

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет  
имени К.И. Сатпаева

Институт автоматизации и информационных технологий

Кафедра автоматизации и управления

Кабылбаев Еркежан Даулетович

Разработка автоматической системы управления и повышения эффективности  
функционирования технологических блоков рудника урана

**ДИПЛОМНАЯ РАБОТА**

Специальность 5В070200 - Автоматизация и управление

Алматы 2022

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет  
имени К.И. Сатпаева

Институт автоматизации и информационных технологий

Кафедра автоматизации и управления



**ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ**  
Заведующий кафедрой АиУ  
канд. физ.-мат. наук.  
Алдияров Н.У.  
«          » мая 2022 г.

**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА**  
к дипломной работе

На тему: “Разработка автоматической системы управления и повышения эффективности функционирования технологических блоков рудника урана”

По специальности: 5В070200 - Автоматизация и управление

Выполнил

Кабылбаев Е.Д.

Рецензент  
канд. техн. наук, доц.  
Сихимбаев А.С.  
«          » мая 2022 г.  
«          » мая 2022 г.  
БСН/БИН 080640000849  
ГОРОД НУР СУЛТАН  
РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

Научный руководитель  
д-р. PhD,  
ассистент-профессор  
Омирбекова Ж.Ж.  
«          » мая 2022 г.

Алматы 2022

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный технический университет имени К.И. Сатпаева

Институт автоматизации и информационных технологий

Кафедра 5В070200 - Автоматизации и управления



**УТВЕРЖДАЮ**

Заведующий кафедрой АиУ

канд. физ.-мат. наук

Алдияров Н. У.

« 18 » мая 2022 г.

**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение дипломной работы**

Обучающемуся Кабылбаеву Е.Д.

Тема: “Разработка автоматической системы управления и повышения эффективности функционирования технологических блоков рудника урана”.

Утвержден приказом ректора Университета № 489-П/ Θ от «24» декабря 2021 г.

Срок сдачи законченной работы: " 18 " мая 2022 г.

Исходные данные дипломной работы: техническая документация к оборудованию подземного скважинного выщелачивания.

Перечень подлежащих разработке в дипломной работе вопросов или краткое содержание дипломной работы: а) анализировать способа добычи урана путем подземного выщелачивания; б) спроектировать функциональную схему подземных скважин; в) разработать и оценить метод прогнозирования с помощью программы Comsol Multiphysics; г) разработать и оценить адекватность системы с помощью программы Matlab.

Рекомендуемая основная литература: техническая литература по автоматизации технологических процессов и математическому моделированию подземного скважинного выщелачивания.

## ГРАФИК

подготовки дипломной работы

Наименования разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю и консультантам	Примечание
Технологический раздел	1 марта 2022 г.	<i>Включено</i>
Специальный раздел	25 апреля 2022 г.	<i>Включено</i>

### Подписи

консультантов и нормоконтролера на законченную дипломную работу с указанием относящихся к ним разделов работы

Наименования разделов	Научный руководитель, консультанты, Ф.И.О. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Технологический раздел	д-р. PhD, ассистент-профессор Омирбекова Ж.Ж.	12.05.22	<i>Ж.О.О.</i>
Специальный раздел	д-р. PhD, ассистент-профессор Омирбекова Ж.Ж.	12.05.22	<i>Ж.О.О.</i>
Нормоконтролер	канд.техн.наук, ассистент- профессор Сарсенбаев Н.С.	12.05.22	<i>Н.С.</i>

Научный руководитель \_\_\_\_\_

*Ж.О.О.*

Омирбекова Ж.Ж.

Задание принял к исполнению обучающийся \_\_\_\_\_

*Е.Д.*

Кабылбаев Е.Д.

Дата "27" января 2022 г.

## АҢДАТПА

Бұл дипломдық жобада Қазақстан Республикасының аумағындағы уран кенішінің технологиялық блоктарының жұмыс істеу тиімділігін арттыруға және автоматты басқару жүйесін дамытуға назар аударылады. Технологиялық процестер зерттеліп, уранды жерасты шаймалаудың технологиялық процесінің автоматтандырылған кешені жобаланды. Кен массасын алудың нақты шарттары жасалды: ұңғымалардың қажетті деңгейін (биіктігі) таңдауда, химиялық реагентті таңдауда және уранды оңтайлы өндіру үшін басқа да маңызды сипаттамалар.

Кен орындарын игерудің өнімділік дәрежесін анықтау үшін ұңғымаларды жерасты шаймалаудың технологиялық процестерін математикалық модельдеу жүргізілді. Модельдің өзіне сәйкестігін тексеру үшін COMSOL Multiphysics модельдеу ортасында ұңғымаларды уран өндірудің технологиялық циклдерін болжауға арналған математикалық модельдер және Matlab модельдеу ортасында in-situ сілтілеу процесінің математикалық моделі әзірленді.

## АННОТАЦИЯ

В этом дипломном проекте будет выделено внимание на разработку автоматической системы управления и повышения эффективности функционирования технологических блоков рудника урана на территории Республики Казахстан. Исследовались технологические процессы и был спроектирован автоматизированный комплекс технологического процесса подземного выщелачивания урана. Были вынесены конкретные условия для добычи рудного тела: в подборе нужного уровня (высоты) скважин, в подборе химического реагента и других немаловажных характеристик для оптимальной добычи урана.

Для определения степени продуктивности освоения залежей, проведено математическое моделирование технологических процессов подземного скважинного выщелачивания. Разработаны математические модели прогнозирования технологических циклов добычи урана скважин в среде моделирования COMSOL Multiphysics и математическая модель процесса подземного выщелачивания в среде моделирования Matlab для проверки адекватности самой модели.

## **ABSTRACT**

In this graduation project, attention will be paid to the development of an automatic control system and improving the efficiency of the functioning of technological blocks of a uranium mine in the territory of the Republic of Kazakhstan. Technological processes were studied and an automated complex for the technological process of underground uranium leaching was designed. Specific conditions for the extraction of the ore body were made in the selection of the desired level (height) of the wells, in the selection of a chemical reagent and other important characteristics for optimal uranium mining.

To determine the degree of productivity of the development of deposits, mathematical modeling of the technological processes of underground well leaching was carried out. Mathematical models for predicting the technological cycles of uranium production of wells in the COMSOL Multiphysics modeling environment and a mathematical model of the in-situ leaching process in the Matlab modeling environment were developed to test the adequacy of the model itself.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение	9
1 Технологическая часть	11
1.1 Описание технологического процесса метода добычи урана подземным выщелачиванием	11
1.2 Особенности и технология разработки урановых месторождений	13
1.3 Современные проблемы разработки системы управления процесса подземного выщелачивания путем математического моделирования	19
1.4 Выводы по разделу	21
2 Расчетная часть	22
2.1 Принцип работы математического моделирования Comsol Multiphysics	22
2.2 Точность сетки	24
2.3 Основные уравнения фильтрации рудных тел. Закон Дарси	24
2.4 Разработка математической модели в ПО Comsol Multiphysics	27
2.5 Разработка функциональных схем подземного выщелачивания: закачных скважин, откачных скважин (глубинных насосов)	35
2.6 Разработка модели технологической схемы подземного выщелачивания	39
2.7 Вывод по разделу	43
Заключение	44
Список использованной литературы	45



## ВВЕДЕНИЕ

Технология извлечения из недр земли геотехнологическим путём приносит наиболее выгодные и функциональные результаты, и успешно применяется на территории Казахстана уже длительное время. В наибольшей степени для этого способа извлечения являются такие залежи как: медь, уран, золото и прочие металлы.

Среди этой технологии распространен метод подземного выщелачивания (ПВ). Специфика применения данной методики состоит в том, что она основана на техническом приеме фильтрационного взаимодействия жидких веществ в слое горной породы.

Наиболее важным аспектом ПВ является то, что он имеет потенциал для производства урана с меньшими затратами (меньшие капитальные вложения и меньшие эксплуатационные расходы за каждую единицу добытого материала) по сравнению с другими методами добычи, если они правильно применяются опытным специалистом на подходящем рудном месторождении.

Вторым важным аспектом является то, что этот метод ограничен только одним типом уранового месторождения; месторождение с фронтом откатки (отложенное воздействие движущимися грунтовыми водами) в проницаемом песчанике или грунте, который должен быть водоносным горизонтом (песчаником или грунтом, заполненным водой).

Третий важный момент связан с тем, что достаточно сложно спрогнозировать эффективность проекта по подземному выщелачиванию. Поскольку этот процесс включает в себя несколько противоречивых химических реакций, происходящих в природном урановом месторождении, химические и геологические параметры, влияющие на скорость потока, скорость реакции и производство урана, могут быть различными.

Вместе с этим происходит появление некоего количества стагнирующих участков на месторождениях, которые требуют дополнительного изучения в поисках оптимального подключения искусственного интеллекта (ИИ) или автоматизированной системы управления насосных станций и скважин, компенсируя истощающее свойство недостатков месторождений [1].

**Актуальность работы.** Несмотря на то, что технология извлечения урана широко высокоразвита, промышленные компании на сегодняшний день испытывают нехватку средств автоматизированных устройств для разработки оптимизированной промышленной системы, в виде рационального освоения недр урана.

**Цель работы.** Целью данной дипломной работы является разработка автоматической системы управления и повышения эффективности функционирования технологических блоков рудника урана.

**Объектом исследования** выступает технология подземного скважинного выщелачивания и технологические системы трубопроводов для закачки и откачки растворов. В дополнение спроектирована модель ПВ с использованием комплекса программного обеспечения MATLAB и Comsol Multiphysics

**Основные задачи.** Основные задачи определяются в виде:

- анализа подземного скважинного выщелачивания, как основного метода добычи урановых залежей;
- разработки функциональной схемы и структурной схемы;
- разработки и в повышении качества системы управления, направление которой определяется путем построения математической модели для прогнозирования эффективности методом подземного выщелачивания и математической модели для процесса подземного выщелачивания.

## **1 Технологическая часть**

Со времен существования Советского Союза до наших дней введется промысел по добыче природных богатств через геотехнологический метод подземного выщелачивания. Наряду с бурным развитием промышленности в Казахстане внедряется и активно используется геотехнологический подход к добыче полезных ископаемых. Анализ, основанный на статистической обработке данных по различным месторождениям, позволил получить обширную информацию о распределении концентраций урана в геотехнологических полях, проницаемости, коэффициенте фильтрации, скорости извлечения урана и других геотехнологических параметрах. По последним данным, а именно на 2020 год по информационному источнику World Nuclear, Республика Казахстан занимает преимущественно первое место по добыче урана, в точности 41 % мировых поставок, добыв тем самым около 19 тысяч тонн урана. Несомненно, это делает Республику важнейшим и ключевым спонсором такого энергического ресурса. Благодаря предприятию «Казатомпром», которое производит добычу энергоресурса на 26 участках территории Казахстана, делая его лидирующим и ключевым поставщиком страны, Казахстан выходит на мировую арену для дальнейшего сотрудничества с другими странами [2].

### **1.1 Описание технологического процесса метода добычи урана подземным выщелачиванием**

Подземное выщелачивание или добыча на основе выщелачивающих растворов - это термин, описывающий процесс контакта минерального месторождения с выщелачивающей жидкостью для растворения минерала без физического извлечения руды (например, массовая отбойка руд) из того места, где она находится в естественном состоянии. Этот процесс является селективным, так как в основном остается только минерал, представляющий наибольшую ценность и необходимость. Как правило, добытый готовый уран отправляют на энергообеспечивающий ресурс, в точности транспортируют в эксплуатацию для ядерных станций и атомных реакторов.

Многие предприятия уже разработали методы тестирования и оценки этих месторождений, включающих в себя лабораторные исследования выщелачивания жил, насосные испытания на месторождениях (гидрологические исследования) в полевых условиях, анализ образцов пород, методы измерения запасов и пилотные проекты по выщелачиванию.

Основным условием применения метода подземного выщелачивания является присутствие в месторождении запасов руды. Благоприятное расположение тела в хорошо дренируемой геологической среде, т. е. естественная и искусственная проницаемость рудоносного горизонта. Дальнейшая комбинированная закачка и откачка в ячейки. Скважины должны быть правильно размещены. В отличие от традиционных методов добычи урана,

метод подземного выщелачивания не требует сложных сооружений и производственных систем [3].

В отличие от гидрометаллургической переработки руды на специализированных предприятиях, метод подземного выщелачивания осуществляется в естественных условиях. Для обеспечения стабильных темпов добычи урана необходимо регулярно устанавливать скважины подземного выщелачивания, что необходимо для ускорения процесса, другие выполняют функцию добычи. То есть, когда один агрегат подвергается пассивному окислению, другой находится в заключительной фазе выщелачивания, а следующий - в фазе окисления. Движение растворов при подземном выщелачивании обычно сопровождается изменением проницаемости пластов вдоль пористых зон. Степень и характер этого изменения зависят от природы реагента и в отличие от подземных вод, которые движутся под воздействием постоянных течений, активный химический раствор проходит через пористую зону с изменением электропроводности. Процессы на урановых месторождениях обычно делятся на две основные части: добыча и переработка. Добыча включает в себя все физические процессы и химические реакции в подземной части и дальнейшее извлечение конечного продукта. Погружные дренажные отстойные насосы первоначально удаляют естественные подземные воды из водоносного горизонта перед добавлением реакционных реагентов уранового комплекса и перед закачкой в скважину и окислением. Через руду проходят хвосты выщелачивания для окисления и растворения урановых минералов в естественных условиях. Наземная же часть подразумевает обработку рудного массива. Иными словами, урановый раствор откачивается из скважин на очистные сооружения, где уран удаляется с помощью обычных технологий очистки, таких как ионный обмен или экстракция растворителем. Большая часть раствора возвращается в нагнетательные скважины, а оставшаяся часть поступает в сточные воды. Поскольку эта вода загрязнена радием, мышьяком и железом, перед утилизацией в нее добавляют для осаждения родия в бассейнах испарения хлорид бария. Дренаж обеспечивает постоянный приток грунтовых вод из окружающего водоносного горизонта на площадку скважины через конус разбавления на уровне грунтовых вод. Это предотвращает как потерю урана в геотехнологическом поле, так и загрязнение водоносного горизонта с учетом экологических и экономических соображений [4].

Элементы технологического процесса подземного выщелачивания. Данный метод подходит для месторождений, расположенных в водоносном горизонте, как показано на рисунке 1.1, где имеется рудное тело. Через нагнетающие скважины в урансодержащий пласт нагнетается вымывающий раствор серной кислоты, в результате чего растворяются урановые минералы. Урансодержащие минералы и щелочи взаимодействуют в результате диффузии и химических реакций в рудном горизонте. В подземном водоносном горизонте формируются реагенты, поступающие на поверхность через систему откачных скважин, снабженных погружными насосами для оперативной перекачки полученного продукта для дальнейшей переработки с помощью системы технологических скважин. Закачка щелочных растворов в скважины осуществляется с помощью

нагнетательных скважин. Скважины должны быть перфорированы для заполнения поступающим раствором, а также для откачки ураносодержащей руды. Это необходимо для протекания реакции подземного выщелачивания.

