{зci} + b_3 H_{зci}^2, \quad (2.7)$$

где

$R_i(H_{зci})$ - гидросопротивление прискважинной зоны i -ной закачной скважины.

Глубинный насос. Модель глубинного насоса основывается на расходно-напорной характеристике, создаваемой насосом, и имеет вид:

$$\Delta P_{ocl} = a_0 + a_1 Q_{ocl} + a_2 Q_{ocl}^2 + a_3 Q_{ocl}^3 \quad (2.8)$$

где

ΔP_{ocl} – напор, создаваемый насосом (МПа);

Q_{ocl} – расход жидкости в откачной скважине ($\text{м}^3/\text{ч}$);

a_0, a_1, a_2, a_3 – аппроксимирующие коэффициенты;

l – номер откачной скважин.

Расчет точки равновесия от давления на откачной скважине определяется:

$$H_{0l} = (P_{ctl} + P_{измл}) \frac{1}{\rho g} \quad (2.9)$$

$$P_{ctl} = (H_{сквл} + H_{0l}) \rho g, \quad (2.10)$$

где

H_{0l} – высота точки равновесия l -ной откачной скважины (м);

$H_{сквл}$ – глубина откачной скважины (м);

$P_{изм.l}$ – давление на устье глубинного насоса (МПа);

P_{ctl} – давление столб-жидкости в откачной скважине (МПа).

Расходно-напорная характеристика насосов из паспорта глубинного насоса представлена на рисунке 2.3.

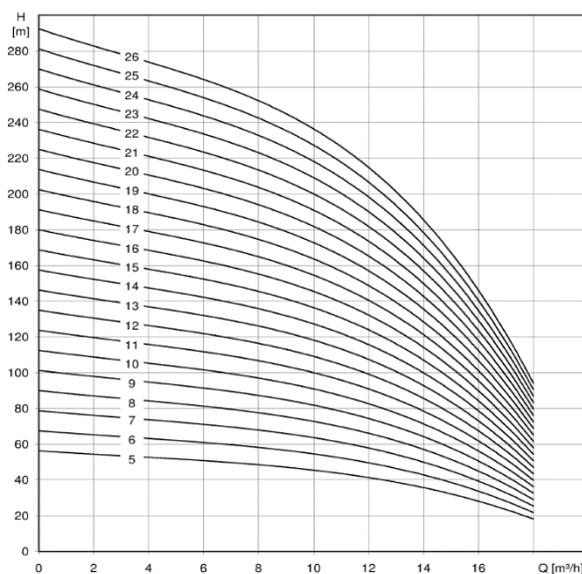


Рисунок 2.3 – Семейство расходно-напорных характеристик из паспорта глубинного насоса

Рудное тело. Рассмотрим кратко основные закономерности фильтрации раствора при плоскорадиальном его движении в потенциальном поле напора жидкости в неограниченном плоском пространстве рудоносного пласта.

Ясно, что жидкость – реагент движется в пористой среде пласта под действием разницы напора, создаваемого уровнем жидкости на закачных скважинах и погружными отсасывающими насосами на откачных скважинах, фоновым естественным потокам и разницей столба жидкости раствора между

откачными и закачными скважинами. Из физики процесса ясно, что, чем больше перепад (градиент) давления на рудном теле, тем меньше потерь выщелачивающего раствора, тем лучше идет процесс выщелачивания, то есть растет скорость фильтрации[41].

В качестве критерия управления выбран показатель, отражающий градиент давления в рудном теле от закачной до откачной скважины. Запишем выражение для технологической цепочки: закачная скважина, рудное тело, откачная скважина.

Расчет перепада давления на рудном теле проводится по закону Дарси, который представлен следующей схемой:

$$\Delta P_{pm.i} = R_{pm.i} \cdot Q_{pm.i} \quad (2.10)$$

где

$R_{pm.i}$ - гидросопротивление рудного тела.

$$\Delta P_{pm.i} = P_{zci} - P_{yocl} \quad (2.11)$$

где

ΔP_{yocl} – давление на рудное тело столба жидкости в откачной скважине (атм);

В работе рассматривается гексогональная схема добычи металла методом подземного выщелачивания. В этой схеме в одной ячейке работает 6 закачных скважин и одна откачная скважина. Одним из условий процесса ПВ при гексогональной схеме добычи является, равенство закачиваемых и откачиваемых растворов:

$$Q_{отл} = \sum_{i=1}^6 Q_{зci} \quad (2.12)$$

Основные ограничения принятые при моделировании объекта:

$$\begin{aligned} Q_{зki} &\leq Q_{зк.зад.i}, \\ H_{зki} &< H_{зк.пред.i}, \\ Q_{зki} &= Q_{врj}, \end{aligned} \quad (2.13)$$

где

$Q_{зк.зад.i}$ – заданное значение выщелачивающих растворов i -ной закачной скважины;

$H_{зк.пред.i}$ – предельная высота заполнения раствора в i -ной закачной скважины;

$Q_{врj}$ – сумма выщелачивающих растворов по j - ному блоку.

Таким образом, выражения (2.2)-(2.12) являются моделью системы «закачная скважина-рудное тело-откачная скважина».

2.2 Построение математической модели прогноза концентрации по ПР блока

Геотехнологические аспекты, связанные с добычей урана методом ПВ, являются весьма сложными. Однако для прогнозного моделирования эту сложность можно понизить до относительно небольшого числа фундаментальных процессов, протекающих при ПВ. Точность оценки может быть повышена при использовании наших знаний об этих фундаментальных процессах независимо от того, насколько несовершенными могут оказаться эти знания[42].

В составе рабочего проекта на отработку эксплуатационного блока ПВ для планирования добычи прогнозируется содержание урана в продуктивных растворах (в зависимости от кондиции руд, производительности скважин по растворам, от заданного расхода реагента, типа геолого-гидрогеологического разреза продуктивного горизонта и т.п.) и строится прогнозная кривая изменения концентрации урана в продуктивном растворе и скорости отработки запасов в зависимости от Ж:Т и (или) времени, т.н. циклограмма[43].

В процессе эксплуатации блоков определяются, систематизируются и анализируются оперативные геотехнологические данные на текущий момент и на период с начала отработки, строятся фактические кривые: изменения концентрации урана во времени и (или) в зависимости от Ж:Т, фактический расход растворителя, темпы отбора продуктивных растворов и подачи выщелачивающих растворов и т.д. Как правило, эти материалы в обобщенном виде представлены в архиве данных по эксплуатационным блокам и отражаются в паспортах на каждый эксплуатационный блок. На основании этого проводится сопоставительный анализ фактических данных с прогнозными (проектными). Выявляется характер изменения основных геотехнологических показателей по каждому эксплуатационному блоку и на основании этих данных прогнозируется средняя концентрация урана в продуктивном растворе, а также добыча урана по каждому эксплуатационному блоку на последующий период времени (месяц, квартал)[44].

В конечном итоге принимаются решения о корректировке отдельных параметров работы блока, как-то: изменение дебитов скважин (при возможности), увеличение (уменьшение) кислотности рабочих растворов.

Подробный алгоритм планирования добычи урана легко поддается автоматизации с использованием компьютерной техники при разработке комплекса специализированных программ.

На втором уровне управления, в соответствии с текущим состоянием фильтрующих свойств РТ и суточными показаниями содержания продукта в продуктивном растворе, будет реализовываться задача оптимального распределения ВР ГТП по блокам, используя при этом прогнозные модели блоков.

Прогнозная модель объекта имеет вид:

$$C_{uj}[\gamma] = d_0 + d_1 Q_{\text{ВР}j}[\gamma - 4] + d_2 Q_{\text{ВР}j}^2[\gamma - 4] + d_3 Q_{\text{отк}j}[\gamma] \quad (2.14)$$

где

γ – сутки;

d_0, d_1, d_2, d_3 – аппроксимирующие коэффициенты.

Принятые ограничения при моделировании объекта:

$$\sum_{j=1}^n Q_{\text{ВР}j}[\gamma] = \Phi_{\text{ВР}}[\gamma] \quad (2.15)$$

где

$\Phi_{\text{ВР}}[\gamma]$ – планируемый расход выщелачивающего раствора на ГТП в γ сутки.

Для определения коэффициентов (2.14) используется метод наименьших квадратов (МНК). Как показали расчеты ошибка колебалась от 3 до 5%. По результатам составляются графики изменения концентрации урана во времени для изменяющегося продуктивного раствора, извлеченного из одной откачной скважины или группы откачных скважин с течением времени. Это было достигнуто путем вычисления усреднения концентраций с весами, с использованием весовых коэффициентов. Затем усредненная с весами и изменяющаяся во времени концентрация использовалась для расчета величины извлечения урана.

2.3 Характеристика метода подземного выщелачивания как объект идентификации

При решении вопроса идентификации рассмотрим взаимодействие закачной и откачной скважины. В закачной скважине основной переменной определяющей ее работу, является уровень выщелачивающего раствора. В откачной скважине определяющей технологической переменной является перепад напора, создаваемый погружным насосом.

Управление добычей металла способом ПВ относится к классу сложных и нелинейных задач из-за отсутствия возможности прямого оперативного контроля основных технологических переменных процесса и нестационарности основных параметров процесса: таких как пьезопроводимость, пористость и др.[45].

В настоящее время для определения основных гидродинамических характеристик скважин и пластов необходимо проводить специальные исследования скважин с применением информационно-измерительных средств и вычислительных устройств, как показано на рисунке 2.5.

Закачная скважина - предназначается для закачки в продуктивные пласты(1) выщелачивающих растворов через фильтр(2), способных растворять содержащие уран минералы. Используются закачные скважины при разработке методом подземного выщелачивания с целью поддержания пластового давления и регулирования темпов отбора полезных ископаемых. Основной технологической переменной процесса, которая позволила бы решить часть задач по качественному управлению ПВ, является контроль уровня закачной скважины. Непрерывный

контроль динамического уровня в закачных скважинах осуществляется с помощью гидростатического уровнемера(3).

В устье скважины монтируется электроклапан(5) для регулирования расхода и расходомер (4) для непрерывного измерения расхода выщелачивающего раствора. Обработка измеренных параметров и управление электроклапаном осуществляются вычислительным устройством или контроллером(6).

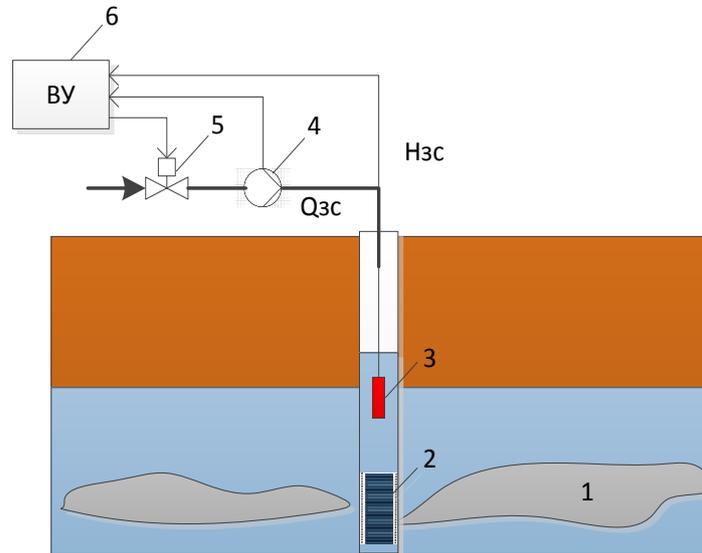


Рисунок 2.5 - Функциональная схема контроля параметров закачных скважин

Как известно, основное уравнение, связывающее уровень в скважине и расход выщелачивающих растворов, имеет вид:

$$W \frac{dH_{zc}}{dt} = Q_{zc} - Q_{pm} \quad (2.16)$$

где

H_{zc} – уровень выщелачивающего раствора закачной скважины (м);

W – емкость закачной скважины (м³);

Q_{zc} – расход выщелачивающего раствора, падающего в закачную скважину (м³/час);

Q_{pm} – расход выщелачивающего раствора, поступающего из закачной скважины в рудное тело через фильтр скважины (м³/час);

Если расход закачной скважины равен расходу рудного тела $Q_{zc} = Q_{pm}$, тогда уровень закачной скважины стабилен $H_k = H_{zc}$, где H_k - уровень закачной скважины при равенстве расхода на приеме и на рудном теле. Давление, которое создает закачная скважина при установившемся режиме работы, рассчитывается:

$$P_{zc} = H_{zc} \rho g \quad (2.17)$$

После проведения исследований в закачной скважине определяем гидросопротивление в прискважинном пространстве по следующей формуле:

$$R(Q_{zc}) = \frac{H_{zc}}{Q_{zc}} \quad (2.18)$$

Испытания показывали, что гидросопротивление R меняется от расхода Q_{zc} . Увеличение Q_{zc} приводит к увеличению H_{zc} . Аналогично это приводит к увеличению расхода $Q_{рт}$, отмечаем что R является нелинейным.

При этом зависимость $R(Q)$ можно представить выражением:

$$R(Q_{zc}) = b_1 + b_2 Q_{zc} + b_3 Q_{zc}^2 \quad (2.19)$$

Построен график зависимости гидросопротивления на расход $[b_i]$, по специальной методике определяется соответствие между уровнем в скважине (H_{zc}) и расходом выщелачиваемых растворов. Измеренный уровень H_{zc} пересчитывается по формуле (2.18) и (2.19) в $R(Q_{zc})$. Составляется матрица:

$$\begin{aligned} R_1(Q_{zc1}) &= b_1 + b_2 Q_{zc1} + b_3 Q_{zc1}^2 \\ R_2(Q_{zc2}) &= b_1 + b_2 Q_{zc2} + b_3 Q_{zc2}^2 \\ R_3(Q_{zc3}) &= b_1 + b_2 Q_{zc3} + b_3 Q_{zc3}^2 \end{aligned} \quad (2.20)$$

По матрице (2.20) определяем параметры b_1, b_2, b_3 , характеризующие зависимость $R(Q_{zc})$ от уровня в скважине и соответственно от расхода выщелачивающих растворов.

Построен график зависимости гидросопротивления от расхода (рисунок 2.6), по которому видно что гидросопротивление уменьшается при увеличении расхода выщелачивающего раствора.

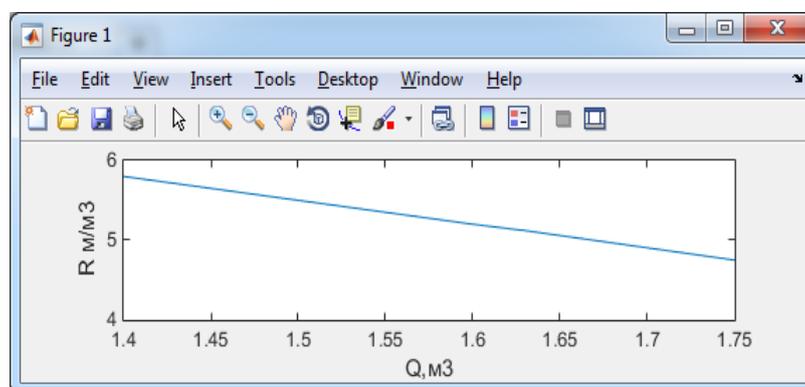


Рисунок 2.6 - График зависимости гидросопротивления призабойной зоны на расход рудного тела

Откачная скважина. Откачные скважины предназначены для подъема продуктивных растворов на поверхность. На рисунке 2.7 представлена функциональная схема контроля параметров откачных скважин.

В откачных скважинах подъем раствора обычно осуществляется погружными насосами(3) через фильтр(2). Основные параметры и состояние насоса контролируется вычислительным устройством или контроллером(6).

В устье скважины, чтобы измерить давление продуктивного раствора устанавливается датчик давления(5), и расходомер (4) для непрерывного измерения расхода. Обработка измеренных параметров и управления глубинным насосом осуществляются вычислительным устройством.

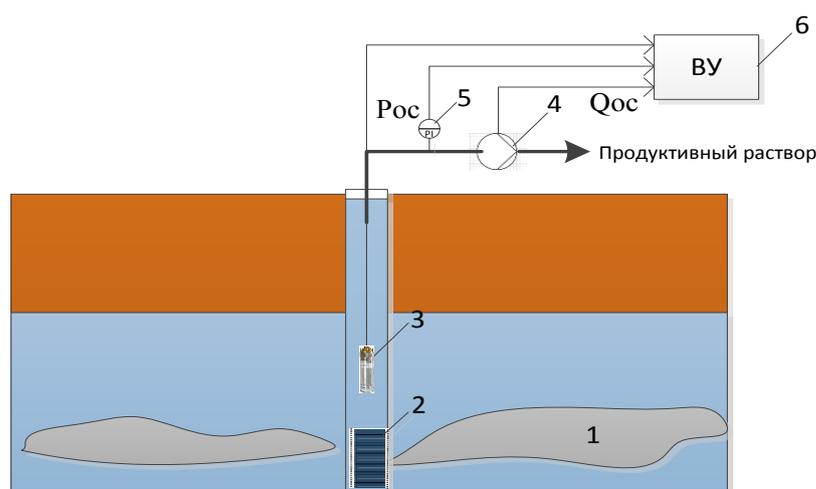


Рисунок 2.7 - Функциональная схема контроля параметров откачных скважин

Для откачной скважины была идентифицирована расходно-напорная характеристика скважинного насоса и самой откачной скважины.

Расходно-напорная характеристика описывается полиномом третьего порядка для точности определения коэффициентов полинома, и имеет вид

$$\Delta P_{oc} = a_0 + a_1 Q_{oc} + a_2 Q_{oc}^2 + a_3 Q_{oc}^3, \quad (2.21)$$

где

a_0, a_1, a_2, a_3 – коэффициенты полинома для характеристики насоса;

Q_{oc} – расход продуктивного раствора откачной скважины.

Для определения коэффициентов полинома и расходно-напорных характеристик глубинного насоса используется программный пакет Matlab. Напишем функцию, как показана на рисунке 2.8.

```

Editor - Block_rachet_nasos/Расчет давления
Расчет давления
1 function P = fcn(Q)
2 %#codegen
3 C=[1 6 36 216;1 8 64 512; 1 10 100 1000;1 12 144 1728];
4 B=[172; 165; 155; 140];
5 A=C\B;
6 P=(A(1,1) + A(2,1)*Q + A(3,1)*Q.^2+A(4,1)*Q.^3)*10;
7

```

Рисунок 2.8 - Код функции в Matlab

Подставляя функцию в Simulink, имитируем на входе расход откачного раствора и получим модель глубинного насоса как показана на рисунке 2.8.



Рисунок 2.9 - Модель глубинного насоса в Simulink

Полученный результат модели имеет вид расходно-напорной характеристики глубинного насоса(рисунок 2.10):

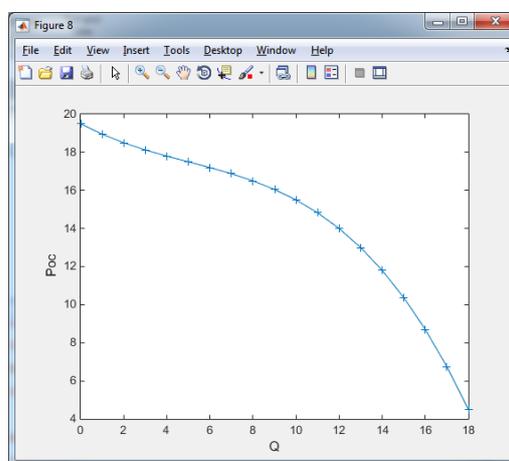


Рисунок 2.10 - Расходно-напорная характеристика глубинного насоса

Предложенная методика определения параметров модели закачной скважины основывается на измерении уровня в скважинах и расходе выщечивающих растворов. С помощью этих показателей на трех различных режимах работы скважины определяются параметры гидросопротивления при забойной зоне закачной скважины. По откачной скважине, при различных режимах работы погружного насоса, по показателям датчика давления устья скважины и расхода продуктивного раствора определяется фактические параметры расходно-напорных характеристик погружного насоса. На основе этих характеристик закачной и откачной скважин можно определить перепад

давления на рудном теле, который в конечном итоге создается расходом выщелачивающего раствора. Поиск максимального перепада относится к классу нелинейных задач, решение которой позволит оптимально вести процесс выщелачивания.

2.4 Исследования модели технологической схемы ПВ на Matlab

В настоящее время для определения исходных гидродинамических параметров скважин и пластов необходимо проводить специальные исследования скважин с применением глубинных приборов и информационно-измерительных средств. Причем наиболее информативным параметром, характеризующим процесс ПВ, является градиент перепада давления в рудном теле. Получение измерений других параметров, таких как дебит скважины, устьевого давления, пьезопроводность, расходно-напорная характеристика погружного электродвигателя, повышает качество идентификации гидродинамической модели, следовательно, позволяет повысить и надежность управления процессом ПВ[46].

Модель процесса ПВ, представленная выражениями (2.2) - (2.12), была набрана для исследования в среде Matlab.

В нашем случае была рассмотрена технологическая цепочка: «закачная скважина - рудное тело - откачная скважина» со скважинным насосом мощностью 7,5 кВт.

Модель откачной скважины. Для откачной скважины была идентифицирована расходно-напорная характеристика скважинного насоса и самой откачной скважины.

Расходно-напорная характеристика была определена по специальной методике, и имеет вид

$$\Delta P_{oc} = 198 - 6,08 Q_{oc} + 0,63 Q_{oc}^2 - 0,04 Q_{oc}^3, \quad (2.22)$$

Модель глубинного насоса показана на рисунке 2.11.



Рисунок 2.11 - Модель глубинного насоса на Matlab

И построена расходно-напорная характеристика насоса (рисунок 2.12).

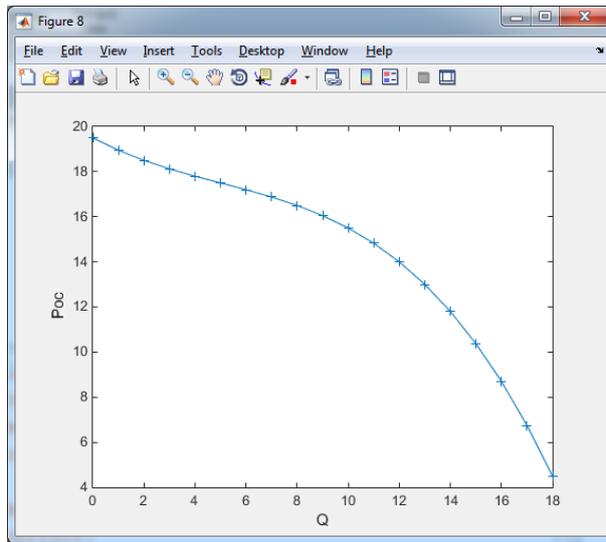


Рисунок 2.12 - Расходно-напорных характеристика глубинного насоса

При подземном выщелачивании металлов остается до сих пор не решенным вопрос о величине напора на закачных скважинах. Так, при его увеличении растет дебит скважин, но уменьшается продуктивность раствора на выходе. А при уменьшении напора пропорционально уменьшается дебит скважин, с которым растет концентрация металла в продуктивном растворе, но падает скорость фильтрации раствора и, следовательно, скорость выщелачивания металла. В этой связи, видимо, существует оптимальный по избранному критерию напор на закачных скважинах. Модель направлена на поиск решения такого необходимого расхода на закачную скважину, обеспечивающего максимальную продуктивность раствора на выходе.

Модель технологической схемы процесса ПВ «закачная скважина - рудное тело - откачная скважина» показано на рисунке 2.13.

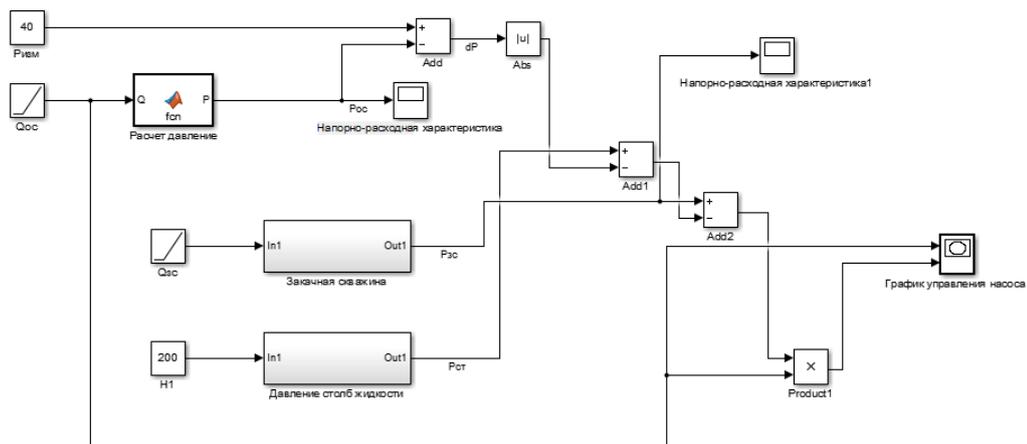


Рисунок 2.13 - Модель технологической схемы процесса ПВ

Как показали исследования на модели, для рассматриваемой технологической схемы зависимость перепада давления на рудном теле от расхода растворов имеет вид(рисунок 14,15):

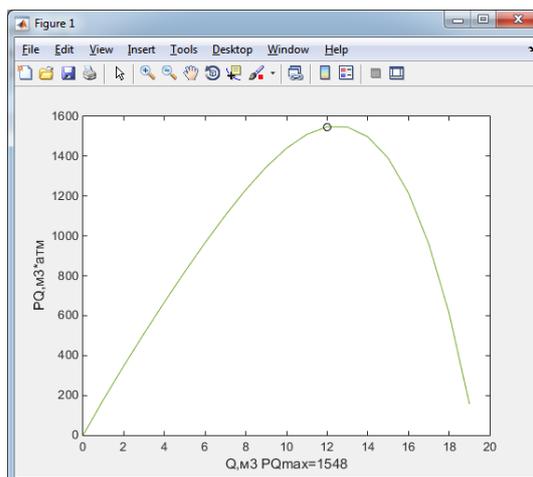


Рисунок 2.14 - Модель перепада давления на рудном теле

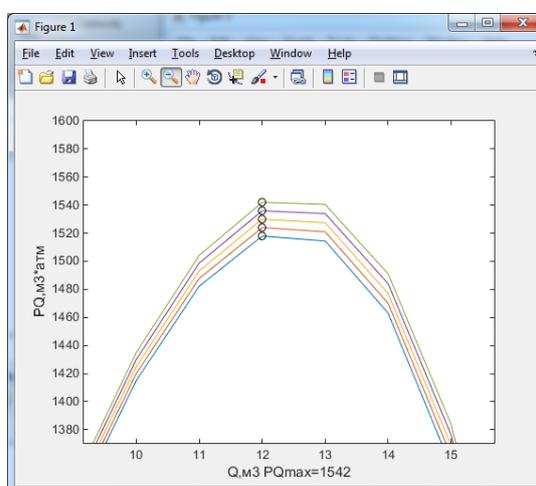


Рисунок 2.15 - Модель перепада давления на рудном теле в разных уровнях раствора в закачных скважинах

Результаты исследования модели показывают, что есть такой расход $Q_{зс}$ который обеспечивает максимум перепад на рудном теле.

2.5 Постановка задачи системы управления

Целью настоящей работы является разработка трехуровневой системы оптимального управления технологическим процессом подземного выщелачивания урана.

На первом, нижнем уровне управления решается задача распределения выщелачивающих растворов по закачным скважинам геотехнологического поля.

В качестве критерия управления нижнего уровня выбрана функция цели максимума показателей, отражающей градиент давления в рудном теле для одной гексагональной ячейки, от закачной до откачной скважины:

$$F_{ij} = \sum_{i=1}^m \Delta p_{рти} Q_{зci} \xrightarrow{Q_{зci}} \max \quad (2.23)$$

где

m – число закачных скважин в блоке;

$\Delta p_{рти}$ - градиент давления в рудном теле от i -той закачной в одной гексогональной схеме(атм.);

$Q_{зci}$ – расход выщелачивающего раствора падающего в i -тую закачную скважину (м³/час);

Содержательная постановка задачи на нижнем уровне управления формулируется следующим образом: необходимо осуществить регулирование расходов по закачным скважинам, которые бы обеспечили максимум критерия(2.23) при стационарном режиме работы ПВ.

На втором уровне (среднем) решается задача оптимального распределения ВР по блокам, в соответствии с показателями содержания урана в продуктивных растворах (ПР) откачных скважин.

Для оптимизации распределения выщелачивающих растворов по блоку примем критерий управления максимизация концентрации металла на откачной скважине и функцию цели имеет следующий вид:

$$F_{II} = \sum_{j=1}^n Q_{отkj} C_{uj} \rightarrow \max_{Q_{врj}} \quad (2.24)$$

где

n – число откачных скважин в ГТП;

$Q_{отkj}$ - расход продуктивного раствора в j -тую откачной скважине (м³/час);

C_{uj} – концентрация продуктивного раствора в j -той откачной скважине (%);

Содержательная постановка задачи на среднем уровне управления сводится к оптимальному распределению выщелачивающих растворов по блокам, который обеспечил бы максимум по критерию(2.24).

На верхнем уровне системы управления решается задача управления ГТП в целом.

Содержательная постановка задачи управления верхним уровнем иерархической системы сводиться, к тому, что необходимо найти такие режимы выщелачивания, которые обеспечили бы заданный уровень содержание металла в продуктивных растворах.

$$F_{III} = \frac{\sum_{j=1}^n (Q_{отк.j}[\gamma] C_{u.j}[\gamma])}{C_{к.j}[\gamma]} \xrightarrow{C_{u.j}} \max \quad (2.25)$$

где

$C_{u.j}$ - среднесуточная концентрация урана в продуктивном растворе по откачным скважинам, j -ном блоке, [г/л];

$Q_{отк.j}$ - расход продуктивных растворов по откачным скважинам, j -ном блоке [м³];

$C_{k,j}$ - среднесуточная концентрация кислоты в выщелачивающих растворах j-ного блока по данным лабораторного анализа [г/л];

n – количество откачных скважин в блоке;

γ – количество суток.

На этом уровне реализуются алгоритмы анализа качества процесса подземного выщелачивания и принимаются решения по распределению нагрузок по выщелачивающим растворам и получению продуктивных растворов, применению нестационарных режимов работы откачных насосов, для выщелачивания застойных зон рудного тела. Создание этой системы позволит повысить эффективность процесса подземного выщелачивания.

Для достижения поставленной цели должно быть решено:

Функционирование иерархической системы управления. Оно осуществляется следующим образом:

нижний уровень управления –

- необходимо реализовать идентификацию (оценку) фильтрационных свойств рудного тела (коэффициент пористости) по каждой закачной скважине блока ГТП, путем измерения уровня ВР в скважине и расхода ВР, и решить задачу ГДИС (геодинамические исследования скважин);

- распределение ВР по закачным скважинам блока в соответствии с заданием полученным от среднего уровня управления;

- реализация стационарных и нестационарных режимов выщелачивания по блоку.

средний уровень управления –

- разработать прогнозную модель процесса выщелачивания по блоку;

- реализовать алгоритмы распределения ВР по блокам ГТП по показаниям содержания готового продукта в ПР.

верхний уровень управления –

- здесь решается задача системы управления ГТП в целом на основе прогнозных моделей процесса подземного выщелачивания.

