

РЕЦЕНЗИЯ

на дипломную работу
(наименование вида работы)

Иминжанова Амирлана Садиржанұлы
(Ф.И.О. обучающегося)

6B07106 Инженерная механика
(шифр и наименование ОП)

На тему: Расчет баланса кислотности растворов при добыче минералов методом подземного выщелачивания

Выполнено:

- а) графическая часть на 10 листах
б) пояснительная записка на 27 страницах

ЗАМЕЧАНИЯ К РАБОТЕ

В работе Иминжанова А.С. проводится расчет баланса раствора при добыче урана методом подземного выщелачивания, которое подразумевает равенство закачанного и откачанного растворов на участках месторождений. Баланс растворов необходимо соблюдать из экологических соображений, так как при выщелачивании используется водный раствор кислоты и его попадание в грунтовые воды может привести к необратимым последствиям.

На примере трех смежных блоков показано, что методика подсчета баланса, используемая в Казатомпроме, создает дебаланс на смежных блоках при соблюдении общего баланса. Более того, используемая в Казатомпроме методика не учитывает такие важные параметры, как расстояние между скважинами и неоднородность пласта.

Оценка работы

В работе предложено проводить расчет баланса на основе моделирования процесса. Расчеты выполнялись в программе GeoStat, использована модель, описывающая фильтрацию раствора в пласте, на основе законов сохранения массы и Дарси. По значениям дебитов на скважинах, определяется распределение давления в пласте и поле скоростей. Далее, по найденному полю скоростей с использованием метода Поллока строятся линии тока. По разделению линий тока из закачных скважин в смежные блоки откачных можно определить распределение раствора в каждом из блоков. Предложенная методика автоматически учитывает геологическую неоднородность пласта, а также исключает влияние расстояния между скважинами.

Считаю, что Иминжанов А.С. может быть допущен к защите, а дипломная работа «Расчет баланса кислотности растворов при добыче минералов методом подземного выщелачивания» заслуживает оценки А, 90%.

Рецензент

Ст. преподаватель кафедры механики,
(должность, ученая степень, звание)

КазНТУ им. И.И.Фараби РД

Алибаева К.А.
(подпись)
«27» ноября 2023 г.

ОТЗЫВ

НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ

на дипломную работу

(наименование вида работы)

Иминжанова Амирлана Садиржанұлы

(Ф.И.О. обучающегося)

6B07106 Инженерная механика

(шифр и наименование ОП)

Тема: Расчет баланса кислотности растворов при добыче минералов
методом подземного выщелачивания

В работе Иминжанова Амирлана исследуется соблюдение баланса раствора при добыче урана методом подземного выщелачивания, т.е. равенство объемов растворов на закачных и откачных скважинах. Соблюдение баланса растворов является необходимым условием для предотвращения растекания и разубоживания раствора в пласте.

Соблюдение баланса растворов на отдельно работающих блоках месторождения не сопряжено с какими-либо сложностями, в отличии от совместной работы смежных блоков, где необходимо учитывать распределение дебитов смежных скважин по блокам. В работе показано, что при соблюдении баланса нескольких блоков, рассчитанных согласно используемой в Казатомпроме методике, приводит к дебалансу на каждом отдельном блоке.

Амирлан ознакомился с особенностями метода подземного выщелачивания, математической моделью, описывающей фильтрацию раствора под действием сети скважин, и методом Поллока для построения линий тока по заданному полю скоростей. Используя программный продукт GeoStat, Амирлан проводил моделирование процесса фильтрации раствора в смежных блоках, посчитал линии тока раствора в блоках под действием сети скважин.

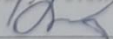
В ходе выполнения дипломной работы проявил самостоятельность, показал достаточный уровень теоретической подготовки, навыки работы с программными продуктами.

Считаю, что дипломная работа Иминжанов А.С. «Расчет баланса кислотности растворов при добыче минералов методом подземного выщелачивания» отвечает всем требованиям, предъявляемым к дипломным работам, и заслуживает оценки А (90%), а ее автор может быть допущен к защите.

Научный руководитель

ассоц.проф., кафедры ИМ, PhD, Dr.Eng.

(должность, уч. степень, звание)



М.С. Тунгатарова

(подпись)

« 8 »

06

2023 г.



Метаданные

Название

Иминжанов А С диплом.docx

Автор

Иминжанов А.С.

Научный руководитель / Эксперт

Мадина Тунгатарова

Подразделение

ИЭиМ

Список возможных попыток манипуляций с текстом

В этом разделе вы найдете информацию, касающуюся текстовых искажений. Эти искажения в тексте могут говорить о ВОЗМОЖНЫХ манипуляциях в тексте. Искажения в тексте могут носить преднамеренный характер, но чаще, характер технических ошибок при конвертации документа и его сохранении, поэтому мы рекомендуем вам подходить к анализу этого модуля со всей долей ответственности. В случае возникновения вопросов, просим обращаться в нашу службу поддержки.

Замена букв	Б	2
Интервалы	A→	0
Микропробелы	␣	13
Белые знаки	␣	0
Парафразы (SmartMarks)	a	32

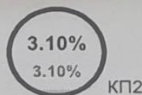
Объем найденных подобиий

Обратите внимание! Высокие значения коэффициентов не означают плагиат. Отчет должен быть проанализирован экспертом.



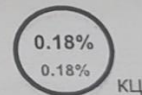
25

Длина фразы для коэффициента подобиия 2



5136

Количество слов



39854

Количество символов

Подобия по списку источников

Просмотрите список и проанализируйте, в особенности, те фрагменты, которые превышают КП №2 (выделенные жирным шрифтом). Используйте ссылку «Обозначить фрагмент» и обратите внимание на то, являются ли выделенные фрагменты повторяющимися короткими фразами, разбросанными в документе (совпадающие сходства), многочисленными короткими фразами расположенные рядом друг с другом (парафразирование) или обширными фрагментами без указания источника ("криптоцитаты").

10 самых длинных фраз

Цвет текста

ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	НАЗВАНИЕ И АДРЕС ИСТОЧНИКА URL (НАЗВАНИЕ БАЗЫ)	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)	Цвет текста
1	Numerical simulation of aquifer thermal energy storage using surface-based geologic modelling and dynamic mesh optimisation Jacquemyn, C., Regnier, G., Jackson, M. D., Salinas, P.;	44	0.86 %
2	https://journal.neark.kz/wp-content/uploads/pdf/2022-4/17-%D0%9C%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D0%BA%D0%B0%20%D0%BE%D0%BF%D1%80%D0%B5%D0%B4%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F%20%D0%B1%D0%B0%D0%BB%D0%B0%D0%BD%D1%81%D0%B0%20%D1%80%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%B2.pdf	30	0.58 %
3	http://www.myshared.ru/slide/982218/	30	0.58 %