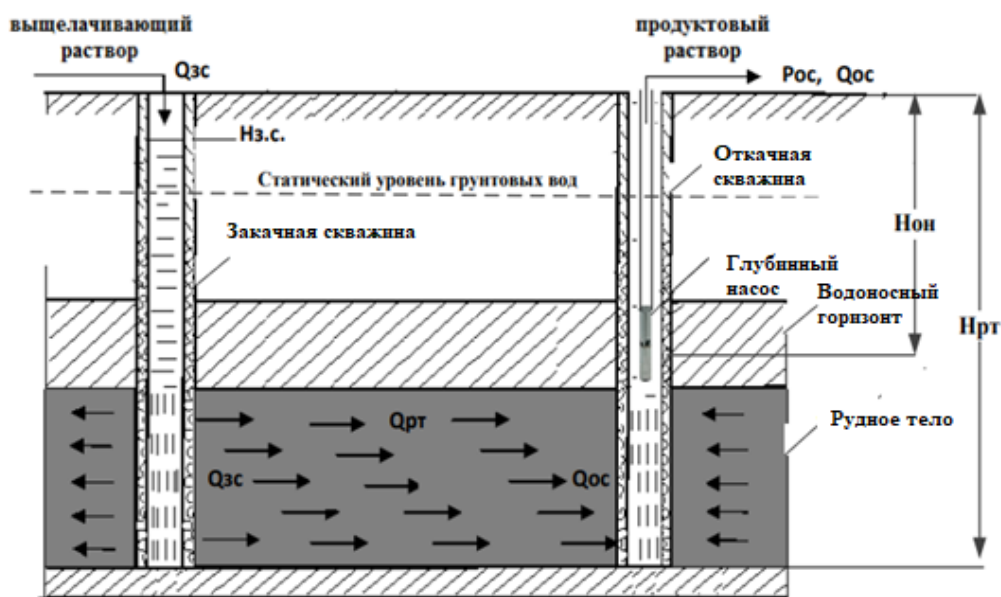


Рисунок 1.1 - Технологическая схема подземного выщелачивания.

## 1.2 Особенности и технология разработки урановых месторождений

Разрабатывая систему добычи методом подземного выщелачивания, исключаются капитальные затраты на проектировку сооружений для дробительных функций, горнодобывающая часть намного упрощается. Выделение материальных ресурсов на транспортировку реагентов и продуктов намного уменьшается, в добавлении трата на использование энергетического блока на руднике тоже снижается. Постройки зданий для гидроустановок могут исключаться из списка затрат, потому что таковых остаточных выбросов не наблюдается. Благодаря сохранению экономически-важных ресурсов, дозволено сосредоточиться на более предпочтительные вещи такие, как: введение предприятий рационального и компромиссного масштаба, в точности: вовлечение земель на участках бедных или труднодоступных урановых недр. Поэтому исходя из всего вышеперечисленного, можно с уверенностью заявить, что этот способ добычи будет считаться экологически чистым методом в добыче полезных ископаемых и способствует сохранению дополнительного капитала.

Невзирая на дополнительное сохранение капитала путем сокращения ненужных кадров на руднике, этот способ требует высоко квалифицированных специалистов, которые могут в порядке вещей контролировать без зрительного контакта с объектом. Специально назначают ответственного человека, потому что на рудниках могут встречаться около ста скважин, а сроки освоения их работы варьируются от трех до пяти лет. Неисправность всего даже одной

скважины или их неправильная эксплуатация крайне негативно влияют на соблюдение технологии процесса ПВ и приводят к оперативной реструктуризации эксплуатационных режимов работы технологической ячейки или участка. В течение прошедших десятилетий технико-экономические характеристики конструкции скважин значительно усовершенствовались. Для комплектации скважин до глубины 650 м и качественного совершенствования их функционирования применяют новые трубопроводные технологии и материалы [5].

Научные свидетельства о урановых происхождении в Казахстане числятся как зоны с пластовыми инфильтрационными (окислительными) месторождениями, которые как раз таки предназначены для растворителей с окислительным содержанием. Ближе к двум тысячним годам этот способ получил уже постоянное состояние добычи. Так ключевой целью урановой горнодобывающей промышленности ПВ является добыча урана в таком состоянии, которое позволяет применять его для работы в энергетических атомных реакторах. К таким вариантам относят: урановый металл, урановый диоксид, фторид урана (IV). С учетом конечного получаемого результата разрабатывается конкретная технология добычи рудного урана. Совершенно обязательным условием при осуществлении правильного расчета технологической карты учитывается условие ядерной чистоты урана, который в дальнейшем будет использоваться в атомных реакторах. Для атомных реакторов, как правило, необходимо питание в виде топлива: иногда может потребоваться предел содержания всего  $10^{-6}$ - $10^{-5}$  % масс. Из-за небольших концентраций металлов руд неправильной формы, встречающихся в уране, на них невозможно воздействовать при механическом обогащении и приходится прибегать (в большинстве случаев) к химическому пути извлечения. Исходя из этого, можно сказать, что технологические карты такого типа тесно связаны с химической обработкой и проходят чрезвычайно сложные процессы и этапы.

Разность извлечения зависит только от гидроустановок для этого геотехнологического метода. Например, с обводненностью рудника проектировка не занимает длительное время на разработку построения комплексов на месторождениях и потерей времени на возведение различных сооружений по очистке сточных вод (потому что они отсутствуют). Таким образом, подземное выщелачивание соответствует тем технологиям добычи полезных ископаемых, которые не наносят сокрушительный ущерб окружающей среде.

С целью эффективного метода добычи подземного выщелачивания большое внимание уделяется на планирование системы скважин, которые должны быть подсчитаны по всем параметрам, в совокупности состоящих из: физико-механических, гидрогеологических, технологических, геотехнических характеристик. Параметры технологического типа зависят от насыщенности и скопления концентратов в растворах для выщелачивания, присутствие в них окислителя в зависимости от степени репродукции урана, система технологических схем подземного выщелачивания и состав численности проектирования скважин.

К числу главных технологических показателей качества минерального сырьевого состава урана следует отнести:

- 1) Химическая структура неметаллических элементов;
- 2) Консистенция обогащенной массы;
- 3) Объем мелких частиц урана.

Химическая структура горного слоя урана делятся на несколько категорий:

- а) химического силиката, включающий в себя силикатные микроэлементы;
- б) углеродистые, включающие свыше 15% карбонатных компонентов;
- в) закись железа, которые относятся к числу сложносоставных железоурановых руд;
- г) сульфидные, имеющие концентрацию сульфидных элементов в объеме выше 20%;
- д) фосфатные, с содержанием в них  $P_2O_5$  в количестве больше 8%, и другие.

Идеальным раствором для метода ПВ является тот, который окисляет уран, обеспечивает его комплексность, чтобы сохранить его в растворе, и слабо влияет на бесплодную горную породу. К сожалению, ни один вид щелочи не является полностью инертен к другим минералам, обычно связанным с осадочными остатками урановых месторождений. Многочисленные химические взаимодействия возможны между выщелачивающей смесью и ураном, связанными с ним вторичными минералами. Следовательно, окислители и их концентрации должны быть адаптированы к каждому минеральному содержанию, чтобы обеспечить максимальное извлечение урана при минимизации нежелательных вторичных реакции [6].

В качестве гидрологического типа основополагающими параметрами будут: потенциометрический уровень горизонта вод, напорного уровня при их вскрытии с помощью буровых траншей. При подборе должных гидрологических параметров, будут спланированы и спроектированы обсадные колонны для их дальнейшего использования в конструкционных скважинах, насосных станций и скважин фильтрации. Последствия, вызванные выделением большого количества объема воды, которые могут возникнуть при подземном выщелачивании, включает выбросы выщелачивающих растворов во время закачки и естественную миграцию остальных выщелачивающих веществ и других подземных вод, затронутых скважинами после прекращения ведения работ [7].

Равным образом значительной свойственностью является геотехническая часть, в которой огромная роль отводится к устойчивости грунта и рельефной зоны, обводненность территорий, где проводятся обслуживающие работы по бурению скважинных ям [8].

В физико-механических характеристиках сведения во многом зависят от породы горной местности, их посадке и обваливанию верхнего слоя каменистых залежей для дальнейшей выборки нужного химреагента, подбора конкретной буровой установки и ее настройка режимов [9].

На практике же возможны трехмерные модели гексагональной (шестиугольной) формы с закачными скважинами на конце углов, в середине которой одна откачная скважина. Это трехмерная модель может работать как в

традиционном режиме, так и в реверсивном: закачные скважины введут работу принципу откачных скважин, и наоборот. На рисунке представлена схема процесса выщелачивания в шестиугольной форме ячеек.

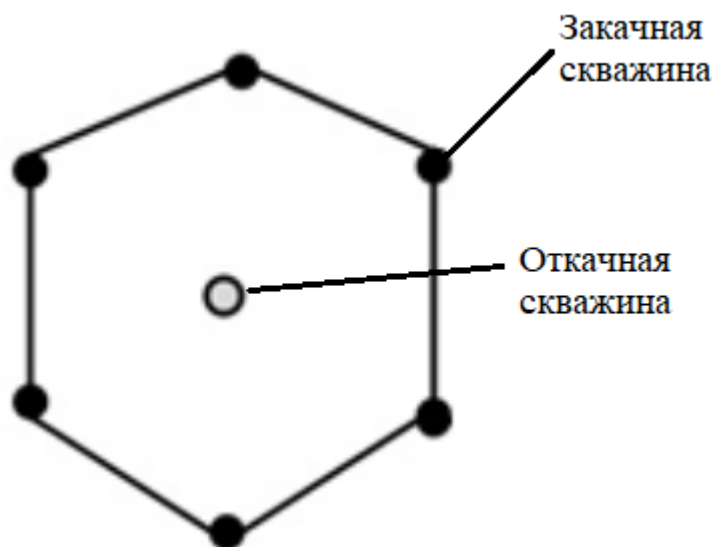


Рисунок 1.2 - Схема процесса выщелачивания в шестиугольной форме ячеек.

Последующее развитие выщелачивающих добыч приобрело необъятные масштабы, которые могли обойти традиционные способы получения подземных залежей. По опыту специалистов в этой сфере, они выделили несколько превосходств подземного скважинного выщелачивания:

- снижение материальных затрат на крупные традиционные конструкции производств в несколько раз, вследствие чего снижение потери на время постройки производств и гидроустановок;
- облегченные сооружения и установки;
- автоматизированную систему, за которой нужен тотальный контроль и, соответственно, облегчение человеческого труда;
- сниженная рыночная цена обработанного урана в несколько раз, включая того добытого урана, который расположился в неблагоприятных и труднодоступных условиях;
- способность проводить трудовую деятельность на местах со скоплениями подземных вод и другими сложными для геологического типа, содержащие гидрологические признаки, месторождениях;
- уменьшение числа потери природного урана при его извлечении;
- сохранение окружающей среды и природных комплексов;
- безопасное извлечение урана путем прокладывания буровых скважин с наружной стороны земли.

Вопреки этим превосходствам, обеспечивающее удобную систему, скважинное подземное выщелачивание является очень трудоемким, если очень подробно описывать ее. Этот порядок охватывает такие акты, как акты



контролирующего надзора за оборудованьями и самим процессом, а также небольшой любви к нестандартным и творческим решениям проблем, исходивших уже с самых начальных этапов производства.

Скорость расхода растворов насосных труб составляет 10–12 м<sup>3</sup>/ч, нагнетательных скважин - 2,5–5 м<sup>3</sup>/ч. Средняя глубина скважины обычно составляет в пределах 600–650 метров, а диаметр - 161 мм. Верхняя часть всасывающих скважин расширена до диаметра 295 мм для размещения глубинных насосов до глубины 115 метров. Конструктивно скважины представляют собой колонну, состоящую из основной опоры, обсадной трубы, щелевого фильтра и отстойника. Устья нагнетательной и всасывающей скважин оборудованы напорными опорами из полиэтилена низкого давления. Эрлифтный насосный способ подъема растворов с использованием погружных насосов обеспечивает необходимым количеством расхода через скважины и дает возможность транспортировки продуктивных растворов к полигону промплощадки. Подача (закачка) промывочных растворов в скважины осуществляется закачными насосами, под давлением 67 атмосфер, от центральной насосной станции. В целом подключение технологических полигонов включает в себя:

- склад серной кислоты, расположенный на промплощадке;
- участковый технологический блок окисления растворов;
- магистральные растворопроводы, насосные трубы, технологические узлы закисления и узлы, принимающие продуктивный раствор;
- диспетчерский или операторский блок.

По большому счету работа геотехнологического блока (площадки) в процессе подземного выщелачивания делится на несколько этапов:

- окисление;
- стадия активного выщелачивания;
- обработка;
- вывод из эксплуатации.

Основная добыча урана осуществляется на стадии активного выщелачивания, которая характеризуется быстрым переходом урана в обогащенный и продуктивный раствор и подачей его в откачные скважины [10].

