

Алматинский университет энергетики и связи
Теплоэнергетический факультет
Кафедра инженерной кибернетики



МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ
**На тему: Разработка и исследование имитационных
моделей процесса добычи урана**

Выполнила магистрант МАУнп-15 Туленбаева А.Е
Руководитель проф., к.т.н Ибраева Л.К

Алматы 2017

Цель диссертационной работы

Целью настоящей работы является разработка математической модели, описывающей динамику процесса подземного выщелачивания урана в пористой среде, которая позволяет проводить детальные и качественные исследования процесса и поможет в изучении механизмов возникновения и развития явлений, осложняющих процесс добычи полезных ископаемых.

Задачи

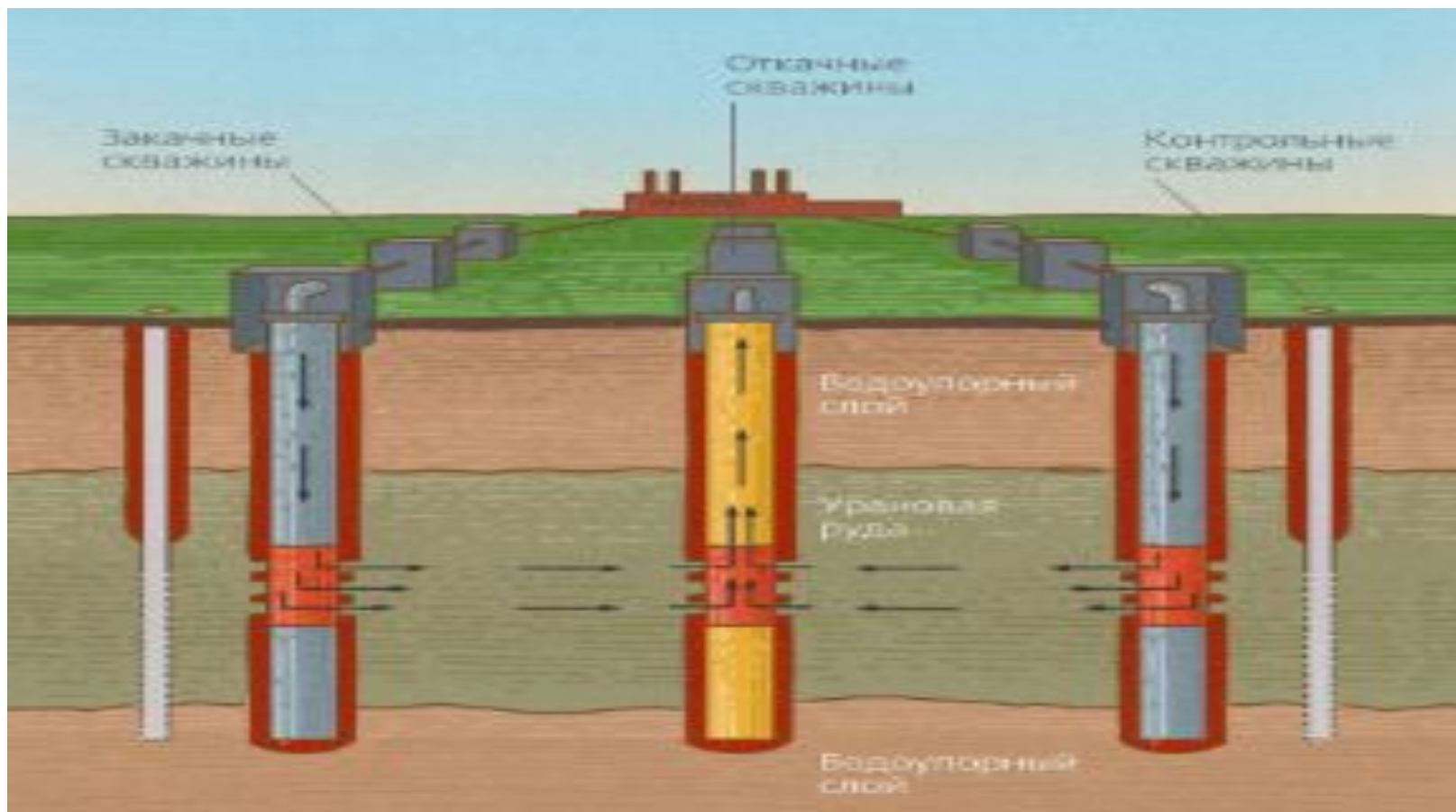
- изучение процесса подземного выщелачивания урана;
- обзор математических моделей с распределенными параметрами;
 - изучение численных методов решения математических моделей с распределенным параметрами;
- выбор математических моделей процесса подземного выщелачивания;
 - обзор современных программ используемых для решения дифференциальных уравнений в частных производных;
- разработка и исследование имитационных моделей процесса фильтрации жидкости при подземном выщелачивании в выбранной среде программирования;
- анализ результатов моделирования;
 - по педагогическому направлению: разработка виртуального лабораторного стенда: «Идентификация динамических характеристик объекта».

Цель исследований: Исследование и разработка имитационных моделей процесса фильтрации жидкости при подземном выщелачивании урана с целью определения наилучших параметров для рациональной добычи полезного компонента.

Теоретическая и методологическая основа работы: математическое моделирование; дифференциальные уравнения в частных производных; идентификация связанных объектов; численное моделирование; метод конечных элементов; Закон Дарси ; фильтрация.

Ожидаемые результаты, их новизна, научная и практическая значимость: Разработать имитационную модель фильтрации выщелачивающего раствора при подземном выщелачивании с учетом подземных вод и изменений пористости пласта с помощью программной платформы Comsol Multiphysics. Определение эффективной схемы размещения скважин и исследование поведения процесса при различных геологических параметрах геотехнологической среды. Результаты исследований могут быть использованы на месторождениях добычи урана, а также на других объектах, где актуальна задача фильтрации жидкости в пористых средах.

Схема добычи урана способом подземного скважинного выщелачивания



Актуальность математического моделирования процессов выщелачивания

- отсутствие возможности прямого оперативного контроля вследствие того, что распространение реагента и химические реакции происходят глубоко в недрах;
- традиционная для горной промышленности неполнота и ограниченность данных о геологической среде;
- большая инерционность процесса, растянутость его во времени;
- кольматация, иначе говоря забивание пор и трубок тока раствора с переходом урана в трудно растворимые соединения;
- образование «промоин» - каналов, по которым раствор достигает откачных скважин, не проработав нужного количества руды.

Актуальность математического моделирования процессов выщелачивания

Научная ценность

Углубление понимания и получение новых знаний о процессах, происходящих при подземном выщелачивании.

Практическое применение

Выбор наилучших схем вскрытия залежи

Оценка геоэкологических последствий

Планирование природоохранных мероприятий

Прогнозирование технологических показателей отработки месторождений

Обзор математических моделей объектов с распределенными параметрами

Математическая модель с распределенными параметрами содержит переменные, зависящие от пространственных координат, и представляет собой систему дифференциальных уравнений в частных производных или систему интегро-дифференциальных уравнений.

Примерами математических моделей с распределенными параметрами могут служить:

$$\frac{\partial \varphi(\mathbf{r}, t)}{\partial t} = \nabla \cdot [D(\varphi, \mathbf{r}) \nabla \varphi(\mathbf{r}, t)],$$

- Уравнение диффузии

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} + \nu \Delta \vec{v} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \vec{f},$$

- Уравнение Навье-Стокса

Обзор математических моделей объектов с распределенными параметрами

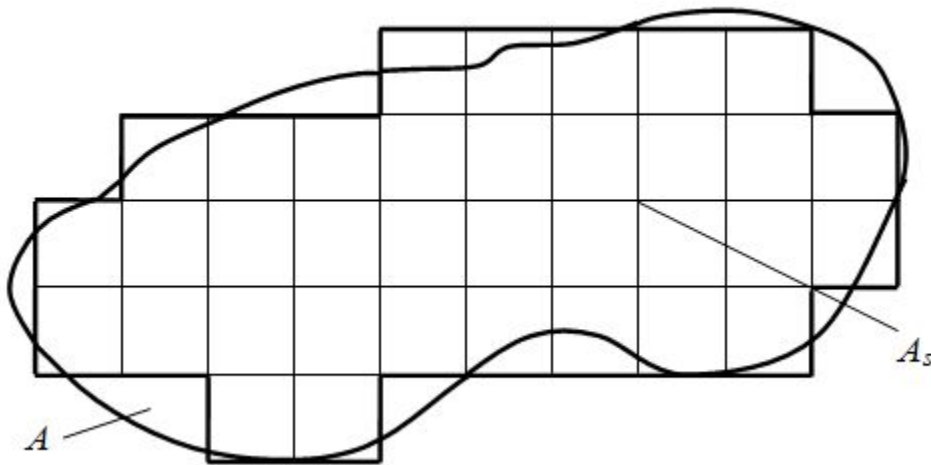
Решение дифференциальных уравнений в частных производных является достаточно сложной проблемой по этим причинам:

- решением уравнения является не одно, а целое множество решений;
- отсутствие сходимости результатов;
- отсутствие адекватных аналитических методов решения;
- значительный объем вычислительных действий.