- разработать модели управления, созданные с помощью численных методов;

- провести исследования моделей управления на чувствительность, устойчивость, однозначность и оценить степень их адекватности;

- разработать программное обеспечение, реализующее алгоритмы в промышленных контроллерах;

- провести испытания алгоритмов в промышленных условиях.

Разрабатываемые средства измерения и методы управления позволят апробировать бюджетный вариант измерения уровня в закачных скважинах. Используя показания уровня и расходных характеристик выщелачивающего раствора, будет разработан алгоритм оценки фильтрующих свойств среды (рудного тела). На основе полученных оценок текущих фильтрующих свойств рудного тела будут разработаны алгоритмы оптимального распределения ВР по блокам геотехнологического поля. Кроме этого, на верхнем уровне управления будут разработаны алгоритмы по выбору стационарного или нестационарного

режима выщелачивания для вымывания застойных зон рудного тела по блокам ГТП.

2.6 Выводы по разделу

Во втором разделе диссертации были построены модели: технологической цепочки «закачная скважина – рудное тело - откачная скважина»; прогноза концентрации по продуктивным растворам блока. Проведена параметрическая идентификация закачной, откачной скважины и рудного тела. Определены зависимости гидросопротивления призабойной зоны на расход выщелачивающего раствора в закачной скважине. Предложена методика определения расходно-напорной характеристики по откачной скважине. Построенные математические модели исследованы в среде MATLAB. На основе построенных математических моделей выявлена постановка задачи системы управления.

3 РАЗРАБОТКА ИЕРАРХИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

3.1 Разработка структуры иерархической системы управления

Основная идея работы заключается в разработке алгоритмов идентификации основных параметров процесса ПВ, используя иерархическую связность объекта.

В настоящее время для определения гидродинамических характеристик скважин и пластов необходимо проводить специальные исследования скважин с применением глубинных приборов.

В геотехнологических полях проводятся следующие основные технологические операции:

- сернокислотное выщелачивание урана на месте залегания руд;
- отстаивание продуктивных растворов от мех взвесей в пескоотстойнике продуктивных растворов.

Добыча урана способом подземного выщелачивания осуществляется на эксплуатационных блоках геотехнологического поля. Эксплуатационные блоки оборудованы сетью технологических скважин, с помощью которых вскрывают рудный горизонт по гексагональной схеме.

Каждая ячейка блока представлена одной откачной скважиной в центре и шестью закачными скважинами по периметру. Радиус ячейки 40-50 метров (определяется технико-экономическими расчетами).

Дебит для откачных скважин и приемистость для закачных скважин, в зависимости от коэффициента фильтрации рудного тела, составляет:

- для закачных скважин – 2 – 5 м³/ч;
- для откачных скважин – 8 – 10 м³/ч.

Добыча продуктивных растворов из эксплуатационных блоков производится в три стадии:

- стадия закисления рудного горизонта;
- стадия активного выщелачивания урана;
- стадия отмывки рудного горизонта.

Отработка эксплуатационных блоков геотехнологического поля производится при помощи подачи выщелачивающих растворов в закачные скважины, подъема продуктивных растворов через систему откачных скважин, транспортировки их в сборники и подачи на сорбцию.

Система обвязки блоков включает в себя:

- магистральные технологические трубопроводы для выщелачивающих растворов;
- магистральные технологические трубопроводы для сбора и транспортировки продуктивных растворов;
- магистральные технологические трубопроводы для подачи кислоты и сжатого воздуха;
- сеть внутриблочных трубопроводов вдоль откачных и закачных рядов скважин, погружных насосов, пусковой электроаппаратуры и кабельных линий;

- технологические узлы закисления (ГУЗ) и узлы приема продуктивных растворов (УППР) соединенные с магистральными трубопроводами;
- систему диспетчеризации и контроля за работой технологических скважин и блоков.

Для транспортировки продуктивных растворов на переработку предусмотрено использование напора погружных электронасосов.

В процессе закисления растворы с кислотностью 15-25 г/л поступают в рудовмещающий горизонт, где происходит растворение природного урана. Уран переходит в раствор. Растворы при помощи погружных насосов поднимаются на поверхность, поступают на УППР. При содержании урана в растворе менее 20 мг/л возвращаются в ГУЗ, доукрепляются серной кислотой и распределяются в закачные скважины. При содержании урана в растворе более 20 мг/л, через УППР, он подается в магистральный трубопровод ПР и транспортируется для дальнейшей переработки.

Стадия закисления блока оканчивается при уточнении количества поданной кислоты на 1 тонну горнорудной массы (от 2,4 до 5 кг/т) или появлении устойчивых минимально промышленных содержаний урана в большинстве откачных скважин блока.

Активное выщелачивание урана ведется после закисления в том же гидродинамическом режиме, но с постепенным уменьшением кислоты в выщелачивающих растворах. На стадии активного выщелачивания кислотность в ВР поддерживается в пределах 7-12 г/л. Стадия активного выщелачивания заканчивается после уточнения объемов извлечения урана (более 85%) и при снижении содержания урана в продуктивных растворах менее 15 мг/л.

Заключительная операция процесса выщелачивания – отмывка – осуществляется маточными растворами сорбции с остаточной кислотностью 1-2 г/л без дополнительного подкисления.

ГТП «Акдала» делится на четыре залежи урановых руд. В северном направлении находятся «Ближний(Уч.1)», в южном - «Летний(Уч.2)», в западном направлении расположены «Залежь 5у(Уч.3)» и «Залежь 2к(Уч.4)». В ГТП «Акдала» также входят центральная насосная станция и промежуточные насосные станции, пескоотстойники выщелачивающего и продуктивного растворов (ПО ВР, ПО ПР), склады серной кислоты.

На рисунке 3.1 представлена технологическая схема ГТП «Акдала».

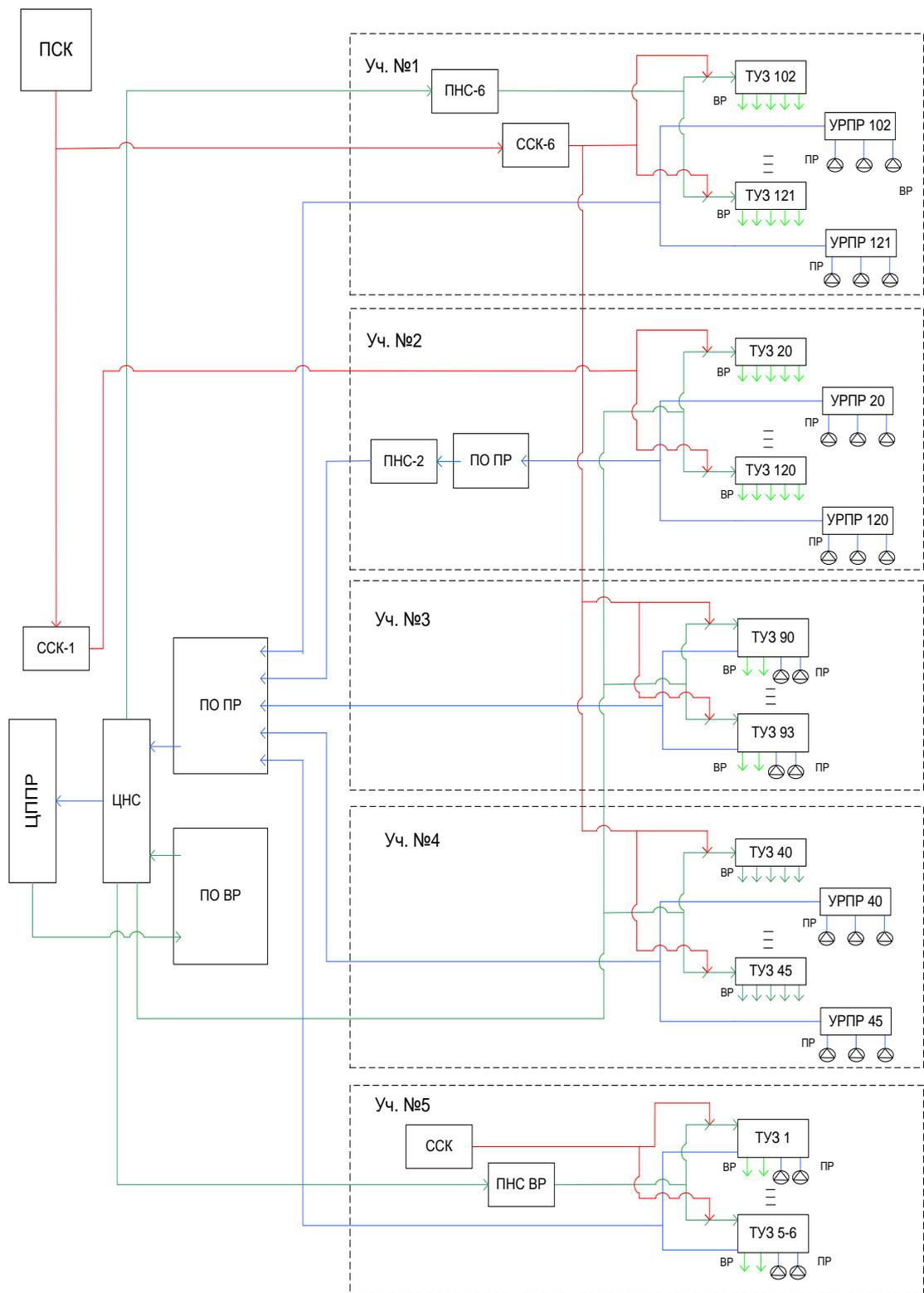


Рисунок 3.1 – Технологическая схема ГТП «Акдала»

В работе предлагается построить трехуровневую систему управления, позволяющую декомпозировать общую задачу управления на ряд системных задач.

Для построения системы управления таким сложным объектом, каким является геотехнологическое поле, предлагается использовать трехуровневую иерархическую структуру, представленную на рисунке 3.2

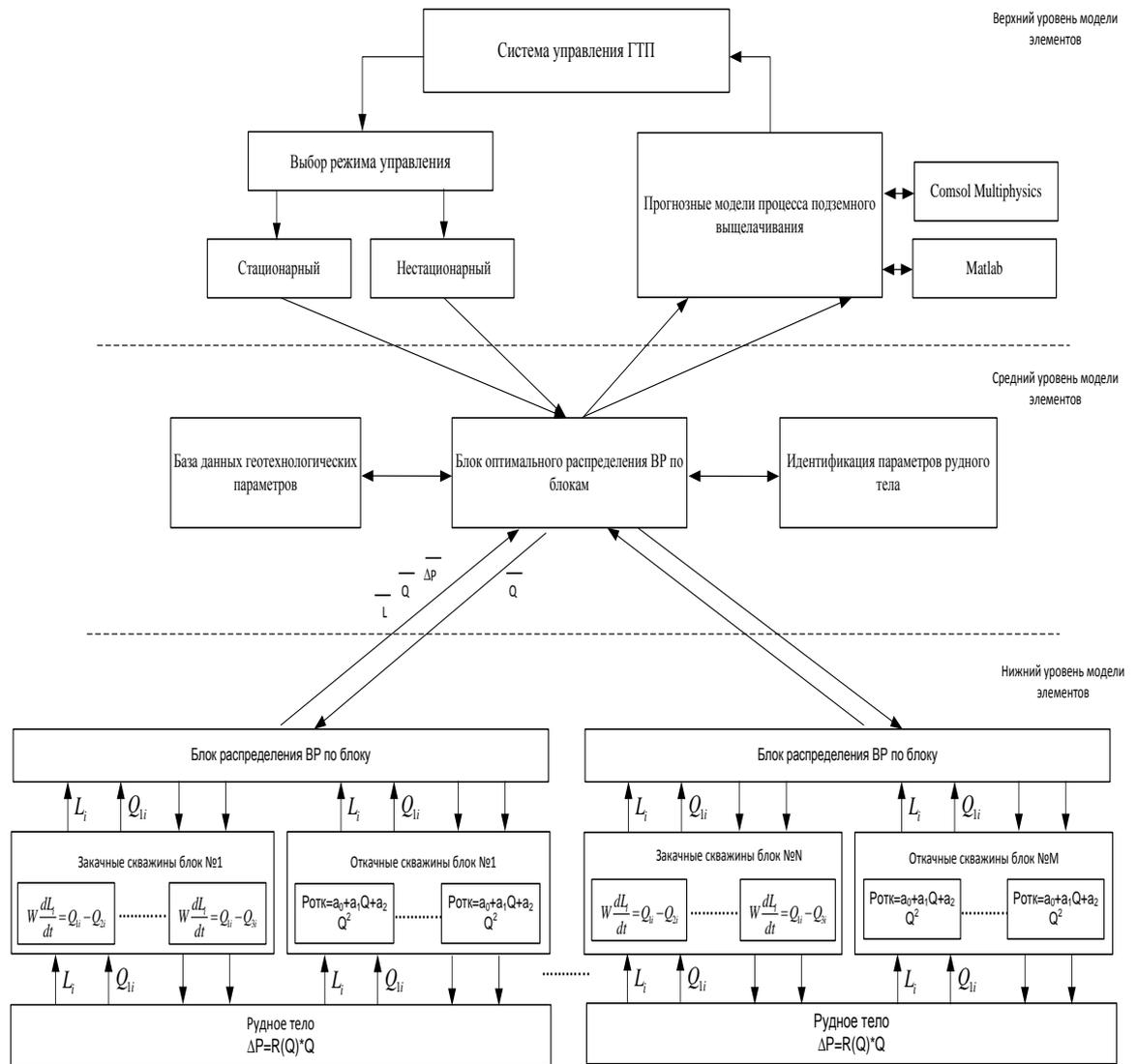


Рисунок 3.2 – Трехуровневая схема управления ПВ

На нижнем уровне управления в основном будут решаться задачи распределения ВР по закачным скважинам блока. На этом уровне по измеренным значениям уровня и расхода ВР в закачных скважинах будут оцениваться фильтрующие свойства рудного тела. Идентификация параметров фильтрующих свойств рудного тела в соответствии с уравнением (2.20) осуществляется автоматически активным экспериментом системы. Коэффициенты фильтрующих свойств РТ будут передаваться на второй уровень управления.

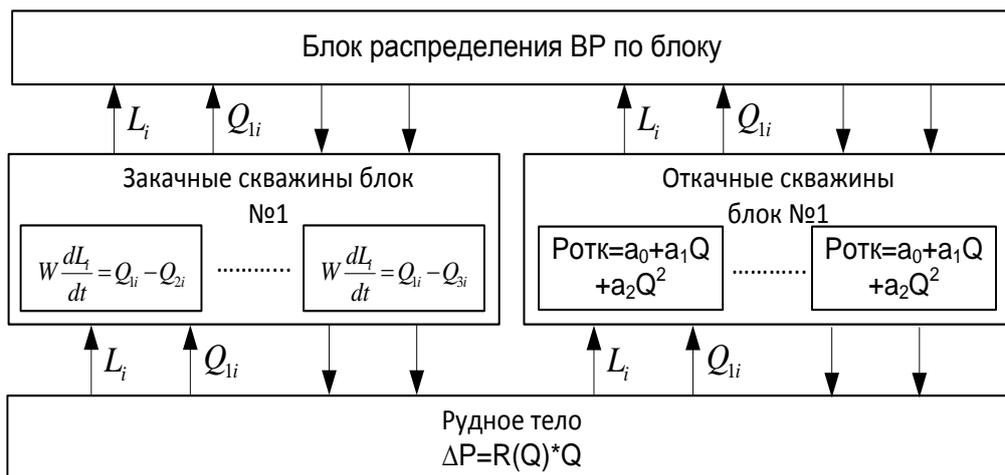


Рисунок 3.3 – Нижний уровень управления

На втором уровне управления, в соответствии с текущим состоянием фильтрующих свойств РТ и суточными показаниями содержания продукта в продуктивном растворе, реализуется задача оптимального распределения ВР ГТП по блокам, используя при этом прогнозные модели содержания металла в ПР блоках.

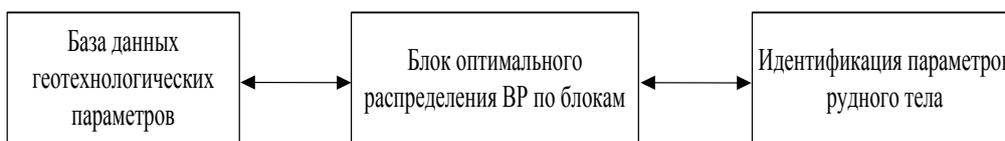


Рисунок 3.3 – Средний уровень управления

На верхнем, третьем уровне, управления синтезируется иерархическая система управления процессом подземного выщелачивания всего ГТП в целом.

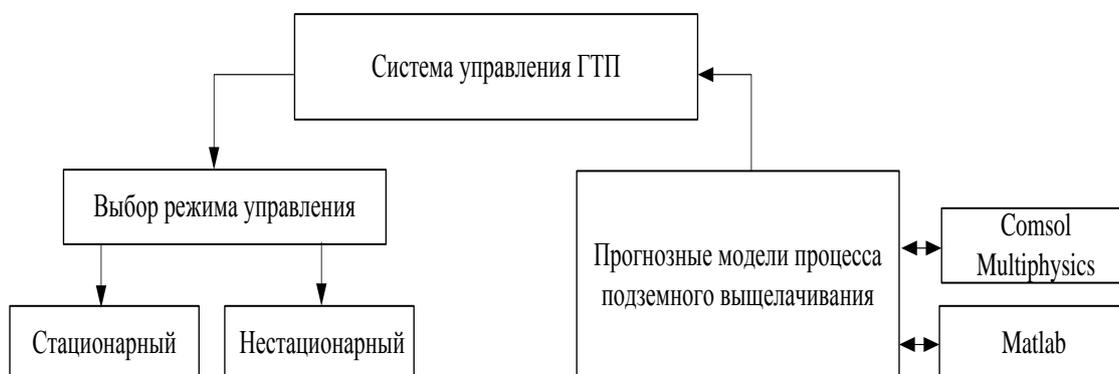


Рисунок 3.4 – Верхний уровень управления

Здесь будет сформирована задача:

- анализа результатов выщелачивания по блокам;
- выбора режимов выщелачивания, стационарный, обычный режим выщелачивания и нестационарный режим для вымывания застойных зон рудного тела.

Кроме этого, требует исследования координирующих свойств предлагаемой иерархической системы управления ГТП, и при этом надо учитывать тот факт, что даже незначительное улучшение показателей данного процесса может привести к значительному экономическому и экологическому эффектам.

3.2 Разработка системы управления оптимального распределения растворов по скважинам (нижний уровень)

Задача управления распределением выщелачивающих растворов по скважинам решается в два этапа.

На первом этапе решаются задачи распределения ВР по закачным скважинам в условиях отсутствия ограничений по количеству выщелачивающих растворов на блок.

Реализация поставленной задачи (2.23) может быть осуществлена с помощью следующего алгоритма, блок-схема которого представлена на рисунке 3.5 (Режим стационарный).

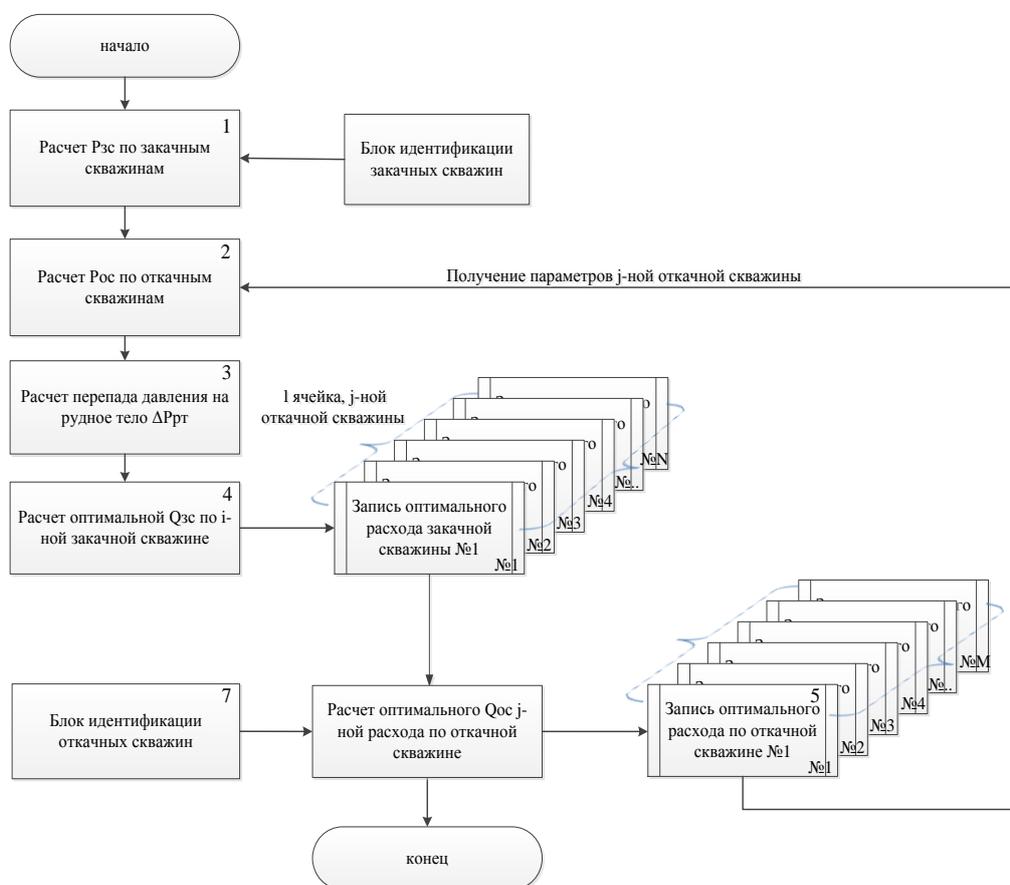


Рисунок 3.5 - Алгоритм распределения ВР нижнего уровня

Описание алгоритма нижнего уровня управления:

Блок №1. Осуществляет расчет давления на рудное тело со стороны закачной скважины $P_{зсi}$; Используется формула (2.23).

Блок №2. Осуществляет расчет давление на рудное тело со стороны откачной скважины $P_{оcj}$, Здесь используется расходно-напорная характеристика погружного насоса; Используются формулы (2.8) – (2.9).

Блок №3 рассчитывает перепад давления прикладываемый к рудному телу:

$$\Delta P_{pti} = P_{зсi} - P_{оcj} \quad (3.1)$$

Блок №4. Эта процедура осуществляет поиск расхода в закачную скважину $Q_{зсi}$, обеспечивающего максимально возможный перепад давления на рудном теле (3.1).

Блок №5 осуществляет запись оптимальных расходов по закачным скважинам 1-ой ячейки, j-ого блока.

Блок №6 рассчитывает оптимальный расход ПР по 1-ой откачной скважине оптимальных значений расходов ВР закачных свкажин, относящихся к 1-ой откачной скважине

$$\hat{Q}_{ocl} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{3} Q_{зсi} \quad (3.2)$$

На нижнем уровне управления данные алгоритмы работают для каждой от 1-ой откачной скважины, затем эти значения суммируются по блоку и передаются на средний уровень.

$$\hat{Q}_{ocj} = \sum_{i=1}^n Q_{ocl} \quad (3.3)$$

Где

\hat{Q}_{ocj} - расчетный расход ПР по j-ому блоку.

На втором этапе решается задача распределения выщелачивающих растворов по закачным скважинам блока в условиях наличия ограничения вида:

$$\sum_{j=1}^m Q_{зсj} = \Phi_{ВРl} \quad (3.4)$$

В этом случае, постановка задачи будет иметь вид:

Критерий:

$$F = \sum_{j=1}^n \Delta P_{ptj} Q_{зсj} \quad (3.5)$$

Модель объекта:

$$\Delta P_{ptj} = P_{зсj} - P_{оcj} \quad (3.6)$$

Ограничения:

$$\sum_{j=1}^n Q_{3j} = \Phi_{\text{ВР}j} \quad (3.7)$$

l-номер ячейки; j-номер блока;

Решение (3.5) – (3.7) имеет вид:

$$F^* = \sum_{i=1}^n \Delta P_{ptj} Q_{3j} - \lambda \sum_{i=1}^n (Q_{3j} - \Phi) \quad (3.8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial Q_{31}} &= \Delta P_{\text{от}1} - \lambda = 0 \\ \frac{\partial F}{\partial Q_{32}} &= \Delta P_{\text{от}2} - \lambda = 0 \\ \frac{\partial F}{\partial Q_{33}} &= \Delta P_{\text{от}3} - \lambda = 0 \\ &\dots \\ \frac{\partial F}{\partial Q_{3n}} &= \Delta P_{\text{от}n} - \lambda = 0 \end{aligned} \quad (3.9)$$

Частное производное функции ∂F по $\partial \lambda$ имеет вид:

$$\frac{\partial F}{\partial \lambda} = (\sum Q - \Phi) = 0 \quad (3.10)$$

Решение (3.10) показывает, что оптимальное решение в условиях ограничений по выщелачивающему раствору заключается в том, что необходимо так распределять расход по закачным скважинам, чтобы перепады по рудным телам в системе «закачная скважина– рудное тело – откачная скважина» были одинаковы по всему блоку.

3.3 Разработка системы управления оптимального распределения растворов по блокам (средний уровень)

Рассмотрим подробнее модель поставленной задачи оптимального распределения ВР по блокам ГТП. Особенностью этой задачи этого уровня является то, что уже на этом этапе имеется информация по содержанию металла в продуктивном растворе $[C_{nj}(\gamma)]$, где γ - временной интервал, в нашем случае γ - сутки.

Запишем модель в следующем виде

$$F = \sum_{j=1}^m \hat{Q}_{ocj}(\gamma) \cdot C_{nj}(\gamma) \rightarrow \max_{\hat{Q}_{3cj}(\gamma)} \quad (3.11)$$

$$C_{nj}(\gamma) = d_0 + d_1 \hat{Q}_{3cj}(\gamma) + d_2 \hat{Q}_{3cj}(\gamma) + d_3 Q_{oc}(\gamma) \quad (3.12)$$

$$\sum_{j=1}^m \hat{Q}_{ocj}(\gamma) = \Phi_{\text{вр}}(\gamma) \quad (3.13)$$

Задачу (3.10) - (3.12) приведем к задаче безусловной оптимизации вида:

$$F^* = \sum_{j=1}^m \widehat{Q}_{ocj}(\gamma) \cdot [d_{0j} + d_{1j}\widehat{Q}_{3cj}(\gamma) + d_{2j}\widehat{Q}_{3cj}^2(\gamma) + d_{3j}Q_{ocj}(\gamma)] + \\ + \lambda[\sum_{j=1}^m \widehat{Q}_{3cj}(\gamma) - \Phi_{вр}(\gamma)] \rightarrow \max_{\widehat{Q}_{3cj}, \lambda} \quad (3.14)$$

Поставленную задачу можно привести к системе уравнения

$$\frac{\partial F^*}{\partial \widehat{Q}_{3c1}} = d_{1j} \cdot \widehat{Q}_{ocj}(\gamma) + 2d_{2j} \cdot \widehat{Q}_{3cj}(\gamma) \cdot \widehat{Q}_{oc1}(\gamma) + 2 \cdot d_{3j} \cdot Q_{ocj}(\gamma) + \lambda = 0 \quad (3.15)$$

$$\frac{\partial F^*}{\partial \widehat{Q}_{3c2}} = d_{12} \cdot \widehat{Q}_{oc1}(\gamma) + 2d_{22} \cdot \widehat{Q}_{3c}(\gamma) \cdot \widehat{Q}_{oc}(\gamma) + 2 \cdot d_{32} \cdot Q_{oc2}(\gamma) + \lambda = 0 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \quad (3.16)$$

$$\frac{\partial F^*}{\partial \widehat{Q}_{3cj}} = d_{1j} \cdot \widehat{Q}_{ocj}(\gamma) + 2d_{2j} \cdot \widehat{Q}_{3c}(\gamma) \cdot \widehat{Q}_{oc}(\gamma) + 2 \cdot d_{3j} \cdot Q_{ocj}(\gamma) + \lambda = 0$$

$$\frac{\partial F^*}{\partial \lambda} = \sum_{j=1}^m \widehat{Q}_{3cj}(\gamma) - \Phi_{вр}(\gamma) = 0 \quad (3.17)$$

Здесь m – число блоков в ГТП, $\Phi_{вр}$ – общий заданный расход выщелачивающих растворов на ГТП.

Решение системы (3.16) позволит определить оптимальный расход выщелачивающих растворов по j -ым блокам ГТП.

При решении системы (3.15) необходимо следить чтобы $\sum_{j=1}^m \widehat{Q}_{3cj}(\gamma) = \sum_{j=1}^m \widehat{Q}_{ocj}(\gamma)$.

Реализация системы управления среднего уровня осуществляется с помощью следующего алгоритма, (рисунок 3.6).

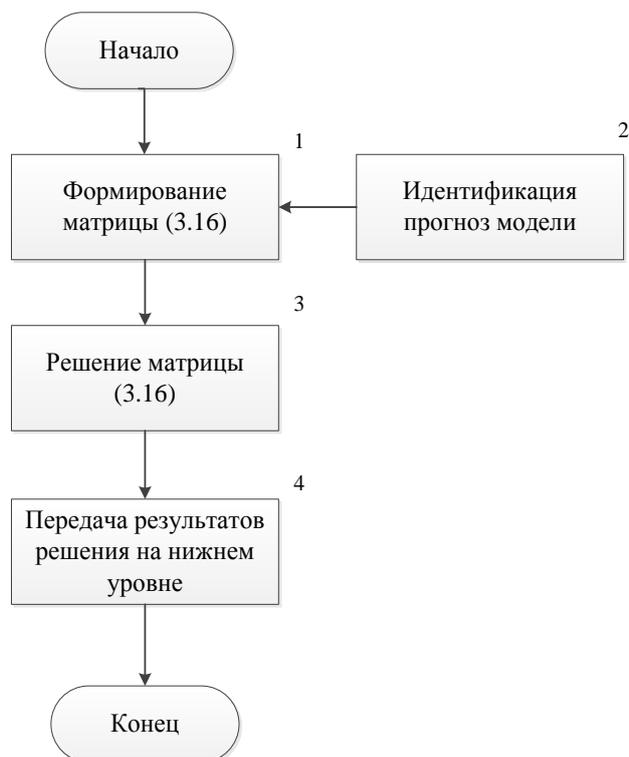


Рисунок 3.6 - Алгоритм распределения ВР среднего уровня

Описание блок-схемы алгоритма распределения ВР среднего уровня:

Блок 1 – получает информацию по прогнозной модели (3.12) получает расходы по блокам $\hat{Q}_{зсj}(\gamma)$ и формирует матрицу (3.16).

Блок 2 – охватывает отдельный адаптивный алгоритм идентификации прогнозной модели содержания металла по блокам ГТП.

Блок 3 – осуществляет решение матрицы (3.16), результатами которой является задание по расходу выщелачивающих растворов $\hat{Q}_{зсj}(\gamma)$ по j -блоку, где $j=1..m$.

В работе для решения задач (3.1) – (3.10) и (3.11) – (1.17) предлагается использовать двухэтапную-двухуровневую процедуру решения сформулированных задач, представленную на рисунке 3.7.