Сам рудник подземного скважинного выщелачивания состоит из геотехнологических полигонов (полей), а он в свою очередь подразделяется на месторождения минерала. К примеру, Акдалинский геотехнологический полигон, расположенный в Южной части Казахстана в Алматинской области, разделен на четыре урановых месторождения. В него входит: на северном участке "Ближнее (уч.1)", на южном участке - "Летнее (уч.2)", в западной части располагается "Залежь 5у (уч.3)" и "Залежь 2к (уч.4)". В комплекс "Акдала" также входят центральная насосная станция и промежуточные насосные станции, песчаные карьеры для выщелачивания и продуктивные растворы, склады серной кислоты. На рисунке 1.3 представлена технологическая схема Акдалинского геотехнологического полигона:

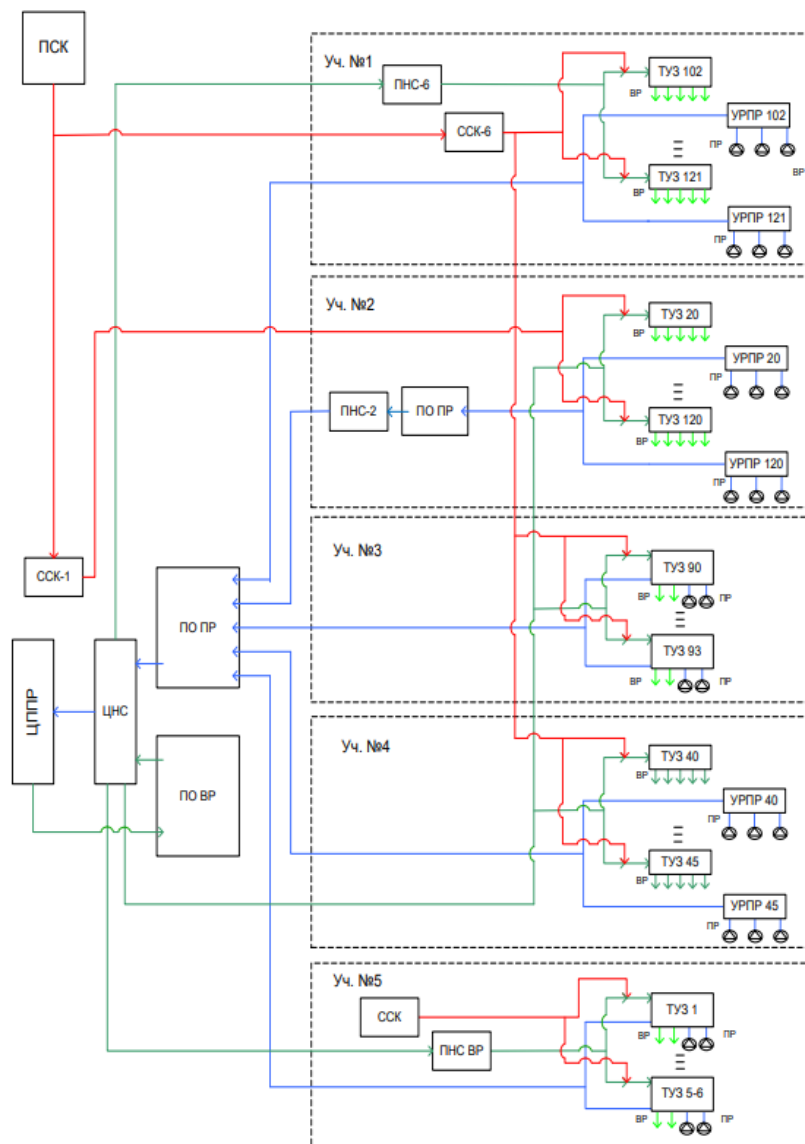


Рисунок 1.3 - Технологическая схема Акдалинского геотехнологического полигона.

Месторождения уранового происхождения содержат в себе неоднозначные параметры руд по геотехнологическим, минеральным, фильтрационным качествам. В частности, работа занимает намного больше времени, потому что нет непосредственного глазного контроля оператора за состоянием и точного нахождения окислителя. Однозначно можно сказать, что дополнительная проверка земельного участка есть неотъемлемая часть разработки систем, сравнивая с той же самой традиционной горной добычей. Продолжительные поиски по исправности этого вопроса были прекращены, когда открылся и получил свой ход внедрения способ кислотного выщелачивания руды. Сравняя примитивную добычу и подземные выщелачивания добычи урана, выделяются основные особенности такого способа:

- минимальные издержки проектирования;

- минимальное использование электричества и спецоборудования;
- сжатие сроков на подготовку разработки и проектирования автоматизированного об;
- получение прибыли за счет инвестирования в проект.

Благодаря тому, что советские ученые смогли вовремя понять концепцию карбонатного или щелочного подземного выщелачивания, это направление получило полноценное развитие и выделило такие плюсы, как:

- получение урана в заметно больших количествах;
- время на затрачивание действий выщелачивания руды относительно низкое;
- получение дополнительного количества продукции;
- хорошее диффундирование растворителя среди горных пород;
- отсутствие необходимости в добавлении дополнительных реагентов, в виде окислителя;
- способность к регенеративному процессу, который дает возможность циклично использовать этот метод.

Говоря о преимуществах кислотного выщелачивания, нельзя забывать о его недостатках:

- использование кислотного содержания растворителей в карбонатном типе руды, будут провоцировать потерей капитала на покупку дополнительного химического оборудования;
- вероятность происхождения закупорок к и засоров (химико-газовые пузыри);
- появление излишек в качестве дополнительных веществ ненужного содержания;
- неизбежная эксплуатация антикоррозионных материалов;
- сопоставляя цену с остальными способами добычи, реагенты, использованные для кислотного выщелачивания, стоят дороже [11].

### **1.3 Современные проблемы разработки системы управления процесса подземного выщелачивания путем математического моделирования**

Для успешного производства необходимо изначально минимизировать неточности, вызванные накладками и неосторожностями в работе специалистов. Для этой отрасли необходима оптимизация стратегии добычи и рационализация использования недр путем разработки эффективных систем управления ПВ. Потенциал применения подземного выщелачивания выстраивает сеть из совокупности гидрогеологических, геологических и остальных выделяющихся своими различающимися географическими показателями. Решительными и ключевыми моментами на рудниках в применении метода ПВ подразделяются на два показателя. Первый и основной показатель ПВ при разработке системы отражается в экономической общности, или же набора связей производств и их дальнейшего развития. На втором плане уже многое будет зависеть насколько же конструирование системы и использование этой же системы эффективно в

исследованиях. Обобщенная конструкция системы ПВ состоит из нескольких подклассов:

- геологическая черта месторождения;
- гидрологическая черта месторождения;
- строительная составляющая рудного тела;
- экономическая часть, связанная с геополитическими признаками;
- инженерно-геологического элемента.

Полная подготовка и разработывание метода ПВ оказывает неоценимую поддержку будущего формирования устойчивого и положительного результата в деле. Путем проб и ошибок при длительной подготовке, в основном, применяя анализ геотехнологической черты месторождения, удастся указать насколько затруднено воздействие системы ПВ. Затрудненность воздействия во многом зависит от гидродинамических показателей техсостояния скважинных отверстий, в точности: их показатель пластового давления, степени заполненности и другие. В случае возникновения непредвиденных (или ранее исследованных) обстоятельств должны приниматься незамедлительные решения следующих сложностей. Осуществив какое-либо регулирующее воздействие, управляющий инженер сможет заметить реакцию системы на это воздействие со значительной временной задержкой и крайне неопределенную картину.

К числу определяемых показателей относятся расход продуктивного раствора из насосных скважин и концентрация в составе урана и прочих компонентов. Операторский функционал для воздействия на процесс также невелик. Этот выбор принципа работы системы скважин позволяет показать расположение и количество скважинных ям, состава реактивного раствора и режима его закачки и откачки. Чаще всего возникают трудности, связанные с кольматацией скважин, другими словами, закупорка пор и проточных трубок раствора с процессом перехода урана в сложно растворимые смеси. Существует и противоположная задача - формирование вымывающих каналов - таких каналов, по которым раствор достигает насосных скважины, не сумев отработать требуемого количества руды. В этих двух вариантах возникает необходимость изменения настройки сети, иногда подключения дополнительных буровых установок для скважин. К этому следует добавить традиционную для горнодобывающей промышленности неполную информацию и ограниченные начальные сведения о состоянии геологической среды. В настоящее время на практике управляющая система автоматического регулирования по обеспечению подземного выщелачивания. Формирование главенствующих вопросов по грамотному распределению потерей от затрат на ресурсы определяет нанятый компанией специалист [12].

Геотехнические промышленные комплексы понимаются как географически разветвленная система нагнетательных и эксплуатационных буровых скважин, территориально связанных с размещением на участке геологических блоков рудника урана, обустроенных емкостями и технологическим оборудованием для приготовления выщелачивающих щелочей, подвода их на рудные пласты для закачки производительных составов. Сложность постановки таких задач заключается в производственном бесперебойном диспетчерском контроле, так

как геотехнологический объект ветвевой конструкции при составлении его производственной схемы нуждается в проведении оперативного наблюдения за состоянием производственных операций и состояниями технических средств, основанного на иерархической трёхступенчатой системе операторной связи и с применением специальных автоматизированных устройств. Если предприятие не обладает автоматизированной системой регистрации и отправки сведений, то на нижестоящем операторном звене персонал осуществляет мониторинг и учет информации об изменениях показателей протекания производственного процесса и производит наблюдение за состоянием оборудования. Наличие большого расстояния между объектами промышленной зоны и длительность геотехнологического процесса затрудняют автоматизированное доведение информации о значениях дебитов выщелачивающих и продуктивных растворов до уровня верхнего звена управления. При этом показатели кислотности и концентрации урана из растворов устанавливаются с помощью проведения химических расчетов, а в дальнейшем их переносят и вносят в ЭВМ, переключенный в ручной режим. Проектирование технологической базы выполняется в соответствии с прогнозируемыми характеристиками резерва урана на месторождениях и с учетом оценки современного качества продуктивных растворов и концентрации урана в них. Рассчитываются соотношения между добычей, обогащением и получением готовой продукции.

#### **1.4 Вывод по разделу**

Независимо от того, что глобальная ресурсная база по урановому роду металлов освоена весьма широко, промышленные компании на сегодняшний день уже испытывают потребность на наличие современных средств автоматизации горнодобывающей отрасли, оптимизации горнопромышленной деятельности, сокращения расходов на добычу металла и, соответственно, увеличения коэффициента эффективности и повышения уровня разумного потребления природных ресурсов.

## 2 Расчетная часть

### 2.1 Принцип работы математического моделирования Comsol Multiphysics

COMSOL Multiphysics — это единое программное обеспечение для всех областей производства и исследований. Программу можно использовать или дополнять функциями, непосредственно предусмотренными в процессе проектирования и моделирования любой комбинации дополнительных модулей для моделирования электромагнетизма, строительной механики, акустики, жидкости, тепловых потоков и химической инженерии. Такое моделирование дает точные результаты. Часто ключом к успешному инженерному моделированию является создание моделей, которые заменяют использование экспериментов и прототипов и обеспечивают глубокое понимание изучаемого проекта или процесса с учетом всех факторов, поскольку среда моделирования очень широка. По сравнению с использованием экспериментальных методов или тестированием прототипов моделирование позволяет быстро, качественно и точно оптимизировать процессы и устройства, так как модель является имитацией объекта. Пользователи COMSOL Multiphysics обычно не ограничиваются программным обеспечением для моделирования и имеют полный контроль над всеми аспектами модели.

Кроме того, это может проявляться в возможности комбинировать между собой любое количество физических явлений и вводить пользовательское описание, демонстрируя творческий подход к процессам, невозможным или гораздо более сложным при использовании классических средств. Специальные многофункциональные модели учитывают широкий спектр возможных условий эксплуатации и физических воздействий. Это позволяет использовать модели для изучения, проектирования и оптимизации процессов и устройств для конкретных условий эксплуатации. Моделирование с помощью COMSOL Multiphysics - моделирование электромагнетизма, структурной механики, акустики, потока жидкости, теплопередачи и химических реакций или возможность переключения между физическими явлениями в системе PDE в единой программной среде. Также возможно объединить физические явления из этих областей в одну модель. Пользовательский интерфейс COMSOL Desktop обеспечивает полную среду моделирования и согласованность от начала до конца, независимо от типа проекта или процесса, который вы хотите проанализировать и разработать. Базовый пакет программного обеспечения предоставляет инструменты геометрического моделирования для создания деталей с использованием твердых тел, поверхностей, кривых и булевых операций. Геометрия определяется последовательностью операций, где каждая операция может получать входные параметры для параметрических исследований в удобных моделях редактирования и анимации. Связь между определением геометрии и определенными физическими предпочтениями полностью ассоциативна — изменение геометрии автоматически распределяет изменения в зависимости от всех параметров модели.

Геометрические объекты, такие как материальные области, могут быть сгруппированы в шаблоны для последующего использования в физических определениях, сетках и графике. Кроме того, последовательность операций может быть использована для создания параметрической геометрической детали, и ее выбор следует учитывать, так как они могут быть сохранены в библиотеке разделов для повторного использования в нескольких моделях. Зависящие от времени и стационарные задачи могут образовывать систему нелинейных, нелинейных уравнений после дискретизации. COMSOL Multiphysics предлагает полностью интегрированную матрицу Якоби, которая представляет собой нелинейное решение для решения, являющегося компасом. Метод вымирания Ньютона — это нелинейное системное решение для стационарных задач или для отчетов, связанных со временем. Затем метод Ньютона решает последовательность систем линейных уравнений, используя матрицу Якоби, чтобы найти решение нелинейной системы. Для линейных задач (также нелинейных) ПО предлагает прямые и итерационные решения с рядом итерационных сетей с современными сетками.

Решения обеспечивают надежность и скорость в итеративном процессе принятия решений. Различные физические интерфейсы также могут предлагать ключевые настройки с предложениями для наилучших возможных настроек по умолчанию. Эти настройки неаппаратные: вы можете изменять и вручную настраивать параметры ключа непосредственно под каждым узлом в пользовательском интерфейсе, чтобы настроить производительность для конкретной задачи. Когда это возможно, сетки и другие вычислительные алгоритмы для использования многоядерных и кластерных вычислений полностью параллельны. Этот метод доступен как для прямых, так и для итерационных решений, а также для больших параметрических циклов. На всех этапах процесса принятия решений могут использоваться параллельные вычисления. Различные виды технических интерфейсов позволяют получить доступ к вариантам выбора оптимальных настроек по умолчанию для решения каждой проблемы. Такие настройки не являются настройками оборудования. При настройке производительности для конкретной задачи вы можете изменить и вручную настроить ключевые параметры непосредственно под каждым сайтом в пользовательском интерфейсе. Решения и другие вычислительные алгоритмы для использования многоядерных и кластерных вычислений должны быть как можно более полностью параллельными, а методы с распределенными параметрами доступны как для прямых и итеративных решений, так и для больших параметрических циклов. Все этапы процесса решения могут предусматривать использование параллельных вычислений [13].

## **2.2 Точность сетки**

Одним из основных вопросов, влияющих на эффективность, является точность сетки. От нее во многом зависит, насколько мелкими должны быть элементы, чтобы на результаты анализа не влияли изменения размера сетки.

Когда речь идет о задании сетки, нет необходимости задавать сетку во всех местах модели. Значения в одной области в соответствии с принципом Сен-Венана не влияют на значения в других областях. Поэтому модель может быть физически уточнена только в определенных областях, представляющих интерес, и может иметь небольшую и точную зону перехода, соответствующую сетке. Существует два типа уточнения (h- и p-уточнение): h-уточнение относится к уменьшению размера элемента, а p-уточнение - к увеличению порядка элемента [14]. Важно различать геометрические воздействия и агрегацию сетки, особенно при использовании вертикальных (или линейных) элементов для создания сетки с криволинейной поверхностью.

### 2.3 Основные уравнения фильтрации рудных тел. Закон Дарси

Закон Дарси — это простая пропорциональная зависимость между мгновенной скоростью потока через пористую среду, вязкостью жидкости и перепадом давления на заданном расстоянии. Песчаные пласты воды происходят на основе течения. Следовательно, применение закона Дарси осуществляется через водоносный слой.