Численные методы решения дифференциальных уравнений в частных производных

Основная идея метода конечных элементов (метода сеток) для приближенного численного решения краевой задачи состоит в том, что:

- на плоскости в области A , в которой ищется решение, строится *сеточная область* A_s ;
- заданное дифференциальное уравнение в частных производных заменяется в узлах сетки A_s соответствующим конечно-разностным уравнением;
- с учетом граничных условий устанавливаются значения искомого решения в граничных узлах области A_s .



- Построение сеточной области

Аппроксимация дифференциального уравнения

$$Ly = -p(x)y'' + q(x)y' + r(x)y$$

Разобьем промежуток $[a, b]$ на n равных частей. Пусть $h = (b - a)/n$ и построим сетку узлов с шагом h : $x_i = a + ih$, $i = 0, 1, \dots, n$. Назовем эту сетку узлов основной



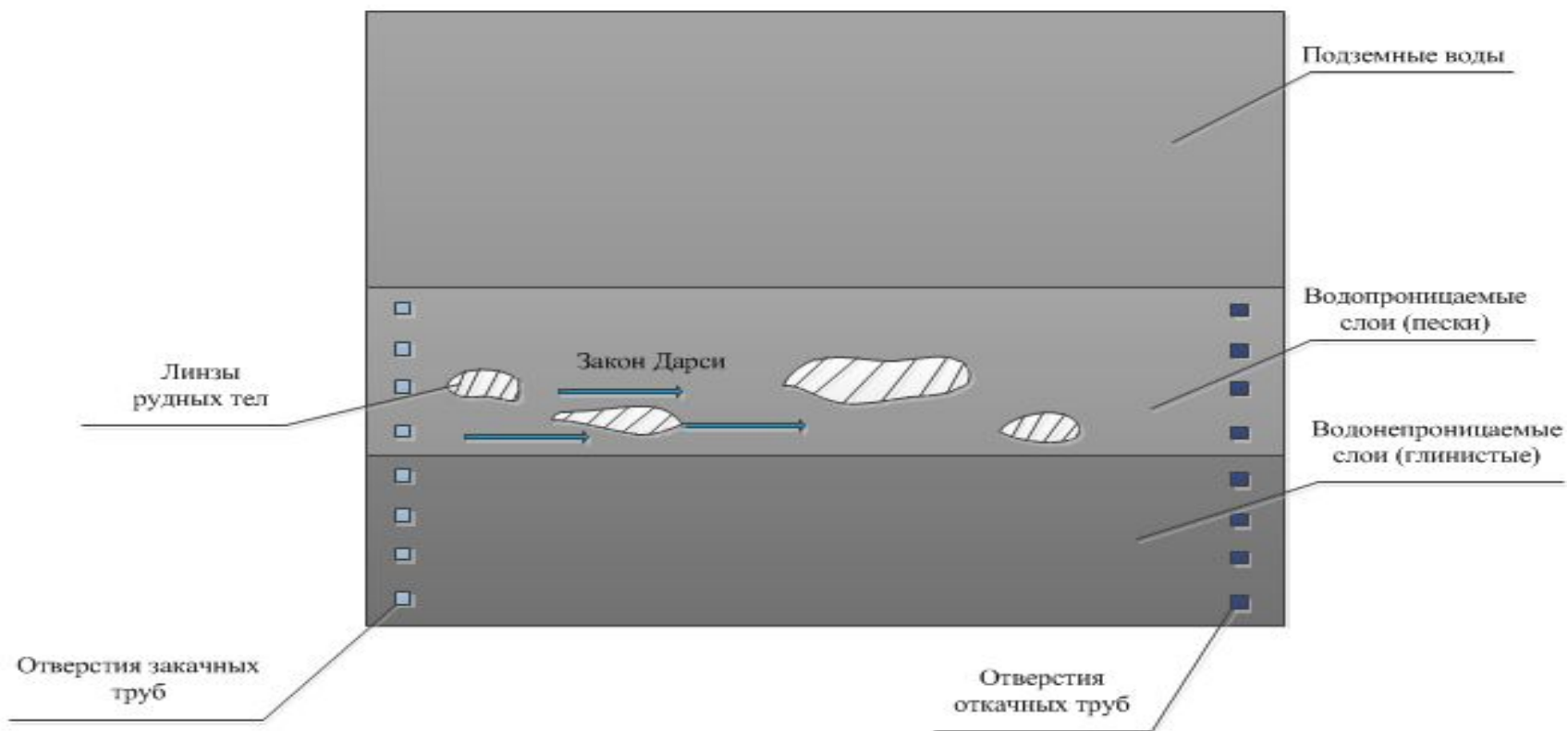
Основная сетка

Решение исходной задачи будем отыскивать в виде таблицы значений в точках сетки $y_i \approx y(x_i)$, $i = 0, 1, \dots, n$.

Заменяя производные в уравнение конечно-разностными отношениями с погрешностью $O(h^2)$, получаем

$$-p_i \frac{y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}}{h^2} + q_i \frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{2h} + r_i y_i = f_i$$

Физическая постановка проблемы



Выбор математической модели фильтрации жидкости при подземном выщелачивании

Закон Дарси:

$$\frac{\partial(\theta\rho)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho\vec{v}) = 0$$

$$\frac{\partial(\theta\rho)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho\vec{v}) = 0$$

$$\frac{\partial(\theta\rho)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho\vec{v}) = 0$$

$$\frac{\partial(\theta\rho)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho\vec{v}) = 0$$

Условие процесса подземного выщелачивания:

$$\frac{\partial(\theta\rho)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho\vec{v}) = 0$$

Граничные условия используемые при моделировании процесса выщелачивания

Начальное условие

$$\frac{\partial p_1}{\partial z} = \gamma_1$$

Граничные условия задаются на границах моделируемой области. Возможны следующие граничные условия (Γ – граница):

1) постоянное или изменяющееся по заданному закону давление

$$p|_{\Gamma} = p_0(\Gamma, t)$$

т.е. границы являются контуром питания;

2) постоянный или переменный поток через границу

$$\frac{k}{\mu} (\nabla p - \gamma z) n|_{\Gamma} = q \quad (\Gamma, t)$$

где n - вектор нормали к границе Γ ;

3) условие непроницаемости (непроницаемые границы):

$$\frac{k}{\mu} (\nabla p - \gamma z) n|_{\Gamma} = 0$$

Анализ и выбор программных продуктов для моделирования процесса выщелачивания

Abaqus – программный комплекс высокого уровня в области конечно-элементных прочностных расчётов, позволяет получать точные и достоверные решения для сложных линейных и нелинейных инженерных проблем.

COMSOL Multiphysics – пакет моделирования, который позволяет решать: системы нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных методом конечных элементов в одном, двух и трёх измерениях.

Partial Differential Equation Toolbox – пакет моделирование в составе MatLab, который содержит инструменты для исследования и решения уравнений в частных производных в двух измерениях со временем.