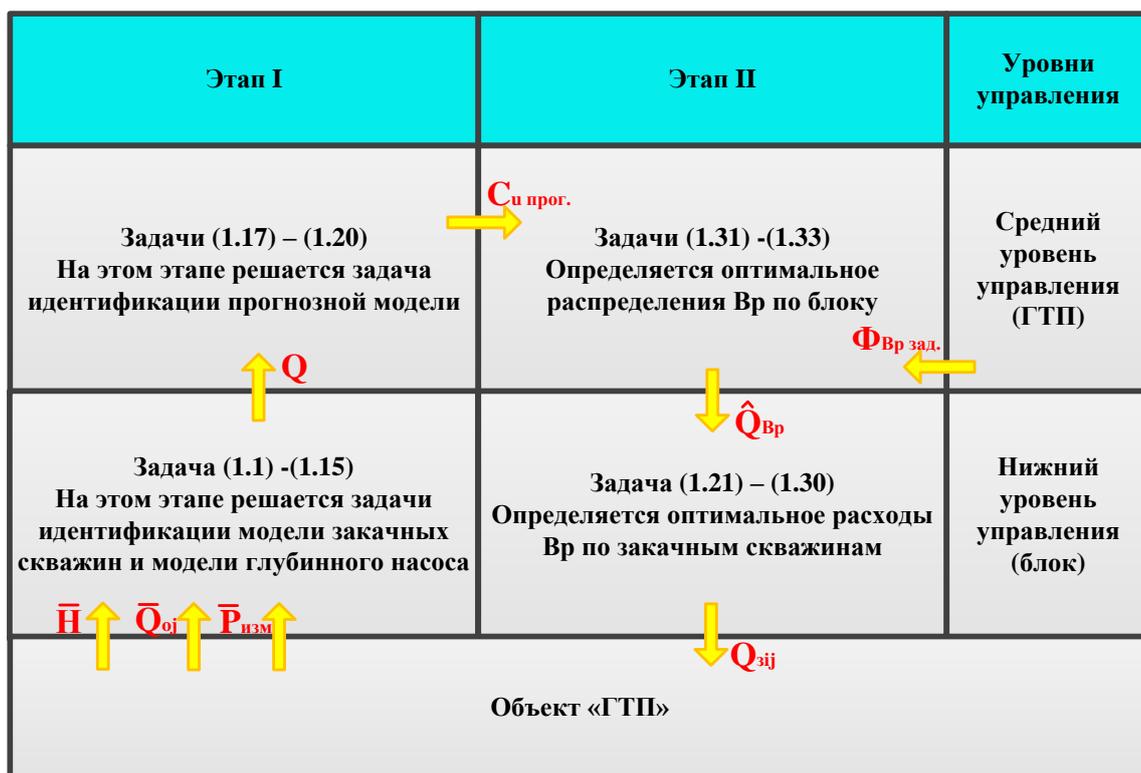


Рисунок 3.7 - Иерархическая система решения задачи распределения по ГТП, где \bar{N} – измеряемых уровней в скважине; $\bar{P}_{изм}$ – вектор измеренных давлений на устье откачных скважин, \hat{Q}_{oj} – вектор расходов откачных скважин.

Предложена иерархическая двухэтапная – двухуровневая процедура решения задачи оптимального распределения выщелачивающих растворов по закачным скважинам ГТП на основе синтезированной модели ПВ.

3.4 Выводы по разделу

В третьем разделе предложена структура иерархической системы распределения выщелачивающих растворов, которая состоит из трех уровней управления. Разработана блок-схема алгоритма управления нижнего уровня, где решается задача оптимального распределения выщелачивающих растворов по закачным скважинам. Построен алгоритм среднего уровня управления, где поставлена задача оптимального распределения V_p по блокам ГТП. Сформированы потоки данных, которые передаются для анализа на верхний уровень управления.

4 СИНТЕЗ СИСТЕМЫ ВЕРХНИМ УРОВНЕМ УПРАВЛЕНИЯ ГТП

Как показывают исследования, основным режимом процесса выщелачивания является стационарный, то есть расходные характеристики по скважинам меняются в незначительной мере. Верхний уровень управления синтезированной иерархической системы предназначен для анализа режимов управления процессом выщелачивания. В данном разделе проведены исследования для анализа стационарности режимов управления в среде Comsol.

4.1 Основные уравнения фильтрации рудного тела. Закон Дарси

Основными целями моделирования являются:

- оценка параметров потока подземных жидкостей;
- оценка предсказаний тенденций потока.

Математическая постановка задачи

Математическая модель однофазного течения в пористой среде описывается следующим уравнением

$$\frac{\partial m\rho}{\partial t} + \operatorname{div}\rho u = f(x, t) \quad (4.1)$$

и законом Дарси

$$u = -k\mu(\operatorname{grad} p + \rho g) \quad (4.2)$$

здесь p – давление, u – скорость фильтрации флюида в пористой среде, k – проницаемость пористой среды, μ – вязкость флюида, g – вектор ускорения свободного падения и f – плотность внутренних источников/стоков.

Подставляя закон Дарси (4.2) в уравнение неразрывности (4.1), учитывая слабую сжимаемость флюида, упругую деформируемость коллектора и пренебрегая действием гравитационных сил ввиду незначительной мощности месторождений (толщина пласта на 2–3 порядка меньше характерных размеров пласта в горизонтальной плоскости), получаем следующее уравнение для давления:

$$\beta \frac{\partial p}{\partial t} - \operatorname{div}\left(\frac{k}{\mu} \operatorname{grad} p\right) = f(x, t), \quad (4.3)$$

где

β – коэффициент совместной упругоёмкости флюида и коллектора.

В вычислительной практике решения задач фильтрации правую часть $f(x, t)$ можно задать в виде суммы мощностей источников/стоков

$$\frac{\partial p}{\partial t} - \operatorname{div}\left(\frac{k}{\mu} \operatorname{grad} p\right) = \sum_{i=1}^{N_q} q_i(t) \psi_i(x), \quad x \in \Omega, \quad t \in (0, T], \quad (4.4)$$

где

q_i для двумерного случая, когда задаем точечный источник/сток, – дебит i -й скважины, а в случае горизонтальной скважины – приток флюида, приходящийся на единицу поверхности ствола i -й скважины, $\psi_i(x)$ – неотрицательные весовые функции, N_q – количество скважин, $T > 0$ и $\Omega \in R^\alpha$, $\alpha = 2, 3$.

Уравнение (4.4) дополняется соответствующими граничным и начальным условиями

$$-\frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial n} = 0, \quad x \in \Gamma, \quad t \in (0, T], \quad (4.5)$$

$$p(x, 0) = p_0(x), \quad x \in \Omega, \quad (4.6)$$

где

Γ – граница Ω , n – внешняя нормаль к Γ .

Таким образом, требуется найти функцию $p(x, t)$, $t \in (0, T]$, $T > 0$, удовлетворяющую параболическое уравнение, граничным и начальным условиям (4.5), (4.6) при заданных входных данных $k, \mu, c, p_0, q_i(t), \psi_i(x), i = 1, 2, \dots, N_q$. Начально-краевая задача (4.4)–(4.6) относится к классу прямых задач.

Учитывая наличие двух важнейших этапов процесса ПВ, нам представляется естественным образом ввести декомпозицию модели ПВ на следующие элементы[47]:

- модель гидродинамического процесса;
- модель массопереноса и кинетики химического взаимодействия.

Здесь необходимо отметить следующее: гидродинамические условия процесса определяют скорости фильтрации потока раствора и соответственно интенсивность проработки участков пласта реагентом, т.е. динамику химического взаимодействия раствора реагента с веществами в твердой фазе. Вместе с тем в результате химического взаимодействия происходит растворение и переотложение веществ, что меняет характеристики проницаемости пласта и гидродинамические условия ПВ.

При моделировании примем следующие допущения. Во-первых, в исследовании рассматривается плоская двумерная задача. То есть предполагается, что мощность пласта невелика, он залегает примерно на одном уровне и достаточно однороден по высоте. Кроме того, область D , внутри которой рассматриваются все процессы, выбирается достаточно большой, чтобы поток раствора через границу был равен (или близок) к нулю[48].

Соответственно, режим закачки-откачки раствора должен быть равнодебитным, т.е.:

$$\sum_{i=1}^n Q_i + \sum_{j=1}^m Q_j = 0, \quad (4.7)$$

где

Q_i – дебиты закачных, а Q_j – дебиты j -ых откачных скважин.

Сам раствор считается идеальной жидкостью (т.е. внутреннее трение отсутствует).

Математическая модель рассматриваемой задачи при вышеуказанных предложениях будет следующей:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial P}{\partial y} \right) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n Q_{i,j} = 0 \quad (4.8)$$

$$\bar{v} = -\frac{k}{m} \nabla h \quad (4.9)$$

$$\frac{\partial(mY)}{\partial t} + \rho_b \frac{\partial z}{\partial t} + \bar{v} \nabla(mY) = \text{div}(mD\nabla Y) + \sum QY \quad (4.10)$$

$$\rho_b \frac{\partial z}{\partial t} = \beta \left(Y - \frac{z}{kd} \right) \quad (4.11)$$

где

P – гидродинамический напор, Н/м², Y – массовая концентрация минерала в растворе, кг/м³, z – массовая доля минерала в пласте, кг/кг, k – коэффициент фильтрации, м/с, \bar{v} – вектор скорости, м/с, m – пористость пласта, ρ_b – плотность породы, кг/м³, Q – дебит ($Q > 0$ – нагнетательная (закачная), $Q < 0$ – откачная), β – скорость растворения минерала.

Первое из систем уравнений (4.8 – 4.11) представляет собой перенос возмущений давлений проявляющих нагнетание и откачивание, второе из них – закон Дарси, третье – изменение концентрации металла по времени за счет конвекций, диффузий, источников/источков и химических реакций, четвертое – изменение концентраций твердых веществ по изменению концентрации жидкой фазы.

Система уравнений (4.8) – (4.11) совместно решается при следующих начально-краевых условиях:

$$P|_{t=0} = P_0, Y|_{t=0} = Y_0, Z|_{t=0} = Z_0, (x, y) \in \Omega, \quad (4.12)$$

$$\frac{\partial P}{\partial n} \Big|_{\Gamma} = 0, \frac{\partial Y}{\partial n} \Big|_{\Gamma} = 0, t > 0 \quad (4.13)$$

где Ω – рассматриваемая область, Γ – граница этой области, n – направление коллинеарное нормалью Γ .

Коэффициенты диффузий вычисляются по следующей формуле :

$$D_{xx} = L_L \frac{v_x^2}{|\bar{v}|} + L_T \frac{v_y^2}{|\bar{v}|} + D^*,$$

$$D_{yy} = L_L \frac{v_y^2}{|\vec{v}|} + L_T \frac{v_x^2}{|\vec{v}|} + D^*,$$

$$D_{xy} = (L_L - L_T) \frac{v_x v_y}{|\vec{v}|} + D^*. \quad (4.14)$$

где

L_L , L_T – продольная и поперечная дисперсность среды, м, D^* – коэффициент молекулярной диффузии, v_x , v_y – компоненты скорости, м/с, $|\vec{v}| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$ – модуль вектора скорости, м/с.

4.2 Исследование процесса подземного выщелачивания металлов с помощью численного моделирования в COMSOL Multiphysics

Разработка месторождения методом подземного выщелачивания возможна при следующих основных условиях:

- подлежащий извлечению компонент присутствует в рудах в форме минералов, легко разрушающихся слабыми водными растворами выщелачивающего реагента;
- входящие в состав руд породообразующие минералы имеют низкую кислотоемкость в условиях взаимодействия с технологическими растворами;
- руды либо обладают естественной проницаемостью, либо становятся раствором-проницаемыми после искусственного раздробления.

К гидродинамическим исследованиям принято относить весь комплекс мероприятий, направленных на измерение ряда параметров скважины (давление, температура, расход, время и др.) на установившихся и неустановившихся режимах ее работы. Основные цели гидродинамических исследований:

- определение параметров призабойной зоны скважины и пласта;
- определение свойств насыщающих залежь флюидов;
- определение параметров фильтрации флюидов и основных характеристик скважин, в том числе коэффициентов проницаемости, пьезопроводности и пористости[50].

COMSOL Multiphysics – это интерактивная среда для моделирования и расчетов большинства научных и инженерных задач, основанных на дифференциальных уравнениях в частных производных (PDE) методом конечных элементов. С этим программным пакетом можно расширять стандартные модели, использующие одно дифференциальное уравнение (прикладной режим) в мультифизические модели для расчета связанных между собой физических явлений. Это возможно благодаря встроенным физическим режимам, где коэффициенты PDE задаются в виде понятных физических свойств и условий, таких как: теплопроводность, теплоемкость, коэффициент теплоотдачи, объемная мощность и т.п. в зависимости от выбранного физического раздела. Преобразование этих параметров в коэффициенты математических уравнений происходит автоматически. Взаимодействие с

программой возможно стандартным способом – через графический интерфейс пользователя (GUI), либо программированием с помощью скриптов на языке COMSOL Script или языке MATLAB. Математическое моделирование и конечно элементный анализ во многих приложениях позволяет сократить дорогостоящие и длительные циклы разработки «проектирование – изготовление – испытание» новых технологических установок, они также могут быть полезны при оптимизации конструкций и режимов работы уже эксплуатирующихся установок. Для решения PDE, COMSOL Multiphysics используют метод конечных элементов (FEM). Программное обеспечение запускает конечно элементный анализ вместе с сеткой, учитывающей геометрическую конфигурацию тел и контроль ошибок с использованием разнообразных численных решателей. Так как многие физические законы выражаются в форме PDE, становится возможным моделировать широкий спектр научных и инженерных явлений из многих областей физики, таких как: акустика, химические реакции, диффузия, электромагнетизм, гидродинамика, фильтрация, тепломассоперенос, оптика, квантовая механика, полупроводниковые устройства, соплат и многих других[51].

Кроме вышеперечисленного, программа позволяет с помощью переменных связи (coupling variables) соединять модели в разных геометриях и связывать между собой модели разных размерностей .

Численное моделирование процессом подземного выщелачивания в среде Comsol Multiphysics. Comsol Multiphysics используется для численного моделирования распределения потока для аналитического решения, а также использование различных режимов для моделирования эксперимента. В качестве отправной точки используется граничные и начальные условия.

Процесс численного моделирования состоит из несколько этапов:

- Выбирается закон физики объекта для моделирования процесса;
- Определяется метод решения дифференциального уравнения в частных производных;
- Построение геометрии;
- Получение результатов исследования.

В качестве выбранного физического закона является эмпирический закон Дарси в пористой среде неизотермических жидкостей для определения гидравлического напора.

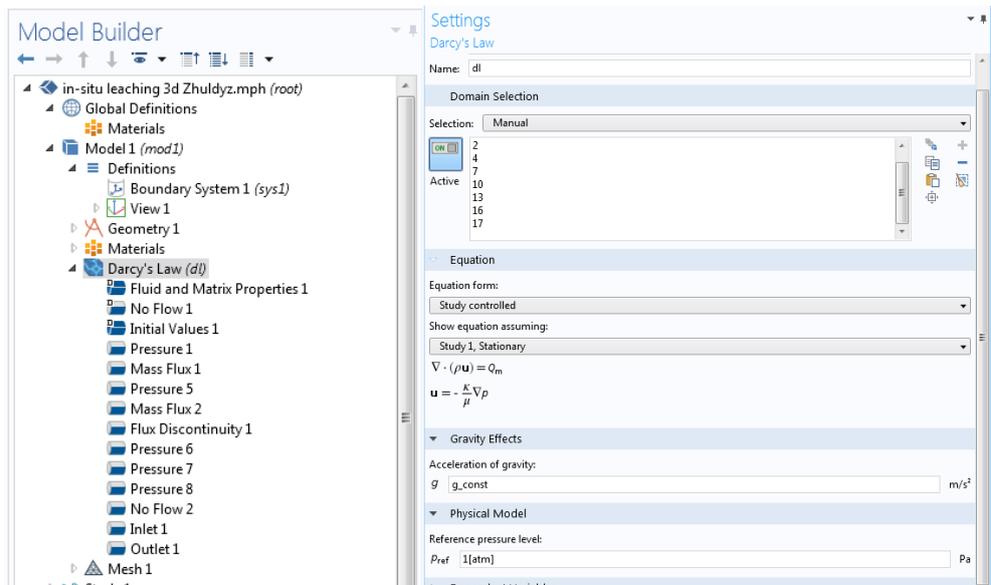


Рисунок 4.1 – Выбор физического закона для моделирования

Для численного решения дифференциальных уравнений в частных производных выбран метод произвольного вычисления Лагранж-Эйлера, чтобы вычислить изменение потока подземных жидкостей в пространстве и во времени с заданными начальными и граничными условиями.

Property	Name	Unit
Dynamic viscosity	mu	Pa·s
Ratio of specific heats	gamma	1
Electrical conductivity	sigma	S/m
Heat capacity at constant pressure	Cp	J/(kg·K)
Density	rho	kg/m ³
Thermal conductivity	k	W/(m·K)
Speed of sound	c	m/s
Porosity	epsilon	1
Permeability	kappa	m ²

Рисунок 4.2 – Заданные начальные условия

Целью моделирования является исследование различных режимов выщелачивания с разными граничными условиями.

На рисунке 4.3 приведен результат моделирования при насыщенной фильтрации трехмерного режима для лучшего представления распределения гидродинамического потока между откачной и закачной скважинами.

Contour: Pressure (Pa) Streamline: Darcy's velocity field Arrow Volume: Darcy's velocity field

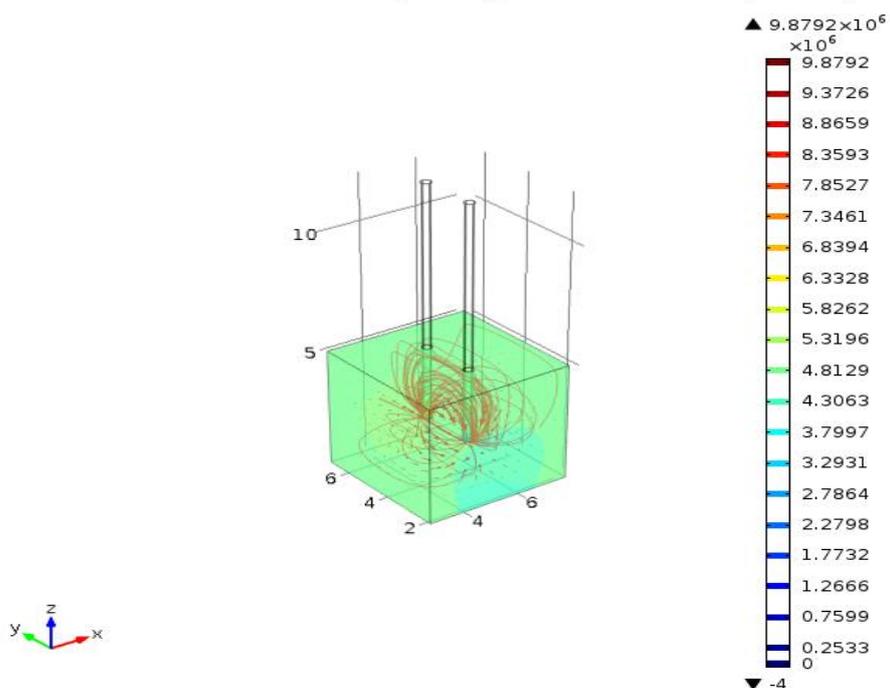


Рисунок 4.3 – Распределение поля гидродинамического напора между откачной и закачной скважинами

Контур эквипотенциальных полей давления на ГТП продемонстрирован на рисунке 4.4.

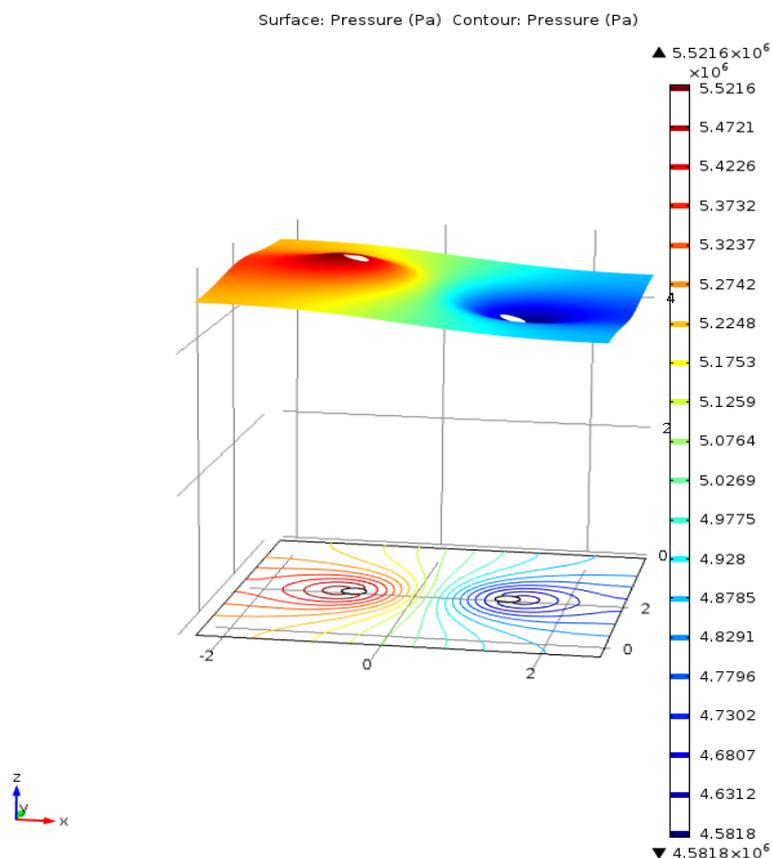


Рисунок 4.4 – Контур распределения давления по ГТП

Принятые ограничения и допущения

На практике, не единственной, но наиболее часто встречающейся конфигурацией месторождений урана, пригодных для добычи способом ПВ, является продуктивный пласт, сложенный песчаником с вкрапленными зернами минералов урана, зажатый между двумя водоупорами. В разрезе продуктивного пласта обычно можно наблюдать переслаивание хорошо проницаемых песков с пропластками глин. Мощность пласта обычно колеблется в пределах от 10 до 30 м, максимально до 80 - 100 м.

Представлена схема (рисунок 4.5) 2D-модели ПВ гидрогеотехнологического режима эксплуатации, который формируется в недрах в результате взаимодействия целого ряда природных и искусственных факторов.

Схематическое представление профиля гексагональной ячеечной формы выщелачивания приведено на рисунке.

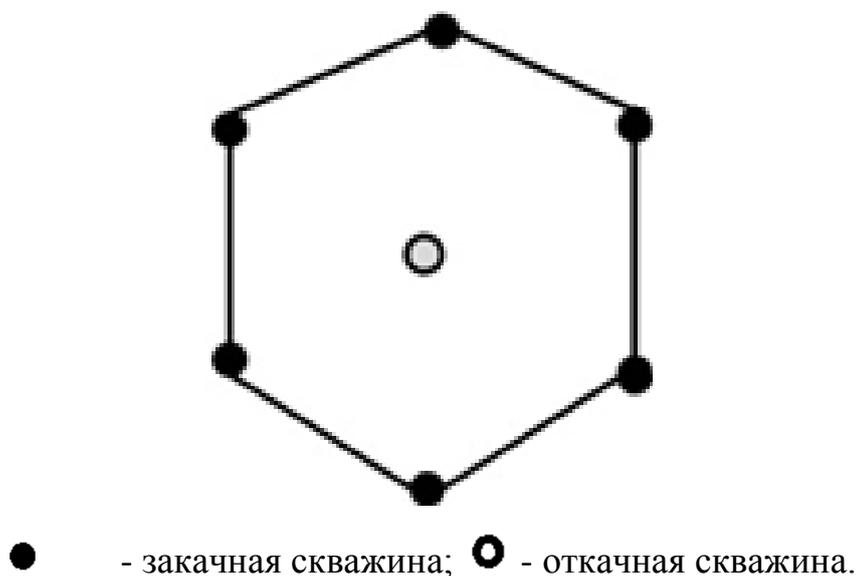


Рисунок 4.5 - Схематическое представление гексагональных ПВ

Построение геометрии – представлена 3D – модель, условно разделенная на три слоя: два нижних слоя представляют собой пористую среду с различными степенями проницаемости, верхний слой является имитацией столба жидкости грунтовых вод (рисунок 4.6).

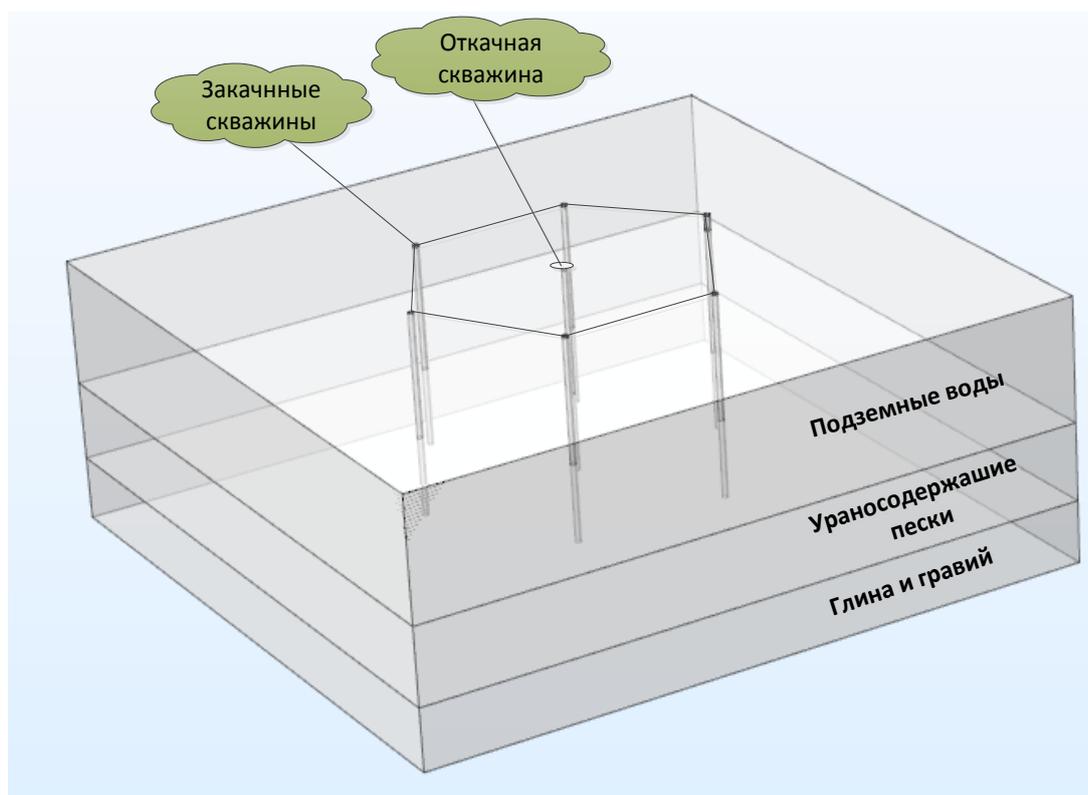


Рисунок 4.6 – Построение 3D -геометрии

Результаты моделирования. Кинетика процесса определяется массопередачей растворителя и растворенного урана, обусловленной, в свою очередь, градиентом их концентрации.

Важнейшим параметром, определяющим кинетику выщелачивания урана из массивных руд с искусственной проницаемостью, является скорость проникновения растворителя в рудный монолит. Она зависит от числа и размера пор и капилляров в рудном монолите и степени структурных изменений их в процессе выщелачивания.

Эти изменения обычно обусловлены вещественным составом руды и характером её взаимодействия с растворителем. Образование и осаждение в порах вторичных химических соединений могут изменить кинетику извлечения урана. Особенно неблагоприятными являются руды, содержащие карбонатные минералы: при их обработке растворами серной кислоты образуется слабо растворимый гипс, коагулирующие поры и капилляры.

По характеру проникновения растворителя внутрь куска руды подразделяется на следующие три типа:

1. Руды, в которых растворитель просачивается более или менее одновременно и постоянно со всех сторон;
2. Руды, в которых растворитель проникает вначале по трещинам и плоскостям слоистости, т.е. по основным каналам, а затем из них поступает в мельчайшие поры и капилляры;
3. Руды, которые при обработке растворителем разрушаются.

Пористость рудных монолитов обычно во много раз ниже пористости глин, однако размеры пор и капилляров в куске выше, чем в глинистых породах.