Закон Дарси вместе с уравнением сохранения массы равен уравнению потока подземных вод. Закон Дарси применим к ламинарным потокам в порах фильтрующей среды, и в большинстве случаев, например, в песчаных и суглинистых почвах, имеет место ламинарный поток. Математическая модель однофазного потока в пористой среде описывается следующим уравнением неразрывности:

$$\frac{\partial mp}{\partial t} + \operatorname{div} pu = f(x, t) \quad (2.1)$$

также закон Дарси:

$$u = -k\mu(\operatorname{grad} p + \rho g) \quad (2.2)$$

где  $p$  - давление;

$u$  - скорость фильтрации жидкости в пористой среде;

$k$  - проницаемость пористой среды;

$\mu$  - вязкость жидкости;

$g$  - вектор скорости свободного падения;

$f$  - плотность внутренних потоков.

Подставив закон Дарси (2.2) в уравнение неразрывности (2.1), для следующего давления получим уравнение:

$$\beta \frac{\partial p}{\partial t} - \operatorname{div} \left( \frac{k}{\mu} \operatorname{grad} p \right) = f(x, t) \quad (2.3)$$



где  $\beta$  - объединенная упругость жидкости и коллектора.  
коэффициент.

В вычислительной практике положительную часть решения задач фильтрации можно представить в виде суммы мощностей потоков  $f(x, t)$

$$\frac{\partial p}{\partial t} - \operatorname{div} \left( \frac{k}{\mu} \operatorname{grad} p \right) = \sum_{i=1}^{N_q} q_i(t) \psi_i(x), \quad x \in \Omega, t \in (0, T], \quad (2.4)$$

где  $q_i$  - дебит первой скважины для двумерного условия, дающего точечный приток, а в случае горизонтальной скважины - расход жидкости на единицу площади поверхности первой скважины;

$\psi_i(x)$  - неотрицательная весовая функция;

$N_q$  - количество скважин,  $T > 0$  и  $\Omega \in R^\alpha, \alpha = 2, 3$ .

(2.4) уравнение дополняется соответствующими граничными и начальными условиями:

$$-\frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial n} = 0, \quad x \in \Gamma, t \in (0, T], \quad (2.5)$$

$$p(x, 0) = p_0(x), \quad x \in \Omega, \quad (2.6)$$

где  $\Gamma$  - граница  $\Omega$ ;

$n$  - внешняя нормаль.

Таким образом, необходимо найти функцию  $p(x, t), t \in (0, T], T > 0$ , параболические уравнения, граничные и начальные условия удовлетворяющие (2.5), (2.6) при заданных входных данных  $k, \mu, c, p_0, q_i(t), \psi_i(x), i = 1, 2, \dots, N_q$ . Начально-краевая задача (2.4) - (2.6) является прямой задачей.

Учитывая наличие двух важных стадий процесса выщелачивания, модель выщелачивания естественно следует разделить на следующие элементы:

- модель гидродинамического процесса;
- модель массообмена и кинетика химических взаимодействий. Следует отметить, что гидродинамические условия процесса определяют скорость фильтрации потока раствора и, соответственно, интенсивность обработки коренной породы реагентом, т. е. динамику химического взаимодействия раствора реагента с твердой фазой.

Кроме того, в результате химических взаимодействий вещества растворяются и разлагаются, что изменяет характеристики проницаемости пласта и гидродинамические условия подземного выщелачивания.

При моделировании мы принимаем следующие допущения. Во-первых, в исследовании рассматривается плоская двумерная задача. То есть толщина слоя

невелика, он лежит примерно на одном уровне и равномерен по высоте. Кроме того, рассматривается зона D, включающая все процессы, выбирается достаточно большим, чтобы поток через границу решения был равен (или близок) к нулю. Соответственно режим прокачки раствора должен быть таким же дебетовым, т. е.:

$$\sum_{i=1}^n Qi + \sum_{j=1}^m Qj = 0, \quad (2.7)$$

где  $Qi$  - расход закачки;  
 $Qj$  - дебит насосной скважины.

Сам раствор представляет собой идеальную жидкость (т. е. без внутреннего трения).

Математическая модель проблемы, рассматриваемой в приведенных выше предложениях, выглядит следующим образом:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n Q_{i,j} = 0 \quad (2.8)$$

$$\bar{v} = -\frac{k}{m} \nabla h \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial(mY)}{\partial t} = \rho_b \frac{\partial z}{\partial t} + \bar{v} \nabla(mY) = \text{div}(mD\nabla Y) + \sum QY \quad (2.10)$$

$$\rho_b \frac{\partial z}{\partial t} = \beta \left( Y - \frac{z}{kd} \right) \quad (2.11)$$

где  $P$  — гидродинамическое давление, Н/м<sup>2</sup>;  
 $Y$  - массовая концентрация минерала в растворе, кг/м<sup>3</sup>;  
 $z$  - массовая доля полезного ископаемого в пласте, кг/кг;  
 $k$  - коэффициент фильтрации, м/с;  
 $\bar{v}$  - векторная скорость, м/с;  
 $m$  - пористость слоя;  
 $\rho_b$  - плотность породы, кг/м<sup>3</sup>;  
 $Q$  - расход ( $Q > 0$  - закачка,  $Q < 0$  - откачка);  
 $\beta$  - скорость растворения минералов.

(2.8) - (2.11)- система уравнений: первое - изменение неустойчивости давления, отражающее закачку и откачку, второе - закон Дарси, третье - изменение концентрации металла во времени за счет конвекции, диффузии, источников / начальные и химические реакции, четвертый - изменение концентрации жидкой фазы, изменение концентрации твердой фазы.

Система уравнений (2.8) - (2.11) решается совместно при следующих начально-краевых условиях:

$$P|_{t=0} = P_0, Y|_{t=0} = Y_0, Z|_{t=0} = Z_0, (x, y) \in \Omega, \quad (2.12)$$

$$\left. \frac{\partial P}{\partial n} \right|_{\Gamma} = 0, \left. \frac{\partial Y}{\partial n} \right|_{\Gamma} = 0, t > 0 \quad (2.13)$$

где  $\Omega$  - рассматриваемая площадь;  
 $\Gamma$  - граница этой области;  
 $n$  - направление  $\Gamma$  с коллинеарной нормой.

Коэффициенты диффузии рассчитываются по следующей формуле:

$$\begin{aligned} D_{xx} &= L_L \frac{v_x^2}{|\bar{v}|} + L_T \frac{v_y^2}{|\bar{v}|} + D^*, \\ D_{yy} &= L_L \frac{v_y^2}{|\bar{v}|} + L_T \frac{v_x^2}{|\bar{v}|} + D^*, \\ D_{xy} &= (L_L - L_T) \frac{v_x v_y}{|\bar{v}|} + D^*. \end{aligned} \quad (2.14)$$

где  $L_L, L_T$  — продольная и поперечная дисперсия среды, м;  
 $D^*$  - коэффициент молекулярной диффузии;  
 $v_x, v_y$  - составляющие скорости, м/с;  
 $|\bar{v}|$  - модуль вектора скорости, м/с.

## 2.4 Разработка математической модели в ПО Comsol Multiphysics

Среда COMSOL имеет широкий спектр актуальных многофункциональных задач. В данной работе подземное выщелачивание является актуальной задачей Основным законом, на котором основаны все расчеты, является закон Дарси. Для имитационной модели необходимо учитывать множество различных физических явлений, это увеличивает вычислительную область.

Процесс моделирования начинается с выбора типа модели: 3D, 2D или 1D. Мы используем 2D для сокращения времени обработки и времени расчета результатов.



Рисунок 2.1 - Выбор типа модели.

Затем нужно добавить физику процесса. Преимущество COMSOL в его гибкости, то есть все процессы и физику можно модифицировать в процессе самого моделирования, чтобы не навредить самой модели.

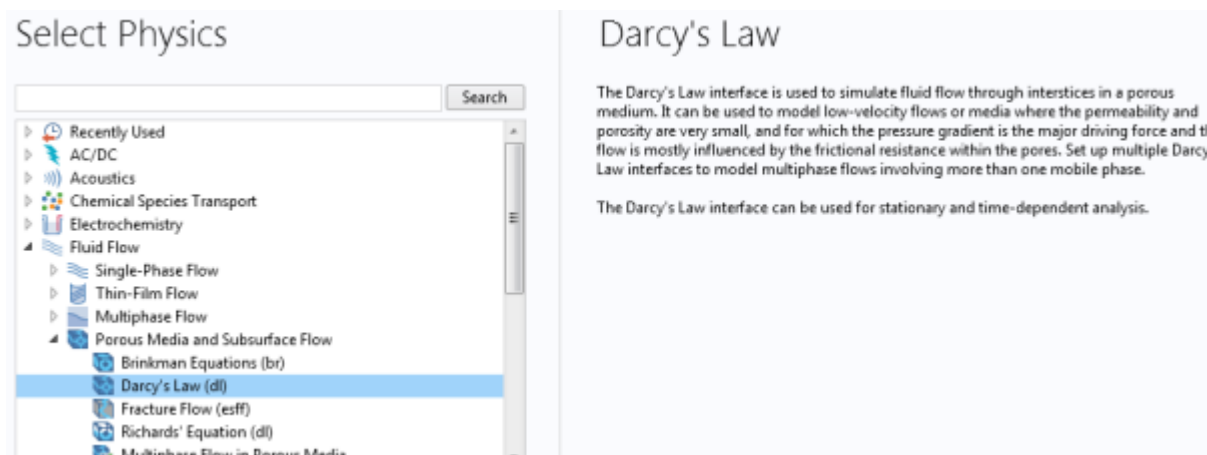


Рисунок 2.2 - Добавление физики модели (Закон Дарси).

Выбираем «Закон Дарси» и нажимаем «Добавить», чтобы добавить в модель физику. Затем выбираем тип «стационарное (stationary)» или «зависящего от времени исследования (time dependent)».

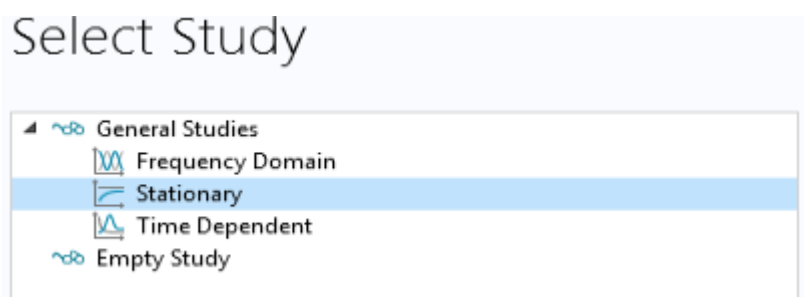


Рисунок 2.3 - Выбор типа исследования.

Происходит эксплуатация скважин подземного выщелачивания  
При этом геометрия упрощена до минимума для быстрых расчетов.

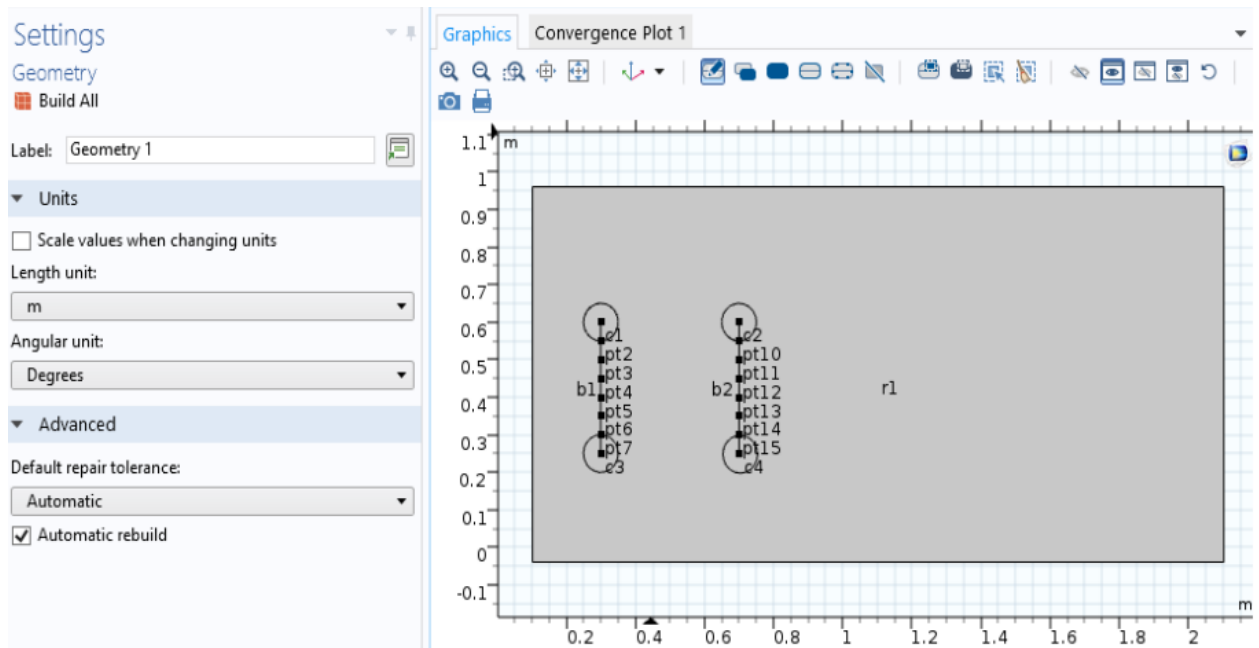


Рисунок 2.4 - Геометрия, имитирующая нагнетательную и откачивающую скважины.

После построения геометрии нужно выбрать материалы. Возможности COMSOL настолько широки, что можно даже добавить недостающий файл в библиотеку материалов, но в нашем случае все материалы доступны.

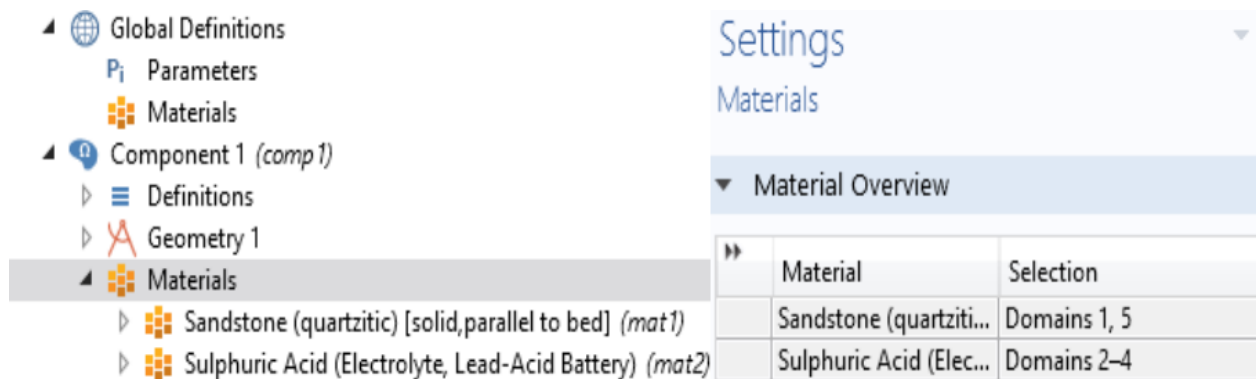


Рисунок 2.5 - Выбор материала для процесса подземного выщелачивания.