Основными преимуществами среды Comsol при моделировании процесса выщелачивания являются:

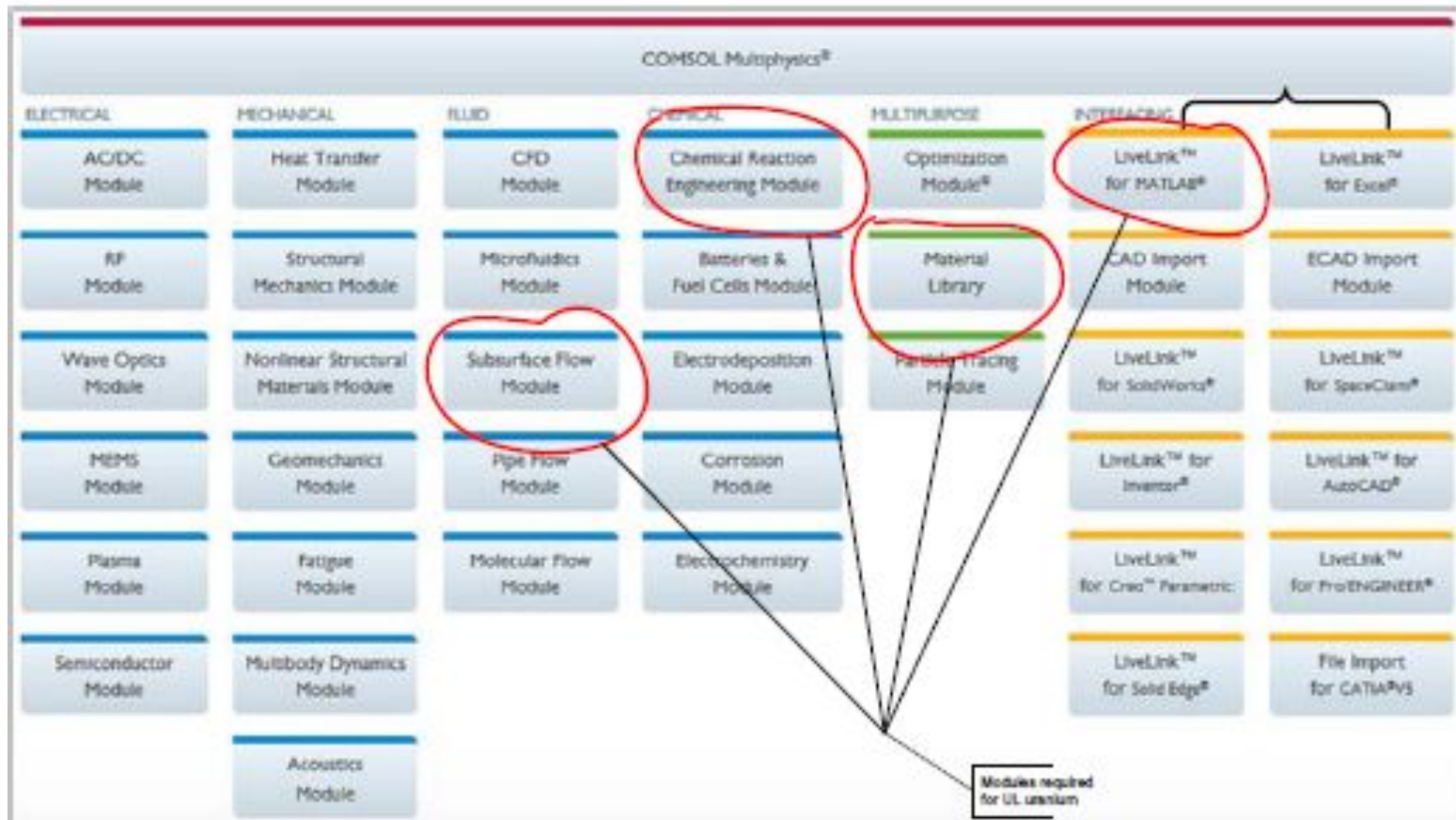
- Возможность проводить динамический анализ;
- Возможность трехмерного моделирования;
- Решение задач динамики и жидкости газа;
- Интеграция с другими пакетами;
- Использование имеющихся и создание новых баз данных;
- Присутствие модуля движения жидкостей и газов в пористых средах и под землей.

Программная платформа Comsol Multiphysics

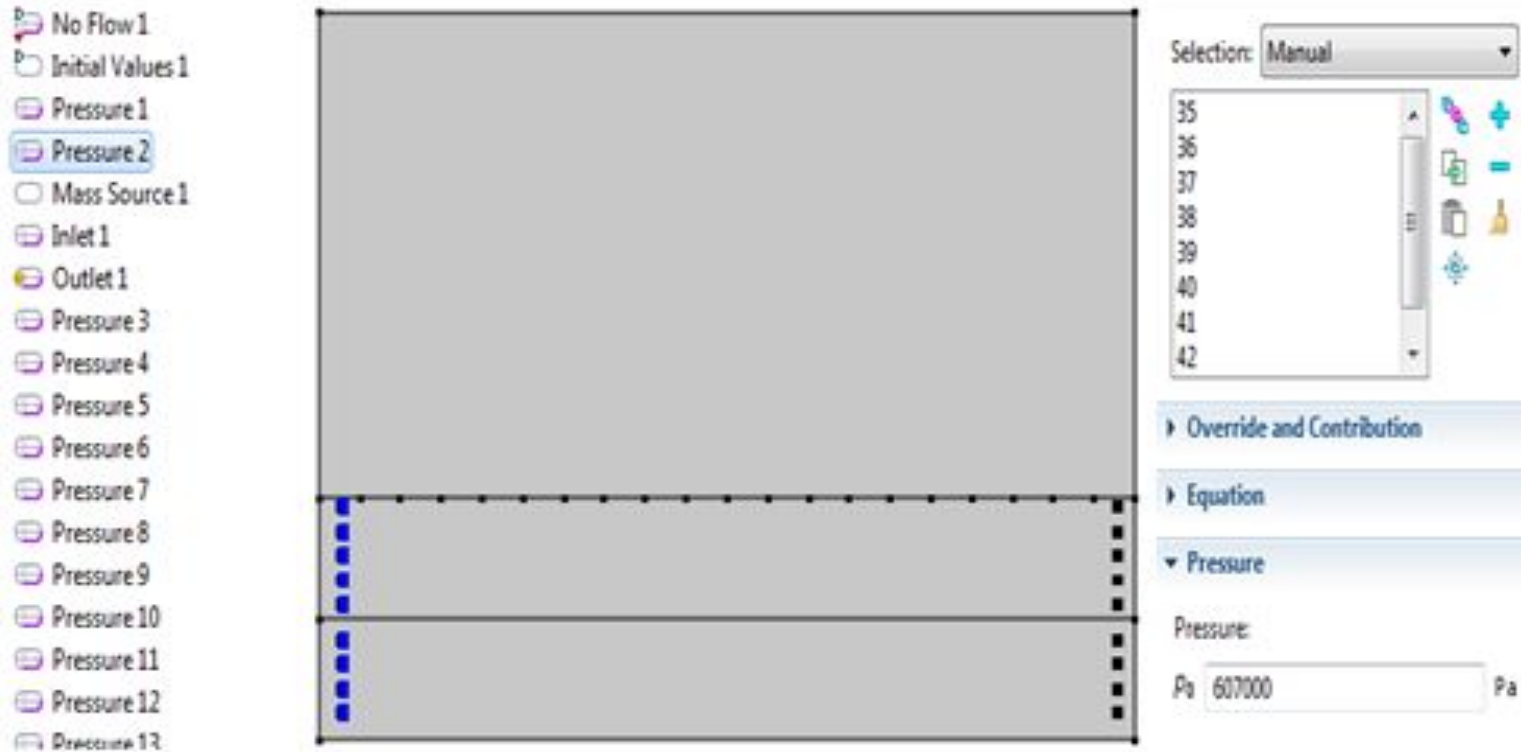
Для решения задачи в среде Comsol Multiphysics выполняется следующая последовательность действий:

- установить среду моделирования;
- создать объекты геометрии;
- специфицировать свойства материалов;
- определить граничных условий;
- определить параметры и построить сетку;
- определить параметры решаемого устройства и запуск симуляции;
- обработка результатов.