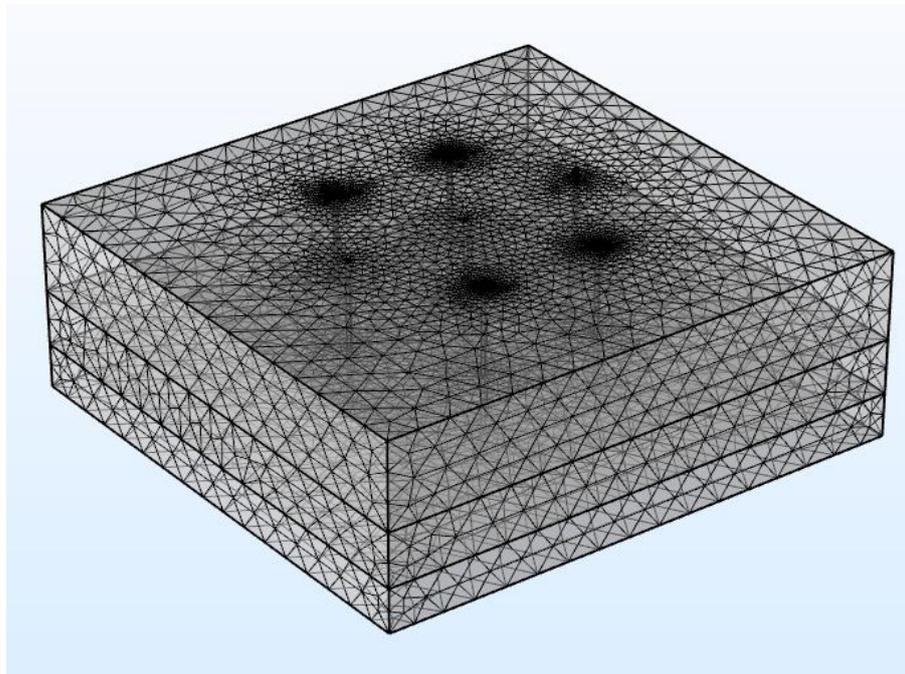


Рисунок 4.7 – Построение геометрии моделируемого объекта и разбиение на сетки

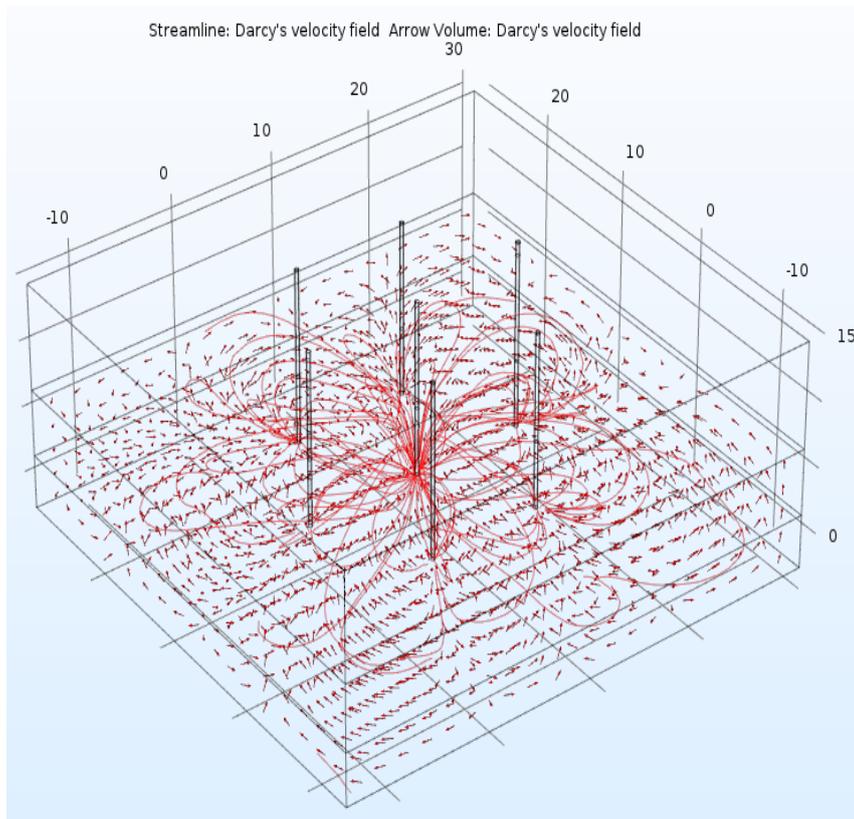


Рисунок 4.8 – Распределение полей гидродинамического напора между откачной и закачными скважинами

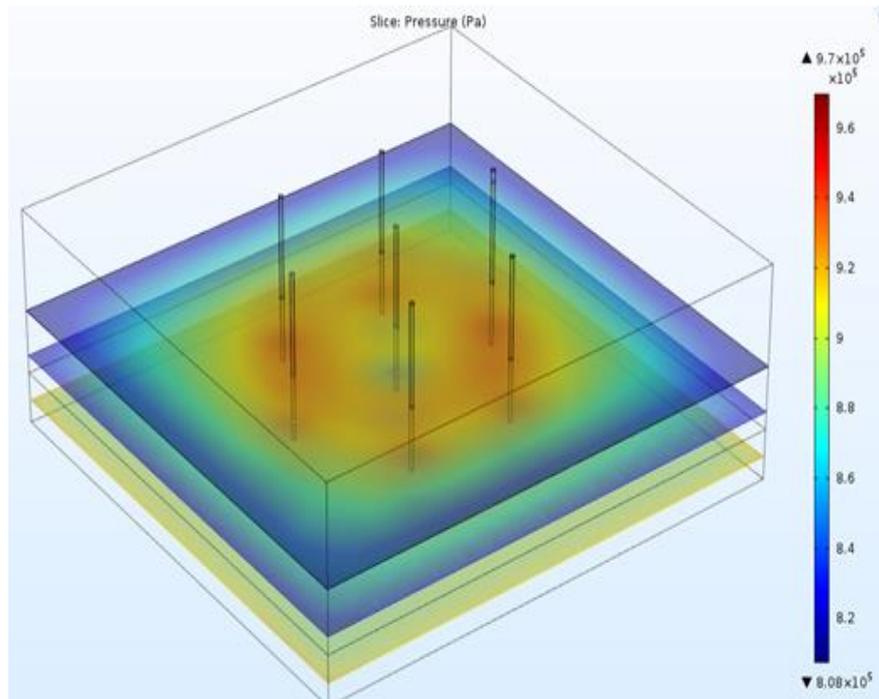


Рисунок 4.9 – Контур распределения давления по горизонтальным слоям

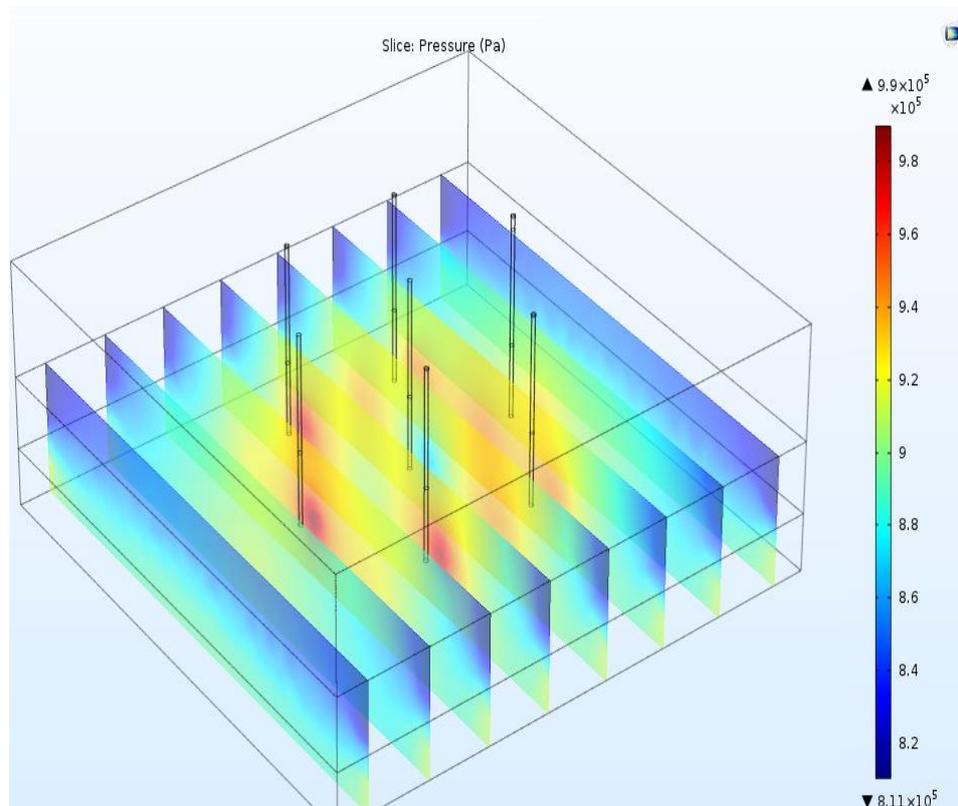


Рисунок 4.10 – Контур распределения давления по вертикальным слоям

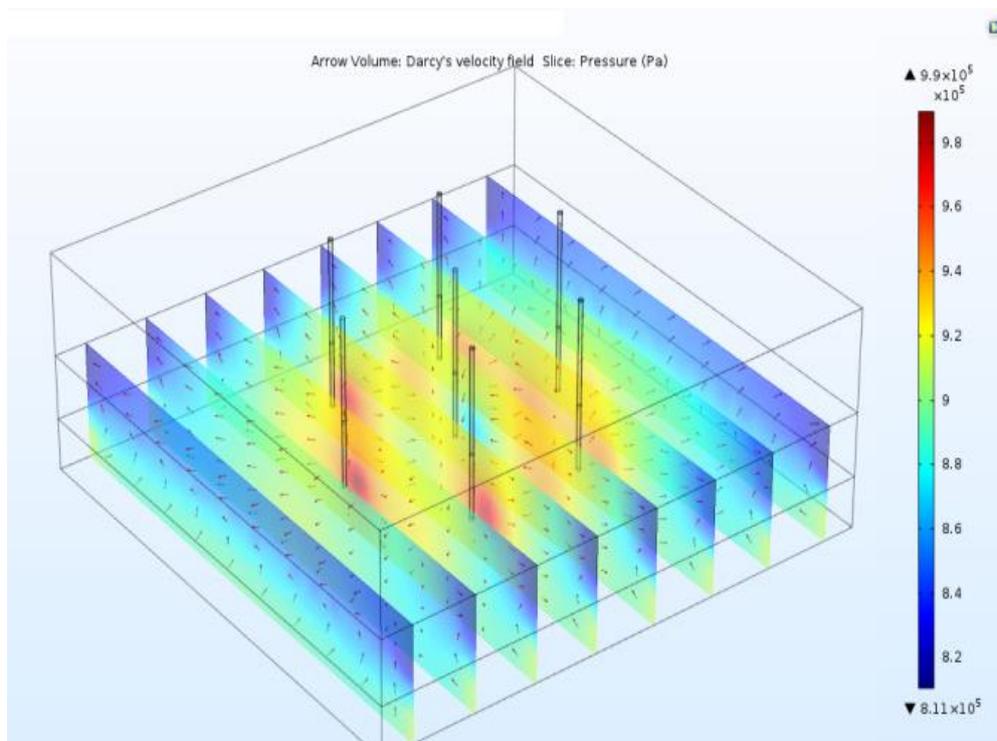


Рисунок 4.11 – Контур распределения давления по вертикальным слоям с направлением движения растворов

4.3 Разработка методов и алгоритмов моделирования для определения застойных зон в процессе ПВ

В этом разделе рассмотрено решение задачи численного моделирования процессов подземного выщелачивания в виде модели фильтрации в режиме напорной фильтрации (основной режим) и в режиме насыщения в среде COMSOL. На следующем этапе, полученная модель связана с проведением моделирующего эксперимента для выяснения влияния изменения уровня насыщения пласта на характер изменения расположения застойной зоны.

Особенность процесса подземного выщелачивания определяется процессом фильтрации жидкости в грунте. Проницаемость руд и вмещающих пород является одним из важнейших условий движения выщелачивающих растворов, поэтому при моделировании процессов ПВ, изучение фильтрационных свойств является одной из главных задач[53].

Количественно проницаемость руд и вмещающих пород выражается коэффициентом фильтрации или коэффициентом водопроницаемости, который численно равен скорости фильтрации вод через породу при напорном градиенте, равном единице, и измеряется в единицах м/сутки (или см/с). Огромное значение имеет фильтрационная неоднородность руд и рудовмещающих пород, которая определяет конвективную дисперсию и распространение растворов, а также контролирует массоперенос в продуктивных пластах[54].

Разработку численной модели можно охарактеризовать как представление концептуальной модели естественной системы с использованием численных алгоритмов подземного выщелачивания и взаимодействие грунтовых вод.

Численные модели используются для моделирования возмущения системы, чтобы оценить наиболее сложные реальные системы.

Численные модели используются при выполнении моделирования для восстановления процессов, имевших место в прошлом, и прогнозировать процессы подповерхностных сложных систем, таких как подземное выщелачивания или движение раствора в пористых средах, в которых многочисленные соединенные процессы с взаимодействующими параметрами и функциями параметров движения подземных пород и вод, а также переноса растворенных веществ и растворов[55].

Конечной целью исследования с помощью численного моделирования является определение застойных зон и определение режимов работы скважин при подземном выщелачивании металлов.

Используя основные законы физики и химии, которые регулируют поток грунтовых вод, а также растворенного вещества, необходимо разработать математически представленную концептуальную модель.

Концептуальная модель учитывает всю информацию о геологической обстановке, геометрических свойствах, гидравлических параметрах, твердофазных свойствах, в том числе однородности и изотропности, свойствах жидкости, граничные условия, как источников и поглотителей жидкостей, растворенных веществ, а также их пространственных, зависящих от времени распределения в пределах исследуемого района и его границы. Целью численной модели является решение дифференциального уравнения в стационарных условиях для невозмущенной системы которые позволяет моделировать поведение процесса в течение долгого времени.

Разработан алгоритм определения застойных зон методом численного моделирования процесса подземного выщелачивания урана. Этапы построения алгоритма показаны рисунке 4.12.

Шаг1: Целью численного моделирования является определение застойных зон подземного выщелачивания металла на основе определенных параметров методом параметрической идентификации объекта ПВ.

Шаг2: Разработка концептуальной модели подземного выщелачивания, которая включает в себя всю доступную информацию о гидродинамических и геохимических данных, физических и химических свойствах системы, являющимися актуальными для явного описания системы. Эти свойства описывают движение подземных вод и растворов и массопереноса.

Шаг3: Построение математической модели подземного выщелачивания, где все понятия о концептуальной модели выражаются в математических уравнениях(закон Дарси). Предположения о граничных условиях и других свойствах концептуальной модели включены здесь.

Шаг4: Разработка численной модели дискретизации области создания числовой сетки или сетки из области, чтобы смоделировать, или использовать

другие методы дискретизации, например, как, методы сеточные. Дискретизация математических уравнений математической модели (если создать свою собственную компьютерную программу моделирования), или выбрать компьютерную программу, которая может решить математические уравнения математической модели. Компьютерная программа должна быть проверена известными аналитическими решениями или с помощью ранее решенных задач, чтобы определить, является ли компьютерный код правильным и функционируют должным образом. Вклад в программе являются присвоенные значения гидравлических параметров, жидкости и свойств материала и т.д., каждый элемент, назначение граничных условий к сетке или сетке (внешние и внутренние).

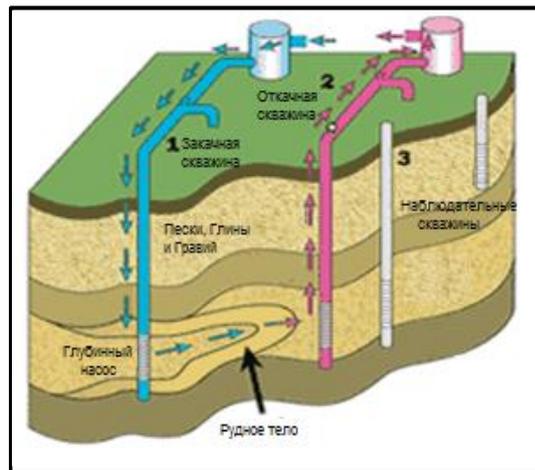
Шаг5: Оценка численной модели, где значения числовых или физических параметров моделирования в вычислительной модели оптимизированы таким образом, что хорошее соответствие между моделируемыми и измеренными данными поля достигнута, и полученные результаты правдоподобны. Оценка модели производится с использованием полевых данных, собранных в прошлом, и по сравнению с численными результатами.

Шаг6: Будут решены задачи по выбору стационарного или нестационарного режима выщелачивания для вымывания застойных зон рудного тела по блокам ГТП.

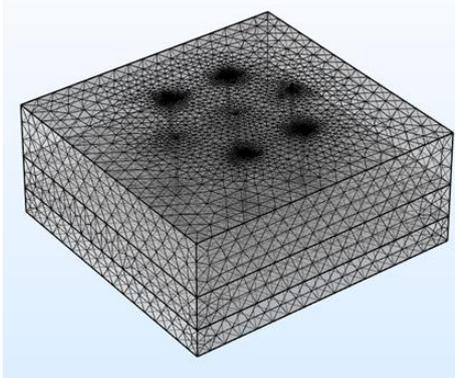
1. Определение параметров и цели модели

Компановка и сбор данных

2. Концептуальная модель



4. Численный модель



$$\frac{\partial h}{\partial x}(x_0, y_0) = \frac{h(x_0 - \Delta x, y_0) - h(x_0, y_0)}{\Delta x}$$

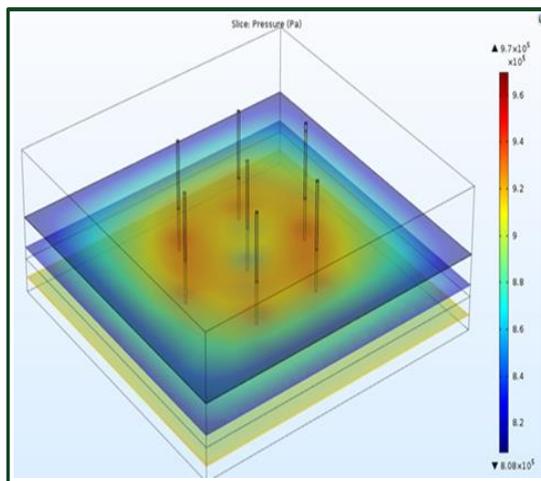
$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2}(x_0, y_0) = \frac{\frac{\partial h}{\partial x}(x_0 - \Delta x, y_0) - \frac{\partial h}{\partial x}(x_0, y_0)}{\Delta x}$$

3. Математическая модель

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0$$

$$K_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

5. Оценка модели



6. Выбор режима управления

Закачные скважины			
Скважина	Давление	Уровень	Расход
14-1-1	P: 0,00 атм.	L: 0 м	F: 0,000 м3/ч
14-1-2	P: 0,00 атм.	L: 0 м	F: 0,000 м3/ч
14-1-3	P: 0,00 атм.	L: 0 м	F: 0,000 м3/ч
13-4-3	P: 0,00 атм.	L: 0 м	F: 0,000 м3/ч

Наблюдательная скважина			
Скважина	Давление	Уровень	Расход
13-4-1	P: 0,00 атм.	L: 0 м	F: 0,000 м3/ч

Откачная скважина			
Скважина	Давление	Уровень	Расход
14-1-4	P: 0,00 атм.	L: 0,000 м	F: 0,000 м3/ч

Режимы управления насосом			
<input type="button" value="Пуск"/>	<input type="button" value="Стоп"/>	<input type="button" value="Режим 1"/>	<input type="button" value="Стоп"/>

Параметры насоса					
Ток	Напряжение	Активная мощность			
Ia: 0,00 Ам	Uab: 0,00 В	PAb: 0,00 кВт			
Ib: 0,00 Ам	Ubc: 0,00 В	PAb: 0,00 кВт			
Ic: 0,00 Ам	Uca: 0,00 В	PAb: 0,00 кВт			
Частота: 0,00 Гц					

Рисунок 4.12 - Алгоритм определения застойных зон методом численного моделирования

Прежде чем выбрать коммерческое программное обеспечение или построение пользовательского встроенного кода для создания цифровой модели, должна быть создана концептуальная модель предметной области. Концептуальная модель, по сути является идеализацией гидрогеологической системы, описанной с помощью математической и численной модели. Это виртуальное представление геологической системы, опираясь на карты сечений и существующие базы данные, такие как физические и химические параметры, позволяет описать наиболее важные свойства, которые управляют потоком раствора и растворенных веществ. Концептуальная модель включает допущения в отношении, процессов, связанных с подземными водами, растворенными веществами, транспортом на границах области, размерностью, гидро-стратиграфией, потоком направленности, свойствами материала, и модели гетерогенности. Другими словами, концептуальная модель представляет собой упрощенное и систематизированное представление высокого уровня области, содержащей набор предположений. Эта модель представляет собой наилучшее понимание процессов, которые естественным образом возникают в подземном выщелачивании[52].

После того, как концептуальная модель построена, вся информация, содержащаяся в ней должна быть преобразована в набор математических выражений, определяющих массу растворенных веществ, энергетического баланса и потока уравнений (в том числе соответствующих граничных условий). Численная модель затем строится путем дискретизации этих математических уравнений в пространстве, с использованием объемного подхода управления во времени. Полученные матрицы дискретных численных уравнений и массивов входных данных с граничными и начальными условиями затем используются для численного моделирования на реальной системе. Значения входных переменных могут быть изменены, чтобы произвести различные сценарии моделирования.

При управлении данными используется сетка, т.е. поле дискретных ячеек, которое охватывает модель предметной области в одном, двух или трех измерениях. Для контрольного объема каждого элемента выполняется индивидуальное усреднение (или интерполяция) потока, транспорта и термодинамических свойств или переменных. Подход к управлению объемом включает в себя следующие широко используемые схемы дискретизации: обычный метод конечных разностей, различные методы конечных элементов, например классические методы конечных элементов Галеркина, а также граничного элемента и методы бессеточные, которые были разработаны в последнее время и используются для моделирования ПВ.

Проверка численной модели используется для определения степени, в которой модель является точным представлением реального объекта с точки зрения предполагаемого использования модели. Это осуществляется с использованием полевых данных, которые еще не были применены при калибровке модели.

После оценки и проверки, делается анализ чувствительности - чтобы определить наиболее важные параметры, влияющие на поведение системы. Если неопределенность модели низка (сравнение численных результатов с экспериментальными данными), численную модель, можно считать подходящей для выполнения численного моделирования в соответствии с теми конкретными задачами, для которых она была разработана (например, делать прогнозы).

Далее рассматриваем пример численного моделирования процесса ПВ. Методом подземного выщелачивания разрабатывают экзогенные месторождения урана, которые находятся в хорошо проницаемых подземных водоносных горизонтах. Извлечение урана из рудного тела происходит через систему технологических скважин, их концептуальная модель показана на рисунке 4.13.

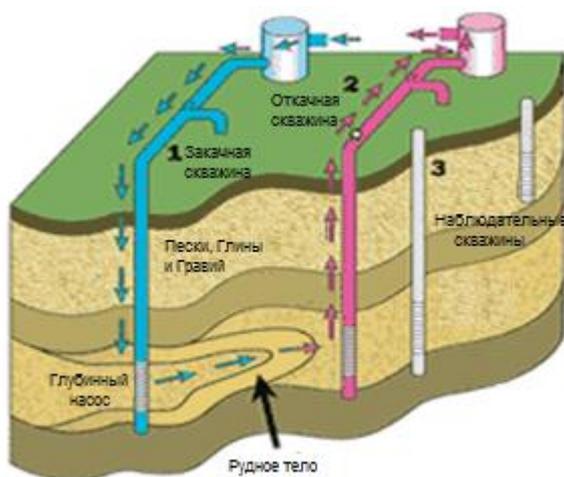


Рисунок 4.13 - Концептуальная модель

Через нагнетательные скважины (1) в продуктивный горизонт нагнетается раствор веществ, способных растворять содержащие уран минералы. Образующийся в подземном водоносном горизонте продуктивный раствор извлекается через откачные скважины (2). Образующиеся после переработки продуктивных растворов маточные растворы доукрепляются выщелачивающими реагентами и снова подаются в нагнетательные скважины в качестве рабочих растворов. Основными задачами управления геотехнологическим предприятием является повышение рентабельности разработки месторождения, увеличение доли урана, извлекаемого из продуктивного горизонта, и снижение загрязнения подземных вод. Для решения этой задачи нужно уметь оценивать геохимическое и гидрогеологическое состояние продуктивного горизонта и подземных вод[56].

Вокруг каждой рудной зоны пробуривается группа наблюдательных скважин (3) для отслеживания движения растворов за пределы района разработки. Скважины обсаживаются, чтобы жидкости текли только в рудную зону и из нее, не затрагивая вышележащих водоносных горизонтов.

На практике при разработке месторождений методом подземного выщелачивания применяется гексагональное расположение скважин. Верификация модели выполнена для случая гексагонального расположения скважин, когда в центре расположена откачная, по краям – закачные скважины, как показано на рисунке 4.14.

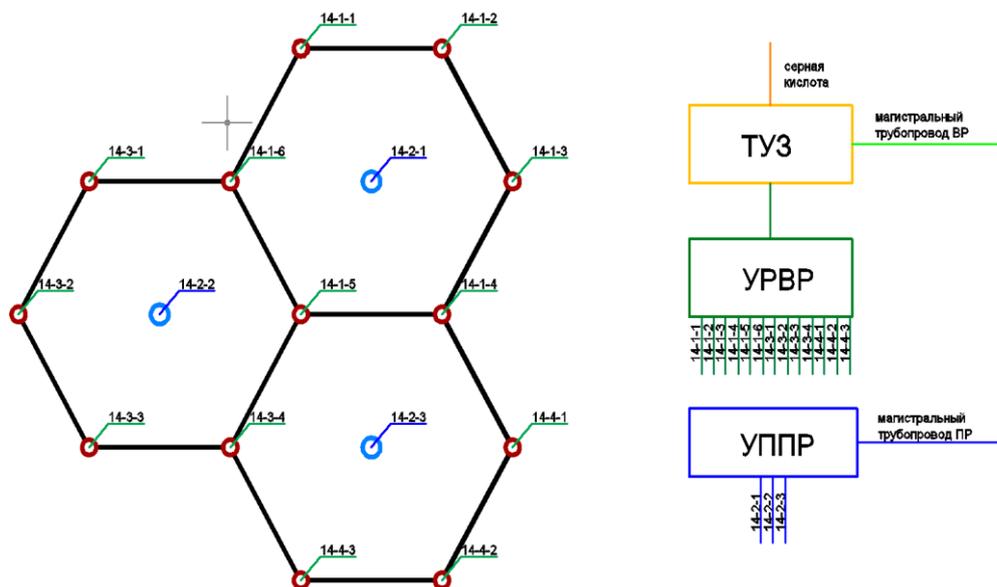


Рисунок 4.14 – Гексагональная схема добычи

На рисунках 4.15 - 4.16 показано распределение давления для гексагональной схемы добычи. Расход закачной скважины равен расходу рудного тела $Q_{zci} = Q_{pmi}$, тогда уровень закачной скважины стабилен $H_k = H_{zci}$. Давление, которое создает закачная скважина при установившемся режиме работы, рассчитывается:

$$P_{zci} = H_{zci} \rho g \quad (4.15)$$

На рисунке 4.17, где представлено поле скоростей, видно, что вдали от скважин фильтрация раствора практически отсутствует, появляются так называемые застойные зоны. Как показали результаты моделирования, застойные зоны появляются в центре между закачными скважинами.

На рисунке 4.18 - построена геометрическая модель застойных зон для гексагональной схемы добычи.

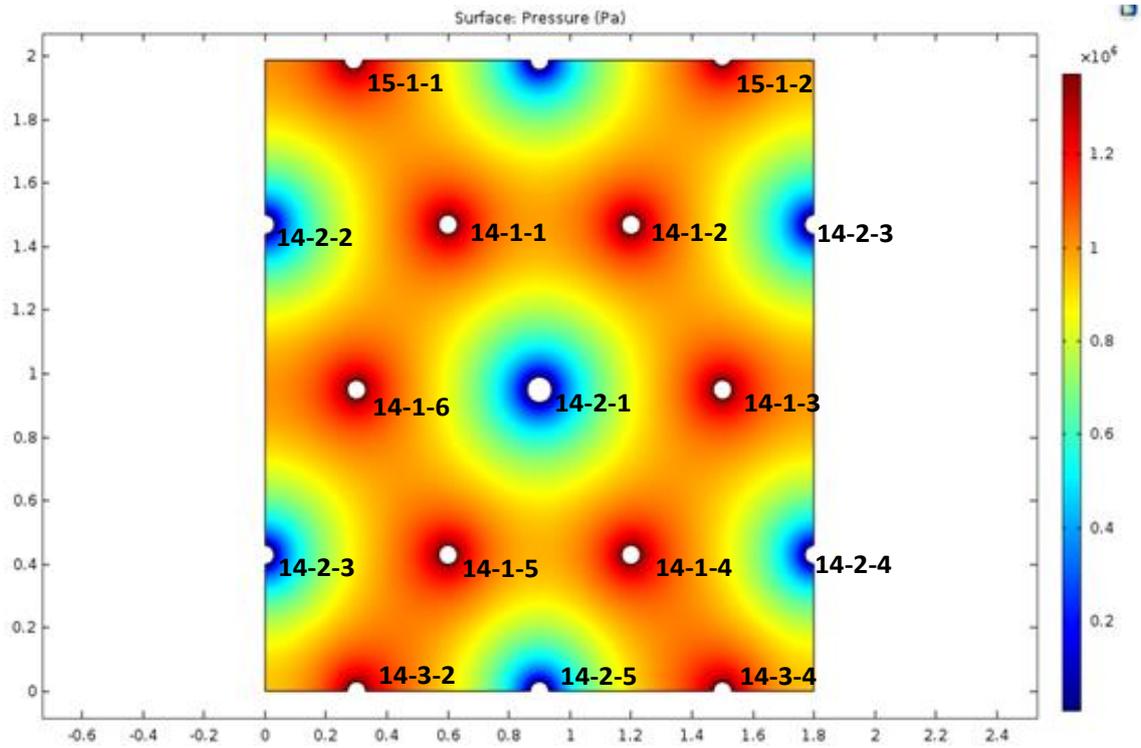


Рисунок 4.15 – Распределение давления при стационарном режиме ($H_{zci}=130\text{м}$, $H_{ocl}=4\text{ атм.}$, $i=1..6$);

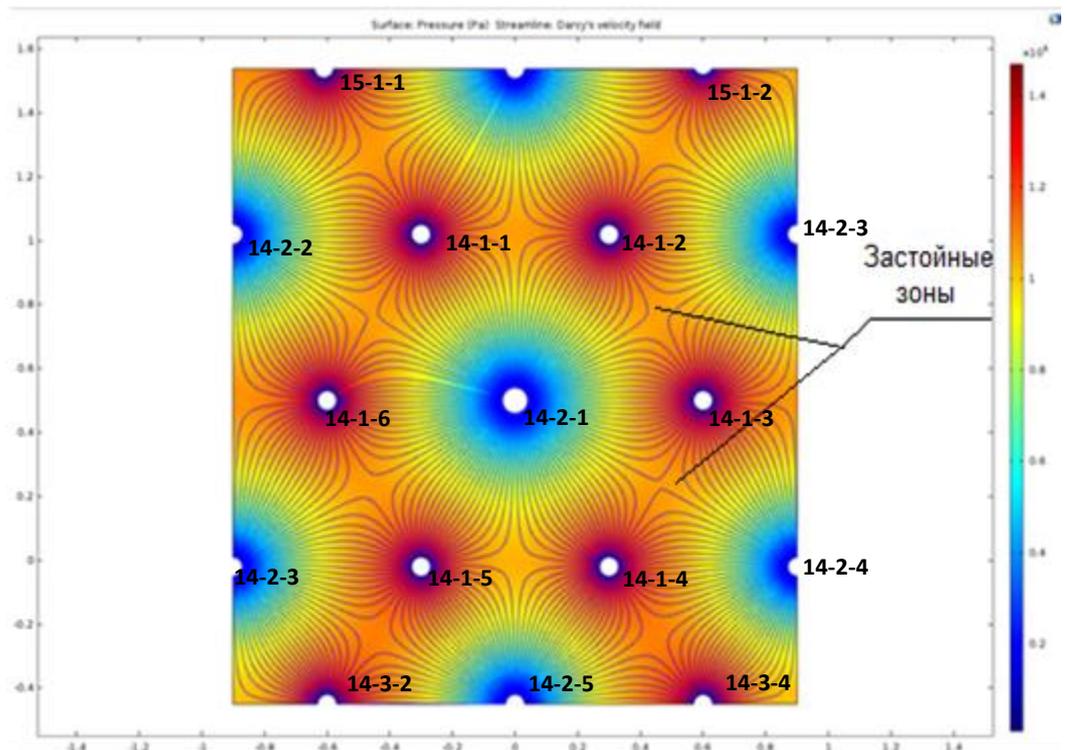


Рисунок 4.16 – Распределение поля скоростей и давления при стационарном режиме ($H_{zci}=130\text{м}$, $H_{ocl}=4\text{ атм.}$, $i=1..6$);