4	Parallel Finite Volume Code for Plasma with Unstructured Adaptive Mesh Refinement Souhail Maazioui,Imad Kissami,Fayssal Benkhaldoun;	28	0.55 %
5	https://journal.neark.kz/wp-content/uploads/pdf/2022-4/17-%D0%9C%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D0%BA%D0%B0%20%D0%BE%D0%BF%D1%80%D0%B5%D0%B4%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F%20%D0%B1%D0%B0%D0%BB%D0%B0%D0%BD%D1%81%D0%B0%20%D1%80%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%B2.pdf	27	0.53 %
6	https://journal.neark.kz/wp-content/uploads/pdf/2022-4/17-%D0%9C%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D0%BA%D0%B0%20%D0%BE%D0%BF%D1%80%D0%B5%D0%B4%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F%20%D0%B1%D0%B0%D0%BB%D0%B0%D0%BD%D1%81%D0%B0%20%D1%80%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%B2.pdf	22	0.43 %
7	http://www.dslib.net/mat-modelirovanie/gidrodinamicheskoe-modelirovanie-plastovyh-sistem-na-osnove-metoda-linij-toka.html	20	0.39 %
8	https://journal.neark.kz/wp-content/uploads/pdf/2022-4/17-%D0%9C%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D0%BA%D0%B0%20%D0%BE%D0%BF%D1%80%D0%B5%D0%B4%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F%20%D0%B1%D0%B0%D0%BB%D0%B0%D0%BD%D1%81%D0%B0%20%D1%80%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%B2.pdf	19	0.37 %
9	https://journal.neark.kz/wp-content/uploads/pdf/2022-4/17-%D0%9C%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D0%BA%D0%B0%20%D0%BE%D0%BF%D1%80%D0%B5%D0%B4%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F%20%D0%B1%D0%B0%D0%BB%D0%B0%D0%BD%D1%81%D0%B0%20%D1%80%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%B2.pdf	18	0.35 %
10	http://www.dslib.net/mat-modelirovanie/gidrodinamicheskoe-modelirovanie-plastovyh-sistem-na-osnove-metoda-linij-toka.html	17	0.33 %

из базы данных RefBooks (1.79 %)

ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	НАЗВАНИЕ	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)	
Источник: Paperity			
1	Numerical simulation of aquifer thermal energy storage using surface-based geologic modelling and dynamic mesh optimisation Jacquemy, C.,Regnier, G., Jackson, M. D., Salinas, P.;	59 (2)	1.15 %
2	Use of underground space for the storage of selected gases (CH 4 , H 2 , and CO 2) – possible conflicts of interest Barbara Ullasz-Misiak,Radosław Tarkowski;	5 (1)	0.10 %
Источник: https://arxiv.org/			
1	Parallel Finite Volume Code for Plasma with Unstructured Adaptive Mesh Refinement Souhail Maazioui,Imad Kissami,Fayssal Benkhaldoun;	28 (1)	0.55 %

из домашней базы данных (0.00 %)

ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	НАЗВАНИЕ	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)
------------------	----------	---

из программы обмена базами данных (0.00 %)

ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	НАЗВАНИЕ	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)
------------------	----------	---

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный
исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева»

Институт Энергетики и машиностроения

Кафедра Инженерной механики

Иминжанов Амирлан Садиржанулы

Расчет баланса кислотности растворов при добычи минералов методом
подземного выщелачивания

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

Специальность 6В07106 – Инженерная механика

Алматы 2023

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

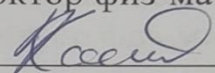
Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный
исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева»

Институт Энергетики и машиностроения

Кафедра Инженерной механики

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой
Инженерной механики,
доктор физ-мат. наук, проф.

 А. Калтаев

" 07 " июня 2023 г.

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

На тему: «Расчет баланса кислотности растворов при добычи минералов
методом подземного выщелачивания»

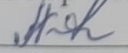
6B07106 – Инженерная механика

Выполнил

Иминжанов А. С.

Рецензент

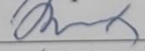
доктор Ph.D., ст. преподаватель

 К.А. Алибаева
(подпись)

« 07 » июня 2023 г.

Научный руководитель

доктор Ph.D., ассоц. профессор

 М.С. Тунгатарова
(подпись)

« 07 » июня 2023 г.

Алматы 2023

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный
исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева»

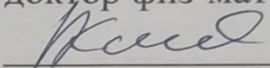
Институт энергетики и машиностроения

Кафедра инженерной механики

6B07106 – Инженерная механика

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой
Инженерной механики,
доктор физ-мат. наук, проф.

 А. Калтаев

" 07 " июня 2023 г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение дипломного проекта

Обучающемуся Иминжанову Амирлану Садиржанулы

Тема: «Расчет баланса кислотности растворов при добычи минералов
методом подземного выщелачивания».

Утверждена приказом № 408-П/Θ от 23.11.2022 г.

Срок сдачи законченной работы: « 07 » июня 2023 г.

Исходные данные дипломного проекта: Расчет баланса растворов при
добычи минералов методом ПСВ, с использованием методом линий тока

Краткое содержание дипломной работы:

а) Введение. Актуальность исследования;

б) Математическая на основе закона Дарси и метода Поллока;

в) Метод линий тока

г) Расчет баланса растворов трех смежных блоков в программе GeoStat.

Перечень графического материала: представлены 15 слайдов презентации
работы

Рекомендуемая основная литература: из 10 наименований

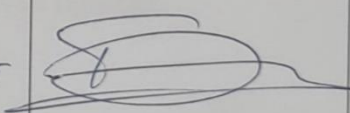
ГРАФИК

подготовки дипломного работы

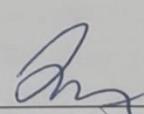
Наименования разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Введение. Актуальность исследования	70.04.2023-19.04.2023	
Математическая на основе закона Дарси и метода Поллока	20.04.2023-23.04.2023	
Метод линий тока	25.04.2023-30.04.2023	
Расчет баланса растворов трех смежных блоков в программе GeoStat.	14.05.2023- 30.05.2023	
Анализ полученных результатов, оформление работы	01.06.2023-04.06.2023	

Подписи

консультантов и нормоконтролера на законченный дипломный проект с указанием относящихся к ним разделов проекта

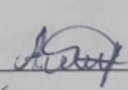
Наименования разделов	Консультанты, И.О.Ф (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Нормоконтролер	Бекенов Е.Т., канд. техн. наук, ассоц. профессор	06.06.23г	

Научный руководитель


(подпись)

Тунгатарова М. С.

Задание принял к исполнению обучающийся


(подпись)

Иминжанов А. С

Дата

« 07 » июня 2023 г.

АННОТАЦИЯ

Дипломная работа посвящена проблеме расчета баланса растворов при подземном выщелачивании. В работе рассмотрены основные технологии и процессы, связанные с подземным выщелачиванием, и подчеркнута важность точного расчета баланса растворов для оптимизации процесса и снижения экономических и экологических рисков. В дипломной работе представлен метод расчета баланса растворов, основанный на использовании линий тока, который учитывает неоднородность пласта и расстояния между скважинами. В работе подробно описывается математическая модель, основанная на законах сохранения массы, Дарси и метода Поллока, и проводится анализ влияния ключевых параметров на процесс выщелачивания.