Для правильного решения задачи необходимо показать границы объекта в геометрии. Для моделирования были выбраны два материала – серная кислота и песок. Песок напоминает пористую среду, содержащую соединения урана. Тогда необходимо изменить закон Дарси относительно модели. Должны быть включены входные параметры, свойства раствора и пористой среды, а также начальные условия или заданные исходные данные.

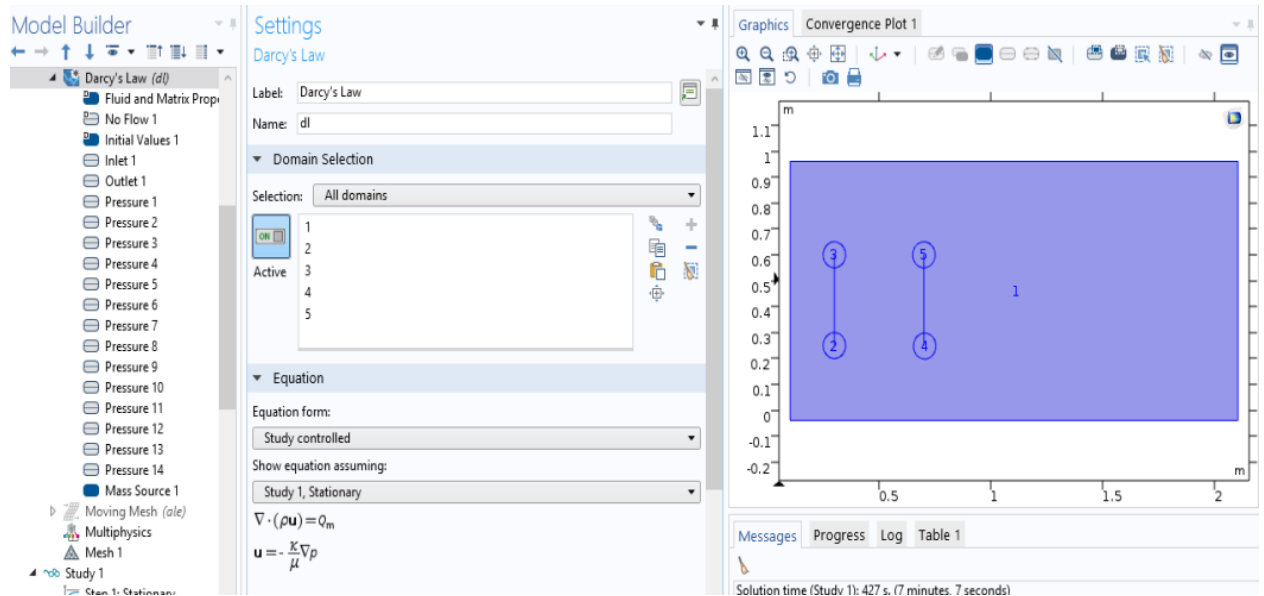


Рисунок 2.6 - Закон Дарси для подземного выщелачивания.

Построение автоматической сетки необходимо для численного решения модели.

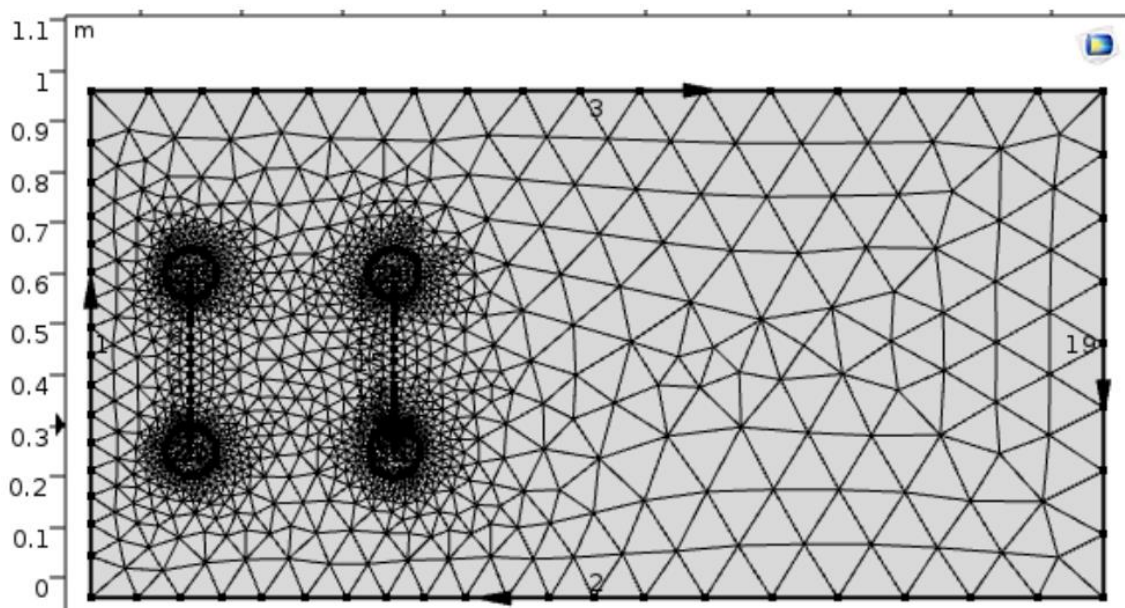


Рисунок 2.7 - Построение автоматической сетки.

При запуске стационарной сетки получаем распределение давления по всей площади шахты. Преимуществом COMSOL также является возможность рисовать график из любой точки всей геометрии, нужно просто выбрать точку или линию и показать ее в виде отдельного графика, что показывает универсальность решения. Чем больше данных в физическом процессе, тем ближе имитационная модель к реальному объекту. В начальных условиях физики показаны значения давления в каждой точке для конкретного решения

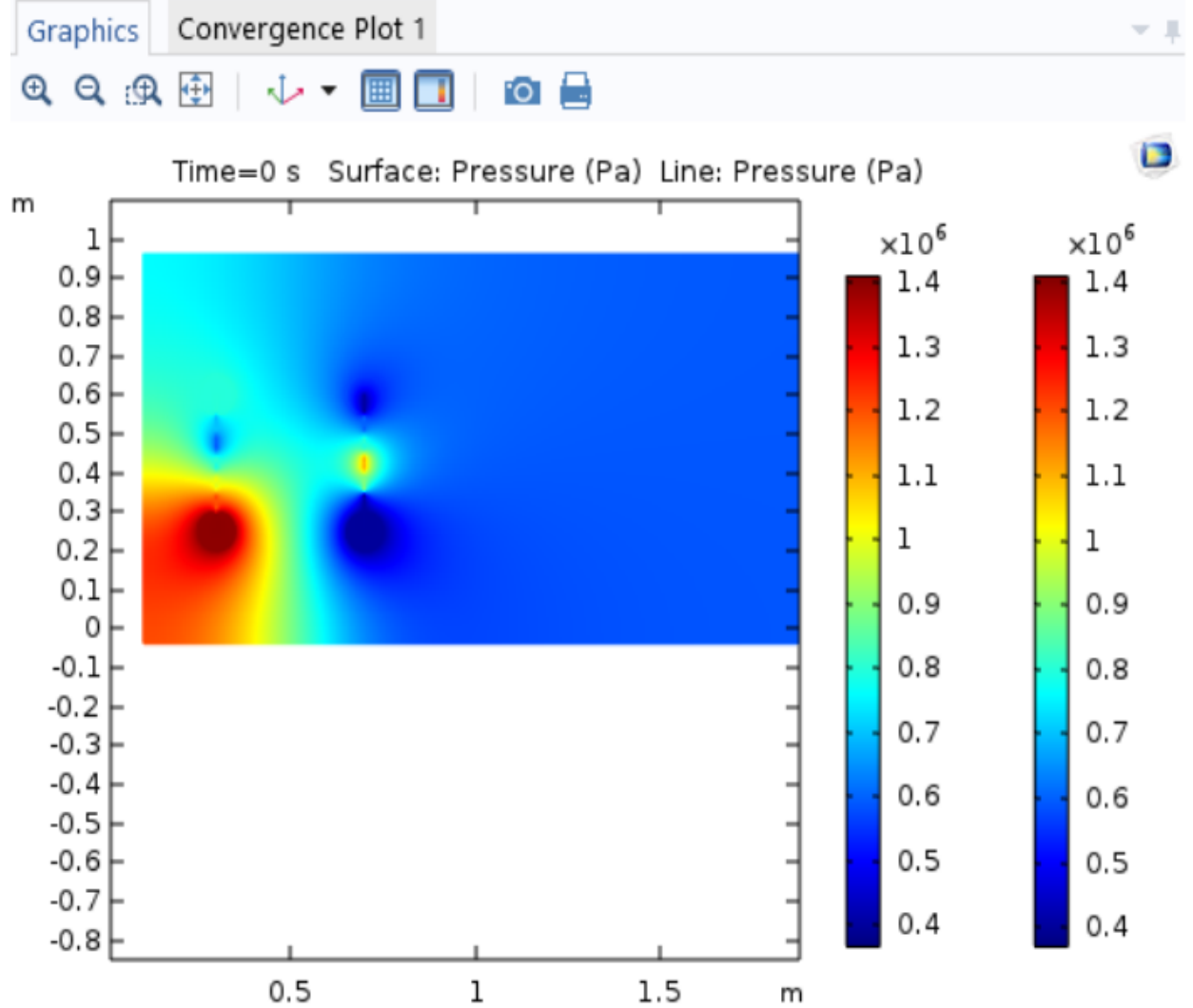


Рисунок 2.8 - Распределение давления.

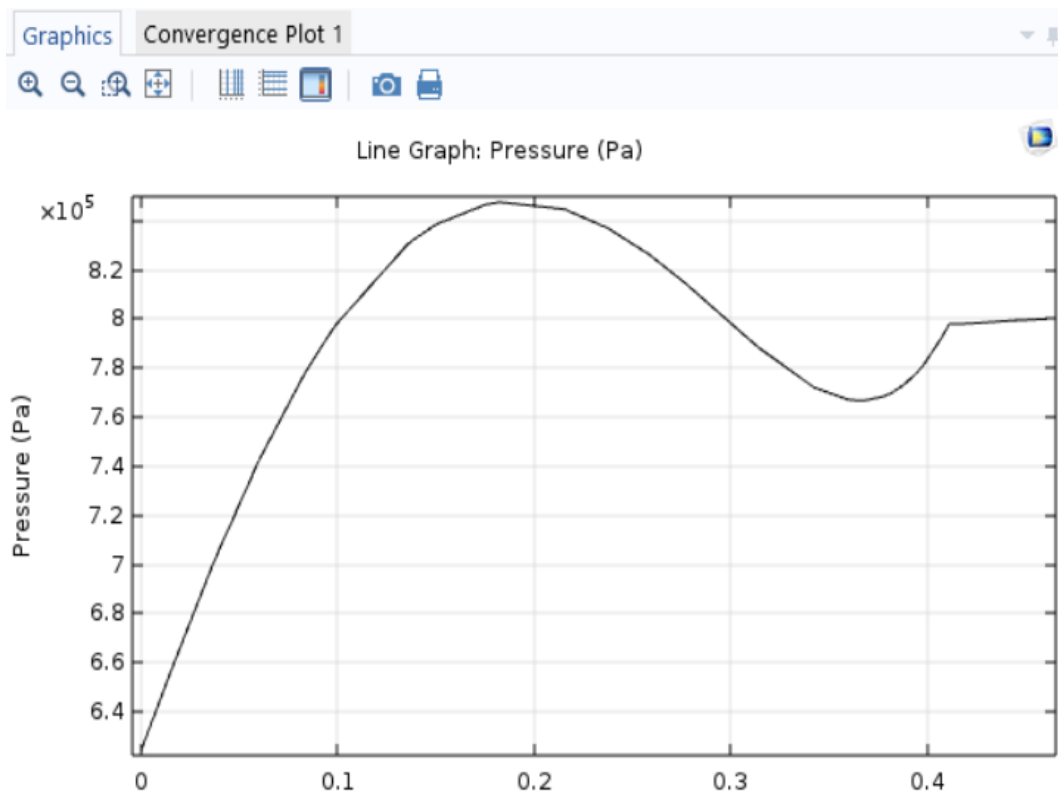
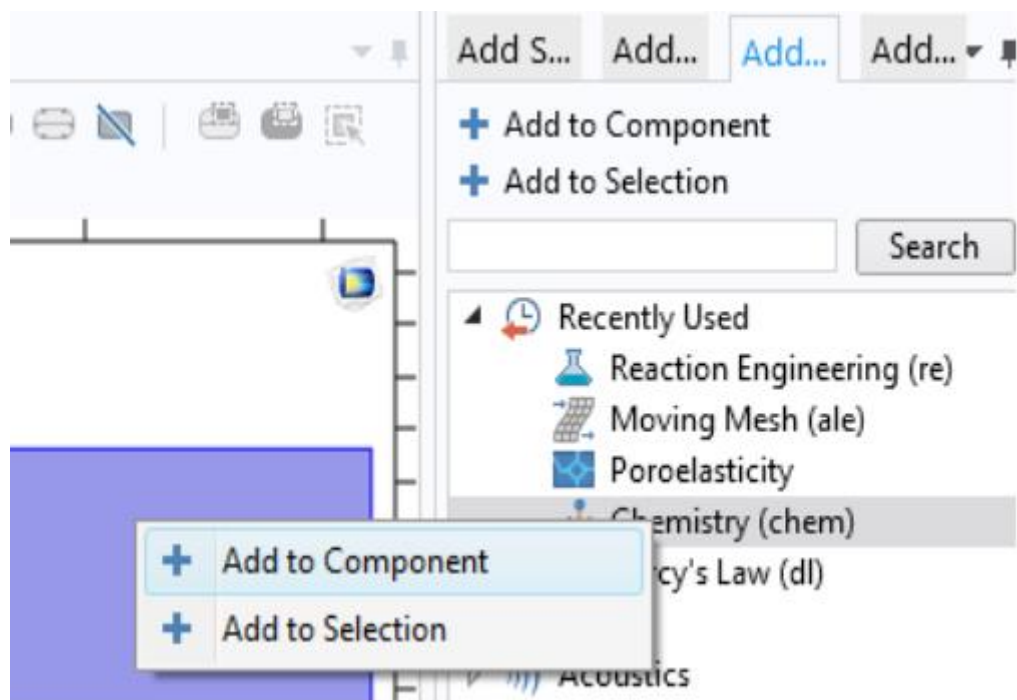


Рисунок 2.9 - График распределения давления.