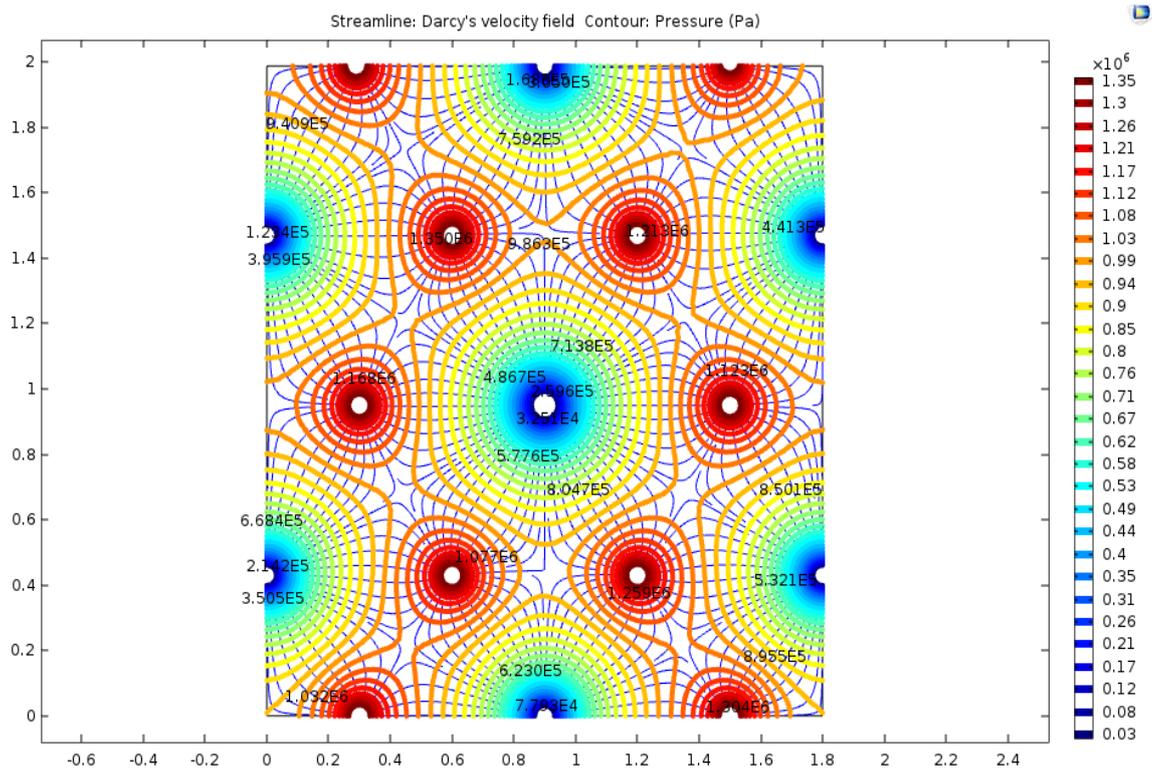


Рисунок 4.17 – Распределение скоростей и давления течения между нагнетающими и откачными скважинами

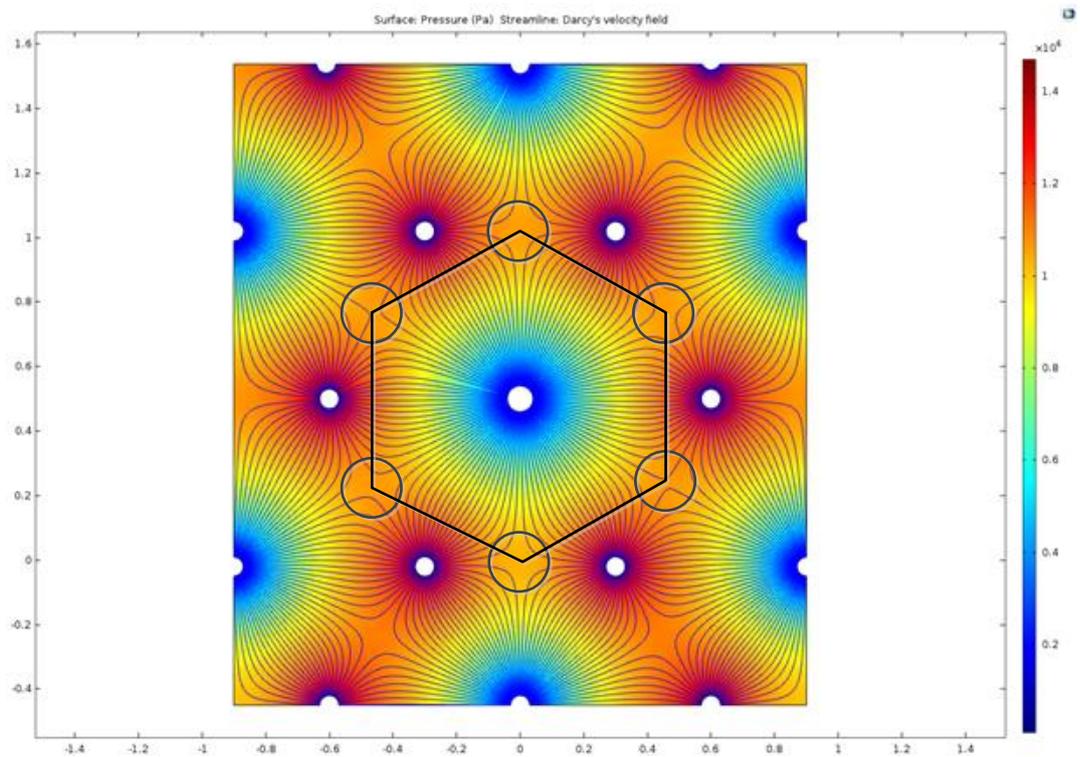


Рисунок 4.18 – Геометрическое оконтуривание застойных зон при стационарном режиме ($H_{zci}=130\text{м}$, $H_{ocl}=4\text{ атм.}$, $i=1..6$;))

Исходя из результатов моделирования, можно предположить, что в процессе подземного выщелачивания образуются застойные зоны, где отсутствует фильтрация. Что влияет на технологический процесс в целом, так как возникает необходимость проведения исследований по повышению степени извлечения минерала определением оптимальных режимов работы скважин, а также управления фильтрационными токами в пласте.

Такие зоны приводят к снижению степени извлечения минерала и, соответственно, к снижению степени отработки месторождения. На практике для увеличения степени отработки месторождения проводят изменение функций некоторых скважин для изменения фильтрационных токов в пласте и сокращения объемов застойных зон. Эта методика может быть применена на месторождениях, вводимых в эксплуатацию, так как сооружение реверсивных скважин вместо закачных или откачных должно быть произведено на этапе разработки месторождения[57].

Как видно из результатов моделирования в среде Comsol, представленных на рисунках 4.20-4.22, выщелачивание в стационарных режимах наблюдается как симметричные картины процесса фильтрации с образованием застойных зон процесса, где тёмно-синим контуром показаны слабопроницаемые зоны.

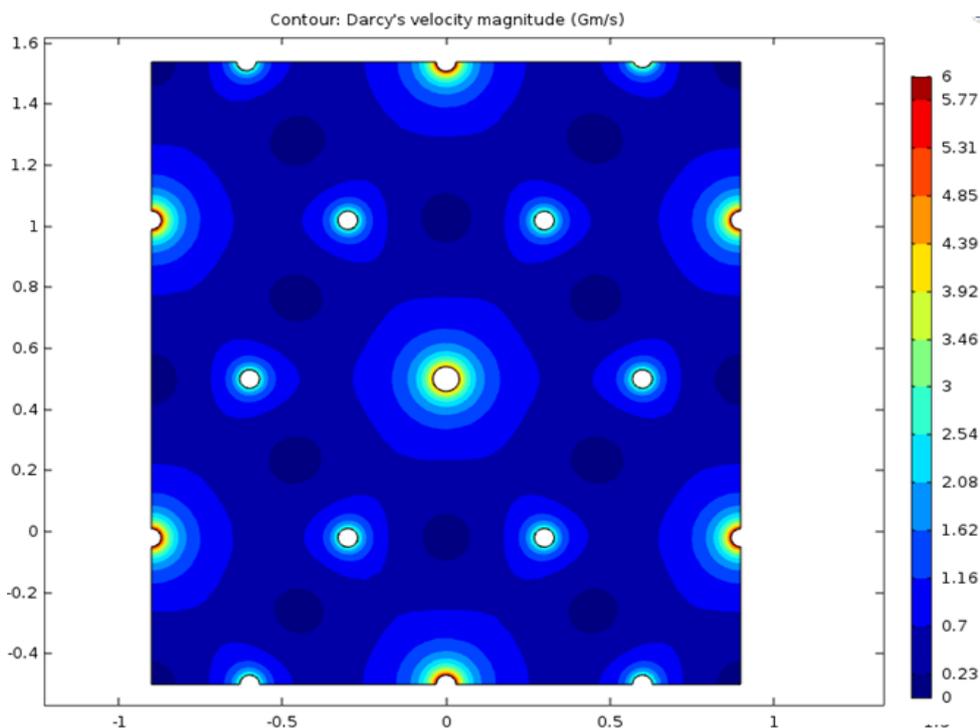


Рисунок 4.19 – Результат моделирования распределения скоростей выявления застойных зон при стационарном режиме работы скважин ($H_{zci}=130\text{м}$, $H_{ocl}=4\text{ атм.}$, $i=1..6$;))

Представленные результаты моделирования поля скоростей показывают, что в центре между соседними закачными скважинами фильтрация раствора

при стационарном режиме работы скважин практически отсутствует (рисунок 4.20).

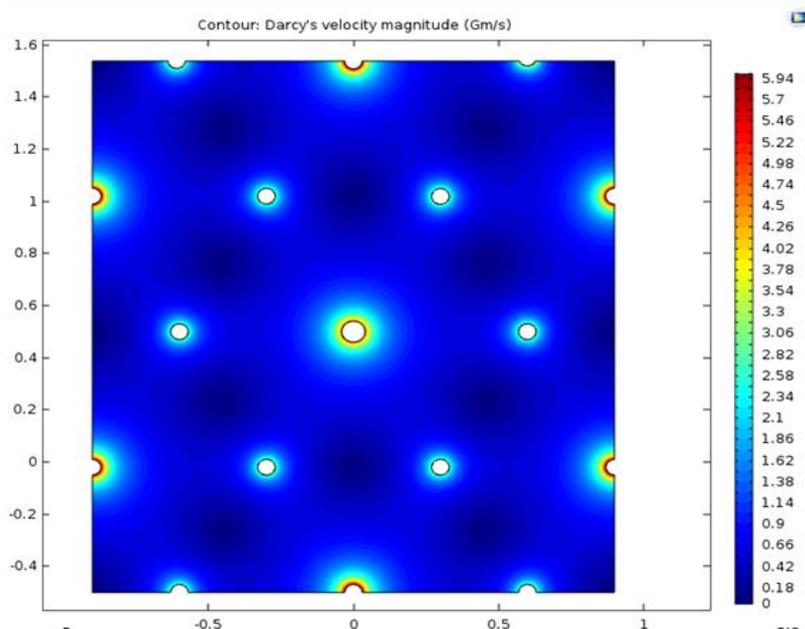


Рисунок 4.20 – Результат моделирования при стационарном режиме распределения скоростей при ($H_{zci}=130\text{м}$, $H_{ocl}=4\text{ атм.}$, $i=1..6$;))

На рисунках 4.21-4.22 представлено распределение минерала в твердой фазе для различных режимов работы скважин. Видно, что происходит частичное извлечение минерала с образованием застойных зон, приводящих к снижению, его извлечения.

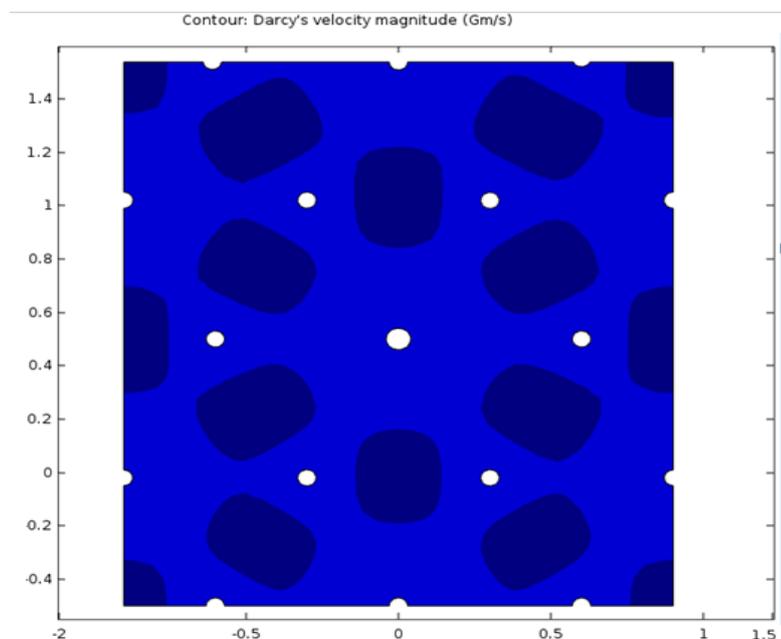


Рисунок 4.21 – Результат моделирования при стационарном режиме распределения скоростей при ($H_{zci}=130\text{м}$, $H_{ocl}=4\text{ атм.}$, $i=1..6$;))

Результаты численного моделирования показывают наличие застойных зон, где отсутствует фильтрация раствора.

На рисунке 4.22 показан результат моделирования, который демонстрирует распределение давления для блока. По рисунку 4.23, где представлены поля скоростей, видно, что в центре между закачными скважинами фильтрация раствора практически отсутствует, это явления отрицательно действует на процесс добычи металла.

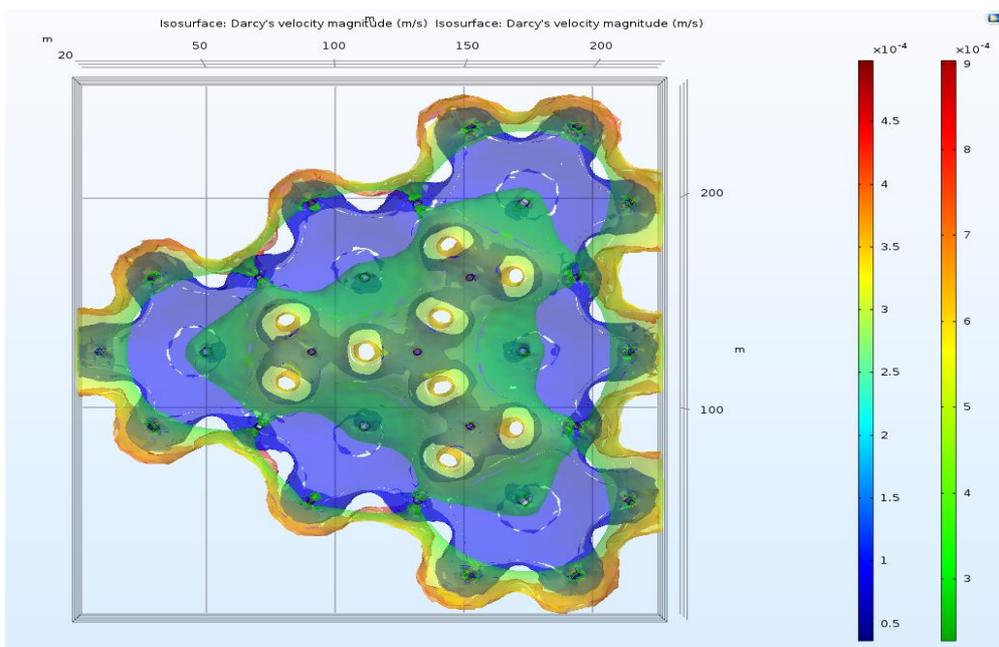


Рисунок 4.22 – Распределение поля давлений по блоку при стационарном режиме работы скважин(3D)

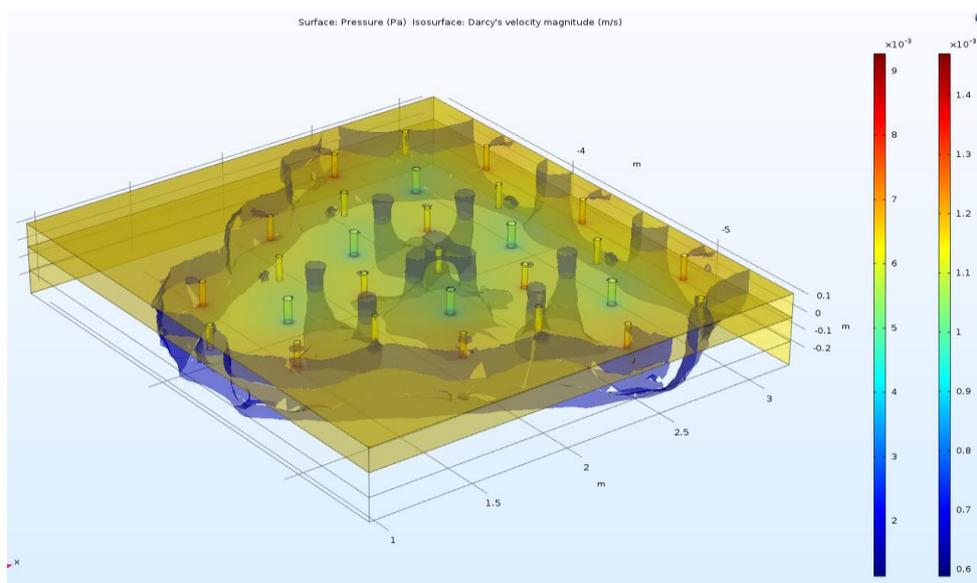


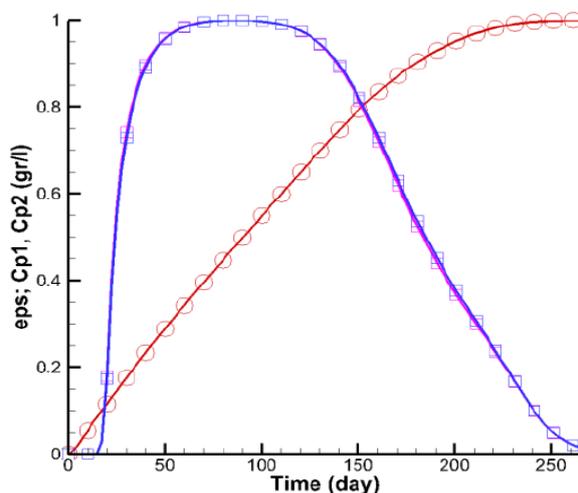
Рисунок 4.23 – Распределение поля скоростей по блоку при стационарном режиме работы скважин(3D)

Результаты проведенных аналитических исследований по выявлению застойных зон на изменение параметров скважин и фильтрационной проводимости пород позволили разработать и опробовать в натурных опытно-промышленных условиях технологию управления режимом растекания линий токов рабочих растворов.

Для устранения застойных зон рекомендуется постоянно менять режим выщелачивания по скважинам.

4.4 Синтез алгоритма режима работы блоков

Зависимость степени выработки пласта и концентрации минерала на откачной скважине со временем для случаев гексагонального расположения скважин видна на рисунке 4.24. Схема показывает, что при 60%-ном извлечении концентрация минерала на откачной скважине достигает до максимального значения, и при дальнейшем извлечении минерала за счет добывания его концентрация уменьшается[58].



Кривая с кругами - степень извлечения минерала; кривая с квадратами - концентрация минерала на откачной скважине

Рисунок 4.24 - Зависимость степени выработки пласта и концентрации минерала на откачной скважине со временем для случаев гексагонального расположения скважин.

В практике ПСВ в первые десятилетия (60 – 70 годы) одним из распространенных физических методов интенсификации являлось изменение направления фильтрационных потоков (метод реверсирования) по отношению к технологическим скважинам. Переоборудование нагнетательных скважин в откачные (дренажные) и наоборот[59].

Застойные гидродинамические зоны, формируемые в результате искривления линии тока растворов (2-х мерная фильтрация в плане), не позволяли эффективно, путем создания соответствующего фильтрационного режима, прорабатывать рудные участки, приуроченные к таким зонам[60].

Выщелачивание урана на участках зон происходит, в основном, в диффузионном режиме, скорость выщелачивания которого несравнима (на несколько порядков ниже) со скоростью фильтрации. Технология реверсирования потоков позволяла на заключительной стадии процесса ПВ, когда содержание урана в продуктивных растворах снижалось до уровня 10 – 12 мг/л, путем создания фильтрации растворов через застойные зоны повысить средние значения концентрации урана в откачиваемых растворах[61].

Необходимо отметить, что диаметры скважин, как нагнетательных, так и разгрузочных (дренажных), составляли 100 мм. В качестве средств подъема растворов использовались эрлифты. С переходом на экономичную и более эффективную технологию подъема растворов – электропогружными насосами, возникла необходимость обсадки скважин трубами большего диаметра (168 и более мм), а диаметр нагнетательных скважин остался прежним. При таких конструкциях технологических скважин возможность изменения путей фильтрации растворов, реверсирование их, не представляется возможным[62].

Для устранения застойных зон рекомендуется постоянно менять (нестационарный) режим выщелачивания по скважинам.

При численном моделировании гексагональной схемы добычи застойных зон можно представить геометрической моделью, который состоит из контуров слабопроницаемых фильтрационных потоков и скоростей.

В работе предлагается разработать два вида нестационарного режима работы скважин для полного вымывания застойных зон. Первый метод нестационарного режима работы скважин представляет собой изменение расхода выщелачивающего раствора по специальной методике (треугольно расположенные закачные скважины), который был разработан в процессе численного моделирования разных режимов работы.

Геометрическое представление треугольного метода нестационарного режима показано на рисунке 4.25. Метод основывается на изменении расхода раствора в треугольно связанных закачных скважинах, при этом уменьшается расход в соседних скважинах. В результате численного моделирования гидродинамической сетки (линий тока и линий напоров) получена схема миграции застойных зон в сторону скважины с меньшей величиной расхода. Так как величина расходов раствора в процессе эксперимента менялась в двух соседних нагнетательных скважинах в сторону уменьшения.

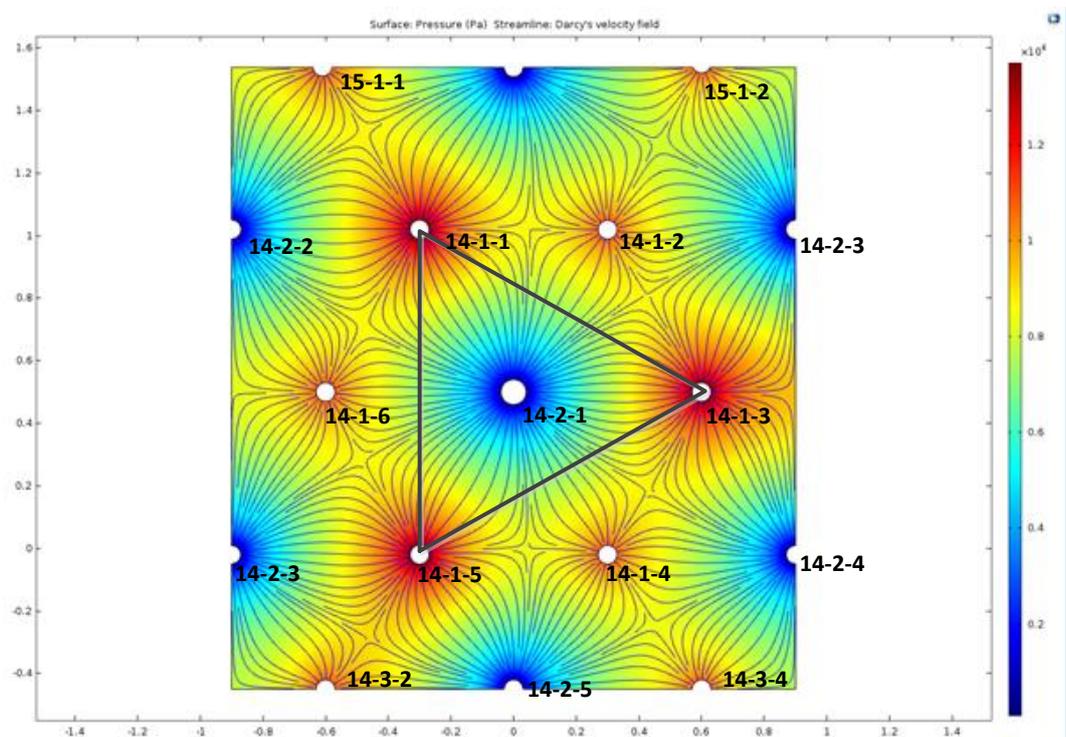


Рисунок 4.25 – Треугольный режим работы при гексагональной схеме ($H_{14-1-1}, H_{14-1-3}, H_{14-1-5} = 150\text{м}$, $H_{14-1-2}, H_{14-1-4}, H_{14-1-6} = 120\text{м}$, $H_{oc1} = 4\text{ атм.}$)

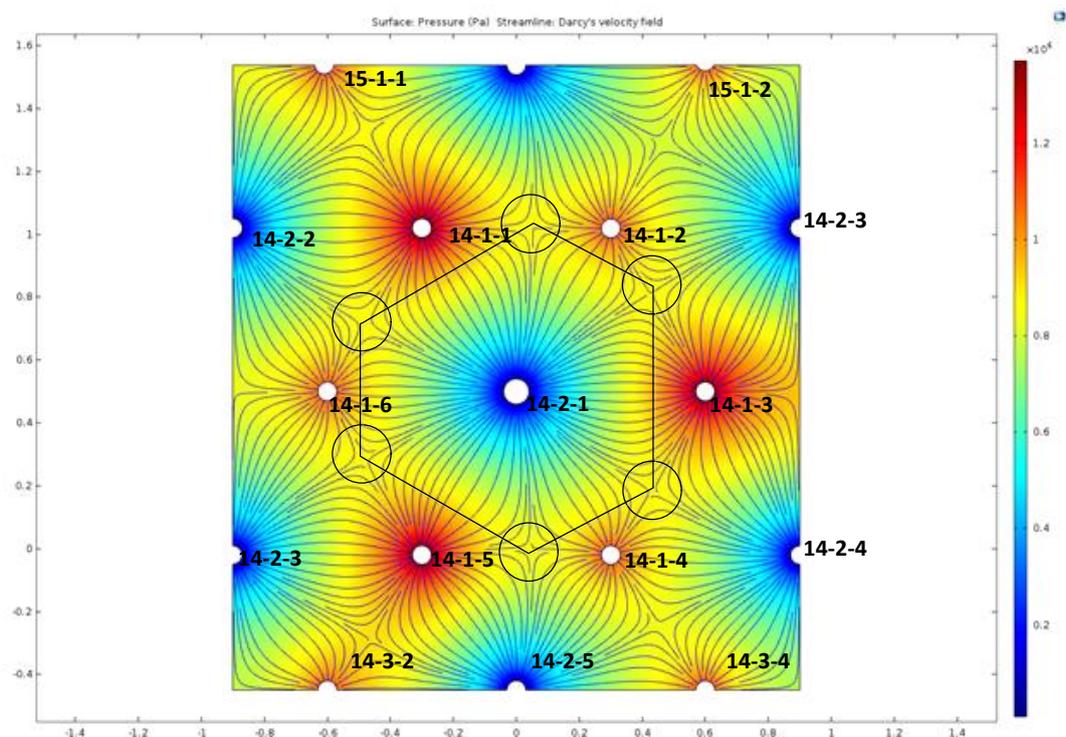


Рисунок 4.26 – Геометрическое оконтуривание застойных зон при нестационарном режиме ($H_{14-1-1}, H_{14-1-3}, H_{14-1-5} = 150\text{м}$, $H_{14-1-2}, H_{14-1-4}, H_{14-1-6} = 120\text{м}$, $H_{oc1} = 4\text{ атм.}$)

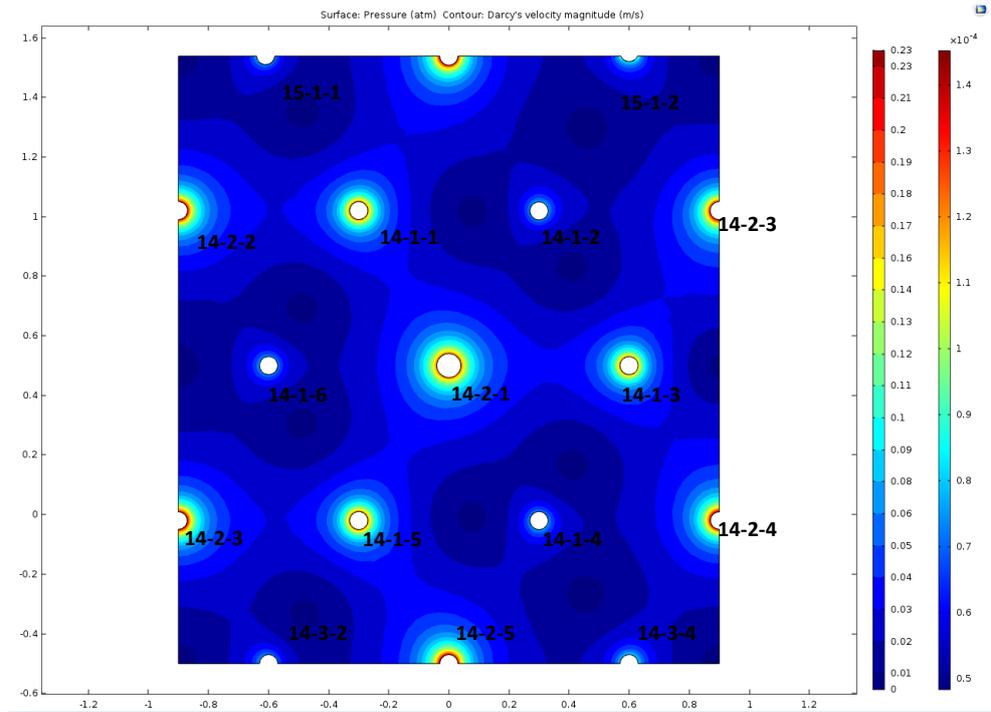


Рисунок 4.27 – Результат моделирования определения застойных при треугольном режиме работы ($H_{14-1-1}, H_{14-1-3}, H_{14-1-5} = 150\text{м}$, $H_{14-1-2}, H_{14-1-4}, H_{14-1-6} = 150\text{м}$, $H_{oc1} = 4\text{ атм.}$)

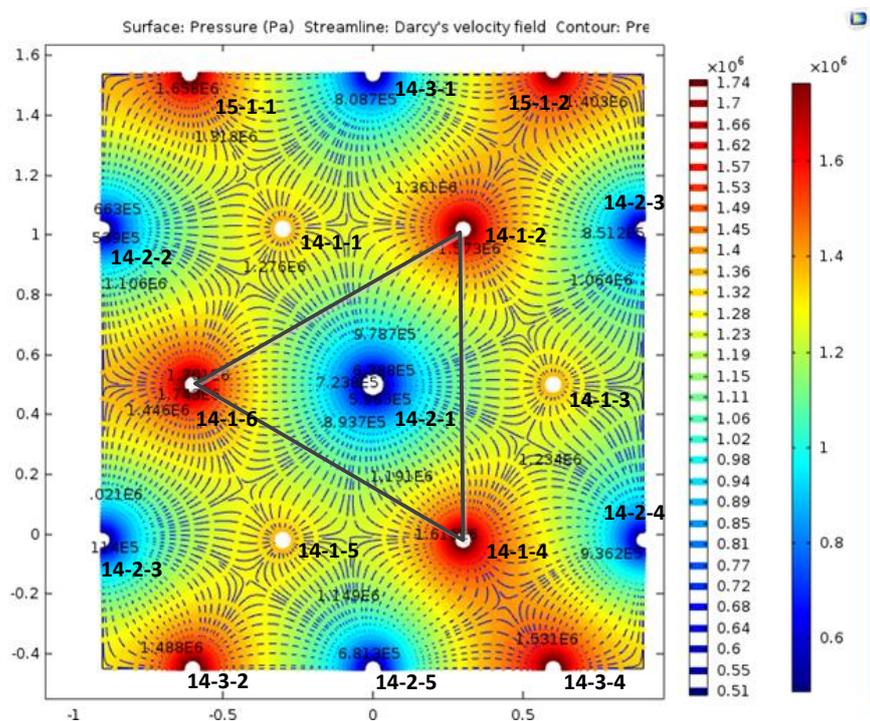


Рисунок 4.28 – Треугольный режим работы при гексагональной схеме ($H_{14-1-1}, H_{14-1-3}, H_{14-1-5} = 120\text{м}$, $H_{14-1-2}, H_{14-1-4}, H_{14-1-6} = 150\text{м}$, $H_{oc1} = 4\text{ атм.}$)