АНДАТПА

Дипломдық жұмыс жер асты шаймалау кезінде ерітінділердің балансын есептеу мәселесіне арналған. Жұмыста жер асты шаймалауға байланысты негізгі технологиялар мен процестер қарастырылып, процесті оңтайландыру және экономикалық және экологиялық тәуекелдерді азайту үшін ерітінділер балансын дәл есептеудің маңыздылығы атап өтілді. Дипломдық жұмыстың қабаттың гетерогенділігі мен ұңғымалар арасындағы қашықтықты ескеретін ток желілерін пайдалануға негізделген ерітінділер балансын есептеу әдісі келтірілген. Жұмыста массаның сақталу заңдарына, Дарсиге және Поллок әдісіне негізделген математикалық модель егжей-тегжейлі сипатталған және шаймалау процесіне негізгі параметрлердің әсерін талдау жүргізіледі.

ABSTRACT

This thesis deals with the problem of calculating solution balances for in-situ leaching. It examines the basic technologies and processes involved in in-situ leaching and highlights the importance of accurate solution balance calculations to optimise the process and reduce economic and environmental risks. The thesis presents a solution balance calculation method based on the use of current lines, which takes into account the heterogeneity of the reservoir and the distance between wells. The paper details a mathematical model based on the laws of conservation of mass, Darcy and Pollock's method and analyses the influence of key parameters on the leaching process.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	11
1 Обзор метода ПСВ, текущие подходы	12
1.1 Актуальность исследования	12
1.2 Основная проблема	14
1.3 Методика подсчета баланса растворов, используемая в Казатомпроме.	16
2 Развитие и применение математической модели для подземного выщелачивания.....	18
2.1 Описание математической модели.....	18
2.2 Учёт неоднородности пласта, расстояний между скважинами и других характеристик.....	20
2.3 Моделирование и оптимизация процесса выщелачивания.....	20
2.4 Описание и реализация метода построения линий тока.....	21
2.5 Применение метода на основе линий тока для расчета баланса раствора 22	
3 Результаты	25
3.1 Результаты и анализ	25
3.2 Выводы и рекомендации	28
Заключение	30
Список использованных литератур	31

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире, который постоянно испытывает растущую потребность в минеральных ресурсах, важность эффективных и оптимизированных методов добычи становится критической. Метод подземного выщелачивания (ПВ) при добыче минералов является одним из ключевых инструментов в этом процессе. Особое внимание уделяется соблюдению баланса растворов, который подразумевает равенство закачанного и откачанного растворов. Баланс растворов – важный фактор, существенно влияющий на эффективность добычи и экологическую обстановку пластовых вод.

Используемая на практике методика подсчета баланса растворов не учитывает расстояния между скважинами, геологическую неоднородность породы, которые имеют первостепенное значение на распространение фронта раствора.

Развитие возможностей информационных технологий и современных методов моделирования позволяет проводить моделирование процесса добычи минералов методом ПВ, которое позволит иметь детальную картину движения фронта растворов. Использование метода на основе линий тока показывает картину движения раствора в пласте под действием сети скважин.

В целом, работа направлена на улучшение эффективности подземного выщелачивания при добыче минералов через разработку и применение точной математической модели для расчета баланса растворов. Разработка модели внесет значительный вклад в улучшение технологии добычи минералов и может послужить основой для дальнейших научных исследований в этой области.

С учетом этих обстоятельств, актуальность исследования заключается в необходимости разработки более совершенных методов подсчета баланса растворов для улучшения процесса подземного выщелачивания. Важность данной тематики обусловлена не только научным интересом, но и промышленной потребностью, что обуславливает принципиальную новизну и практическую значимость нашего исследования.

Основная проблема, которую мы рассматриваем в данной работе, связана с учетом неоднородности пласта и расстояния между скважинами в процессе расчета баланса растворов. Это вызывает необходимость использования сложных математических моделей и методов, что существенно усложняет процесс добычи и увеличивает затраты времени и ресурсов.

1 Обзор метода ПСВ, текущие подходы

1.1 Актуальность исследования

Подземное выщелачивание является современным и прогрессивным методом, который широко используется для добычи урана. За относительно короткий период времени этот метод прошел все этапы от исследований до промышленного внедрения на гидрогенных месторождениях, расположенных в проницаемых осадочных породах депрессионных зон земной коры. В этих условиях открытие и подготовка рудных тел, а также добыча урана, осуществляются через скважины.

Уже накоплен значительный положительный опыт добычи урана с использованием метода выщелачивания руд, где проницаемость создается искусственно через предварительное дробление на месте залегания. При рассмотрении метода подземного выщелачивания гидрогенных месторождений проницаемых руд следует отметить некоторые важные аспекты, которые оказывают значительное положительное влияние на экономические, социальные и экологические условия разработки месторождений урана.

Использование этого метода устраняет необходимость строительства дорогостоящих шахт или карьеров и гидрометаллургических заводов, сокращает расходы на материалы, снижает число работников на строительстве и при эксплуатации месторождений. Также расширяются природные сырьевые ресурсы за счет разработки месторождений с низким и бедным содержанием урана в руде, расположенных в сложных гидрогеологических условиях, которые традиционными методами разработать экономически невыгодно.

При этом условия труда существенно улучшаются, обеспечивается более полное использование богатств недр, минимизируются потери урана при добыче и переработке, а также извлекается металл из забалансовых руд. Метод подземного выщелачивания играет важную роль в охране окружающей среды, так как при его использовании поверхность земли и воздушный бассейн практически не загрязняются.

Можно утверждать, что разработка гидрогенных месторождений методом подземного выщелачивания в корне меняет производственные отношения и производительность в уранодобывающей промышленности в лучшую сторону, что имеет исключительное экономическое значение.

Перспективы развития добычи урана методом подземного выщелачивания действительно впечатляющи. Гидрогенные месторождения урана в проницаемых осадочных слоях депрессионных зон Земли обещают огромный потенциал для дальнейшего прогресса и развития в этой области [1].

В процессе добычи, выщелачивающий раствор обычно вводится в подземное месторождение через соответствующую систему. Раствор, используемый для выщелачивания, может быть щелочным или кислым, в зависимости от типа минералов, которые нужно извлечь. Он растворяет полезные ископаемые при прохождении через месторождение. Обычно, минералы в руде

подвергаются окислению, чтобы превратить их в растворимую форму. Например, при выщелачивании урана его четырехвалентная форма окисляется до растворимой шестивалентной формы (рисунок-1).