Анализируя характер подземного выщелачивания, можно сказать, что в него вовлечено множество физических процессов. Выщелачивание невозможно без метаболизма и химических реакций, происходящих при разжижении. Как упоминалось выше, в процессе моделирования могут быть добавлены новые



физики.

Рисунок 2.10 - Добавление химического компонента.



Имеются реакции в свойствах химии. При выщелачивании урана серной кислотой происходит реакция окисления урановых минералов и готового раствора в виде уран-иона:  $UO_3 + H_2SO_4 \rightarrow UO_2SO_4 + H_2O$

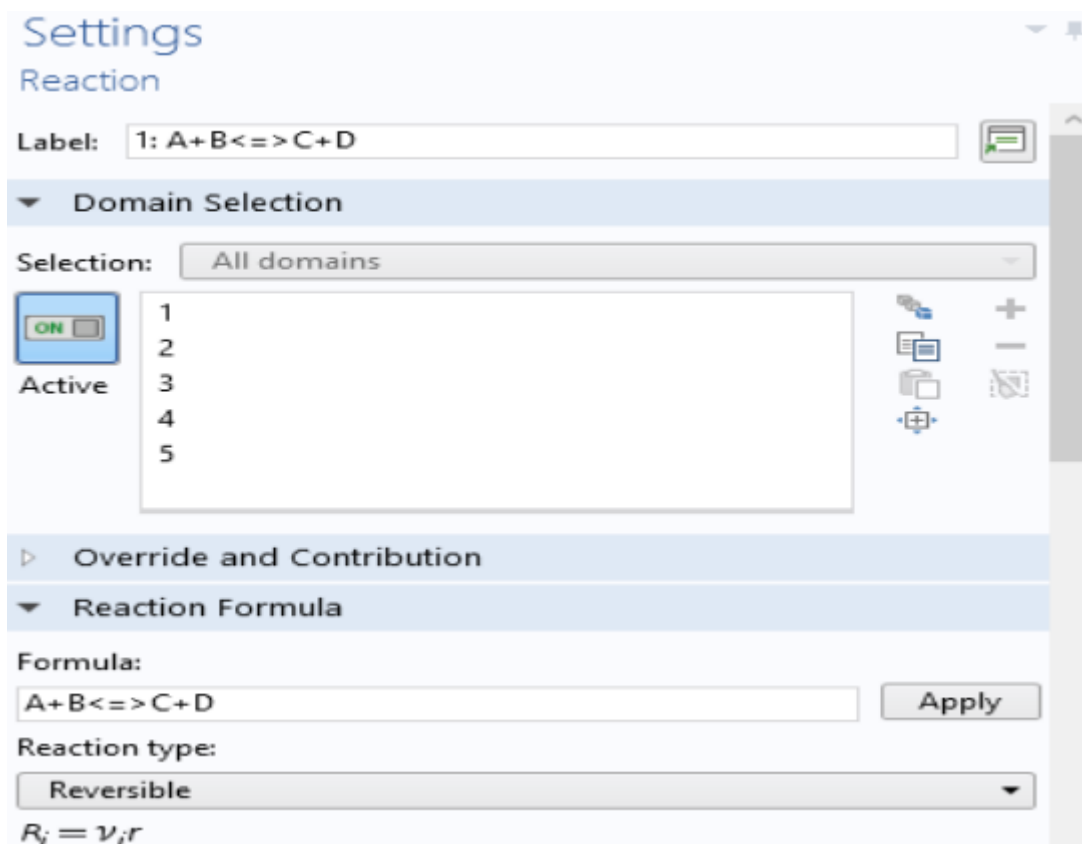


Рисунок 2.11 - Щелочная реакция.

Для каждого вещества, участвующего в реакции необходимо написать описание молярной массы.

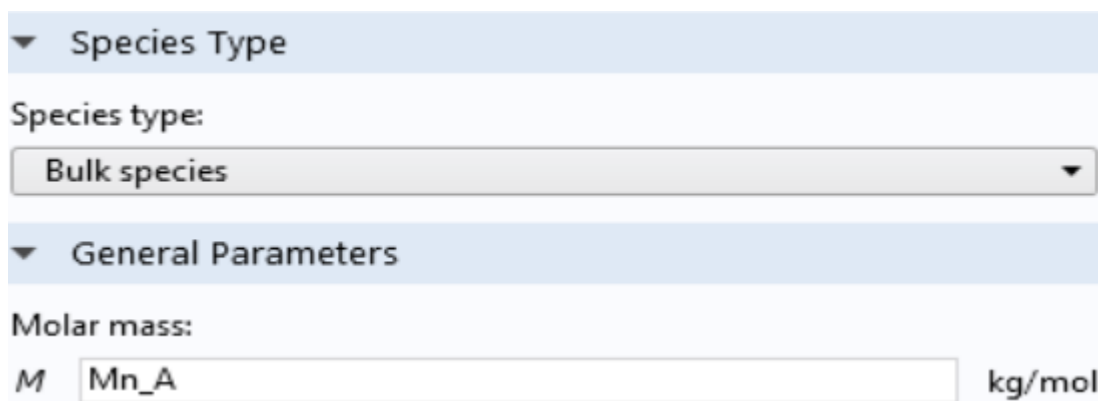


Рисунок 2.12 - Характеристики  $UO_3$ .

Решение химической задачи состоит в том, чтобы распределить концентрацию по всей области, но необходимо указать транспортировку веществ. Для этого выбираем физику транспорта от Diluted Species in Power Media.

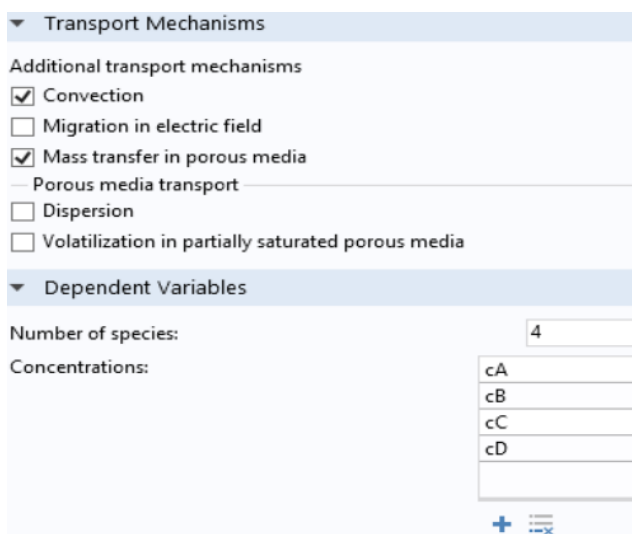


Рисунок 2.13 - Параметры, необходимые для физики.

Четыре зависимых значения концентрации, т. е. каждое вещество, участвующее в реакции концентрации, а также выбор механизма транспорта, т. е. перенос массы в пористой среде. В дополнении необходимо указать все начальные условия для Transport of Diluted Species in Porous Media, концентрации доходов.

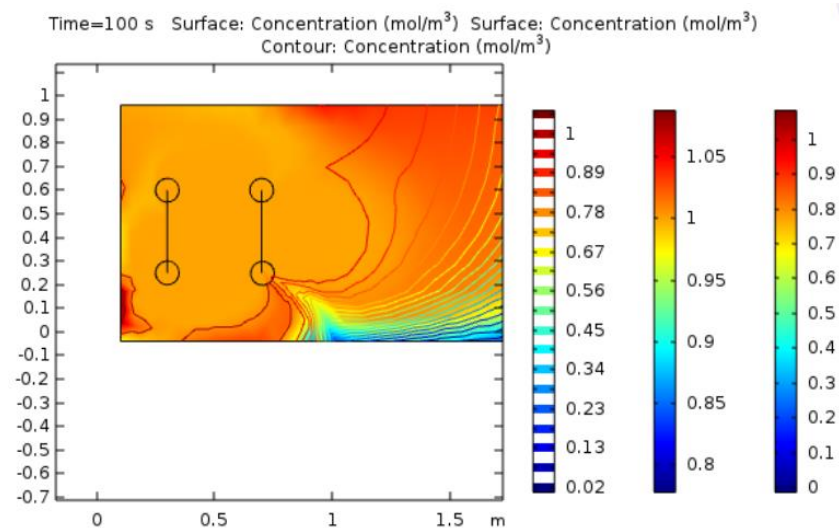


Рисунок 2.14 - Распределение концентрации по всей площади.

На основании данных и экспериментов, полученных в модели, можно определить перепад давления в рудном теле между закачной и откачной скважинами, сопровождающийся расходом выщелачивающего раствора.

Несомненно, следует отметить, что при моделировании контролировался уровень выщелачивающего раствора, что приводило к увеличению готового продукта за счет ограничения концентрации.

## **2.5 Разработка функциональных схем подземного выщелачивания: закачных скважин, откачных скважин (глубинных насосов)**

Подземное выщелачивание находится в недостаточно информативном для наблюдения состоянии, так как весь процесс этого метода находится под поверхностью земной коры и не может должным образом находиться под контролем глаз специалистов. Ее управление координируется, и только благодаря, действиям закачки раствора для выщелачивания в специализированные скважины и откачки продуктивного содержания из регенерированных скважин, в дополнении со скважинами из наблюдательного сектора.

Следовательно, для лучшего результата обязательными действиями будут точное проведение и анализ объекта, а также его детальное моделирование процессов. Все эти процедуры направлены для выборки вида и результативности выщелачивания, дачу прогноза качества добытой руды и подземных вод.

Для этого разработаем эту систему как математическую модель с его описанием. Есть несколько составляющих в построении модели добычании урана путем подземного выщелачивания: добываемое сырье, расположено в высокопроницаемой литосфере (обычно в местах, находящихся возле, или в самом водоносном слое). Уран получают с помощью специализированных скважин (закачных), которые в совокупности представляют собой комплекс блоков рудника. Через эти скважины проходит выщелачивающий раствор, который усиливает продуктивность добываемого урана, растворяя из него все минералы. Далее полученный «продуктивный уран» будет находиться в стадии откачки, однако остаточный маточный раствор имеет повторный вышеописанный комплекс, только в качестве выщелачивающего раствора. Для первоначальной обработки в системе используются растворы, содержащие серную кислоту. Улучшением откачки нужного количества жидкости из скважин и отправки «продуктивного урана» является эксплуатация более скважинных насосов. Закачные скважины служат чтобы выщелачивающий раствор нагнетался (закачивался) в скважины. Насосные трубы контролируются с помощью пульта управления, находящегося у участка, где получают продуктивный раствор урана.

Закачная скважина – скважины, в которых в добываемое сырье добавляется выщелачивающий раствор. Она выглядит как вертикальная труба, с учетом давления жидкости в нем. Закачные скважины рассчитаны на закачку выщелачивающих растворов в продуктивные пласти (1) через фильтрационный

блок (2). Постоянный мониторинг динамического уровня в закачных скважинах проводится с использованием гидростатического уровнемера (3). На устье скважины монтируются расходомер (4) и электроклапан (5) для регулировки потока для проведения измерения расхода выщелачивающего раствора. Обработка измеренных параметров и управление электромагнитным клапаном осуществляется вычислительным устройством или контроллером (6) (Рисунок 2.15)

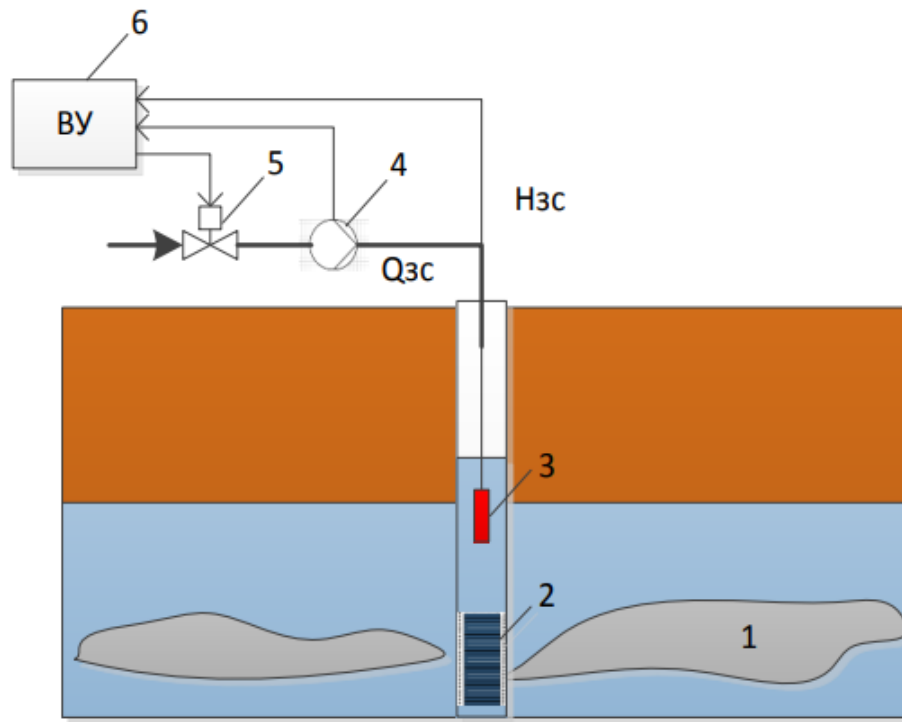


Рисунок 2.15 - Функциональная схема контроля параметров закачных скважин.

Допуская, что высота столба будет равна 9,8 м, давление будет равно 0,01 МПа, модель закачной скважины будет представлена в виде формулы:

$$W \frac{dH_{zc}}{dt} = Q_{zc} - Q_{рт}, \quad (2.15)$$

где  $W$  - емкость закачной скважины ( $m^3$ )

$H_{zc}$  - высота столба выщелачивающего раствора закачной скважины (м);

$Q_{zc}$  - дебит выщелачивающего раствора, попадающего в закачную скважину ( $m^3/ч$ );

$Q_{рт}$  - дебит выщелачивающего раствора, попадающего непосредственно в рудное тело через фильтр ( $m^3/ч$ )

Если дебит, попадающий в закачную скважину, равен дебиту, попадающему в рудное тело ( $Q_{zc} = Q_{рт}$ ), то высота нагнетальной скважины будет устойчивой

$H_k = H_{zc}$ . Тогда давление, создаваемое благодаря нагнетательной скважины при стационарном режиме работы будет:

$$P_{zc} = H_{zc} \rho g \quad (2.16)$$

Учитывая, что остаток резерва нагнетательных скважин вычисляется по формуле:

$$D_{ij} = H_{пред.ij} + H_{zc} ij, \quad (2.17)$$

где  $H_{пред.i}$  – предельная высота в  $i$ -й нагнетательной скважине.