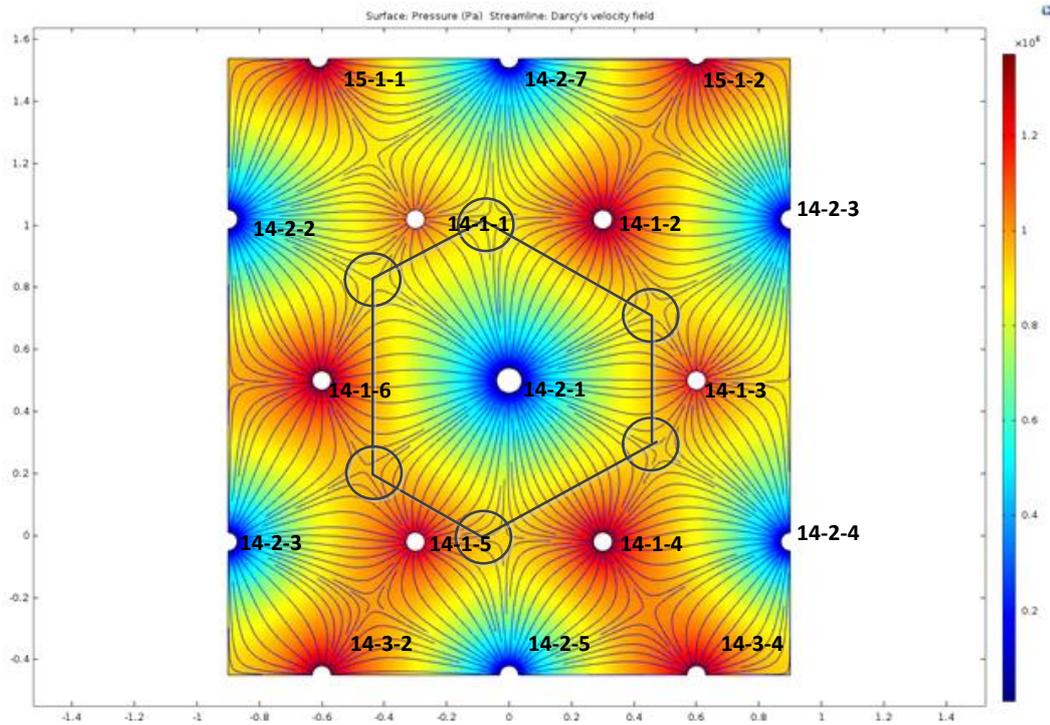


Рисунок 4.29 – Геометрическое оконтуривание застойных зон при нестационарном режиме ($H_{14-1-1}, H_{14-1-3}, H_{14-1-5} = 120\text{м}$, $H_{14-1-2}, H_{14-1-4}, H_{14-1-6} = 150\text{м}$, $H_{ocl} = 4 \text{ атм.}$)

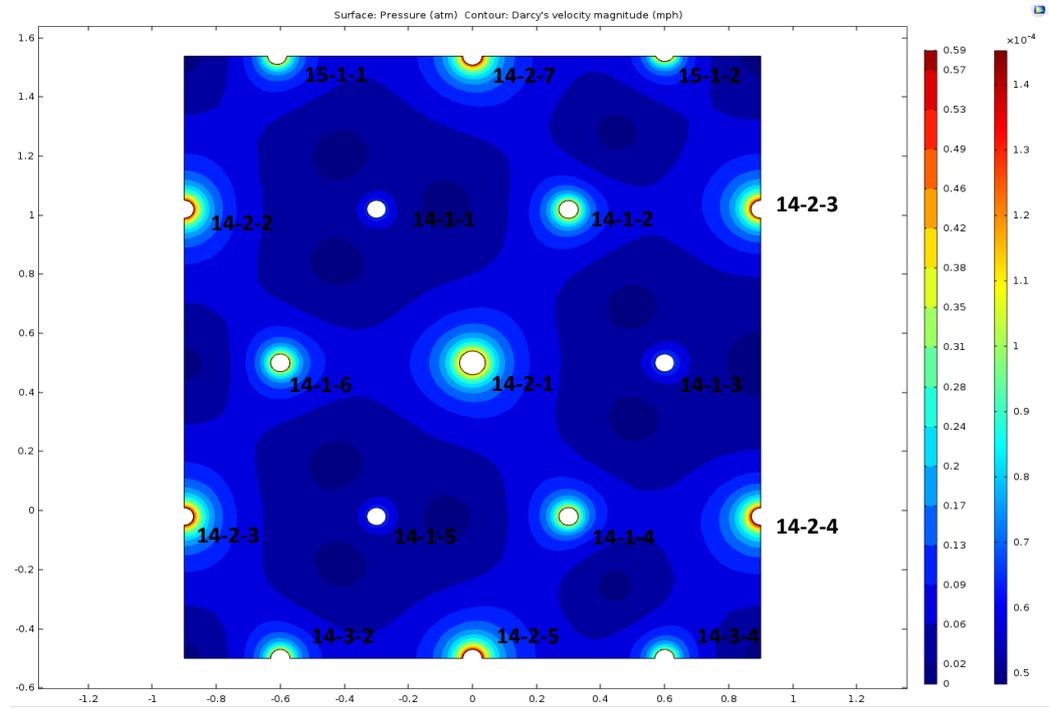


Рисунок 4.30 – Результат моделирования определения застойных зон при треугольном режиме работы ($H_{14-1-1}, H_{14-1-3}, H_{14-1-5} = 120\text{м}$, $H_{14-1-2}, H_{14-1-4}, H_{14-1-6} = 150\text{м}$, $H_{ocl} = 4 \text{ атм.}$)

Из результатов моделирования режимов работы треугольного метода видно, что увеличение расходов раствора тех закачных скважин в гексагональной схеме, которые представляют геометрический равносторонний треугольник, а уменьшение расхода в остальных скважинах приводит к вымыванию застойных зон. Миграцию застойных зон можно представить геометрическими моделями, которые описаны в таблице 4.1, сравнение моделей показано в таблице 4.2.

Таблица-4.1 Геометрические модели застойных зон при гексагональной схеме

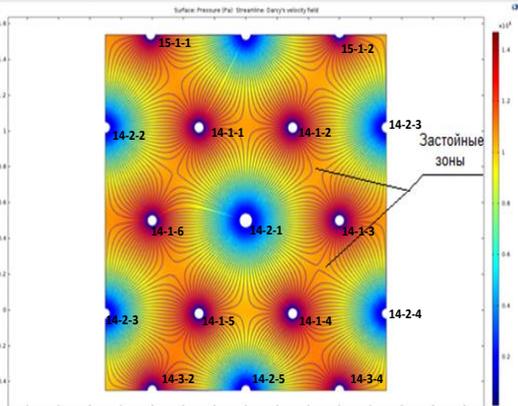
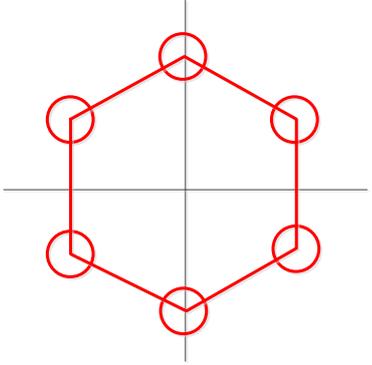
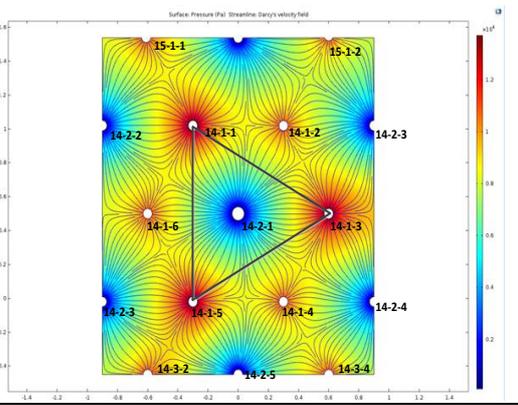
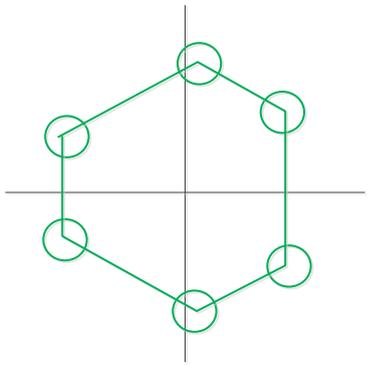
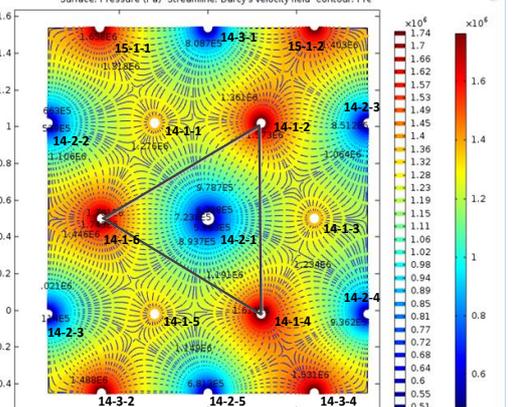
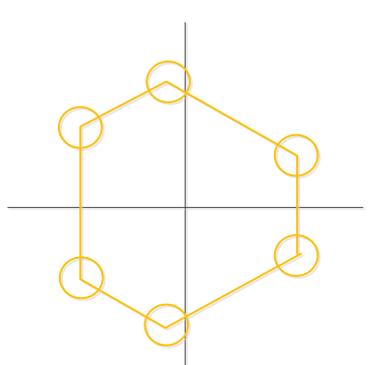
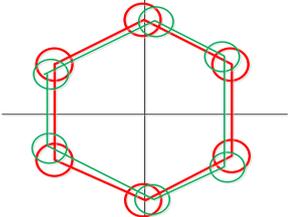
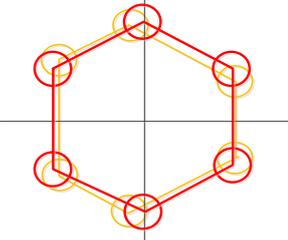
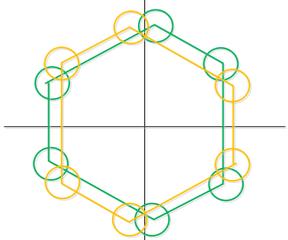
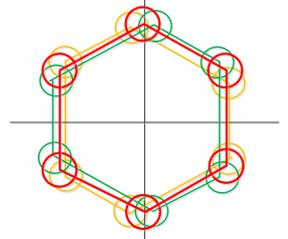
Результат численного моделирования	Режим	Геометрическая модель
	<p>стационарный</p>	
	<p>нестационарный, управление в виде треугольника 1</p>	
	<p>нестационарный, управление в виде треугольника 2</p>	

Таблица-4.2 Геометрические модели застойных зон при гексагональной схеме

Геометрический модель	Режим
	<p>Стационарный (красный) и нестационарный(зеленый), управление в виде треугольника 1</p>
	<p>Стационарный (красный) и нестационарный(оранжевый), управление в виде треугольника 2</p>
	<p>Нестационарный(зеленый), управление в виде треугольника 1 и нестационарный(оранжевый), управление в виде треугольника 2</p>
	<p>Стационарный (красный), Нестационарный(зеленый), управление в виде треугольника 1 и нестационарный(оранжевый), управление в виде треугольника 2</p>

4.5 Выводы по разделу

В четвертом разделе смоделирован процесс подземного выщелачивания, который относится к классу сложных и нелинейных объектов. Представлены также результаты численного моделирования определения застойных зон при стационарном режиме управления геотехнологическим полем. Проанализированы методы вымывания слабопроницаемых зон в процессе добычи подземного выщелачивания при гексагональной схеме. Определены эффективные режимы работы закачных скважин для оптимального извлечения минерала. Построены геометрические модели оценки застойных зон.

5 ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

5.1 Применение результатов моделирования в разработке виртуального тренажера для процесса ПВ урана

Полученные результаты математических и численных моделей, которые были разработаны в третьем разделе использовались при создании виртуального компьютерного тренажера «Подземное скважинное выщелачивание урана», для операторов ГТП рудников «Казатомпрома».

Актуальность создания виртуального тренажера. Аварии и сбои вследствие ошибок оператора, по статистике, являются причиной четверти всех крупных аварий. Известно, что люди запоминают 20% того, что они видят, 40% того, что они видят и слышат и 70% того, что они видят, слышат и делают. Поэтому для решения задач обеспечения безопасной эксплуатации технологических установок и оборудования предприятий, снижения потерь от незапланированных остановок по вине персонала необходимо повышать и постоянно поддерживать уровень его подготовки[66].

Разработка компьютерных тренажеров с использованием мультимедиа - технологий создает возможность реализовать практически любые по сложности эксперименты с оборудованием и воспроизвести методики отработки любых нештатных ситуаций. Применение сценарных моделей представления знаний предметной области позволяет предложить решения для проектирования и создания эффективных тренажерных комплексов, обладающих рядом интеллектуальных функций и основанных на моделях поведения и восприятия пользователя[67].

Предлагаемая разработка обеспечивает получение навыков работы с конкретными технологическими процессами. Такой подход позволяет более углубленно изучать отдельные объекты управления и получать практические навыки по эксплуатации АСУТП. Данный виртуальный тренажер предназначен для обеспечения тренинга оперативного персонала, работающего с основными подсистемами АСУТП подземного скважинного выщелачивания урана.

Технологические объекты виртуального тренажера «Подземное скважинное выщелачивание урана». Виртуальный тренажер «Подземное скважинное выщелачивание урана» реализуется на моделях основных технологических объектов.

Они представлены:

- Закачивающими скважинами;
- Откачными насосными агрегатами;
- Узлом распределения выщелачивающего раствора;
- Узлом приготовления выщелачивающего раствора;
- Узлом приема продуктивного раствора;
- Геотехнологическим полем.

Постоянное и эффективное функционирование технологических процессов без инцидентов имеет первостепенное значение для любого предприятия. Тем

не менее, если произойдет какой-либо сбой, персонал службы должен быть надлежащим образом подготовлен, чтобы избежать серьезных последствий, и такое обучение его должно быть максимально приближенным к реальности. Виртуальный тренажер, который мы представляем в этой работе, может прекрасно соответствовать этой цели и широко использован для эффективного обучения персонала компаниями и предприятиями[68].

В данном разделе подробно описывается, как технология моделирования может быть использована на примере анализа процесса выщелачивания на месте урана. Введенные планы и спецификации ПВО могут помочь персоналу учебного оператора изучить и имитировать вышеупомянутый процесс, и эти знания могут быть получены без перерыва в рабочем процессе предприятия. Виртуальный симулятор основан на имитационной модели технологического оборудования, и уровне сложности обучения и дальнейшем развитии динамики обучения, разработанного с помощью численного моделирования[69].

Структура комплекса технических средств (КТС) виртуального тренажера «Подземное скважинное выщелачивание урана» базируется на следующих основных принципах современной концепции построения мультимедийных тренажеров:

- централизованный, иерархический контроль и управление моделью технологического объекта;
- открытая архитектура информационного взаимодействия различных компонентов системы;
- распределенная структура функции сбора и обработки информации;
- оптимизация распределения функций сбора информации, контроля и управления на основе применения объектно-ориентированного подхода;
- простота обслуживания и высокая степень готовности программно-технических средств;
- дистанционное обучение.

Открытая архитектура информационного взаимодействия позволяет дополнять систему новыми техническими средствами либо заменять морально устаревшие компоненты системы при минимальных затратах на стыковку с существующим комплексом технических средств.

Принятая концепция построения структуры КТС предусматривает применение открытых международных стандартов для всех уровней информационного взаимодействия компонентов виртуального тренажера.

Таким образом, обеспечивается бесперебойное, неоднократное расширение и модернизация системы в будущем.

Структура программно-технических средств виртуального тренажера обеспечивает высокую степень надежности, благодаря:

- применению принципа распределенного управления;
- самодиагностике основных компонентов ПТК.

Структурная схема технических средств разработана по принципу иерархической информационно-управляющей системы.

Поскольку основной целью любого промышленного предприятия является эффективное администрирование производства, которое достигается путем рационализации рабочего процесса, организационная схема ПВО выщелачивания урана должна соответствовать этому требованию по его структуре и взаимосвязям.

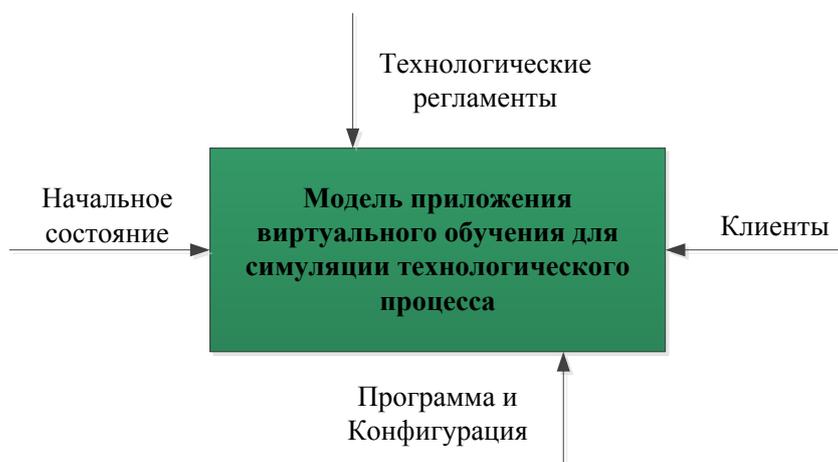


Рисунок 5.1 - Модель компьютерного тренажера

Очень удобно строить тренажеры для технологических процессов, так как можно имитировать технологический процесс в реальном режиме времени. Тут человек (оператор) может визуально представить всю цепочку процесса и влиять на процесс как в целом, так и на отдельные его элементы в зависимости от их отклонений от заданной величины. Разработка таких тренажеров очень удобна в использовании их для обучения пока еще не - опытного персонала.

В данном тренажере была разработана структура процесса выщелачивания урана. Она имеет две основных составляющих:

1. Математическую модель технологического процесса, построенную в математическом пакете (Matlab+Comsol)
2. Программу для визуального просмотра и воздействия на всю цепочку технологического процесса (WinCC).

Весь принцип работы данного тренажера заключается в том что имитируется процесс выщелачивания урана. Оператор может следить за ходом процесса через программную оболочку WinCC. В процессе обучения оператор может изменять в модели параметры процесса ПВ. Эти изменения воспринимаются в программе ученика, как воздействия. Воздействия, вызываемые преподавателем, могут быть разного характера. От случайного выхода из строя задвижки до снижения концентрации урана в выщелачивающем растворе. Здесь также предусмотрены аварийные ситуации. К примеру, полная остановка выкачивания в одной из скважин, отказ работы насоса при выкачке раствора из резервуара и т. д. Кроме этого, человек (оператор) может изменять параметры системы. Если падает концентрация

урана в растворе, он может снизить закачку раствора, и с таким же успехом задать расход на выходе.

Системная компоновка:

На рисунке 5.2 представлены два типа моделирования:

- Моделирование подземной фильтрации закона Дарси;
- Аппаратное моделирование системы управления.

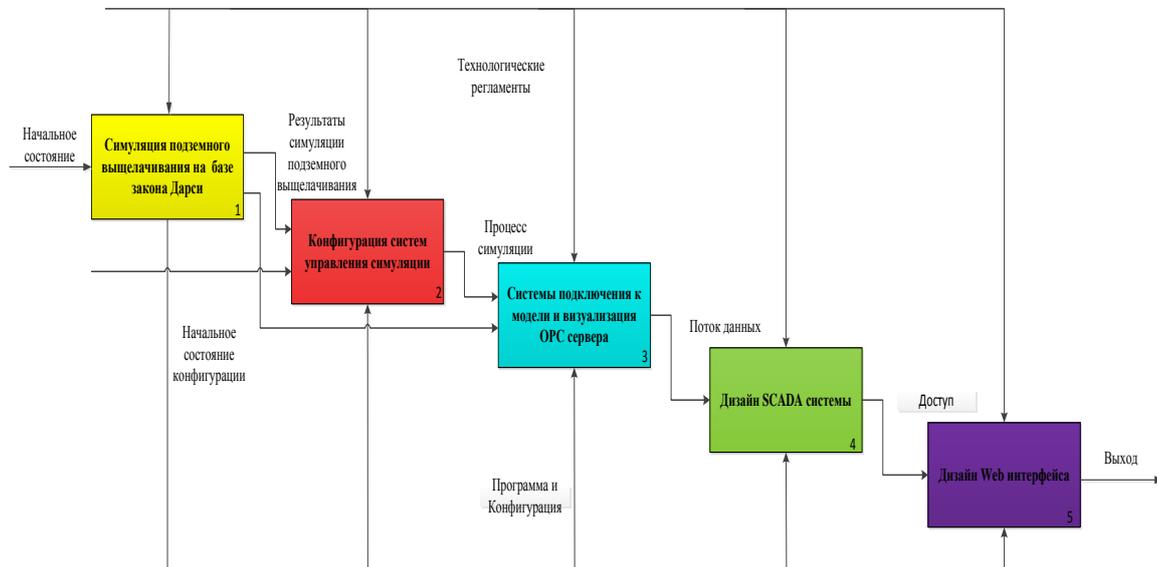


Рисунок 5.2 - Подсистемы виртуального обучения

Основные требования «Норм годности» к моделям объектов управления тренажером:

- построение модели должно базироваться на основе математического описания физических процессов, происходящих в реальном объекте, в виде систем дифференциальных, алгебраических и логических уравнений, определение параметров должно производиться на основе технологических характеристик оборудования и экспериментальных данных о работе объекта;
- допущения, принимаемые при построении моделей, должны обеспечивать воспроизведение качественно верной физической картины происходящих в объекте процессов, во всех воспроизводимых на тренажере режимах работы объекта;
- должна обеспечиваться необходимая полнота моделирования, определяемая конкретной стадией подготовки: должны моделироваться все необходимые для этой стадии режимы работы, контролируемые параметры и органы управления объекта моделирования при наличии требуемого набора воспроизводимых аварий и отказов в работе технологического оборудования и устройств автоматики;
- должна обеспечиваться достаточная точность модели, когда отклонение в поведении моделируемых параметров от поведения реальных параметров настолько мало, что практически не различается обучаемыми и допускается экспертами при приемке тренажера;

- должно обеспечиваться сохранение реального (а в ряде режимов – и ускоренного) масштаба времени при воспроизведении моделируемых процессов на ЭВМ тренажера;

- замедления быстропротекающих процессов.

В компьютерном тренажерном комплексе(КТК) реализованы:

- имитация рабочих мест оперативного персонала центрального пульта управления объекта;

- различные режимы функционирования КТК, а именно: режим консультации обучаемых с системой, режим приобретения знаний, режим взаимодействия с инструктором, режим проверки знаний обучаемых, режим создания тренировочных упражнений;

- динамические модели процессов выщелачивания, сорбций и десорбций, а также модели основных технологических узлов и агрегатов;

- различные режимы работы обучаемых: общий (все обучаемые работают с общей моделью), индивидуальный (каждый обучаемый работает со своей моделью), групповой (участники группы совместно работают с одной моделью);

- различные режимы работы технологического оборудования (подготовка технологического узла к пуску, пусковые операции, штатная работа, контроль и регулирование узла во время работы, останов, аварийные ситуации);

- различные режимы выполнения тренировочных упражнений (демонстрационный, тренировочный);

- система поддержки инструктора, включающая автоматизацию составления сценарных алгоритмов тренинга, задания внутренних и внешних возмущений, взаимодействие с одним или несколькими обучаемыми, контроль за правильностью выполнения заданий;

- изменение масштаба времени (реальное время, ускорение медленных).

Визуализация технологического процесса реализуется в SCADA - пакете WinCC. Математическая модель объекта управления решается в программном продукте Matlab. Связь математической модели и видеокадров технологического процесса организуется через OPC (рисунок-5.4).

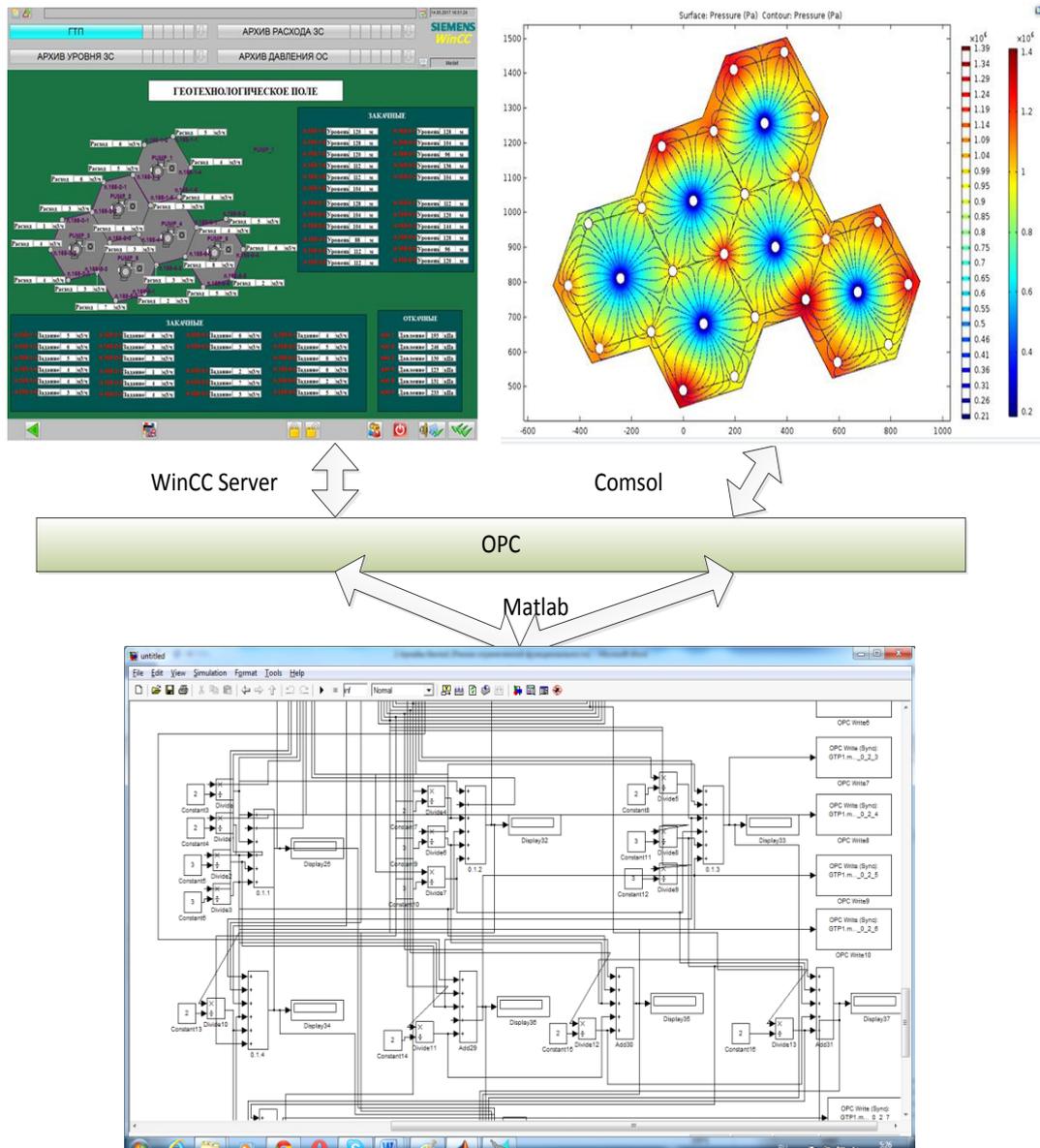


Рисунок-5.4 Связь математической модели и видеокладов технологического процесса

5.2 Разработка структуры комплекса технических систем для проведения промышленного эксперимента на руднике «Акдала»

Промышленный эксперимент выполнен в течение научно-исследовательской работы на тему «Разработка сетевых моделей синтеза системы оптимального управления подземной добычей урана», которая выполняла на основе Грантового финансирования научных исследований на 2013 – 2015 годы[71].

Цель исследования: апробация предложенных алгоритмов идентификации параметров процесса выщелачивания. В данном случае предполагается определение приемистости закачной скважины, напорно-расходных характеристик скважинного насоса Grundfos ($W=7,5$ кВт) откачной скважины, оценка гидросопротивления рудного тела. Также в этом разделе приведены

сведения о составе и структуре программного комплекса и описание технических решений по программному обеспечению подсистем автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУТП) эксперимента.

Проведены экспериментальные исследования в промышленных условиях, (рудник «Акдала»).

Структура микропроцессорных технических средств по управлению и сбору технологической информационной ячейки рудника Акдала представлена на рисунке 5.5.

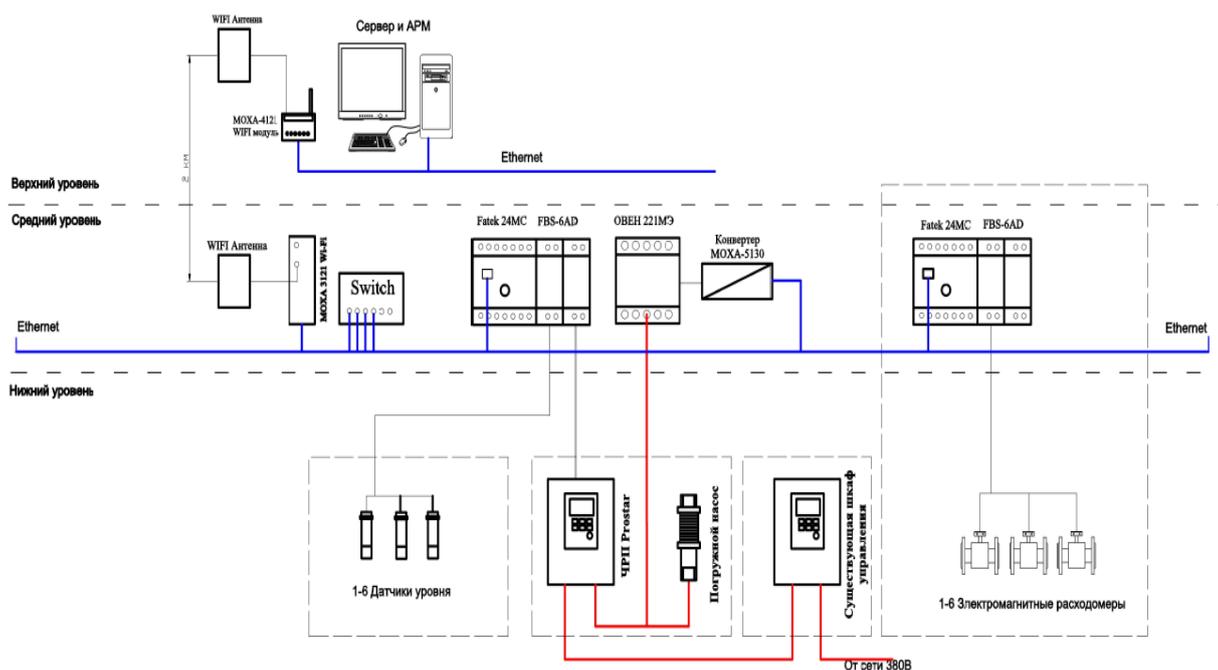


Рисунок 5.5 – Структура технических средств

Описание комплексно технических систем. АСУТП эксперимента представляет собой открытую, трехуровневую систему связанную локальными сетями.