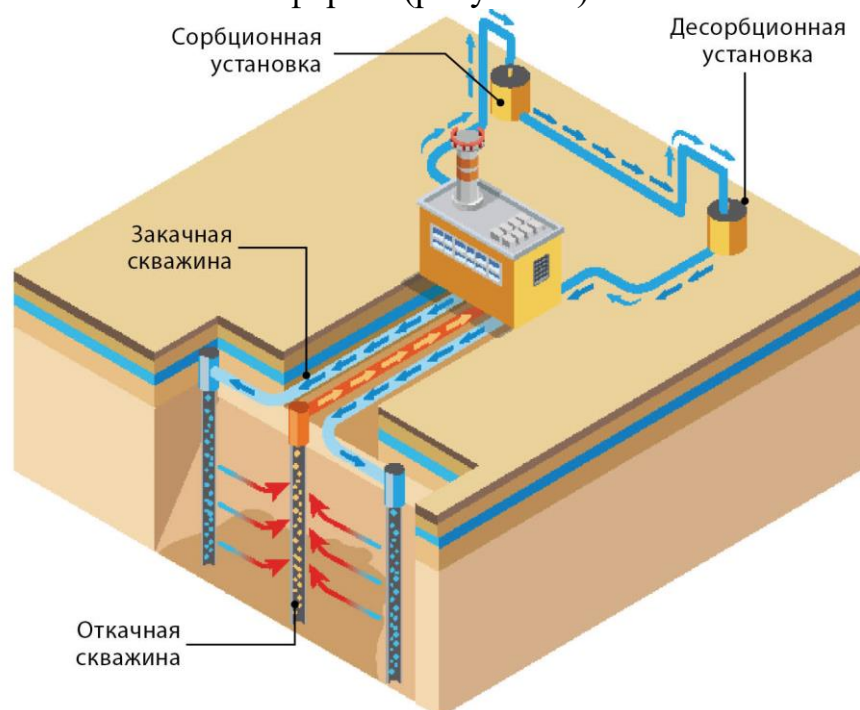


Рисунок 1 – Подземное выщелачивание – малотравматичный метод добычи (Казатомпром)

Затем насыщенный раствор извлекается с помощью подходящей системы добычи и обрабатывается для извлечения полезных ископаемых с помощью различных методов, включая экстракцию растворителем, прямое осаждение, или абсорбцию.

Описанный выше метод и его вариации наиболее эффективны при работе с достаточно однородным месторождением. Однако, во многих случаях, месторождения имеют неоднородность по пористости и проницаемости. В некоторых областях эта неоднородность достаточно значительна для существенного изменения режима течения выщелачивающих жидкостей. Выщелачивающие растворы обычно следуют по трассам с более высокой проницаемостью, обходя некоторые части рудного тела. Это приводит к потере потенциально извлекаемых полезных ископаемых из-за отсутствия контакта с выщелачивающими растворами.

Управление процессом ПСВ требует точного контроля баланса закачиваемого и откачиваемого растворов. Несбалансированный процесс может привести к неконтролируемому растеканию раствора, что угрожает окружающей среде и может привести к потере ценных ресурсов. Необходимость в более точных методах баланса растворов: Существующие методы баланса растворов при подземном выщелачивании могут не учитывать все сложности процесса, включая неоднородность пласта и расстояния между скважинами. Это может

привести к неточностям в балансе и ухудшению эффективности процесса выщелачивания [2].

Экологические и экономические последствия: Неправильное балансирование растворов может привести к их утечке за пределы рабочего блока, что имеет отрицательное экологическое воздействие и может ухудшить экономические показатели добычи.

Применимость исследования: Результаты исследования могут быть применены на практике для улучшения процесса подземного выщелачивания, что делает данное исследование актуальным и важным для современной промышленности.

1.2 Основная проблема

Основная проблема, которую исследует данная работа, заключается в недостаточной точности существующих методов соблюдения баланса растворов при подземном выщелачивании, особенно при работе с двумя смежными блоками. Это может привести к некорректному распределению раствора в пласте, что, в свою очередь, может снизить эффективность процесса добычи. Кроме того, возможен потенциальный экологический ущерб из-за утечки раствора за пределы технологического блока.

Вопрос взаимодействия двух соседних операционных блоков добавляет еще одну сложность к проблеме. распределение раствора и эффекты выщелачивания не ограничиваются одним блоком, но могут влиять на соседний блок, усложняя баланс растворов и общее управление процессом.

В частности, существующие методы часто не учитывают следующие факторы:

- Неоднородность пласта: пласт может быть неоднородным, что затрудняет точное распределение и соблюдение баланса растворов.
- Расстояния между скважинами: в существующих методах часто не учитываются расстояния между скважинами, которые могут существенно влиять на распределение раствора.
- Влияние гидродинамики процесса: Гидродинамика процесса также может оказывать влияние на распределение раствора, и это часто игнорируется в существующих методах.

Следовательно, существует необходимость в разработке более точного метода для соблюдения баланса растворов при подземном выщелачивании, который бы учитывал вышеуказанные факторы.

Основные технологии и процессы, используемые в подземном выщелачивании, включают следующие этапы:

1. Подготовка пласта и создание системы скважин: это включает геологическую оценку, бурение скважин и создание системы скважин для внедрения и откачки раствора. Скважины могут быть разделены на закачные и откачные в зависимости от их функции.

2. Закачка раствора: На этом этапе раствор, обычно содержащий специальные химические вещества для выщелачивания целевого минерала, вводится в пласт через закачные скважины.

3. Процесс выщелачивания: Раствор перемещается через пласт, растворяя минералы в процессе. Важно, чтобы раствор распределялся равномерно, чтобы максимизировать эффективность выщелачивания.

4. Откачка раствора: После того, как раствор проник в пласт и растворил целевые минералы, его откачивают через откачные скважины. Теперь раствор содержит целевой минерал в растворенном виде.

5. Обработка раствора: Полученный раствор обрабатывается для извлечения целевого минерала. Это может включать в себя различные процессы, такие как осаждение, фильтрация, ионный обмен и другие.

6. Восстановление пласта и закрытие скважин: После завершения процесса выщелачивания пласт и скважины должны быть восстановлены и закрыты в соответствии с экологическими стандартами и требованиями [2].

В контексте данной работы основной фокус направлен на разработку метода для соблюдения баланса растворов при подземном выщелачивании, особенно в случае отработки смежных блоков. Участок месторождения с двумя блоками показан на рисунке 2.

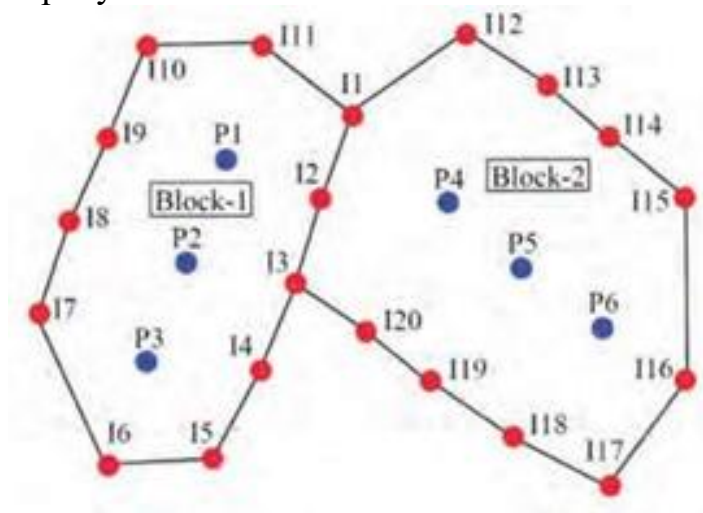


Рисунок 2 – Показан участок месторождения с двумя блоками, где синим обозначены откачные, красным — закачные скважины [3].

Расчёт баланса растворов при подземном выщелачивании в двух смежных блоках включает в себя несколько ключевых параметров, которые должны быть учтены:

- Дебит закачки раствора: это относится к количеству раствора, которое закачивается в каждую скважину в единицу времени. Он влияет на скорость и эффективность процесса выщелачивания.
- Дебит откачки раствора: это относится к количеству раствора, которое откачивается из каждой скважины в единицу времени. Этот параметр влияет на баланс растворов и может повлиять на эффективность процесса выщелачивания.