Структура модульных пакетов программного комплекса COMSOL Multiphysics



Назначение граничных условий



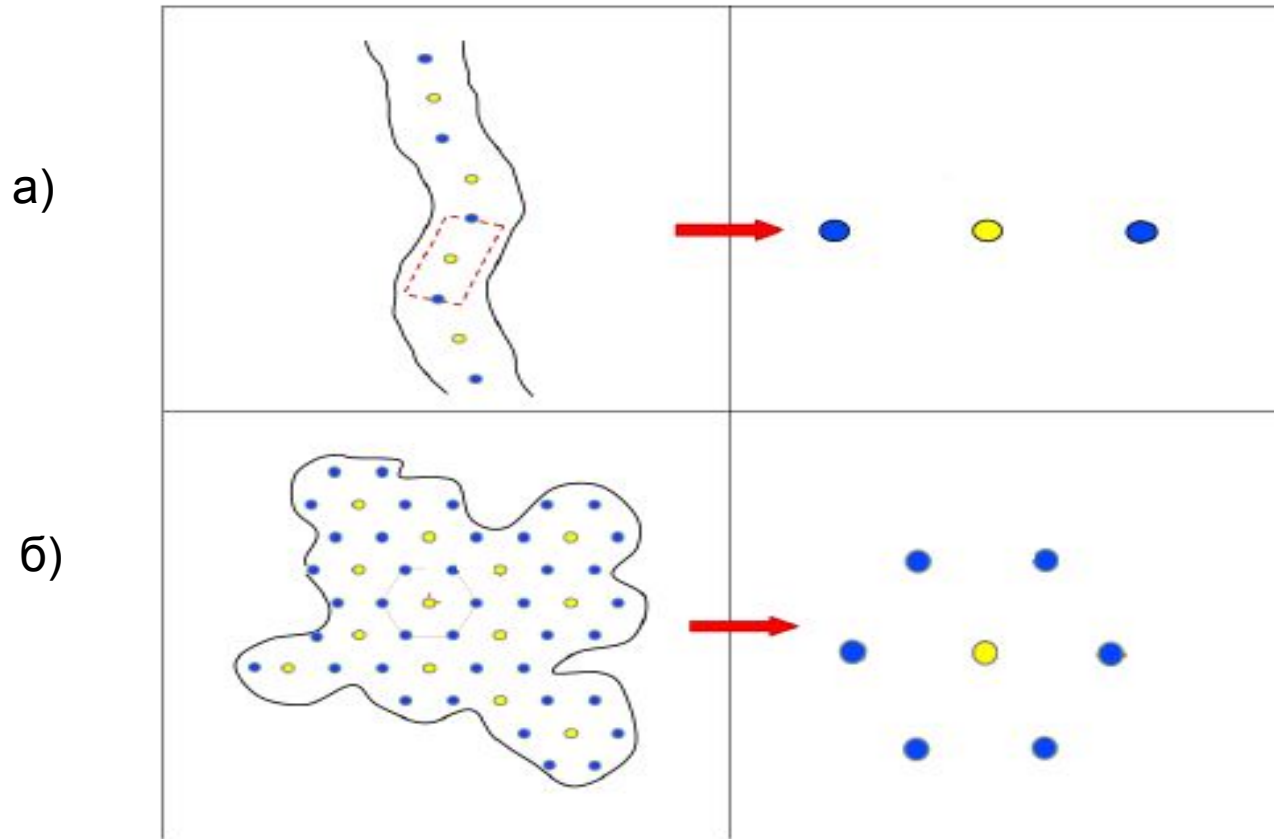
Функция *No Flow* задает условие непроницаемости (непроницаемые границы)

$$-n * \rho u = 0$$

Функции *Inlet* и *Outlet* добавляют граничные условия для притока и оттока соответственно перпендикулярно до границы

$$n * \rho \frac{k}{\mu} \nabla p = \rho U_0$$

Схемы размещения скважин при подземном выщелачивании

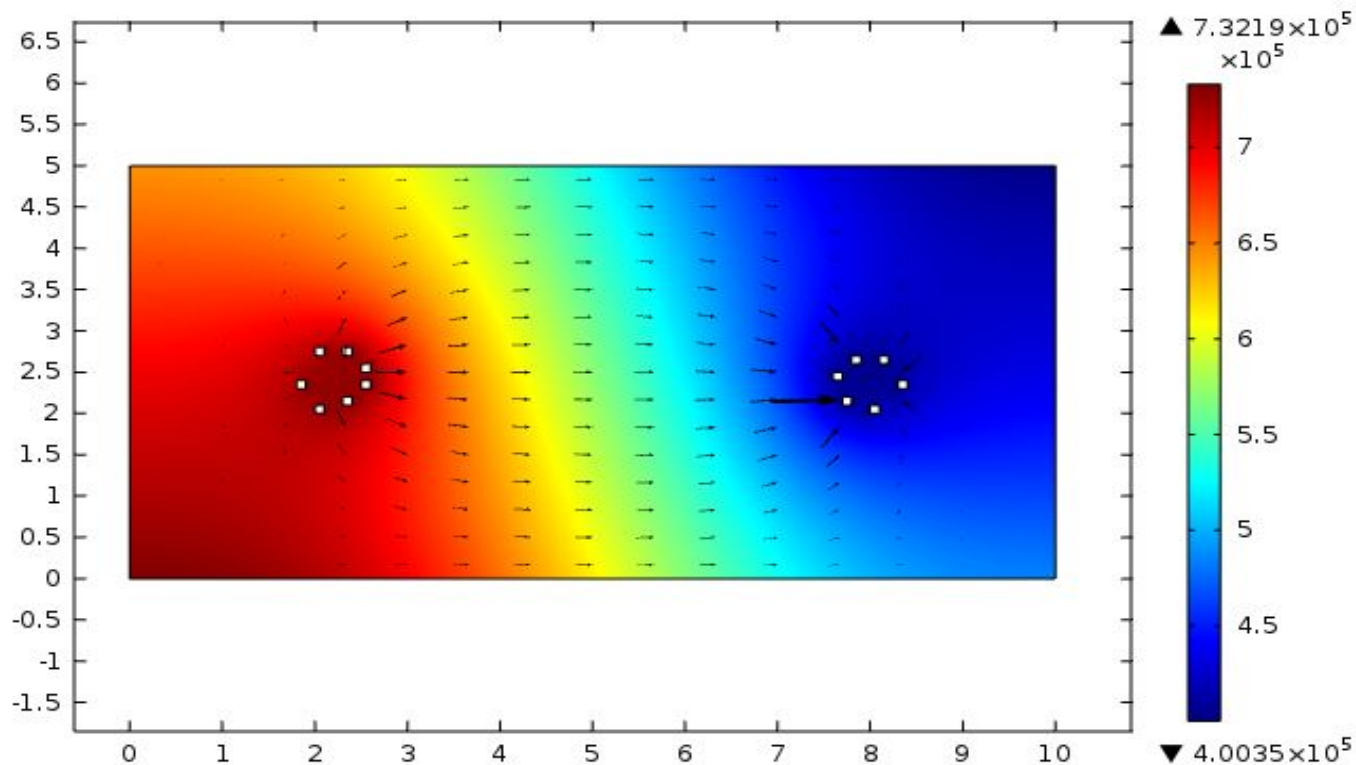


Схематический рисунок рассматриваемой области:
а) линейная схема; б) гексагональная схема.

Моделируются два типа расположения скважин:

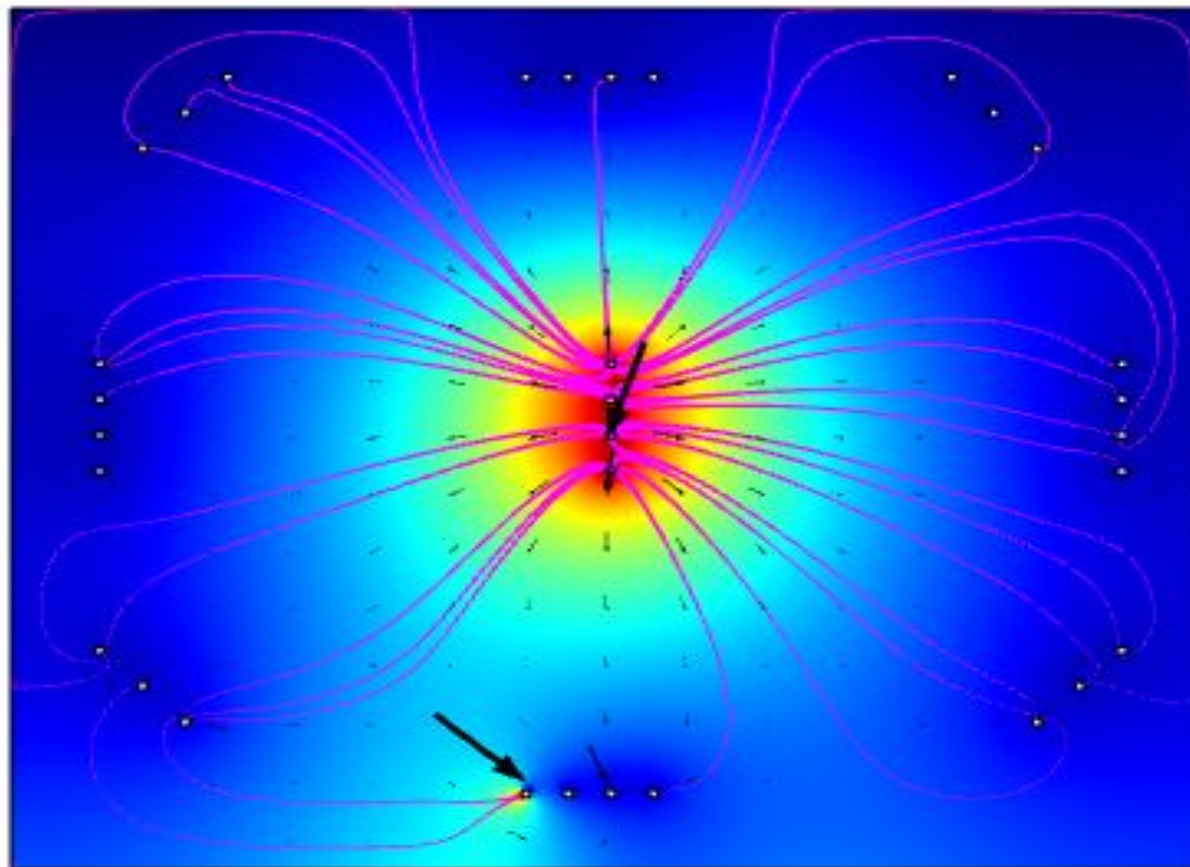
- 1) число скважин равняется двум, одна из них нагнетательная, который располагается в одной четверти длины, а добывающая – в три четвертях;
- 2) число скважин равняется семи, нагнетательные скважины располагаются по краям пласта, а добывающая – в центре.