Уровень АРМ состоит из:

- Сервера, который содержит компьютер и служит для архивирования данных;
- АРМ - оператора, который содержит ноутбука и служит для мониторинга и управления частотным преобразователем откачного глубинного насоса;
- модуля беспроводного сбора и передачи данных для связи с 2-ым уровнем.

Уровень оборудования сбора, обработки информации, формирования управляющих воздействий содержит.

- модуль беспроводного сбора и передачи данных;
- контроллер Fatek FBs-24MC;
- 14 - битный аналогово-цифровой преобразователь.

Связь контроллеров с автоматизированным рабочим местом (АРМ) оператора осуществляется беспроводной по сети Wi-Fi.

Уровень контрольно-измерительных приборов (КИП) и полевой автоматики:

- датчики гидростатического уровня закачных скважин;
- датчик давления откачной скважины;
- датчики расхода закачных и откачных скважин.

Состав и компоновка оборудования АСУТП. Состав АРМ оператора:

- сервер и АРМ оператора
- сетевое беспроводное Wi-Fi оборудование МОХА-4121

Состав и компоновка оборудования АСУТП 2-го уровня.

Оборудование АСУТП 2-го уровня для эксперимента скомпоновано в шкафу управления, который расположен на геотехнологическом поле.

В шкафу управления установлено следующее оборудование:

- Компьютер – сервер по месту, служит для архивирования данных;
- 1 контроллер Fatek 24МС;
- ОВЕН МЭ-221, модуль электрических параметров;
- Преобразователь интерфейса RS-485 - > Ethernet Моха5130;
- Сетевое беспроводное Wi-Fi оборудование МОХА-3121;
- Антенна для Wi-Fi оборудование МОХА-3121;

В втором шкафу контроллера установлено следующее оборудование:

- 1 контроллер FАТЕК-24-МС, содержащий:
- FАТЕК Memory Card, 3,3 В FLASH, 4 МБАЙТ;
- FBS-6AD, модуль аналоговых входов(6 входов);

В третьем шкафу контроллера установлено следующее оборудование:

- Частотный преобразователь PROSTAR 6000;
- Трансформатор тока.

В состав оборудования АСУТП 1-го уровня входит система управления насосом откачки ПР:

- датчик избыточного давления на откачной скважине 14-2-1 тип ПД-100/4-20мА (Овен, г. Москва);
- датчик расхода на откачной скважине 14-2-1;
- датчик гидростатического уровня на закачных скважинах 14-1-1, 14-1-2, 14-1-3 14-5-3, тип ДУ-160/4-20мА(до 200м).

Программное обеспечение АСУТП. Программное обеспечение (ПО) разработано на стадии внедрения проекта для реализации информационных и управляющих функций АСУТП в соответствии с требованиями для эксперимента.

При разработке ПО предусмотрено использовать следующие программные продукты:

- операционная система рабочей станции – Windows Server 2012;
- системное программное обеспечение основной рабочей станции WINCC версия 7.3(Siemens);

- прикладное программное обеспечение контроллеров - среда разработки Winproladder v.3.0;
- прикладное программное обеспечение для ОВЕН МЭ-221 OWEN Modbus OPC Сервер;
- программы математического моделирования Matlab 2014;
- программу для прогнозирования и определения застойных зон Comsol.

Программное обеспечение АСУТП предназначено для решения функциональных задач сбора, обработки, хранения и представления информации с участков.

В основу архитектуры программного комплекса принят модульный принцип построения с использованием базового программного обеспечения (WinCC с опциональными пакетами Server, MS SQL Server под управлением операционной системы Windows Server 2012) и прикладного программного обеспечения.

Для обеспечения взаимодействия компонентов в едином комплексе используется иерархическая структура с несколькими уровнями группирования и подчиненности модулей, каждый из которых имеет свою целевую задачу и специфический критерий качества, обеспечивающий эффективное функционирование программного комплекса в целом.

Структура АСУТП эксперимента построена с учетом существующей организационной структуры. Общая схема структуры имеет два уровня. На нижнем уровне данные с контроллеров собираются и передаются на верхний уровень управления. На верхнем уровне - данные собираются в единую систему сбора и обработки информации о текущем состоянии объектов автоматизации с централизацией функций контроля и диспетчерского управления технологическими процессами.

Для проведения экспериментальных исследований были разработаны технические средства по измерению уровня в закачных скважинах (рисунок 5.6). Подключен частотный преобразователь Prostar (рисунок 5.7) к скважинному насосу Grundfos.

Листинги программы контроллера промышленного эксперимента в Приложении В.



Рисунок 5.6 - Датчик уровня для закачной скважины



Рисунок 5.7 - ЧРП Prostar

Подключен датчик давления на выходе откачной скважины (рисунок 5.8).



Рисунок 5.8– Измерение давления на выходе откачной скважины

На рисунке 5.9 приведена реализация технических средств в виде шкафа управления.



Рисунок 5.9 – Шкаф управления, включающий контроллеры Fatek, ОВЕН МЭ110 и модули МОХА.

На рисунке 5.10 показана антенна WiFi для модуля MOXA.



Рисунок 5.10 – Антенна WiFi

Экспериментальными работами доказано, что изменение производительности скважин в нагнетательном ряду (метод треугольника) увеличивает содержание урана в продуктивных растворах на 11–20%, что сокращает время и повышает коэффициент извлечения при отработке эксплуатационных блоков (рисунок 5.11).

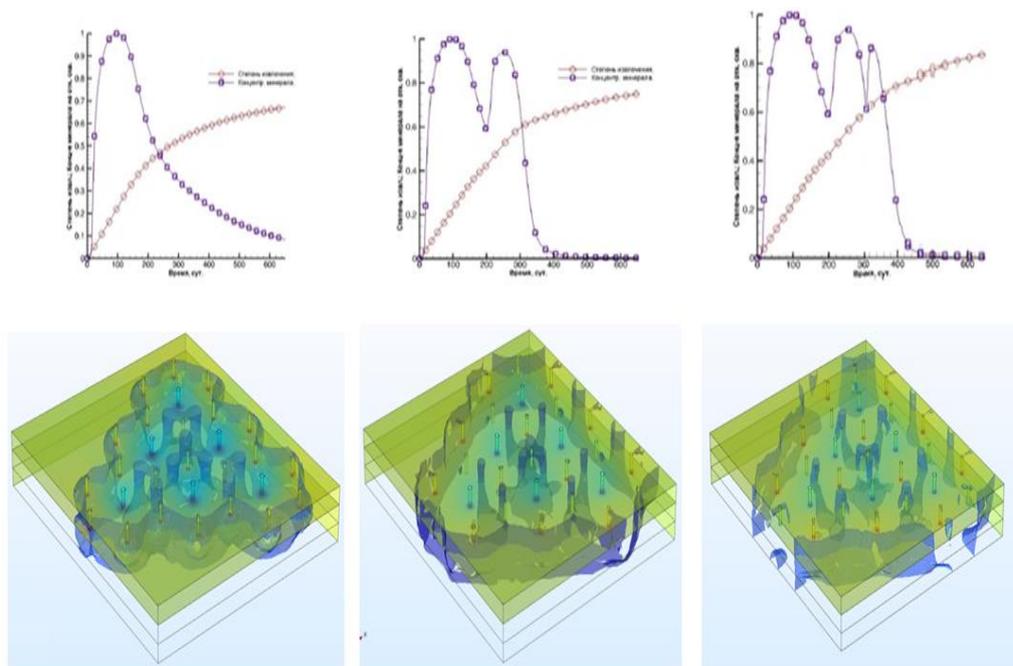


Рисунок 5.11 - Степень извлечения урана

Разработанная эффективная система управления оптимальной миграции краевых линий тока растворов, увеличить на 80% степень проработки

застойных зон и на 11 – 20 % повысить содержание урана в продуктивных растворах.

5.3 Выводы по разделу

В пятом разделе поставленные цели исследования были выполнены, а разработанные алгоритмы идентификации и управления проверены в промышленных условиях на руднике «Акдала». Результаты математических и численных моделей использовались при создании компьютерного тренажера для операторов. Проведен анализ экспериментально полученных данных, контролирующего процесс возникновения застойных зон. Промышленные испытания показали эффективность предложенных подходов к системе управления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе разработаны математические и численные модели гидродинамических процессов, протекающих в водоносном пласте, в 2D- и 3D - постановке.

Разработанные модели, описывающие процессы, протекающие в геотехнологическом поле при добыче минерала методом ПВ, позволили выбирать оптимальные режимы работы скважин для максимального извлечения минерала и проводить мониторинг и прогнозирование при эксплуатации месторождений.

На основе разработанной модели исследованы влияние уровня выщелачивающих растворов в закачных скважинах на степень извлечения минерала, определены оптимальные перепады давления на рудном теле и распределения выщелачивающего раствора по скважинам, а также проведено исследование по интенсификации процесса ПВ гидродинамическими способами.

По результатам выполненной работы можно сделать следующие основные выводы:

- разработана трехуровневая система управления для оптимального распределения выщелачивающих растворов и синтез систем управления методом эффективного извлечения;
- разработаны методы оценок фильтрующих свойств рудного тела (задача параметрической идентификации) процесса подземного выщелачивания;
- проведена серия численных расчетов. Показано, что разработанная модель ПВ качественно учитывает все основные закономерности процесса и позволяет детально изучить и понять их динамику. Разобраны практически важные с точки зрения автора случаи неоднородности поля проницаемости среды и поля концентраций урана в насыщенном растворе;
- разработана структура системы автоматизированного управления с моделью объекта в контуре управления. Подготовлены схемы подключения, программные средства к проведению промышленных испытаний, предложенных алгоритмов идентификации;
- построены численные модели подземного выщелачивания для определения застоин в среде Comsol Multiphysics;
- предложены режимы работы (стационарный и нестационарный) для повышения эффективности процесса подземного выщелачивания на уровне геотехнологического поля;
- обработаны и проанализированы полученные результаты в промышленных испытаний алгоритмов идентификации и управления для корректировки алгоритмического и программного обеспечения систем.
- Получен акт передачи алгоритмов идентификации и управления процессом подземного выщелачивания.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Каракоцкая И.А. Математическая модель отработки месторождения способом скважинного подземного выщелачивания: дис. ... канд. физ. мат. наук: - Екатеринбург: Уральский государственный университет, 2006. – 143 с.
- 2 Аликулов Ш.Ш. Совершенствование гидродинамического режима подземного выщелачивания урана с учетом коагуляции руд: автореф. ... канд. тех. наук. – М., 2011. – 87 с.
- 3 Грабовников В.А. Геотехнологические исследования при разведке металлов. – М.: Недра, 1995. – 154 с.
- 4 Добыча урана методом подземного выщелачивания / под ред. Мамилова В.А. – М.: Атомиздат, 1980. – 248 с.
- 5 Канцель А.А. Математическое моделирование динамики процесса подземного выщелачивания в неоднородном рудоносном слое: автореф. ... канд. физ. мат. наук. – М.: МГУ, 2010. – 26 с.
- 6 <http://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/kazakhstan.aspx>
- 7 Абдульманов И.Г., Мосев А.Ф., Пименов М.К., Савинова Н.К., Фазлуллин М.И. Комплексы подземного выщелачивания. – М.: Недра, 1992. – 263 с.
- 8 Инструкция по подземному выщелачиванию урана. – Алматы: Казатомпром, 2006. – 222 с.
- 9 Бугенов Е.С., Василевский О.В. Физико-химические основы и технология получения химических концентратов природного урана. – Алматы, 2005. – 523 с.
- 10 Дмитриев В.И., Канцель А.А., Куркина Е.С. Математическое моделирование процессов растворения и отложения при фильтрации растворов в пористой среде // Вестник МГУ-М. – 2009. - № 1. – С. 31-42.
- 11 Голубев В.С., Кричевец Г.Н. Динамика геотехнологических процессов. – М.: Недра, 1989. – 120 с.
- 12 Интыкбаев А.М, Алыбаев Ж.А. Основы подземного выщелачивания урана и примеры решения задач: учебное пособие. – Алматы: КазНТУ, 2011. – 83 с.
- 13 Бугенов Е.С., Джусипбеков У.Ж. Теоретические основы химической технологии: учебник для химико-технологических специальностей вузов. – Алматы: КазНТУ, 2003. – 242 с.
- 14 Зобнин Б.Б., Каракоцкая И.А. Вероятностная модель функционирования технологического комплекса скважинного подземного выщелачивания // Электронный журнал "Исследовано в России". – 2006. С. 2068-2075.
- 15 Справочник по геотехнологии урана. – М.: Энергоатомиздат, 1997. – 258 с.

16 Толстов Е.А. Физико-химические геотехнологии освоения месторождений урана и золота в Кызылкумском регионе. – М.: Изд. Московского государственного университета, 1999. – 277 с.

17 Бугенов Е.С., Бугенов Б.Е., Ибраимова Г.Т. Опытнo-полупромышленные испытания выщелачивания антимоната натрия в сульфидно-щелочных растворах // Труды Международного форума «Инженерное образование и наука в XXI веке: проблемы и перспективы», посвященного 80-летию КазНТУ имени К.И. Сатпаева. – Алматы, 2014.- Т.1.- С. 158-163.

18 Данаев Н.Т., Корсаков Н.К., Пенькеовский В.И. Массоперенос в прискважинной зоне и электромагнитный каротаж пластов. – Алматы: Қазақ университеті, 2005. – 180 с.

19 Manual of acid in situ leach uranium mining technology. – Vienna: IAEA, 2001. – P. 105-122.

20 Подземное выщелачивание полиэлементных руд / под ред. Н.П.Лаверова. – М.: Изд. Академии горных наук, 1998. – 446 с.

21 Бровин К.Г., Грабовников В.А., Шумилин М.В., Язиков В.Г. Прогноз, поиски, разведка и промышленная оценка месторождений урана для отработки подземным выщелачиванием. – Алматы: Гылым, 1997. – 384 с.

22 Калабин, А.И. Добыча полезных ископаемых подземным выщелачиванием и другими геотехнологическими методами. – М.: Атомиздат, 1981. – 304 с.

23 Каневский Е.А. Физико-химические основы выщелачивания урана из руд: дис. ... канд. хим. наук. – М., 1964.

24 Омирбекова Ж.Ж. Исследование и разработка систем управления с распределенными параметрами: дис. ... док. фил. (PhD). – А.: КазНТУ, 2014.

25 Алибаева К.А. Численное исследование путей повышения выработки месторождения при добыче минералов методом подземного выщелачивания: дис. ... док. фил. (PhD). – Алматы: КазНУ, 2013.

26 Абуов А.А. Разработка и исследование автоматизированных систем идентификации основных параметров процесса подземного выщелачивания: дис. – Алматы: АУЭС, 2015.

27 Совершенствование технологии подземного выщелачивания урана из слабопроницаемых руд // X Международная конференция «Новые идеи в науках о земле».-2005.-Т.2.-188с.

28 Интенсификация гидродинамических параметров подземного выщелачивания урана // X Международная конференция «Новые идеи в науках о земле». – М., 2011. – Т.2. – 187с.

29 Линцер Л.А., Грачев А.Н., и Рыков В.Е., Имитационное моделирование в геофильтрационных исследованиях // Сборник докладов серии "N" Химические методы добычи и переработки, международный симпозиум "Горницкий Пшибрам". – Пшибрам: ЧСФР, 1990.

30 Линцер Л.А., Грачев А.Н., и Рыков В.Е. Моделирование геологической среды - основа моделирования процесса подземного

выщелачивания // Сборник докладов серии "К" Химические методы добычи и переработки, международный симпозиум "Горницкий Пшибрам". – Пшибрам: ЧСФР, 1990.

31 Басов В.С. Пути оптимизации сернокислого процесса СПВ урана применительно к рудам Хиагдинского месторождения. – М.: МГГРУ, 2004.

32 Басов Я.С. Основные положения физико-математической модели сернокислотного скважинного подземного выщелачивания. – М.: МГГРУ, 2005.

33 Басов В.С. Прогнозирование сроков отработки руд и изучение влияния кислотности выщелачивающих растворов на процесс СПВ методами физико-математического моделирования // Известия ВУЗов. – 2005.

34 Басов Я.С. Выбор оптимальной схемы вскрытия гидрогенного месторождения геотехнологическими скважинами методами физико-математического моделирования // Горный журнал. – 2005.

35 Басов В.С. Повышение эффективности процессов скважинного подземного выщелачивания урана в условиях освоения сложных гидрогенных месторождений России: дис. ... канд. тех. наук. – Московский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе (МГГРУ) и ФГУП "Всероссийский научно-исследовательский институт химической технологии" (ВНИИХТ), 2005.

36 Каракоцкая И.А. Математическая модель отработки месторождения способом скважинного подземного выщелачивания: дис. ... канд. физ. мат. наук. – ГОУ ВПО "Уральский государственный горный университет", 2006.

37 Bommer P.M., Schechter R.S. Mathematical modeling of in-situ uranium leaching. – Society of Petroleum Engineers Journal. – 1979. - №19. – P. 34-45.

38 Schechter S.P., Bommer M. Optimization of uranium leach mining. - Society of Petroleum Engineers Journal. – 1982. - № 22. – P. 133-141.

39 Kabir M.I., Lake L.W., Schechter R.S. Evaluation of one-well uranium leaching test restoration. – Society of Petroleum Engineers Journal. – 1982. - № 22. – P. 43-56.

40 Walsh M.P., Schechter R.S., Humenick M.J., Hill A.D., Silberberg I.H. A Model For Predicting The Restoration Of And Ammonium Migration From In Situ Mine Sites. – AIME South Texas Uranium Seminar - Corpus Christi. – Texas, 1978. – P. 248-312.

41 Schmidt D., Follin S.E., Peterson K.A., Level E.V. Geochemical kinetics model for in-situ leach mining. – SPE Journal. - 1981. - № 198.- P.132-141.

42 Kurth D. J., Schmidt R. D. Computer modeling of five-spot well pattern fluid flow during in situ uranium leaching. - Washington: US Bureau of Mines, 1978. – P. 33 – 46.

43 Kurth D.J., Schmidt R.D. Computer modeling of fluid flow during production and environmental restoration phases of in situ uranium leaching. - Washington: US Bureau of Mines, 1978. – 64 p.

44 Рогов Е.И., Язиков В.Г., Рогов А.Е. Гидродинамическая модель подземного выщелачивания урана // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – М., 2000. - №5. – С. 40 – 42.

- 45 Arriaga M.C. Introduction to the Numerical Modeling of Groundwater and Geothermal Systems.-Mexico, 2010. – P. 217 – 284.
- 46 Повелицын В.М. Моделирование процесса подземного выщелачивания урановых месторождений. – М.: Атоимздат, 2007. – С. 10-11.
- 47 Mukhanov B.K., Omirbekova Zh.Zh., Usenov K.A., Wójcik W. Simulating In-situ Leaching Process Using COMSOL Multiphysics // INTL International Journal of Electronics and Telecommunications. – 2014. – Vol. 60, № 3. – P. 213-217.
- 48 Mukhanov B.K., Usenov A.K., Omirbekova Zh.Zh. Process of in-situ leaching modeling in a Comsol Multiphysics environment // The 2nd International Virtual Conference on Advanced Scientific Results (SCIECONF-2014). – Slovakia: held in Zilina, 2014. – P. 499 – 503.
- 49 Белоцерковская М. С., Численное моделирование процессов фильтрации с использованием метода вложенных сеток: дис. ... канд. физ. мат. наук. – МГУ им. М. В. Ломоносова, факультет ВМиК, 2007.
- 50 И. В. Капырин, Трехмерное моделирование процессов переноса примесей в пористых средах сложной структуры: дис. ... канд. физ. мат. наук. – Институт математического моделирования РАН, 2007.
- 51 <http://www.comsol.com/support/knowledgebase/1077/>
- 52 Bundschuh J., Arriaga M.C. Introduction to the Numerical Modeling of Groundwater and Geothermal Systems. – Mexico, 2010. – P. 217-284.
- 53 Mukhanov B., Omirbekova Zh., Alimanova M., Jumadilova S., Kozhamzharova D., Baimuratov O. A model of virtual training application for simulation of technological processes. Procedia Computer Science. – 2015.- Vol. 56. - P. 177-182.
- 54 Ведерников В.А., Лысова О.А. Синтез замкнутой оптимальной системы управления электродвигателем погружной центробежной установки // Изв. вузов. Нефть и газ. – 2002. – №2. – С. 10- 17.
- 55 Ведерников В.А., Соловьев И.Г. Разработка и использование гидродинамических моделей скважин, оборудованных УЭЦН // Вест. кибернетики. – 2002. – Вып.1. – С. 85- 91.
- 56 Муханов Б. К., Омирбекова Ж. Ж., Оракбаев Е. Ж. Исследование и разработка системы оптимального управления процессом подземного выщелачивания // Вестник Национальной Академии Наук Республики Казахстан. – 2016. - №5. - С. 178-185.
- 57 Mukhanov B. K., Wójcik W., Omirbekova Zh. Zh., Orakbayev Y.Zh. Study of in-situ leaching of metals by numerical simulation // Известия национальной академии наук республики Казахстан. – Алматы, 2017. - №1. - С. 205-216.
- 58 Mukhanov B. K., Wójcik W., Omirbekova Zh. Zh., Orakbayev Y.Zh. Исследование процесса подземного выщелачивания металлов с помощью численного моделирования // Известия национальной академии наук Республики Казахстан. – Алматы, 2017. - №1. – С. 157-166.

59 Mukhanov B. K., Wójcik W., Omirbekova Zh. Zh., Orakbayev Y.Zh. Application of virtual training model for technological processes // *Przegląd Elektrotechniczny*. -2017. - №5. - С. 129-133

60 Mukhanov B. K., Omirbekova Zh. Zh., Orakbayev Y.Zh. Process of in-situ leaching modeling in a Comsol Multiphysics environment // *Lubelskie Dni Nauki i Biznesu. Pod patronatem honorowym Polskiego stowarzyszenia tomografii procesowej I Komitetu elektrotechniki polskiej akademii nauk. Warsztaty doktoranckie. WD2016. Science conference.* – Lublin, 2016. - P. 142-145.

61 Сулейменов Б.А., Омирбекова Ж.Ж., Онбаев А.Б., Оракбаев Е.Ж. Разработка системы управления процессом подземного выщелачивания урана, «Роль и место молодых ученых в реализации новой экономической политики Казахстана» // *Международных Сатпаевских Чтений.* – Алматы, 2015. – 4.-с.120-125.

62 Mukhanov B.K., Omirbekova Zh.Zh., Kangtarbay M.B., Orakbayev Y.Zh. Modeling process of in-situ leaching of various regimes // *The 15th International Scientific Conference Information Technologies and Management.* - Riga, 2017.- P. 65-69.

63 Муханов Б.К., Омирбекова Ж.Ж., Туленбаева А.Е., Оракбаев Е.Ж. Исследование застойных зон при подземном выщелачивании в среде Comsol Multiphysics // *Международная научно-практическая конференция «Математические методы и информационные технологии макроэкономического анализа и экономической политики» (к 80-летию академика А. Ашимова).*- Алматы,2016. С.180-190.

64 Муханов Б.К., Омирбекова Ж.Ж., Онбаев А.Б., Билялова Ж.Б., Наби Е.М. Об использовании датчика уровня в закачных скважинах подземного выщелачивания // *Инженерно-технический журнал «Вестник Автоматизации».* – 2016. - №4(54). – С. 35-36.

65 Uranium 2007.: Resources, Production and Demand//*Joint report by OECD NEA.* – 2008. - № 6345. - 420 с.

66 Lisunets N.L., Smirnov O.M., Tsepin M.A. Simulation of the processes of aluminum alloys preforms and semi-finished products manufacture under influence of technological heredity and phase transitions// *Physical and Numerical Simulation of Materials Processing.* – 2008. - Vol. 575-578. - P. 1134-1138.

67 Kim Y.S, Kim H.M. Design of a New Virtual Interaction Based PLC Training Using Virtual Sensors and Actuators: System and Its Application// *International Journal of Distributed Sensor Networks.* - 2013. - Vol. 4.

68 Mashkov V., Smolarz A., Lytvynenko V. Development Issues In Algorithms For System Level Self-Diagnosis // *Informatyka, Automatyka, Pomiar w Gospodarce i Ochronie Środowiska.* - 2016. - Vol. 6, № 1. - P. 26-28.

69 Joung-souk S., Doo-hun L. Adaptive Tutoring and Training System Based on Intelligent Agent // *International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering.* - 2006. - Vol. 1, № 3. - P. 6-11.

70 Dongfeng SH., Fugee T. Modelling and diagnosis of feedback-controlled processes using dynamic PCA and neural networks. - INT. J. PROD. RES. – 2003. - Vol. 41, № 2. - P. 365-379.

71 Разработка сетевых моделей синтеза системы оптимального управления подземной добычи урана: отчет по НИР, № ГР 0113РК00566, 2013-2015.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Видеокадры SCADA системы