- Свойства пласта: это включает в себя такие параметры, как пористость и проницаемость пласта, которые влияют на способность раствора проникать в пласт и вступать в реакцию с полезными ископаемыми.

- Расстояние между скважинами: этот параметр влияет на распределение раствора в пласте и может влиять на эффективность процесса выщелачивания.

- Расположение скважин: Планирование скважин могут значительно влиять на эффективность процесса выщелачивания.

- Взаимодействия между блоками: если блоки смежные, то взаимодействие между ними может привести к изменению баланса растворов и влиянию на эффективность процесса выщелачивания. Это может включать в себя растекание раствора из одного блока в другой или изменение давления в пласте в результате деятельности в соседнем блоке.

При расчете баланса растворов, все эти факторы должны быть учтены для обеспечения эффективного и безопасного процесса выщелачивания.

Основная формула, используемая для расчета баланса растворов, основана на законе сохранения массы. В подземном выщелачивания и особенно при работе с двумя смежными блоками, эта формула может быть выражена следующим образом:

$$\sum_{time} \left[\sum_{i=1}^{N_{inj}} Q_i(t) + \sum_{p=1}^{N_{pr}} Q_p(t) \right] = 0, \quad (1)$$

где Q_i - дебит закачиваемого раствора из i -ой закачной скважины, а Q_p - дебит откачиваемого раствора из p -ой откачной скважины [3].

1.3 Методика подсчета баланса растворов, используемая в Казатомпроме

Рассмотрим методику подсчета баланса растворов, применяемую на предприятиях Казатомпрома, на конкретном примере. Рассмотрим область месторождения с двумя смежными блоками, где откачные скважины обозначены синими точками, а закачные – красными (рисунок 2).

В двух смежных блоках соблюдается суммарный баланс растворов, при этом закачные скважины на границах блока I1, I2, I3 работают на два блока одновременно.

На схеме видно, что от закачных скважин 1 и 2 раствор течет к откачным скважинам P1 и P4, от скважины 3 к скважинам P2 и P4. Следовательно, дебиты на данных закачных скважинах распределяются между двумя блоками.

Для второй и третьей закачных скважин аналогичным образом рассчитываются коэффициенты $\lambda_{2,i}$ и $\lambda_{3,i}$ соответственно.

Для подсчета баланса растворов используются следующие формулы:

$$\begin{aligned}
I1: \lambda_{1,1} &= \frac{Q_{p1}}{(Q_{p1} + Q_{p4})}; \lambda_{1,2} = \frac{Q_{p4}}{(Q_{p1} + Q_{p4})}; \\
I2: \lambda_{2,1} &= \frac{Q_{p1}}{(Q_{p1} + Q_{p4})}; \lambda_{2,2} = \frac{Q_{p4}}{(Q_{p1} + Q_{p4})}, \\
I3: \lambda_{3,1} &= \frac{Q_{p2}}{(Q_{p2} + Q_{p4})}; \lambda_{3,2} = \frac{Q_{p4}}{(Q_{p2} + Q_{p4})};
\end{aligned} \tag{2}$$

где $\lambda_{i,j}$, доля дебита i -ой закачной скважины, приходящейся на блок j .

Использование весового коэффициента $\lambda_{i,j}$ позволяет учитывать только влияние дебитов откачных скважин на закачные, не учитывая при этом проницаемость породы и расстояния между скважинами [3].

При подсчете баланса растворов ключевую роль играет корректное определение долей дебита от закачных скважин. Это осуществляется путем учета дебитов откачных скважин в соответствующих блоках. Например, для скважины 1, расположенной на границе двух блоков, ее дебит распределяется между этими блоками пропорционально дебитам откачных скважин Р1 и Р4 в каждом из блоков.

Важно отметить, что такой подход основан на допущении равномерного распределения потоков раствора от закачных скважин к откачным. Он не учитывает влияния проницаемости породы и расстояний между скважинами, что может привести к отклонениям в результатах в случае существенного влияния этих факторов.

В то же время, применение методики Казатомпрома позволяет получить приближенное представление о балансе растворов в рассматриваемой области. Это важно для оптимизации работы скважин и обеспечения эффективной добычи.

Следующим шагом в этом подходе является подсчет баланса дебитов для каждого блока. Используя рассчитанные доли дебитов и общий дебит на каждую закачную скважину, можно вычислить объем раствора, откачиваемого в каждом из блоков.

В конечном итоге, этот подход позволяет получить оценку распределения растворов между смежными блоками и обеспечивает ценную информацию для планирования и оптимизации работы на месторождении.

2 Развитие и применение математической модели для подземного выщелачивания

2.1 Описание математической модели

Баланс растворов гарантирует экологичность процесса и предотвращает разливание раствора за границы блока. Согласно условиям баланса растворов, общий объем закачанного выщелачивающего раствора должен быть равен объему откачанного раствора для каждого блока.

Основой для расчета баланса растворов в системе подземного выщелачивания служит математическая модель процесса фильтрации раствора в пласте. Эта модель описывается следующим уравнением:

$$\operatorname{div}(K_f * \operatorname{grad}(H)) = \sum_{i=1}^{N_{inj}} \delta(x - x_i, y - y_i) * Q_i(t) + \sum_{p=1}^{N_{pr}} \delta(x - x_p, y - y_p) * Q_p(t), \quad (3)$$

где:

- K_f – коэффициент фильтрации породы;
- H – гидравлический напор;
- $Q_i(t)$ – дебит i -й закачной скважины в момент времени t ;
- $Q_p(t)$ – дебит p -й откачной скважины в момент времени t ;
- N_{inj} и N_{pr} – количество закачных и откачных скважин соответственно;
- (x_i, y_i) и (x_p, y_p) – координаты i -й закачной и p -й откачной скважин соответственно.

Уравнение решается итерационным методом. Найденное значение гидравлического напора используется для определения поля скоростей с использованием закона Дарси. Затем по известному полю скоростей методом Поллока вычисляется ток хода и выхода линии тока и время пролета в каждой ячейке.

Модель учитывает неоднородность пласта и расстояния между скважинами, что делает ее подходящей для реалистичного моделирования процесса выщелачивания в конкретных условиях добычи.

Формула скорости Дарси:

$$\phi v = -K_f * \operatorname{grad}(H), \quad (4)$$

где:

- v – скорость фильтрации;
- K_f – коэффициент фильтрации породы;
- $\operatorname{grad}(H)$ – градиент давления.

Модель учитывает неоднородность пласта и расстояния между скважинами, что делает ее подходящей для реалистичного моделирования процесса выщелачивания в конкретных условиях добычи [4].

На основе уравнения Дарси и распределения проницаемости в пласте строятся линии тока. Эти линии позволяют представить путь, по которому раствор будет двигаться в пласте при подземном выщелачивании.