Распределение поля скоростей для первого случая



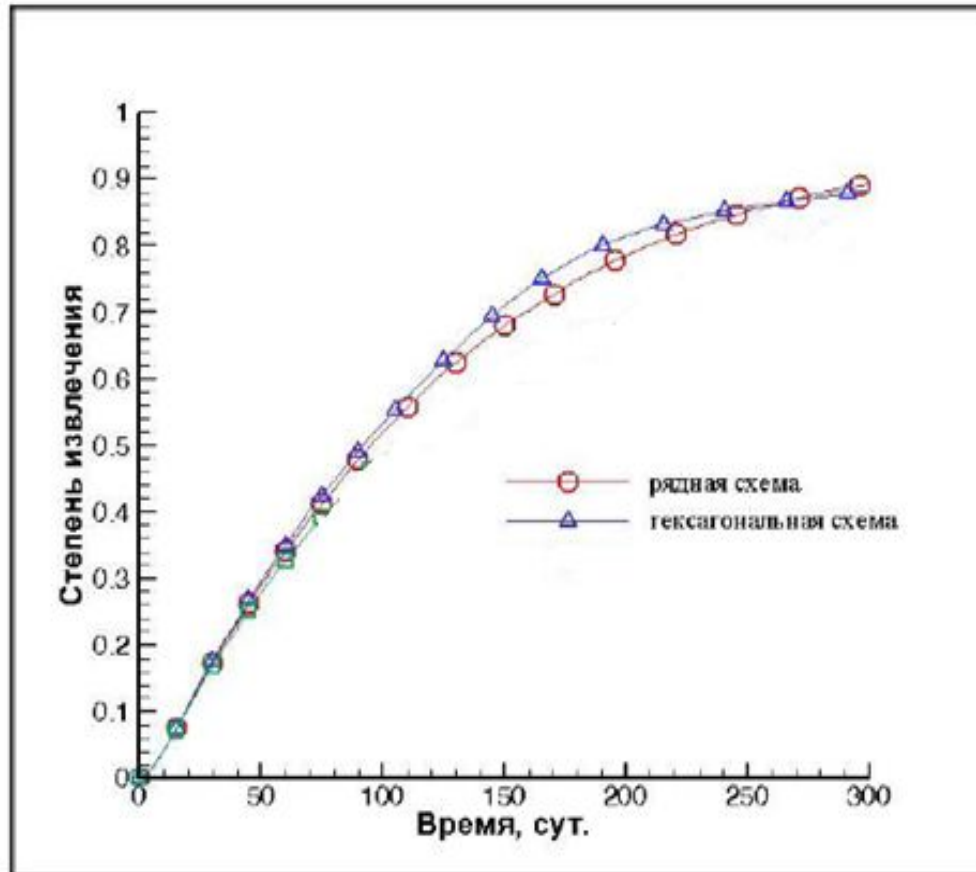
Из рисунка видно, что значение скорости в полосах до нагнетательной скважины и после добывающей скважины меньше чем в полосах между скважинами. Это значит, что минералы находящейся в полосах между скважинами растворяется больше чем в остальных частях, т.е. появляется **застойные** зоны.

Распределение поля скоростей для второго случая



Из рисунка видно, что зоны появления минерала увеличивается за счет увеличения скважин, т.е. зоны растворения увеличивается.

Сравнение зависимостей степени извлечения от времени



Сравнительный анализ показывает, что в случае линейного расположения степень извлечения на один процент превышает степень извлечения гексагонального расположения. Однако, при линейном расположении количество откачных скважин на два раза больше чем в гексагональном случае. Учитывая этот факт можно сказать что оптимальной схемой является – гексагональная схема.

Моделирование динамики процесса подземного выщелачивания

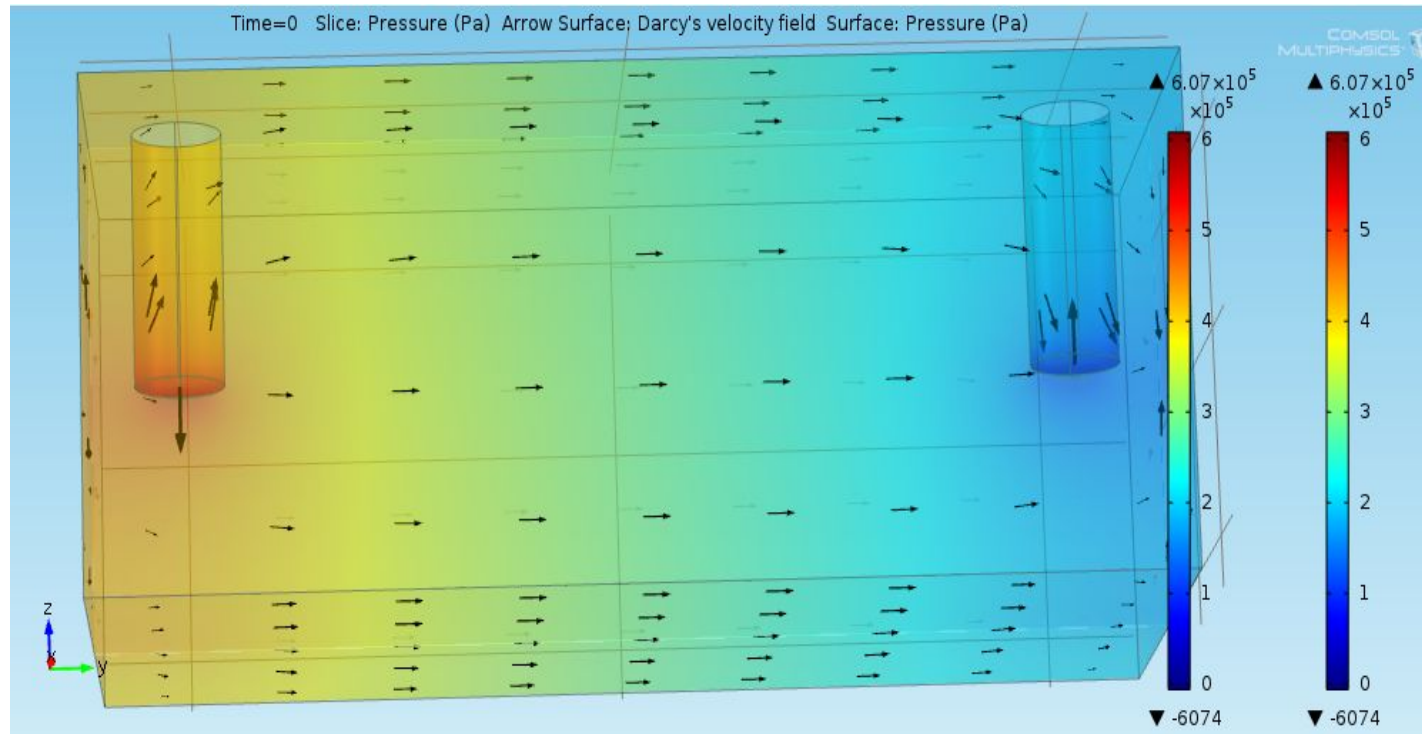
При моделировании фильтрации жидкости при подземном выщелачивании были приняты следующие допущения:

- Моделируется направление потока выщелачивающего раствора от закачных до откачных скважин;
- При моделировании будет рассматриваться продуктивный пласт, сложенный песчаником, с вкрапленными зернами минералов урана;
- В продуктивном пласте наблюдается переслаивание хорошо проницаемых песков с пропластками глин;