Дебит выщелачивающего раствора при устойчивой высоте в скважине равен дебиту вывода из предфильтровой зоны скважины в рудное тело.

Если нагнетательная скважина работает на одну ячейку, то дебит выщелачивающего раствора рудного тела для каждой ячейки вычисляется по формуле:

$$Q_{рт} = \frac{P_{zc}}{R_i(H_{zc})} \quad (2.18)$$

Для двух ячеек:

$$Q_{рт} = \frac{1}{2} \frac{P_{zc}}{R_i(H_{zc})} \quad (2.19)$$

Для трех ячеек:

$$Q_{рт} = \frac{1}{3} \frac{P_{zc}}{R_i(H_{zc})} \quad (2.20)$$

Расчет гидравлического сопротивления фильтра раствора, попадающего в закачную скважину:

$$R_i(H_{zc}) = b_1 + b_2 H_{zc} + b_3 H_{zc}^2, \quad (2.21)$$

где  $R_i(H_{zc})$  – гидравлическое сопротивление прискважинной зоны.

**Глубинный насос** - в основе его модели заложена расходно-напорная характеристика, формируемая при работе насоса, имеющая следующий вид:

$$\Delta P_{ocl} = a_0 + a_1 Q_{ocl} + a_2 Q_{ocl}^2 + a_3 Q_{ocl}^3, \quad (2.22)$$

где  $\Delta P_{ocl}$  – создаваемое насосом давление (МПа);

$Q_{ocl}$  – дебит жидкости в откачной скважине (м<sup>3</sup>/ч);

$a_0, a_1, a_2, a_3$  – аппроксимирующие коэффициенты;  
 $l$  – нумерация откачной скважины.

В откачных скважинах при откачивании растворов подъем раствора происходит, в основном, с помощью глубинных насосов (3) через фильтрационный блок (2). Главные характеристики и статус насоса контролируется вычислительной машиной или блоком управления (6). Для измерения давления продуктивной жидкости на устье скважины монтируется датчик давления (5), а для измерения расхода - расходомер (4).

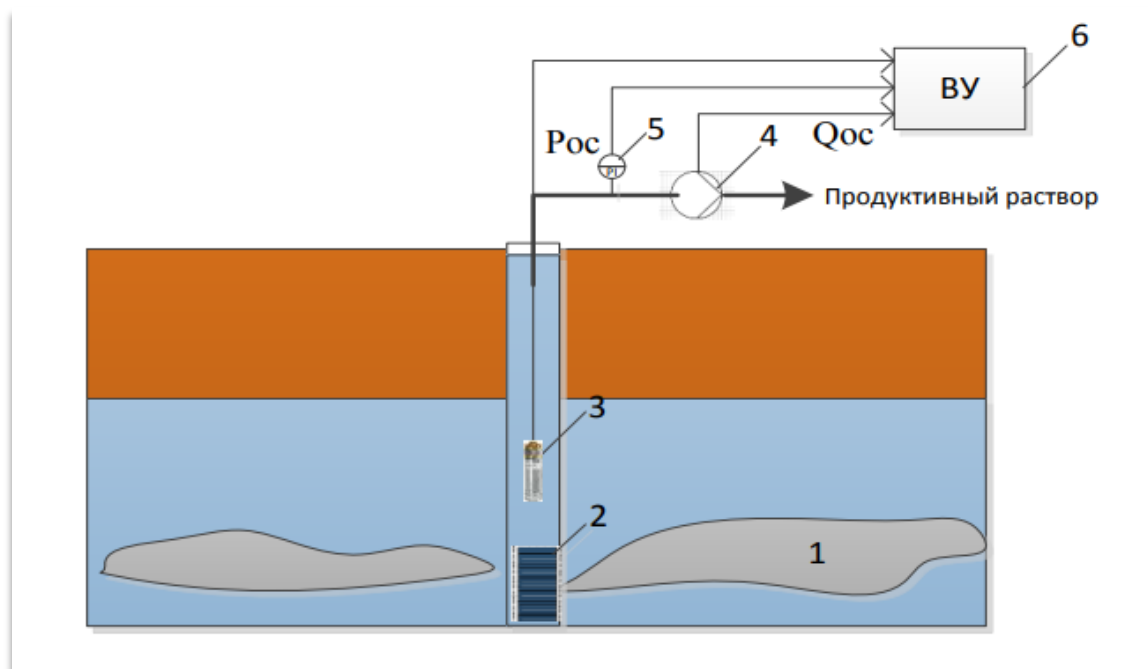


Рисунок 2.16 - Функциональная схема контроля параметров откачных скважин.

Расчет точки равновесия по давлению откачной скважины определяется по формуле:

$$H_{0l} = (P_{стl} + P_{измл}) \frac{1}{\rho g} \quad (2.23)$$

$$P_{стl} = (H_{сквл} + H_{0l}) \rho g \quad (2.24)$$

где  $H_{0l}$ - высота точки равновесия  $l$ -ой откачной скважины (м);  
 $H_{сквл}$ - глубина откачной скважины (м);  
 $P_{измл}$ - давление напора глубинного насоса (МПа);  
 $P_{стl}$ - давление столба-жидкости откачной скважины (МПа).

Расходно-напорная характеристика из паспорта глубинного скважинного насоса, изображенного на рисунке 2.17

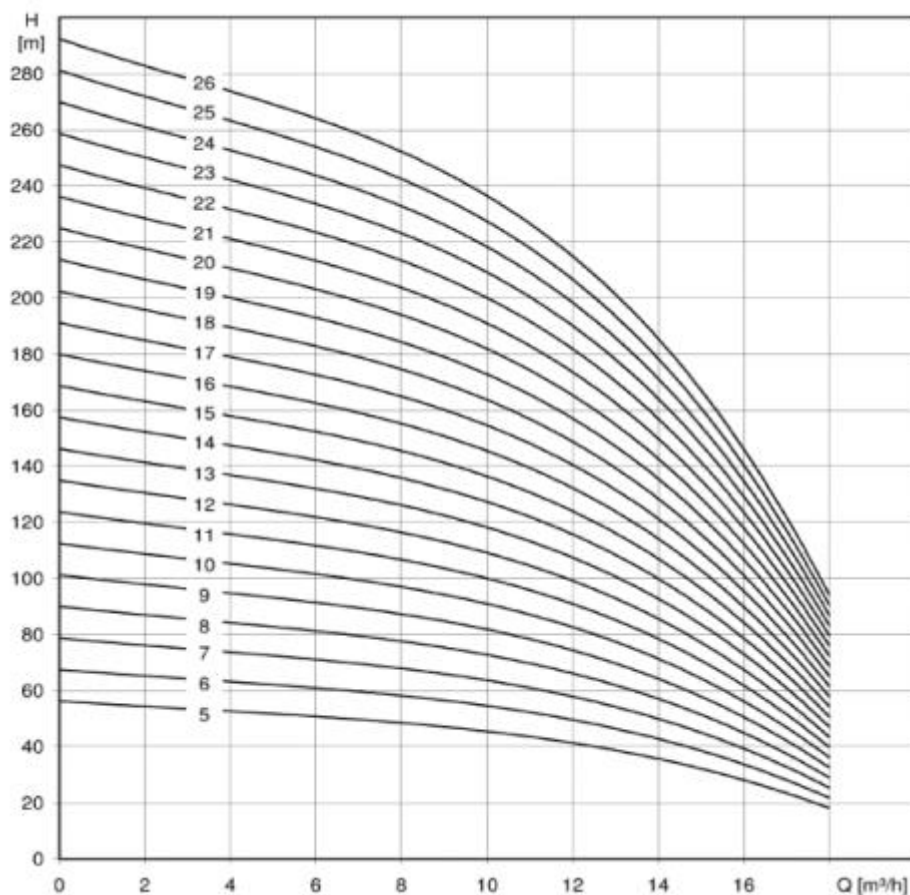


Рисунок 2.17 - Комплекс расходно-напорных характеристик глубинного насоса по паспорту.

## 2.6 Разработка модели технологической схемы подземного выщелачивания

Для проектирования модели откачной скважины нам потребуется напорно-расходная характеристика глубинного насоса и самой откачной скважины.

Подставляя паспортные данные, мы получим давление в виде суммы полиномов:

$$\Delta P_{oc} = 198 - 6.08Q_{oc} + 0.63Q_{oc}^2 - 0.04Q_{oc}^3 \quad (2.25)$$

После введения паспортных данных в код Matlab, мы получаем такие данные, которые вводим в M-file, показанные на рисунке 2.18

```

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

```

Рисунок 2.18 - Код, находящийся в M-file.

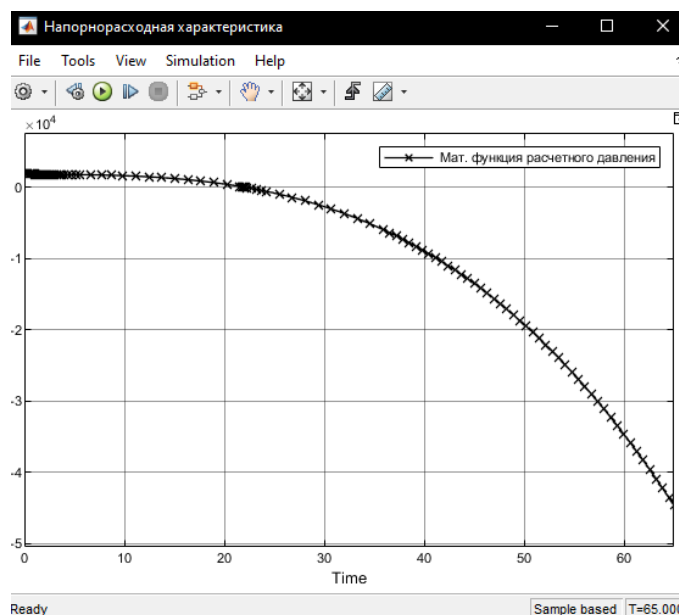


Рисунок 2.19 - Расходно-напорная характеристика глубинного насоса.

При подземном выщелачивании различных металлов все еще не до конца урегулирован вопрос относительно величины давления в нагнетательных скважинах. Получается, что с его повышением дебит скважин увеличивается, однако продуктивность раствора на выходе снижается. При снижении же давления соразмерно падает дебит скважин, при этом концентрация содержания металла из продуктивного раствора увеличивается, зато уменьшается скорость фильтрации раствора и, соответственно, скорость выщелачивания металла. В связи с этим, очевидно, существует оптимальное давление на нагнетательные скважины в соответствии с выбранным критерием. Модель направлена на поиск решения такого требуемого дебита на нагнетательную скважину, который обеспечивает максимальную производительность раствора на выходе.

Модель технологической схемы подземного выщелачивания показано на рисунке 2.19



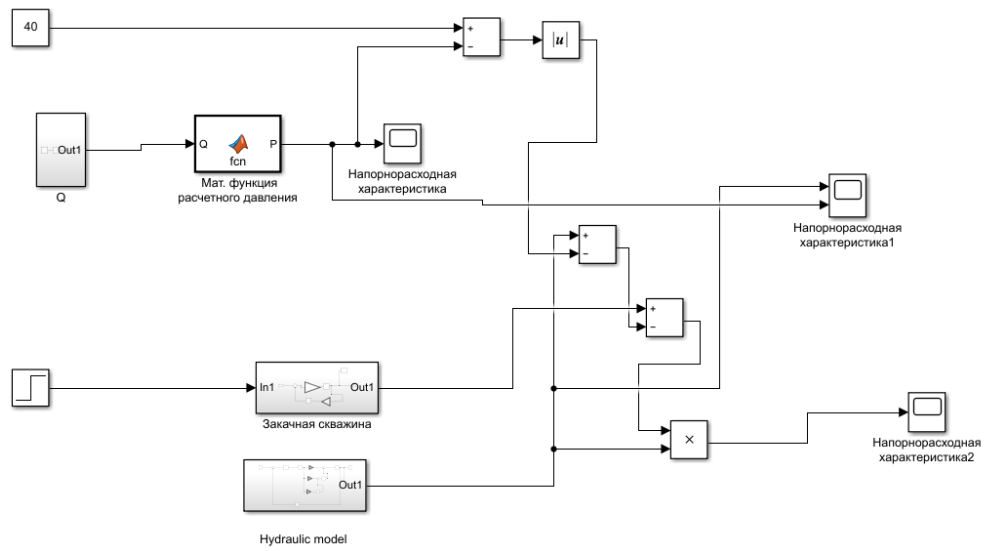


Рисунок 2.19 - Технологическая схема подземного выщелачивания.

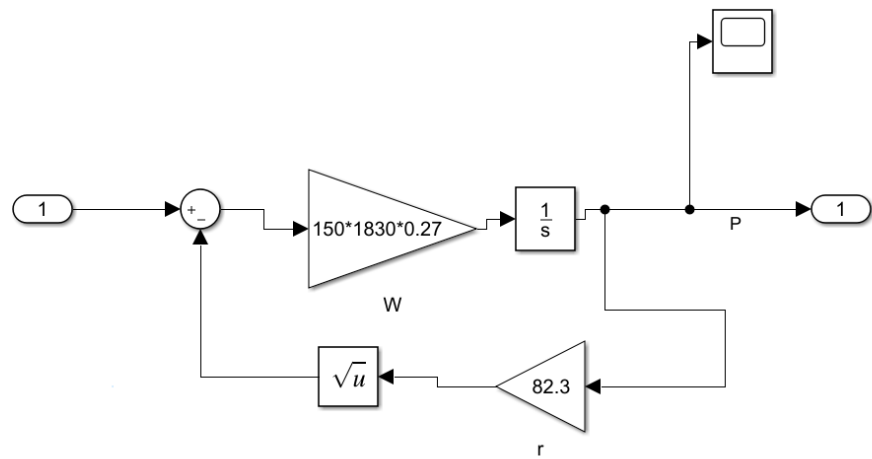


Рисунок 2.20 - Подсистема модели закачной скважины.

Гидравлическая модель - один из наиболее удобных механизмов для управления системой водоснабжения и распределения водоснабжения, позволяющий осуществлять разработку различных вариантов оптимизации, модернизации и повышения эффективности системы водоснабжения, проводить оценку потенциала действующей системы для подключения пользователей при новом проектировании.