Методы вычисления тока хода и времени пролета основываются на использовании метода Поллока. Метод Поллока это численный метод, который использует трассировку линий потока для моделирования движения воды в осадочной горной породе. В модели Поллока используются такие понятия, как, градиент скорости, время выхода и линии потока. Идея состоит в том, что вы определяете, где вода войдет и выйдет из каждой ячейки в вашей модели на основе этих концепций. Вычисления скорости в каждом направлении с помощью кусочно-линейной функции позволяет учесть изменения в скорости воды по мере ее движения через водоносной слой. Интеграция этой скорости позволяет определить время, которое потребуется воде для прохождения через каждую ячейку модели. Этот метод позволяет провести расчеты по известному полю скоростей. В результате возможно определить, как распространяется раствор в пласте и какое время он затрачивает на прохождение через каждую ячейку.

$$v_x = v_{x0} + grad_x(x - x_0), grad_x = \frac{v_{x\Delta x} - v_{x0}}{\Delta x}, \quad (5)$$

где v_{x0} – скорость в направлении $x = x_0$ (м/с),

$grad_x$ – градиент скорости в направлении x (1/с)

Время выхода для каждой ячейки вычитывается по формуле:

$$\begin{aligned} \Delta t_x &= \frac{1}{grad_x} * \ln \left[\frac{v_{x0} + grad_x(x_e - x_0)}{v_{x0} + grad_x(x_i - x_0)} \right], \\ \Delta t_y &= \frac{1}{grad_y} * \ln \left[\frac{v_{y0} + grad_y(y_e - y_0)}{v_{y0} + grad_y(y_i - y_0)} \right], \end{aligned} \quad (6)$$

После вычисления времени можно вычислить, координаты точек выхода по формуле:

$$\begin{aligned} x_e &= \frac{1}{grad_x} * \ln[v_{xi} \exp(grad_x \Delta t_m) - v_{x0}] + x_0, \\ y_e &= \frac{1}{grad_y} * \ln[v_{yi} \exp(grad_y \Delta t) - v_{y0}] + y_0, \end{aligned} \quad (7)$$

Метод Поллока широко используется для моделирования потока жидкости в подземных водонапорных слоях. Он основан на концепции линий тока и потенциальных линий, которые являются ортогональными друг к другу [5].

В исследовании, модель месторождения разбивается на блоки, в каждом из которых рассчитываются векторы скорости с использованием формул Дарси и Поллока. Это позволяет проследить, как закачиваемый раствор распространяется в месторождении и как он влияет на дебиты скважин.

С помощью метода Поллока, мы можем увидеть, как влияние отдельных закачных скважин распределяется по блокам и как оно влияет на дебиты откачивающих скважин. Это позволяет нам выявить “узкие места” в распределении раствора и найти возможные пути оптимизации процесса.

Также стоит отметить, что метод Поллока позволяет нам учесть влияние проницаемости породы и расстояний между скважинами на распределение раствора, что дает более точные прогнозы, чем простое использование баланса дебитов [6].

В заключение, метод Поллока является мощным инструментом для анализа и оптимизации процесса подземного скважинного выщелачивания и в значительной степени помогает в достижении целей нашего исследования.

В процессе исследования предлагается использование линий тока для расчета баланса растворов. Это позволяет наглядно представить движение раствора в пласте и вычислить распределение дебитов закачных скважин между откачными.

На основе найденного распределения линий тока проводится расчет распределения баланса дебитов между скважинами. Этот этап позволяет учесть растекание раствора за границы технологического блока, что является важным фактором для эффективного управления процессом подземного выщелачивания.

2.2 Учёт неоднородности пласта, расстояний между скважинами и других характеристик

Неоднородность пласта может значительно влиять на эффективность процесса, поскольку вариации в проницаемости могут вызвать неравномерное распределение потока раствора. Неоднородности в пласте могут включать изменения в пористости, проницаемости, и других свойствах породы.

Расстояния между скважинами также играют важную роль в процессе выщелачивания. Расстояние между скважинами влияет на гидродинамику потока, время прохождения раствора между скважинами, а также на общую эффективность выщелачивания. Нужно рассмотреть, как различные схемы расположения скважин (например, линейное, прямое, яичные и др.) могут влиять на баланс растворов и на эффективность выщелачивания.

Важно учитывать и другие характеристики, такие как температура, давление, химический состав раствора и характеристики породы. Все эти факторы влияют на процесс выщелачивания и должны быть учтены при проектировании и оптимизации процесса [7].

2.3 Моделирование и оптимизация процесса выщелачивания

После описания всех важных характеристик и параметров, следует обсудить, как эти факторы могут быть учтены при моделировании процесса выщелачивания. Кроме того, можно обсудить методы оптимизации этих параметров для улучшения эффективности выщелачивания.

Метод Поллока и закон Дарси играют ключевую роль в моделировании движения воды в подземных резервуарах. Закон Дарси, в свою очередь, позволяет определить скорость движения воды через пористую среду, в то время как метод Поллока используется для трассировки линий тока в резервуаре, что помогает определить, как распределяется вода в резервуаре.

В контексте нашего исследования, мы использовали оба этих инструмента для определения и анализа потоков воды между закачивающими и выкачивающими скважинами в нескольких смежных блоках. Мы обнаружили, что дебит в некоторых случаях распределялся не так, как предполагалось изначально. Это позволило нам выявить потенциальные проблемы в управлении ресурсами и предложить решения для их устранения.

Однако, при моделировании потоков воды, также необходимо учитывать закон сохранения массы, который говорит о том, что общая масса воды, входящей в систему, должна равняться общей массе воды, выходящей из системы, плюс любые изменения в запасах воды внутри системы [8].

Совместное использование этих методов и принципов позволяет создать более точное и полное представление о поведении воды в подземных резервуарах и в конечном итоге приводит к более эффективному управлению ресурсами.

2.4 Описание и реализация метода построения линий тока

За последние несколько лет, множество исследований подтвердили полезность моделирования месторождений с использованием метода линий тока. Этот метод показывает себя особенно эффективным при решении задач, которые традиционно представляют собой сложную проблему для более стандартных методов моделирования. Он особенно полезен для процессов вытеснения малоподвижных жидкостей в больших, геологически неоднородных системах. Этот метод становится сильной альтернативой классическим принципам моделирования. Где это возможно, обсуждение будет иллюстрировано конкретными примерами.

В расчетах смежных блоков, SL-моделирование может быть полезно для представления потока жидкости через неоднородные геологические структуры. Каждая линия тока может быть представлена как последовательность смежных блоков, и путем расчета проницаемости, давления и других параметров в каждом блоке, можно получить подробное представление о поведении жидкости в месторождении. Это может помочь в оптимизации процесса вытеснения и увеличении эффективности добычи.

Одним из наиболее привлекательных аспектов метода линий тока для многих инженеров является его визуальные возможности при отображении потоков жидкости и газа. Вместо того чтобы ожидать постепенных изменений в параметрах, таких как насыщенность, линии тока предоставляют мгновенный "снимок" распределения потоков. Это позволяет ясно понять, где начинается поток (в какой нагнетающей скважине) и где он заканчивается (в какой добывающей скважине).