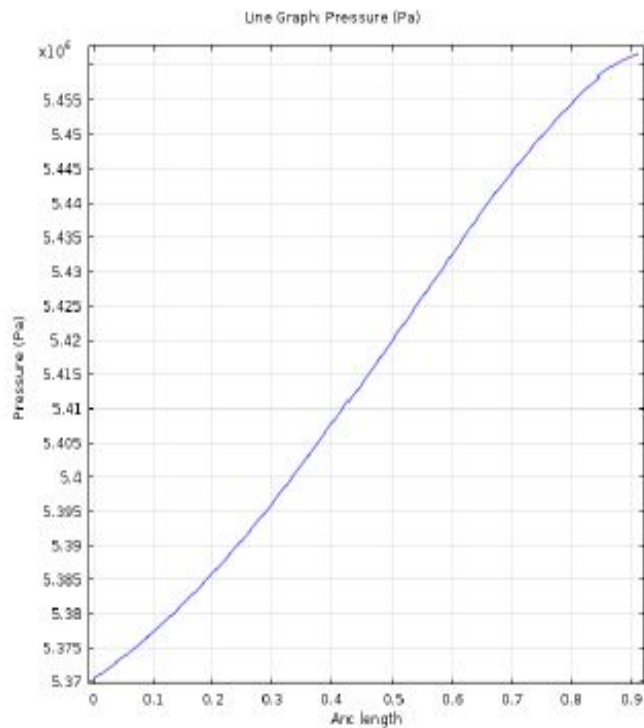
Данные используемые при моделировании выщелачивания урана

№	Название	Обозначение	Значение	Ед. измерения
1	Коэффициент пористости (для водопроницаемой среды)	ε	0.5	-
2	Плотность среды (для водопроницаемой среды)	ρ	1800	г/м ³
3	Динамическая вязкость (для водопроницаемой среды)	μ	9000	г/(м*сут)
4	Коэффициент проницаемости (для водопроницаемой среды)	к	0.5	-
5	Коэффициент пористости (для глинистой среды)	ε	0.2	-
6	Плотность среды (для глинистой среды)	ρ	1800	г/м ³
7	Динамическая вязкость (для глинистой среды)	μ	9000	г/(м*сут)
8	Коэффициент проницаемости (для водопроницаемой среды)	к	0.2	-
9	Плотность раствора	ρ	1.84	г/м ³
10	Коэффициент фильтрации	К	8	г/(м/с ³)

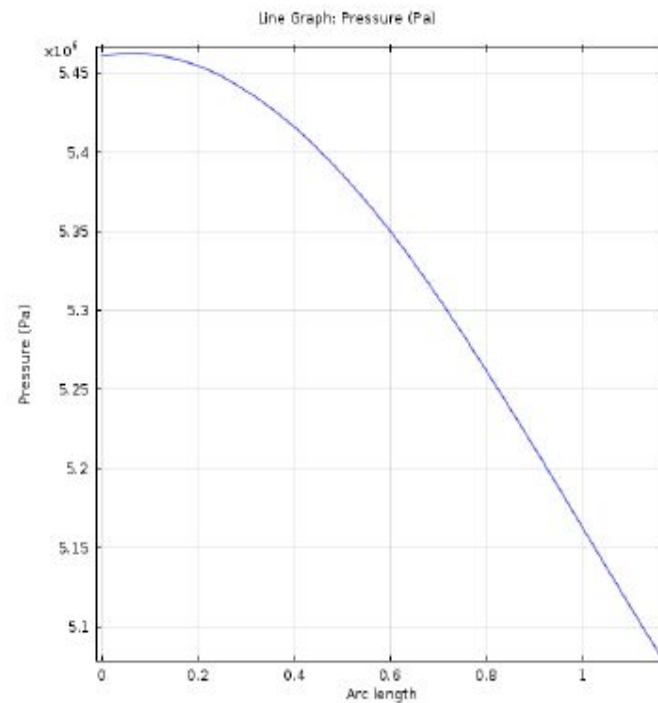
Исследование динамики фильтрации жидкости в пласте от точки подачи выщелачивающего раствора до точки приема продуктивного раствора.