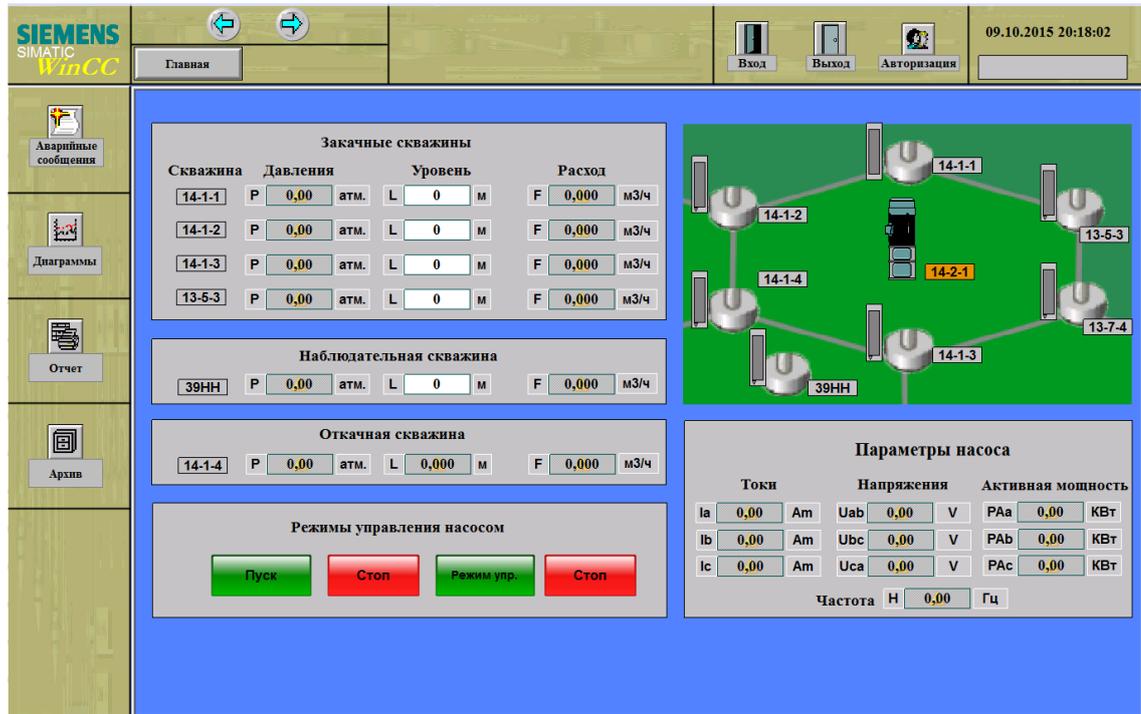


Рисунок А1 - Экран для одной ячейки

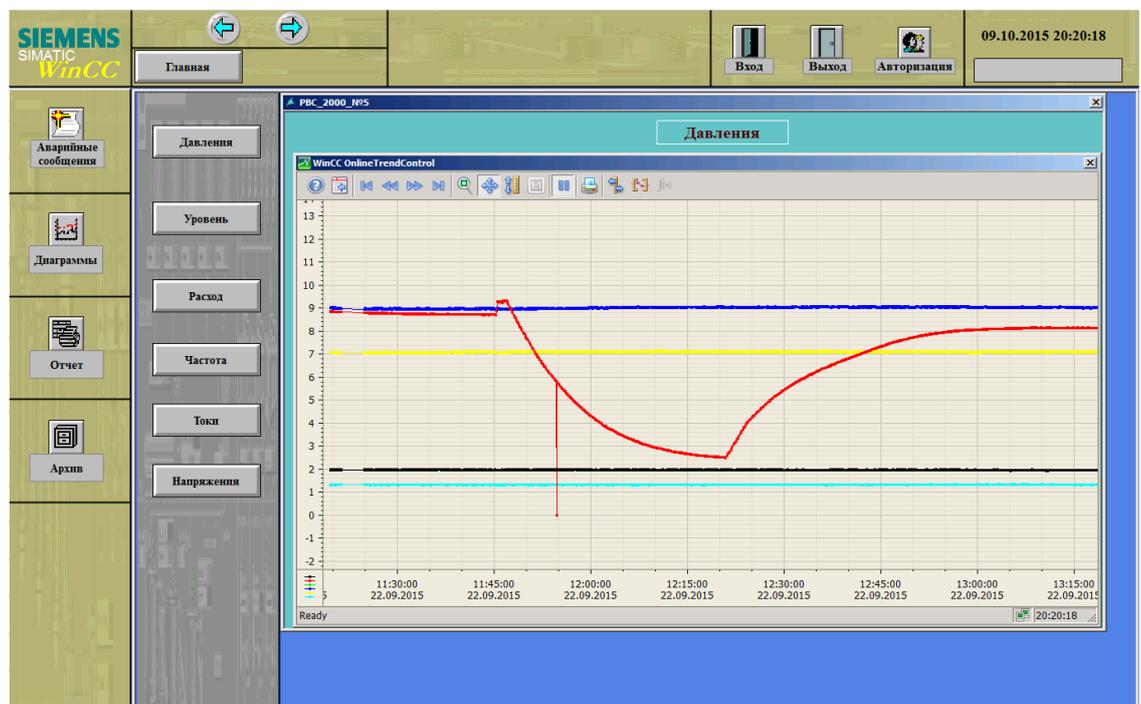
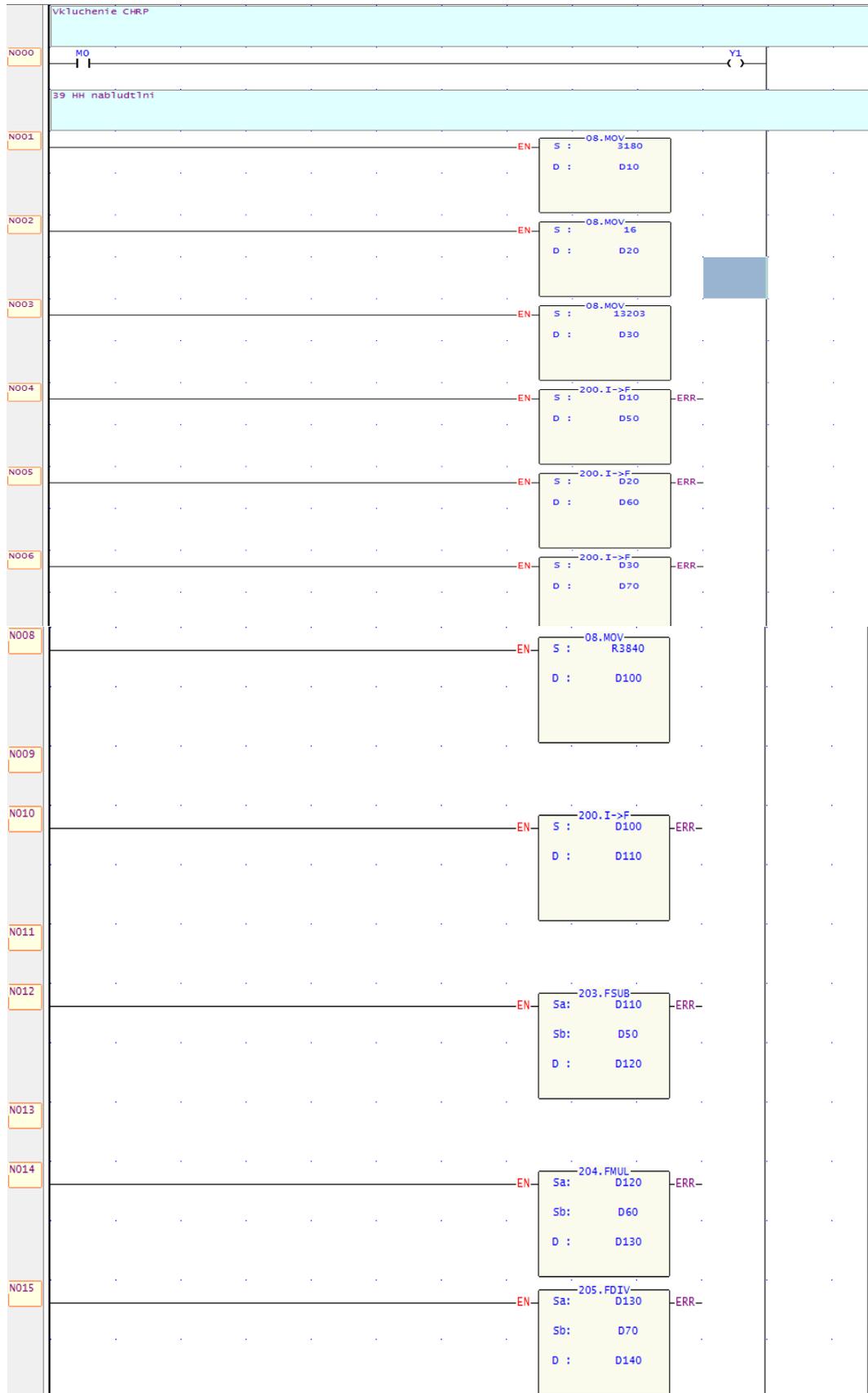
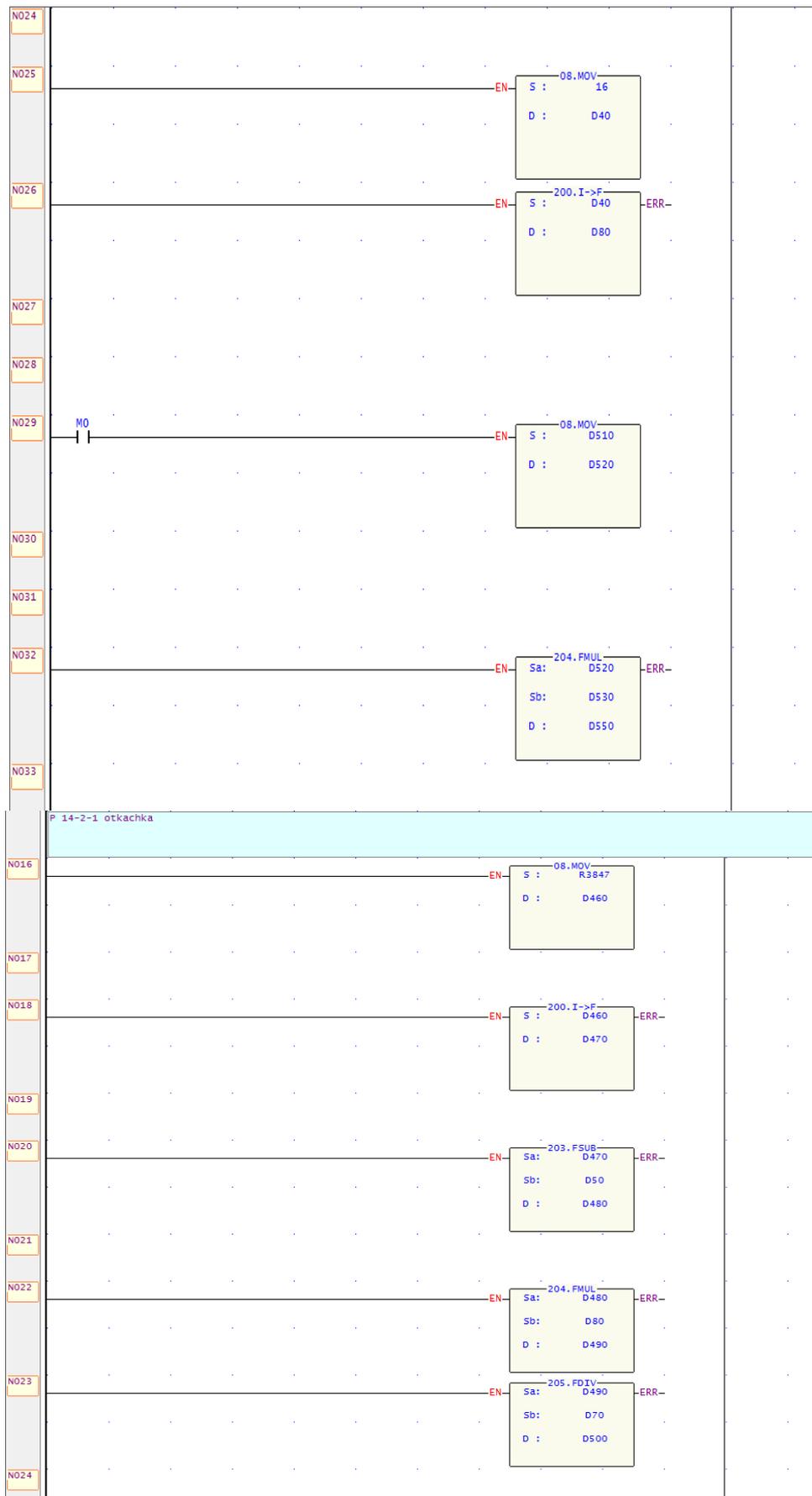


Рисунок А2 - График снижения уровня выщелачивающих растворов в зачатной скважине и ее заполнения при увеличении расхода

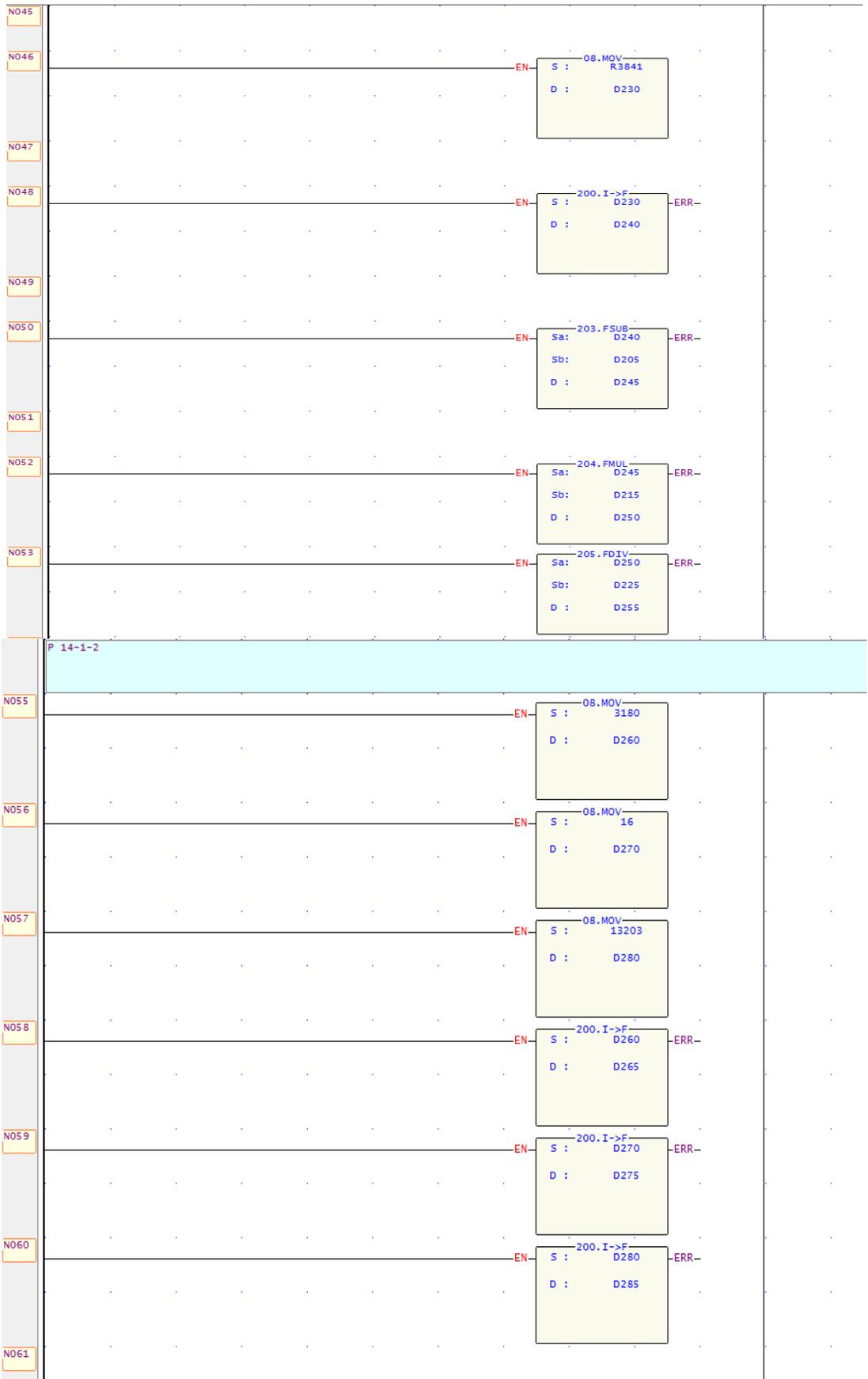
ПРИЛОЖЕНИЕ Б

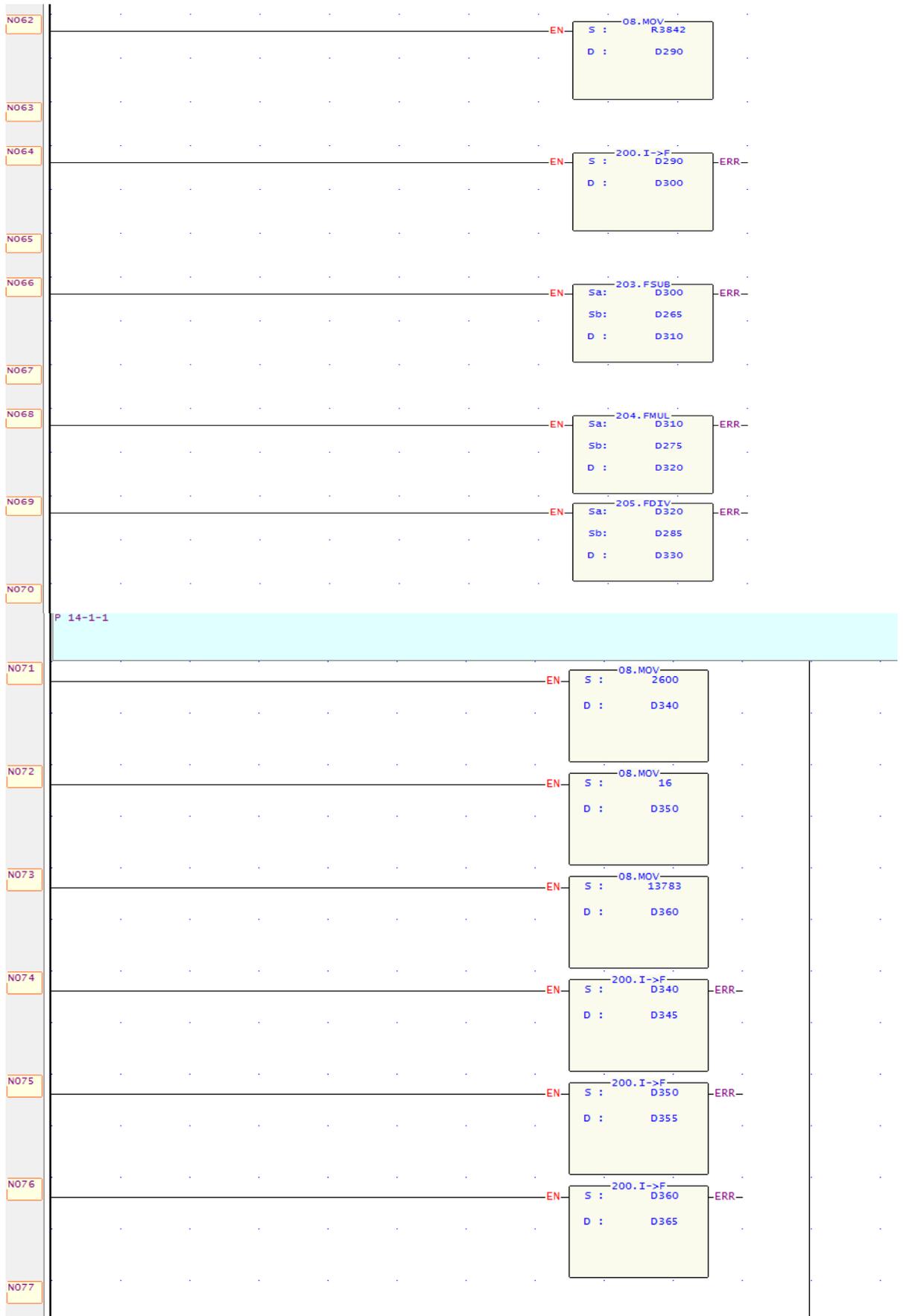
Листинг программы управления в промышленном контроллере

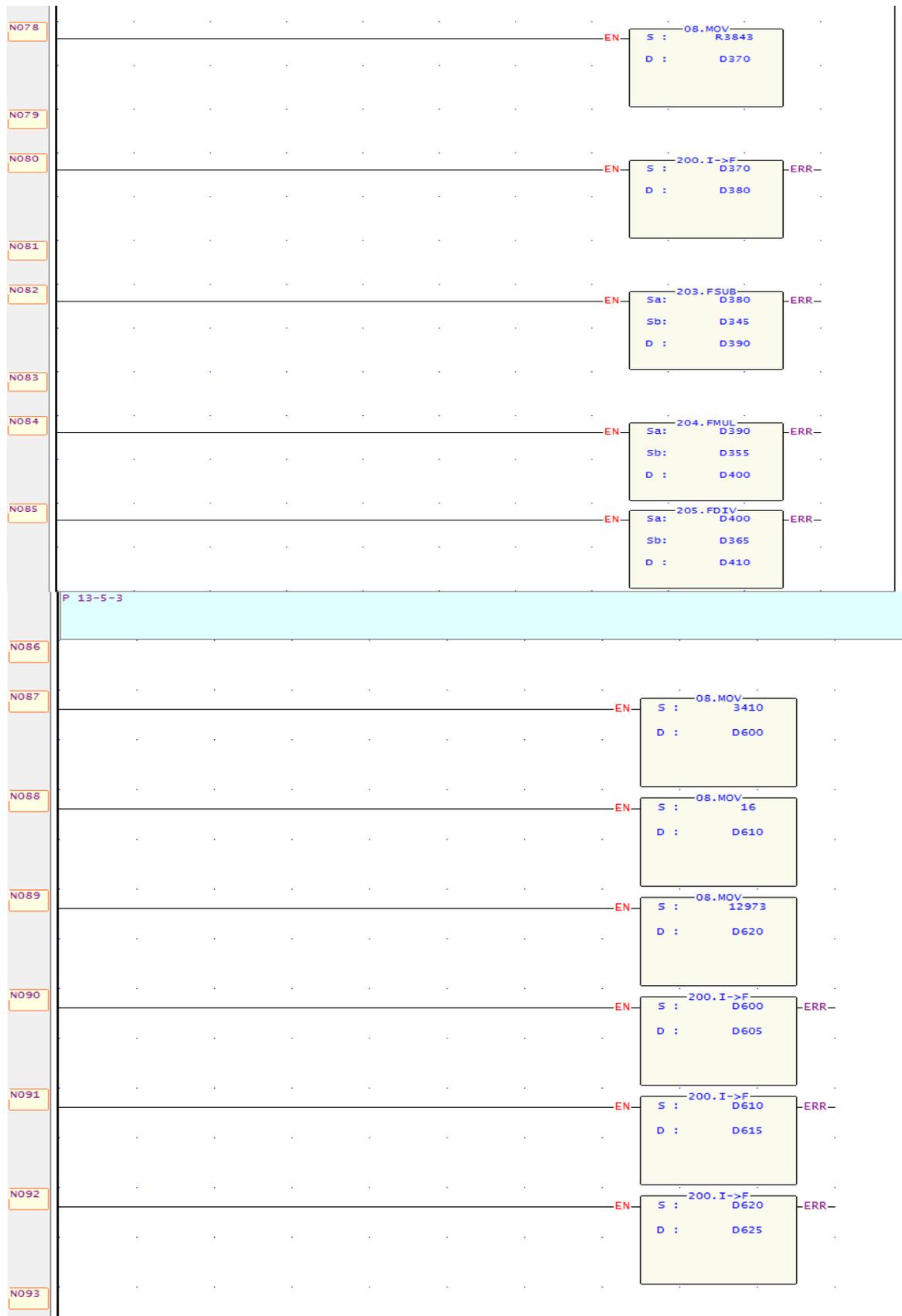


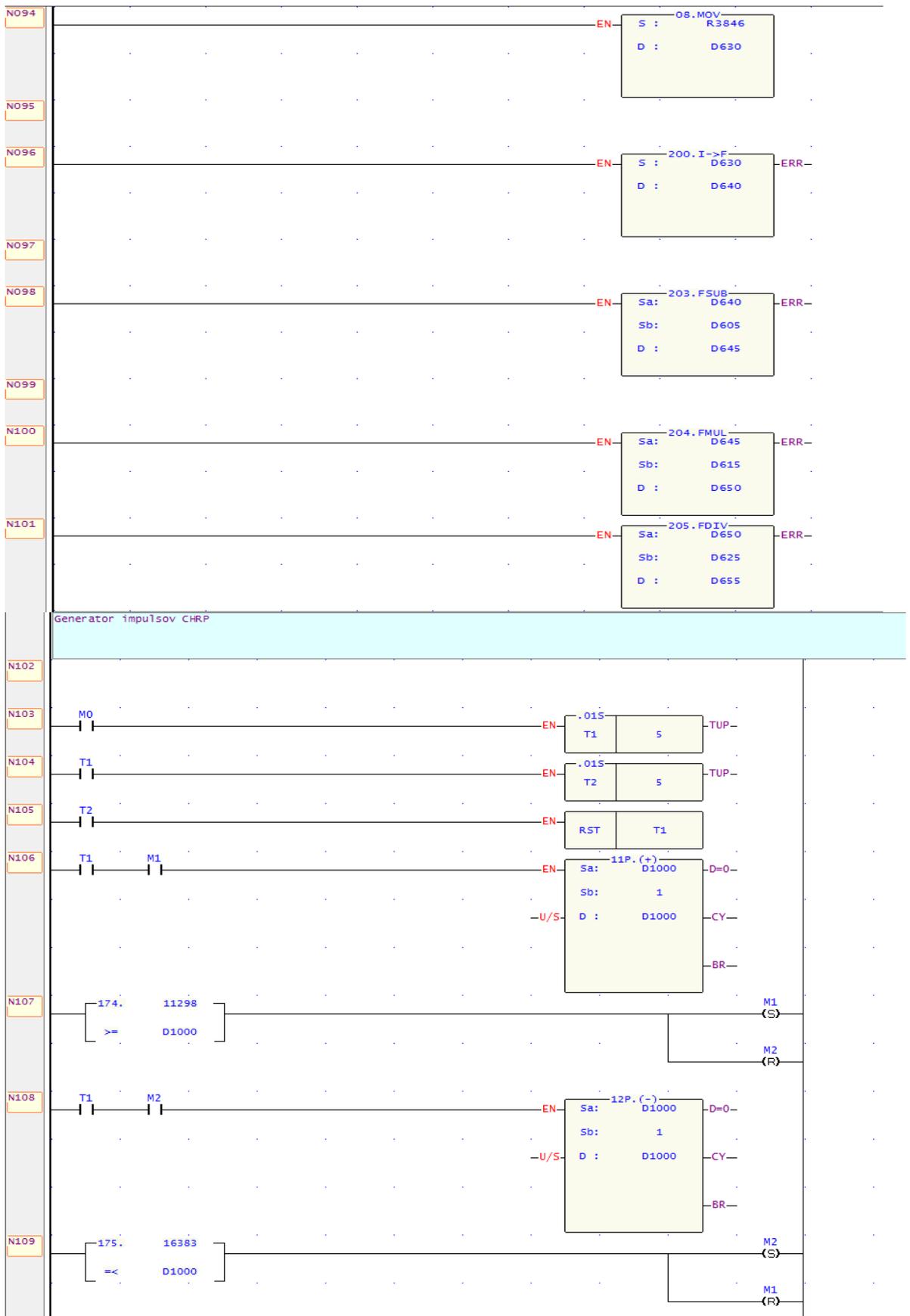


N033			
CHRP zadat chastatu			
N034		EN	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content;"> <p style="text-align: center;">200.I->F</p> <p>S : 32300</p> <p>D : D530</p> </div>
N035		EN	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content;"> <p style="text-align: center;">200.I->F</p> <p>S : 100</p> <p>D : D540</p> </div>
N036		EN	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content;"> <p style="text-align: center;">205.FDIV</p> <p>Sa: D550</p> <p>Sb: D540</p> <p>D : D560</p> </div>
N037		EN	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content;"> <p style="text-align: center;">201.F->I</p> <p>S : D560</p> <p>D : D570</p> </div>
N038		EN	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content;"> <p style="text-align: center;">08.MOV</p> <p>S : D570</p> <p>D : R3904</p> </div>
P 14-1-3			
N039		EN	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content;"> <p style="text-align: center;">08.MOV</p> <p>S : 3340</p> <p>D : D200</p> </div>
N040		EN	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content;"> <p style="text-align: center;">08.MOV</p> <p>S : 25</p> <p>D : D210</p> </div>
N041		EN	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content;"> <p style="text-align: center;">08.MOV</p> <p>S : 13043</p> <p>D : D220</p> </div>
N042		EN	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content;"> <p style="text-align: center;">200.I->F</p> <p>S : D200</p> <p>D : D205</p> </div>
N043		EN	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content;"> <p style="text-align: center;">200.I->F</p> <p>S : D210</p> <p>D : D215</p> </div>
N044		EN	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content;"> <p style="text-align: center;">200.I->F</p> <p>S : D220</p> <p>D : D225</p> </div>
N045			









ПРИЛОЖЕНИЕ В

Копии документов, подтверждающих участие докторанта в НИР

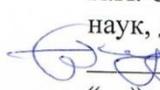
Министерство образования и науки Республики Казахстан

КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени К.И.САТПАЕВА
(КазНТУ)

УДК 681.513.5:622.349.5
ГРНТИ 28.19.31
№ госрегистрации 0113РК00566
Инв. 0214РК01882



УТВЕРЖДАЮ
Проректор по научной
и инновационной
деятельности КазНТУ имени
К.И. Сатпаева канд. техн.
наук, доцент


Е. Кузьмеев
«__» _____ 2014

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

по теме:
РАЗРАБОТКА СЕТЕВЫХ МОДЕЛЕЙ СИНТЕЗА СИСТЕМЫ
ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПОДЗЕМНОЙ ДОБЫЧЕЙ УРАНА

(промежуточный)
0819/ГФЗ

Подпрограмма 101 «Грантовое финансирование научных исследований на
2013-2015 гг.»

Приоритет: «Информационные и телекоммуникационные технологии»

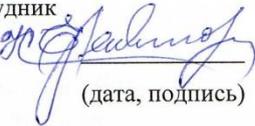
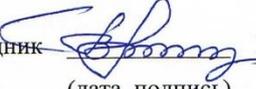
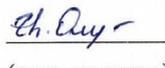
Научный руководитель проекта
канд. тех наук, доцент



Б. Муханов

Алматы 2014

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

- Научный руководитель
доцент, канд. техн. наук  Б.К. Муханов (общее руководство)
(дата, подпись)
- Главный научный сотрудник
д-р техн. наук,  Б.А. Сулейменов (разделы 1,2)
(дата, подпись)
- Ведущий научный сотрудник
канд. техн. наук  Еренчинов К.К. (раздел 4)
(дата, подпись)
- Ведущий научный сотрудник  Погребняк В.В. (разделы 1,3)
(дата, подпись)
- Научный сотрудник  Шаров А.З. (раздел 5)
(дата, подпись)
- Научный сотрудник
магистр  Адилова Ш.К. (раздел 4)
(дата, подпись)
- Младший научный сотрудник
магистр  Омирбекова Ж.Ж. (раздел 3)
(дата, подпись)
- Младший научный сотрудник
магистр  Оракбаев Е.Ж. (раздел 3)
(дата, подпись)
- Нормоконтроллер  Г.А. Бейсебекова
(дата, подпись)

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Акт передачи алгоритмов идентификации и систем управления процессом подземного выщелачивания



Жауапкершілігі шектеулі серіктестігі
Товарищество с ограниченной ответственностью
БИН 050 440 006 061

УТВЕРЖДАЮ
Зам. Директор по автоматизации
Андахов Б.К.
« » 2016 г.



Акт Передачи алгоритмов идентификации и систем управления процессом подземного выщелачивания

Мы нижеподписавшиеся, составили настоящий акт о том, что разработанные алгоритмы идентификации гидродинамических параметров и иерархическая система управления процесса подземного выщелачивания, прошли испытания и показали удовлетворительные для практического применения результаты.

Настоящие алгоритмы переданы в ТОО «Verbulak», для использования их в разработке информационного, и математического и алгоритмического обеспечения АСУТП ГРК.

От КазННТУ имени К.И. Сатпаева
Зав кафедрой
Автоматизации и управления,
докт. техн. наук,
« » Б. А. Сулейменов
« » 2016 г.

От ТОО «Verbulak»
Руководитель проекта,
« » А. И. Прокофьев
« » 2016 г.

Профессор кафедры
Автоматизации и управления,
канд. техн. наук,
« » Б. К. Муханов
« » 2016 г.

Исполнитель проекта,
« » А. З. Шаров
« » 2016 г.

Докторант PhD
Автоматизация и управления,
« » Е. Ж. Оракбаев
« » 2016 г.



Intertek

QMS is certified to ISO 9001:2008

EMS is certified to ISO 14001:2004

OHSMS is certified to OHSAS 18001:2007

Хат-хабарга:

050046, ҚР, Алматы қаласы,
Сәтбаев көшесі, 90, оф. 335
Тел. (727) 385-82-09
E-mail: info@verbulak.com
www.verbulak.com

Для корреспонденции:

050046, РК, г. Алматы,
ул. Сатпаева, 90, оф. 335
Тел. (727) 385-82-09
E-mail: info@verbulak.com
www.verbulak.com

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

СПРАВКА о выполнении научно-экспериментальных работ



LUBLIN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
Faculty of Electrical Engineering & Computer Science
Institute of Electronics and Information Technology

ul. Nadbystrzycka 38A, 20-618 Lublin, Poland; tel.: +48 81 538 43 09; fax: +48 81 538 43 12; e-mail: ieti@pollub.pl; http://ieti.pollub.pl



СПРАВКА

о выполнении научно-экспериментальных работ диссертационного исследования
докторанта 2-го года обучения ИИТТ НАО КазННТУ им. К.И. Сатпаева
специальности 6D070200 – Автоматизация и управление
Оракбаева Ербола Жумагельдиевича
по теме «Исследование и разработка эффективных систем управления процессом подземного выщелачивания»

Данная справка подтверждает, что в период прохождения 2 научной стажировки с 07.06.2016 г. по 08.07.2016г. в Люблинском политехническом университете, г. Люблин (Польша) докторантом Оракбаева Е.Ж. проведены следующие научно-экспериментальные работы диссертационного исследования:

1. Разработана математическая модель процессов подземного выщелачивания, в виде модели фильтрации в режиме напорной фильтрации (основной режим) и в режиме насыщения в среде COMSOL. Полученная модель, связана с топологией трубопроводов и проведен моделирующий эксперимент для выяснения влияния изменения уровня насыщения пласта на характер изменения корреляционных функции, отражающих взаимовлияние между переменными топологической сети. Для получения взаимно корреляционных кривых (функции) необходимо в сети организовать возмущающие воздействия (аналог гидропрослушивания при проведении ГДИС).

2. Определены основные методы моделирования: закон Дарси (dl), использован для определения гидравлического напора во времени и пространства, метод произвольного Лагранжевой-Эйлера (ale) для того чтобы вычислить изменение потока подземных жидкостей.

3. Разработана методика определения гидродинамических характеристик скважин и пластов которое необходима проводить специальные исследования скважин с применением глубинных приборов. Продолжены исследования процессов фильтрации с помощью программного комплекса Comsol, с целью получения расходных характеристик ПВ при различных режимах фильтрации.

4. Разработаны алгоритмы идентификации основных параметров процесса подземного выщелачивания, используя топологическую связность технологических систем трубопроводов объекта, и на этой основе построить эффективную систему управления. При решении поставленных задач использовались методы: математического моделирования, идентификации связанных объектов, построения эффективных САУ.

5. Проведены оценки параметры потока подземных жидкостей с помощью сравнения численных результатов с данными измерения эксперимента. Предложены для оценки параметров ПВ предлагается разработать алгоритмическое, информационное и техническое обеспечение системы по определению данных характеристик работающие в рамках существующих SCADA-систем, что позволит улучшить систему управления процессами ПВ.

В результате исследований разработана математическая модель процессов подземного выщелачивания, в виде модели фильтрации в режиме напорной фильтрации (основной режим) и в режиме насыщения в среде COMSOL. Данный материал может быть использован для создания и внедрения в практику системы управления процесса подземного выщелачивания и эффективность предложенных алгоритмов будут оцениваться в процессе их эксплуатации.

зарубежный научный руководитель
д.т.н., профессор

POLITECHNIKA LUBELSKA
Instytut Elektroniki i Techniki Informatycznej
20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 38A
tel. (81) 53 84 309, fax. (81) 53 84 312

Waldemar Wójcik

DYREKTOR
Instytutu Elektroniki i Techniki Informatycznych

Prof. dr hab. inż. Waldemar Wójcik