Возможность визуализации внутреннего распределения линий тока оказывается весьма полезной, так как это добавляет дополнительную информацию о режиме потока. Реальные месторождения, даже те, которые были разработаны с учетом оптимального размещения скважин, редко показывают ожидаемое извлечение минерала. Это может быть связано с неоднородностью геологической модели, отсутствием водоупоров, что может быть причиной дебаланса растворов в пласте.

Оптимальным решением, конечно, является моделирование всего месторождения, при котором структура системы могла бы "развиваться" в зависимости от расположения скважин, их дебитов, строения пласта и присутствующих в нем неоднородностей. Однако, выбор подходящей модели всего месторождения требует эффективных технологий создания моделей, с учетом разумных затрат на память и требуемого вычислительного времени [9].

2.5 Применение метода на основе линий тока для расчета баланса раствора

Моделирование и распределение скважин мы делаем на программе GeoStat, разработанной научной группой под руководством проф. А. Калтаева. Моделирование в программе состоит из следующих этапов

- Загрузка данных на скважинах (координаты, уровень фильтра, концентрация кислоты) с файла загружаются в программу (рисунок 3);

Well ID	Type	X	Y	Z	Permeability	Porosity	Other 1	Other 2
P1	EXPLORATION	87	-135	100	100	201.64	209.64	0
P2	EXPLORATION	71	-93	100	100	201.64	209.64	0
P3	EXPLORATION	55	-54	100	100	201.64	209.64	0
P4	EXPLORATION	175	-117	100	100	201.64	209.64	0
P5	EXPLORATION	204	-91	100	100	201.64	209.64	0
P6	EXPLORATION	237	-67	100	100	201.64	209.64	0
P7	EXPLORATION	195	-300	100	100	201.64	209.64	0
P8	EXPLORATION	160	-260	100	100	201.64	209.64	0
P9	EXPLORATION	133	-210	100	100	201.64	209.64	0
I1	EXPLORATION	137	-152	100	100	201.64	209.64	0
I2	EXPLORATION	124	-119	100	100	201.64	209.64	0
I3	EXPLORATION	115	-85	100	100	201.64	209.64	0
I4	EXPLORATION	101	-51	100	100	201.64	209.64	0
I5	EXPLORATION	81	-16	100	100	201.64	209.64	0
I6	EXPLORATION	39	-12	100	100	201.64	209.64	0
I7	EXPLORATION	12	-72	100	100	201.64	209.64	0
I8	EXPLORATION	24	-110	100	100	201.64	209.64	0
I9	EXPLORATION	40	-143	100	100	201.64	209.64	0
I10	EXPLORATION	55	-180	100	100	201.64	209.64	0
I11	EXPLORATION	102	-180	100	100	201.64	209.64	0
I12	EXPLORATION	180	-185	100	100	201.64	209.64	0
I13	EXPLORATION	215	-164	100	100	201.64	209.64	0
I14	EXPLORATION	239	-143	100	100	201.64	209.64	0
I15	EXPLORATION	270	-118	100	100	201.64	209.64	0
I16	EXPLORATION	270	-46	100	100	201.64	209.64	0
I17	EXPLORATION	239	-4	100	100	201.64	209.64	0
I18	EXPLORATION	201	-23	100	100	201.64	209.64	0
T10	EXPLORATION	160	-46	100	100	201.64	209.64	0

Рисунок 3 – Координаты скважин, для трех смежных блоков.

- После загрузки скважины отображаются в области (рисунок 4):

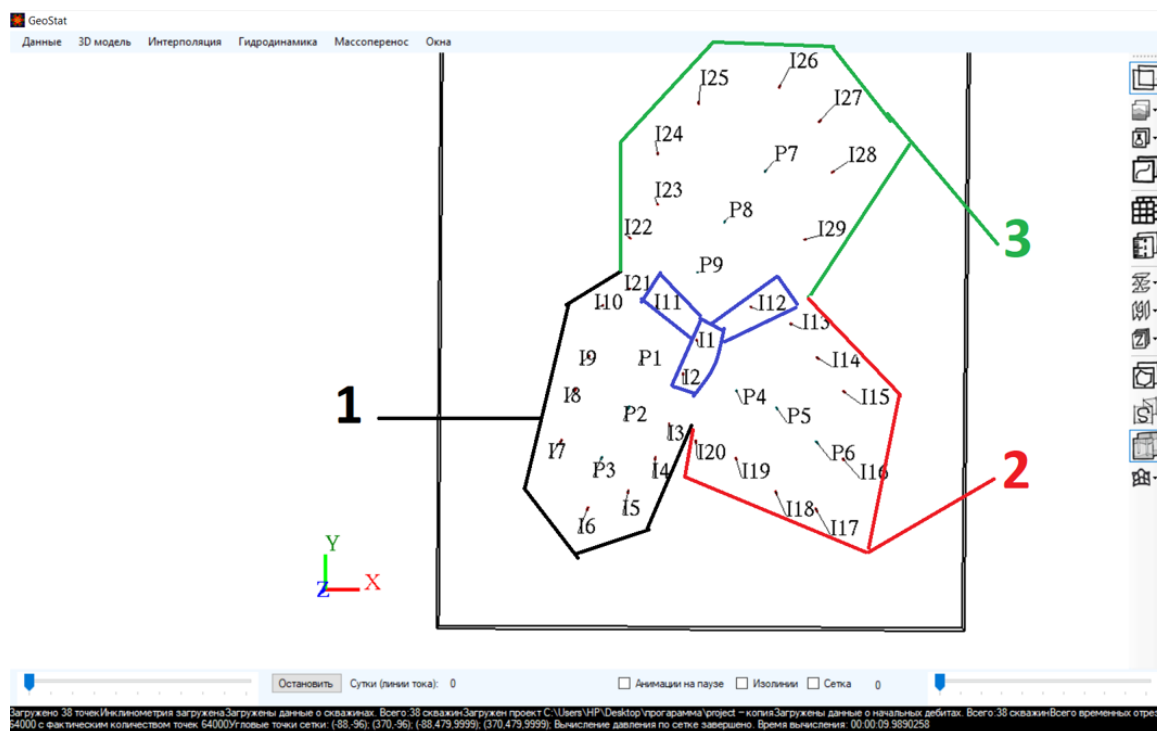


Рисунок 4 – Показан участок месторождения с двумя тремя блоками, где Р обозначены откачные, I — закачные скважины.

- С помощью опции “3D Модель” программы отображаем расчетную область и создаем сетку (рисунок 5);

Создать сетку

Рисунок 5 – Создание сетки.