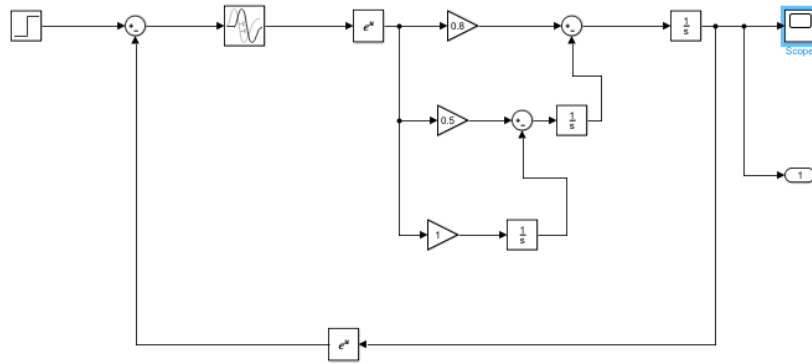


Рисунок 2.21 - Гидравлическая модель.

На рисунке 2.20 показана графики пересечения расходно-напорной характеристики и закачной скважины для оптимальной работы:

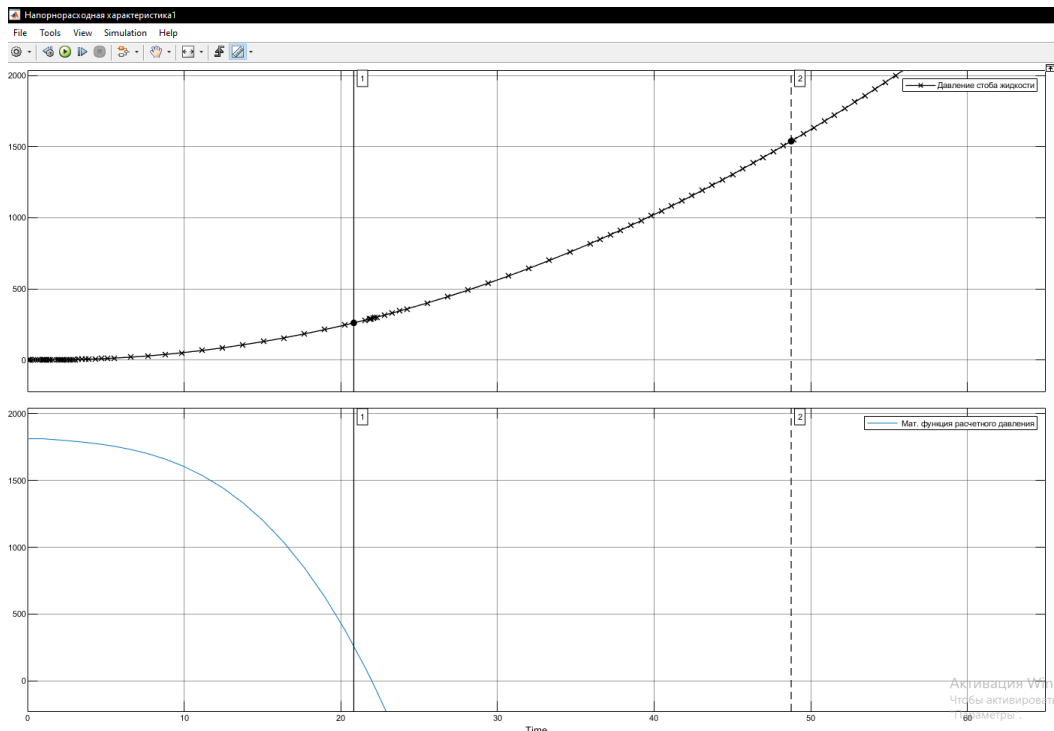


Рисунок 2.22 - График пересечения.

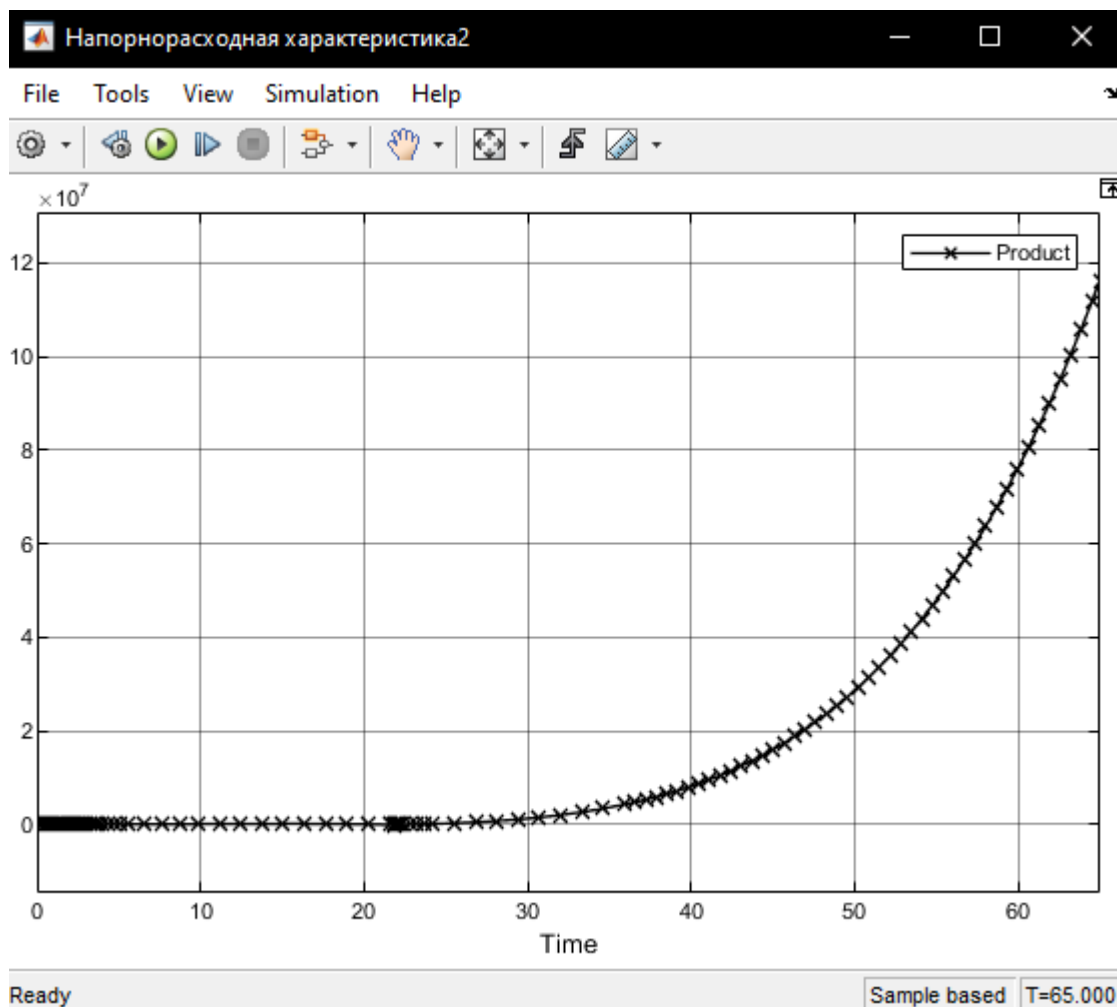


Рисунок 2.22 - Производство моделей ПВ.

## 2.7 Вывод по разделу

В данном разделе были рассмотрены методы прогнозирования выщелачивающего раствора путем моделирования системы в программном обеспечении Comsol Multiphysics и построения и анализа оптимальной работы через программу Matlab. Была осуществлена параметрическая оценка нагнетательной и откачной скважин. Установлены значения зависимости гидродинамического сопротивления активной части скважины от расхода выщелачивающего раствора в нагнетательной скважине. Для определения расходной характеристики закачной скважины разработана технология получения расхода выщелачивающего раствора. Сконструированные математические модели рассмотрены в компьютерной системе MATLAB. Исходя из разработанных математических моделей, раскрыта постановка цели системы управления.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном дипломном проекте были спроектированы модели 2-D и 3-D содержания в программных обеспечениях COMSOL Multiphysics и Matlab. В геотехнологическом поле при добыче полезных ископаемых методом ПВ разрабатывались математические модели, характеризующие процессы извлечения максимального количества полезных ископаемых для выбора оптимального режима эксплуатации скважин и месторождений мониторинга и прогнозирования в процессе эксплуатации. На основе разработанной модели было определено влияние уровня выщелачивающих растворов в нагнетательных скважинах на уровень добычи полезных ископаемых, определены оптимальные колебания давления в рудном теле и распределение выщелачивающего раствора в скважине.

По результатам проделанной работы в можно сделать следующие ключевые выводы:

- разработана структурированные модели системы управления метода подземного выщелачивания для добычи урана;

- по оценке фильтрационных свойств рудного тела процесса подземного выщелачивания разработаны специальные методы;

- выполнена серия численных задач: разработанная модель процесса качественно учитывает все основные закономерности и их динамику позволяет детально изучить и понять практическую важность проницаемости среды и концентрация урана в насыщенном растворе неоднородные полевые условия разбиты на части.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 In situ leaching of uranium: technical, environmental, and economic aspects // IAEA-TECDOC-492. - Vienna, 1989. – P. 7-12
- 2 world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/kazakhstan.aspx
- 3 Каракоцкая И.А. Математическая модель отработки месторождения способом скважинного подземного выщелачивания: дис. ... канд. физ. мат. наук: - Екатеринбург: Уральский государственный университет, 2006. – 143 с.
- 4 Носков М. Д., Добыча урана методами скважинного подземного выщелачивания. - Северск: 2010. – 83 с.
- 5 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.
- 6 А. А. Маслов, Г.В. Каляцкая, Г.Н. Амелина, А.Ю. Водянкин, Н. Б. Егоров Технология Урана: 2007–97 с.
- 7 Сорочан Е. А. Основания, фундаменты и подземные сооружения. – Москва, 1985 – С. 108–109
- 8 Толстов Е. А. Физико-химические геотехнологии освоения месторождений урана и золота в Кызылкумском регионе. – М.: Изд. Московского государственного университета, 1999. – 277 с.
- 9 Manual of acid in situ leach uranium mining technology. – Vienna: IAEA, 2001. – P. 105-122.
- 10 Совершенствование технологии подземного выщелачивания урана из слабопроницаемых руд // X Международная конференция «Новые идеи в науках о земле». -2005.-Т.2. –188с.
- 11 Dutrizac J.E., MacDonald J.C. Ferric ion as a leaching medium. Min.Sci. Eng., Vol. 6, 1974 - P.59–100
- 12 Сытенков В.Н., Наимова Р. Ш. Разработка принципов, приемов и критериев оценки рационального использования техногенных ресурсов. // Горный вестник Узбекистана, №2 2010 г. С. 26–29
- 13 <https://www.comsol.ru/introduction-to-comsol-multiphysics-webinar>
- 14 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.

## ОТЗЫВ

### НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ

На дипломный проект  
(наименование вида работы)

Кабылбаев Еркежан Даулетович  
(Ф.И.О. обучающегося)

5B070200 - «Автоматизация и управление»  
(шифр и наименование специальности)

Тема: «Разработка автоматической системы управления и повышения эффективности функционирования технологических блоков рудника урана»»

Подземное выщелачивание - прогрессивный метод в настоящее время широко применяется при добыче урана. Этот метод за короткое время прошел все стадии исследований, разработки и промышленного внедрения на гидрогенных месторождениях, залегающих в проницаемых осадочных породах депрессионных зон земной коры, где вскрытие и подготовка рудных тел и добыча урана осуществляются через скважины. Уже имеется большой положительный опыт добычи урана методом выщелачивания из труднопроницаемых руд, в которых проницаемость создается искусственным путем предварительного дробления их на месте залегания. Рассматривая метод подземного выщелачивания гидрогенных месторождений проницаемых руд, хотелось бы выделить некоторые важные аспекты, которые оказывают весьма существенное положительное влияние на экономические и экологические условия разработки месторождений урана

За время разработки дипломного проекта Кабылбаев Е.Д. показал себя, выполнял задания самостоятельно и по регламенту. В дипломном проекте смоделировал процесс подземного выщелачивания урана.

Дипломный проект Кабылбаева Еркежана соответствует требованиям и имеет практическую значимость, а Еркежан заслуживает оценки «удовлетворительно» и степень бакалавра по специальности «5B070200- Автоматизация и управление»


**Научный руководитель**

Ассистент-профессор, PhD

( должность, уч. степень, звание)

 Омирбекова Ж.Ж.

(подпись)

« 16 »  2022 г.

**РЕЦЕНЗИЯ**

На дипломную работу  
Кабылбаев Еркежан Даулетович  
5B070200 – Автоматизация и управление

Тема: «Разработка автоматической системы управления и повышения эффективности функционирования технологических блоков рудника урана»

Перед дипломантом ставилась задача разработка автоматической системы управления и повышения эффективности функционирования технологических блоков урана.

В первом разделе данной дипломной работы был рассмотрен способ добычи урана с помощью метода подземного скважинного выщелачивания. Разработав САУ, были выделены конкретные положительные и отрицательные стороны этого такого метода добычи урановых залежей в Казахстане.

Вторая часть дипломной работы посвящена методу прогнозирования с помощью ПО Comsol Multiphysics. Благодаря этой программе была спроектирована и промоделирована комбинация различных дополнительных модулей, выявлена эффективность разработки самой системы управления и в дальнейшем сохранении времени на использование практических и реальных актов.

В третьей части дипломной работы был проанализирован метод процессов с помощью моделирования откачной и закачной скважин, были представлены их функциональные схемы.

В четвертой части дипломной работы показана функциональная модель самих скважин в ПО Matlab.

Графический и текстовый материал оформлен в соответствии с требованиями ГОСТ, предъявляемыми к оформлению учебных работ.

**Оценка работы**

Считаю, что дипломный проект заслуживает оценки «удовлетворительно»

**Рецензент**  
Магистр техники и технологии по специальности РЭТ

Сахимбаев Асхат Саматович



## Протокол

### о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

**Автор:** Кабылбаев Еркежан

**Соавтор (если имеется):**

**Тип работы:** Дипломная работа

**Название работы:** Разработка автоматической системы управления и повышения эффективности функционирования технологических блоков рудника урана

**Научный руководитель:** Жанар Омирбекова

**Коэффициент Подобия 1:** 6

**Коэффициент Подобия 2:** 1.6

**Микропробелы:** 27

**Знаки из других алфавитов:** 33

**Интервалы:** 0

**Белые Знаки:** 0

**После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:**

- Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.
- Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.
- Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.
- Обоснование:

Дата 16.05.22

проверяющий эксперт



## Протокол

### о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

**Автор:** Кабылбаев Еркежан

**Соавтор (если имеется):**

**Тип работы:** Дипломная работа

**Название работы:** Разработка автоматической системы управления и повышения эффективности функционирования технологических блоков рудника урана

**Научный руководитель:** Жанар Омирбекова

**Коэффициент Подобия 1:** 6

**Коэффициент Подобия 2:** 1.6

**Микропробелы:** 27

**Знаки из других алфавитов:** 33

**Интервалы:** 0

**Белые Знаки:** 0

**После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:**

- Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.
- Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.
- Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.
- Обоснование:

Дата 18.05.22

Заведующий кафедрой