Распределение давления для закачных и откачных скважин

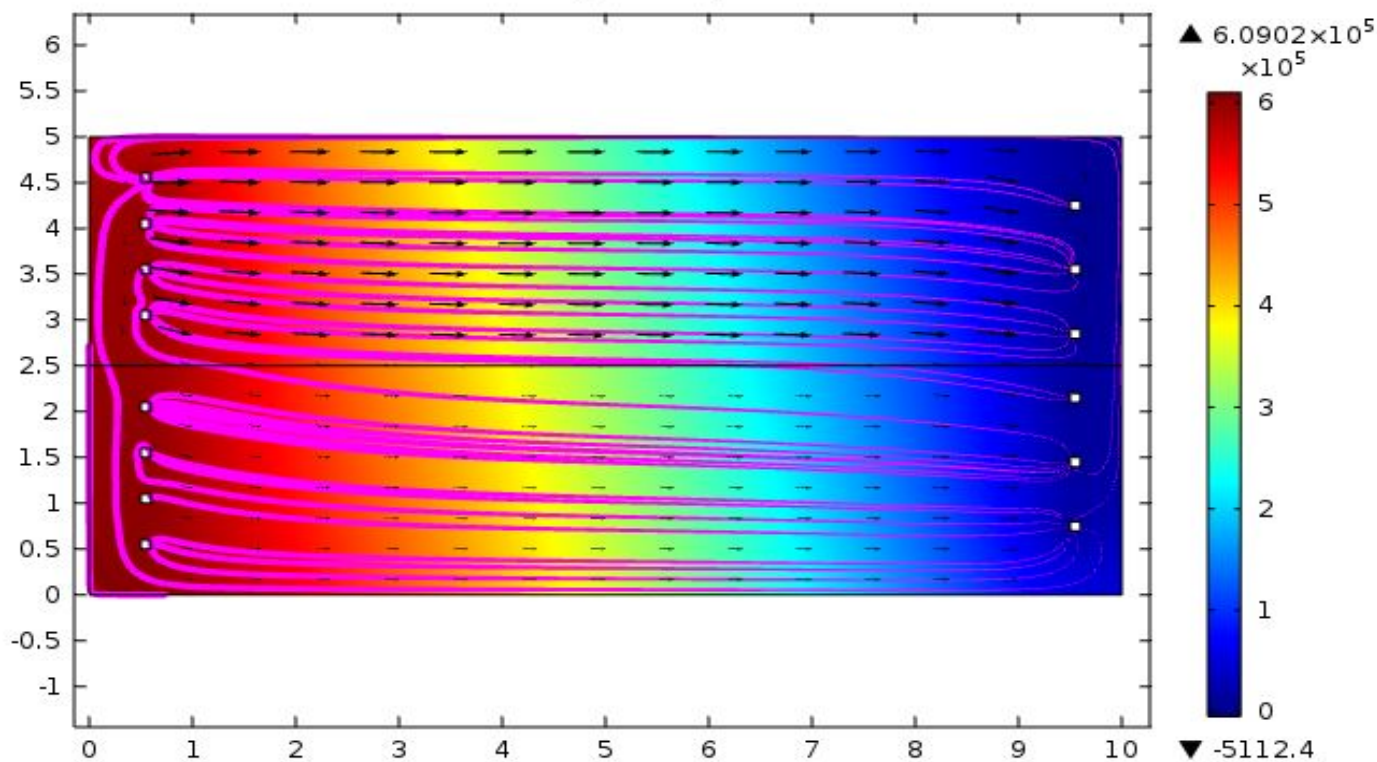


Кривая давления для закачной скважины



Кривая давления для откачной скважины

Моделирование режимов напорной и насыщенной фильтрации



Кольматация при подземном выщелачивании урана

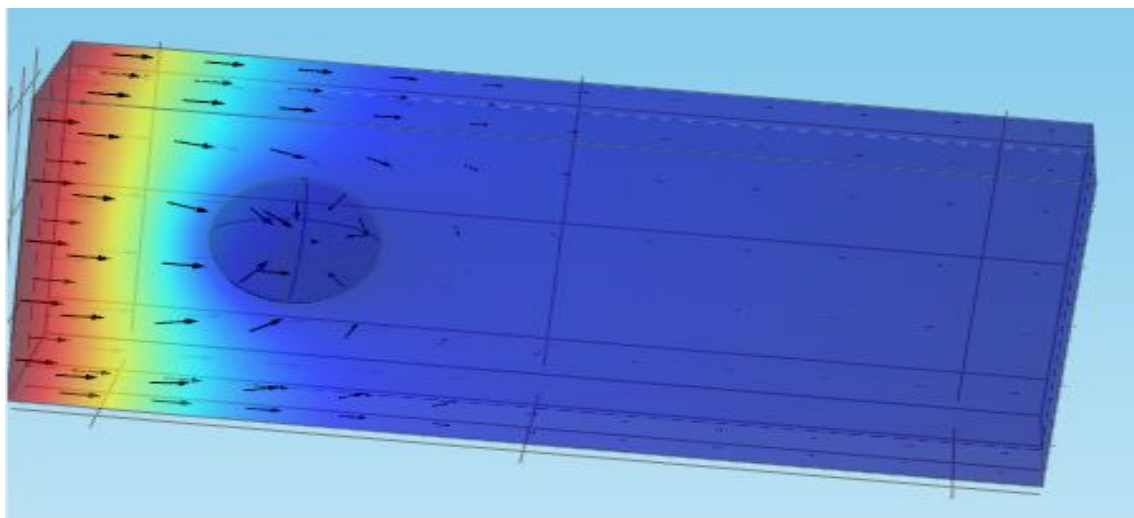
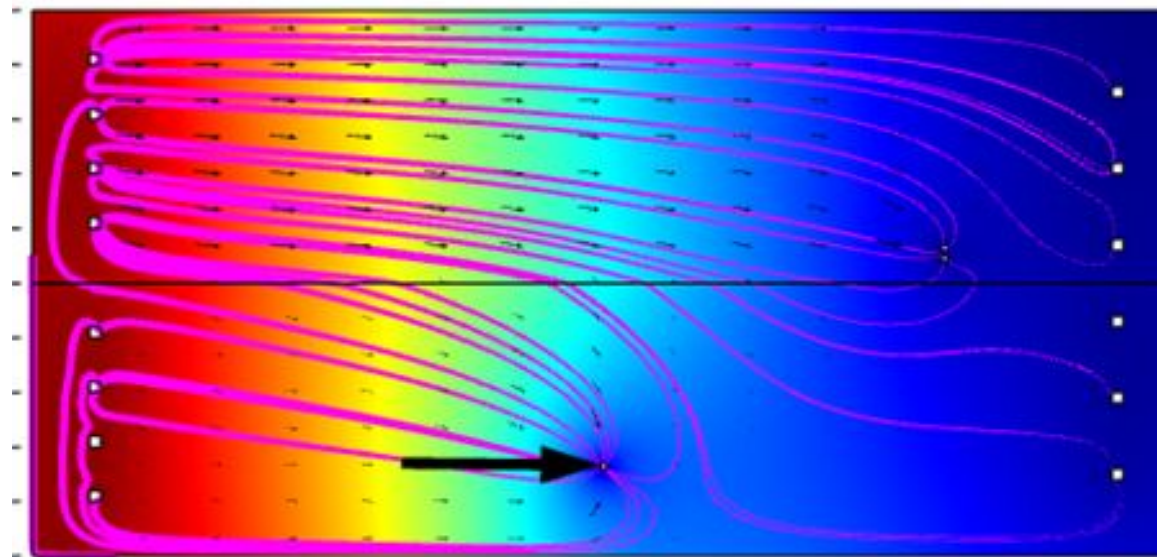
Химическая

**Виды
кольматации**

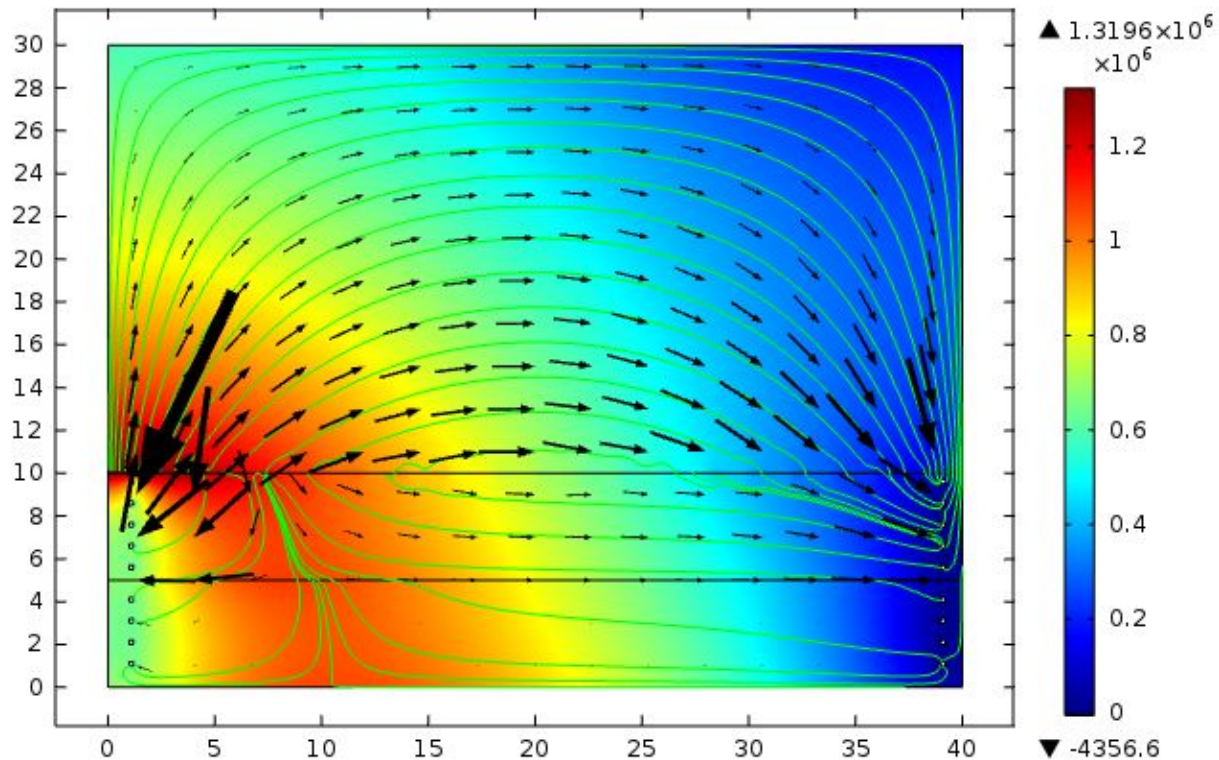
Механическая

Ионообменная

Результаты исследования при кольматации



Распределение потока жидкости при моделировании динамики процесса подземного выщелачивания с учетом подземных вод



Анализ полученных результатов:

- Сравнение схем расположения скважин по степени выработки пласта и по количеству откачных и закачных скважин показывает, что оптимальной схемой является – гексагональная схема.
- Установлена прямая зависимость между коэффициентом проницаемости и фильтрацией жидкости;
- При моделировании фильтрации продуктивного раствора с учетом подземных вод, можно сделать вывод продуктивный раствор, не доходя до откачной трубы, может рассеяться по пласту, либо перемешаться с грунтовыми водами.
- При моделировании фильтрации продуктивного раствора с учетом подземных вод, видно, что вдали от скважин фильтрация раствора практически отсутствует, появляются так называемые застойные зоны.

Лабораторная работа: «Идентификация динамических характеристик объектов»

Объектом исследования в виртуальном лабораторном практикуме является кожухотрубный теплообменник. Цель функционирования объекта – поддержание заданной температуры подогреваемой воды.

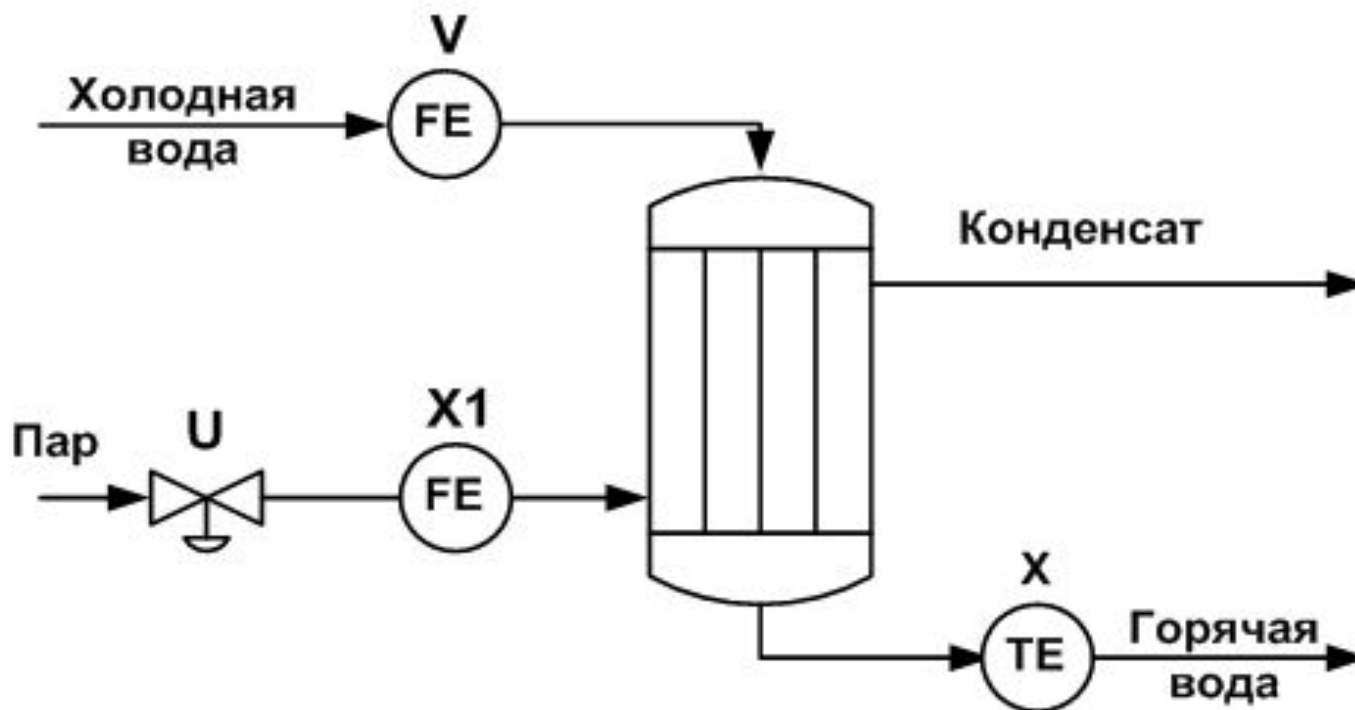
Условная схема объекта показана на рисунке, где обозначены:

U - управляющее воздействие (вход) - расход пара;

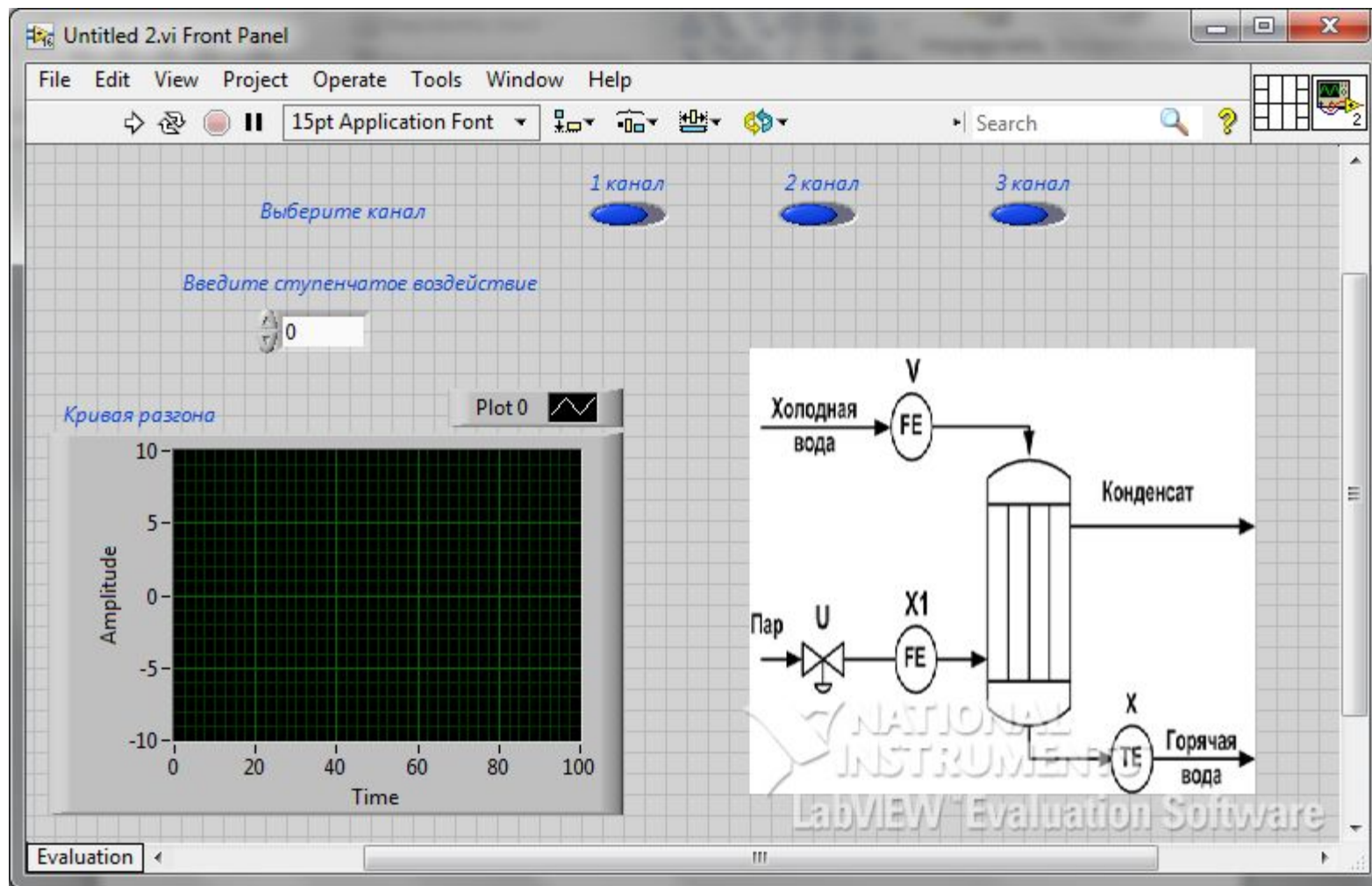
X – регулируемый параметр (выход) – температура горячей воды;

X1 – промежуточный (вспомогательный) режимный параметр -расход пара;

V – возмущение – расход холодной воды;



Лабораторная работа: «Идентификация динамических характеристик объектов»



Интерфейс виртуальной лабораторной работы

Заключение

Научно-исследовательская работа заключалась в исследовании и разработке имитационных моделей процесса добычи урана методом подземного скважинного выщелачивания, с целью определения основных закономерностей процесса, в том числе определение влияния различных факторов на его результат и выбор оптимального геотехнологического режима

Полученные результаты:

- изучен процесс подземного выщелачивания урана;
- был произведен обзор математических моделей с распределенными параметрами;
 - изучены численные методы решения математических моделей с распределенным параметрами;
- произведен выбор математических моделей процесса подземного выщелачивания;
 - произведен обзор на современные программы используемых для решения дифференциальных уравнений в частных производных;
- разработана имитационная модель процесса фильтрации жидкости при подземном выщелачивании в выбранной среде программирования;
 - сделан анализ результатов моделирования;

-по педагогическому направлению:

разработан интерфейс виртуального лабораторного стенда: «Идентификация динамических характеристик объекта».

Магистрант приняла участие в 3-х научных конференциях (гг. Алматы, г.Астана) и опубликовала следующие статьи по теме диссертационного исследования:

-А.Е. Туленбаева Л.К.Ираева., Исследование модели процесса добычи урана в программной среде Comsol Multiphysics– 2016: Сборник научных трудов по специальностям «Автоматизация и управление» и «Информационные системы»: Ред.кол.: Л.К.Ираева.Алматы:АУЭС,2016.-С.19-24.

- А.Е. Туленбаева Л.К.Ираева., Уран өндіру процесінің моделін «Comsol Multiphysics» Бағдарламасы арқылы зерттеу - 2016: сборник научных трудов *международной научно-практической конференции «Инновации в науке, образовании и производстве Казахстана»* : Ред.кол.: Л.К.Ираева. Астана:ЕНУ,2016-С.43-47.

- Б.К. Муханов., Е.Ж. Оракбаев., П.Ж.Ж. Омирбекова., А.Е. Туленбаева Исследование застойных зон при подземном выщелачивании в среде Comsol Multiphysics– 2017: Сборник трудов Международной конференции «Математические методы и информационные технологии макроэкономического анализа и экономической прлитики», 11– 12 апереля 2017 г., Алматы.