- Смотрим наши данные (рисунок 6);

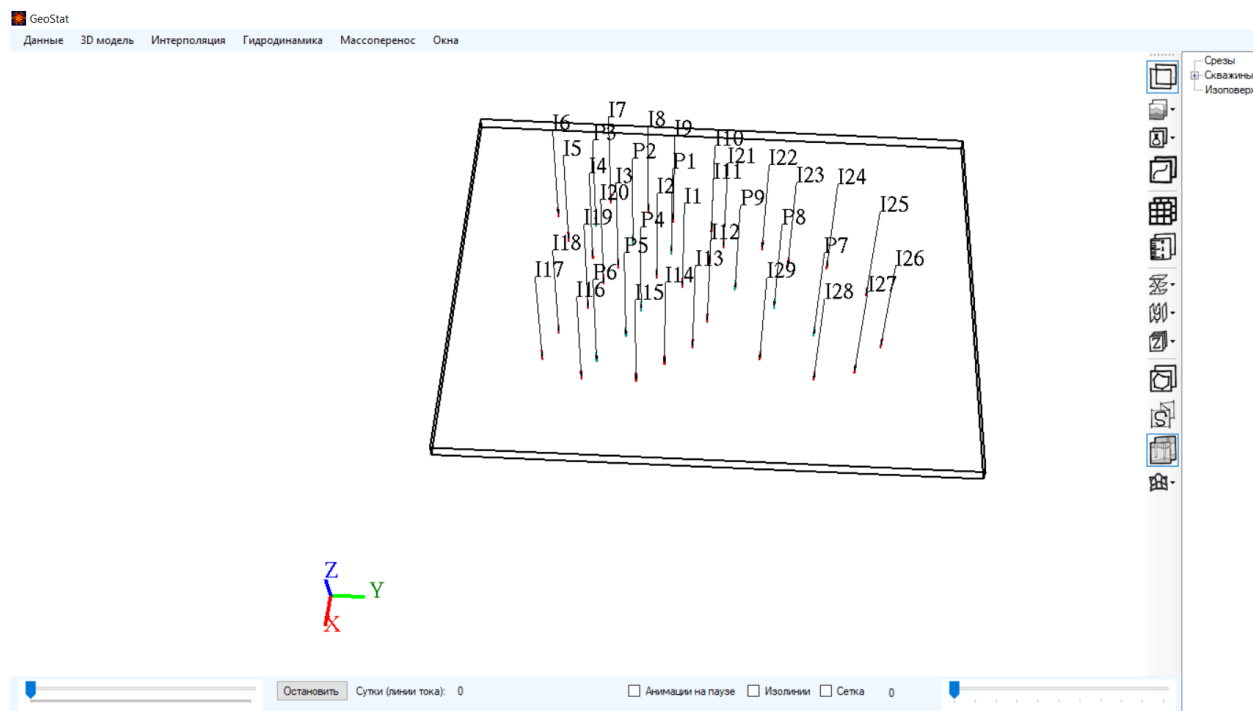


Рисунок 6 – Расчетная область

- Выполнение расчета (рисунок 7);

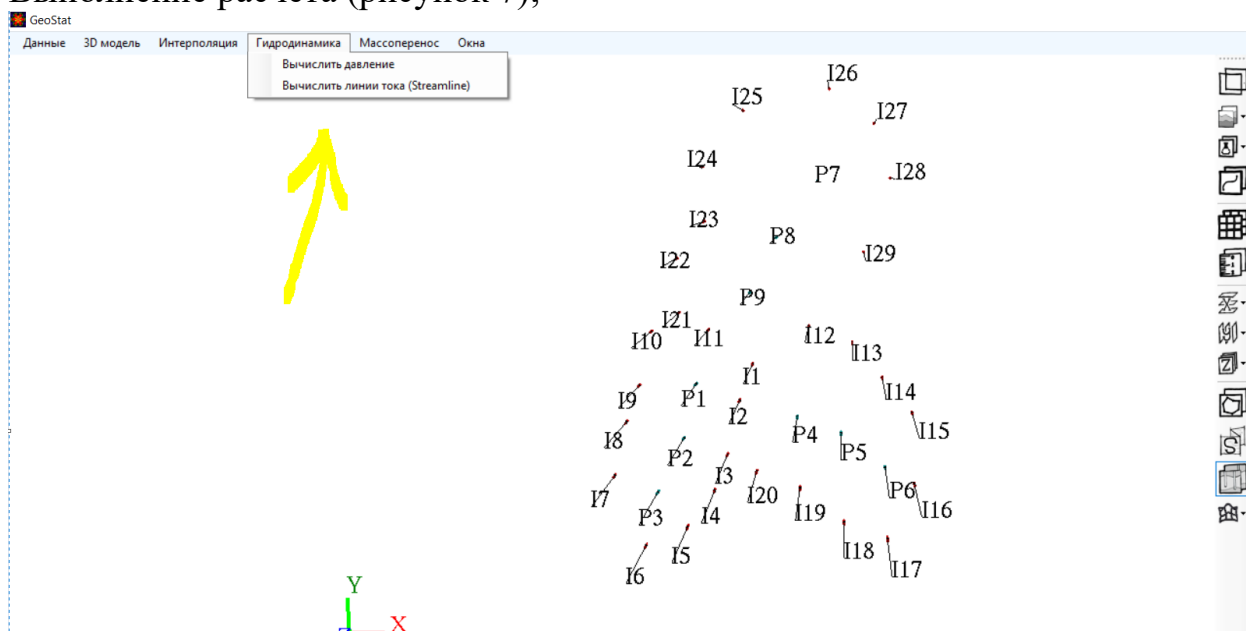


Рисунок 7 – Отправка на расчет

С использованием предложенного метода проводится моделирование различных вариантов распределения скважин в блоке. Рассматриваются как равномерное распределение скважин, так и различные варианты их группировки и концентрации в определенных зонах.

Для каждого варианта распределения скважин проводится расчет баланса растворов с использованием рассмотренного выше метода. Оценивается влияние распределения скважин на распределение линий тока и, как следствие, на баланс растворов в системе.

3 Результаты

3.1 Результаты и анализ

Мы видим, что использование метода Поллока и закона Дарси для моделирования процесса выщелачивания позволяет более точно определить распределение потока раствора и эффективность выщелачивания. Это обеспечило глубокое понимание динамики потока в заданных условиях, что является ценным инструментом для оптимизации процесса выщелачивания и управления ресурсами. Это подчеркивает значимость использования более сложных моделей для более точного прогнозирования поведения системы и определения потенциальных проблем.

Как видим на рисунке 8 показана расчетная область, Уравнение решается с использованием итерационного метода. После определения значения гидравлического напора, используется закон Дарси (4) для определения поля скоростей. При известном поле скоростей, метод Поллока используется для расчета пути и выхода потока, а также времени пролета в каждой ячейке. Важно отметить, что точка выхода из одной ячейки становится точкой входа для следующей.

Представлено распределение линий потока раствора, обусловленное влиянием сети скважин в пласте. При этом, каждая линия потока, соответствующая конкретной закачной скважине, выделена своим уникальным цветом. Это распределение позволяет не только визуализировать перемещение раствора в пласте, но и рассчитать распределение дебитов между закачными и откачными скважинами.

Используя выявленное распределение линий потока, можно определить баланс дебитов между скважинами. Для большей наглядности в расчетах, из каждой закачной скважины было запущено по 100 линий потока. Цвет каждой линии потока обозначает скважину, из которой исходит раствор, а числа на линиях потока указывают количество линий потока, которые достигли соответствующую откачную скважину из заданной закачной.

В нашем случае, возьмем I20 раствор закаченный от него должен был откачиваться 100% через откачную скважину Р4, но как видим на рисунке 8 некоторой в раствор в 15% ушел на первый блок на откачной Р2. Еще видим что некоторых местах не все 100% откачивается, например скважинах I17, I15, I28 и I25. Такое распределение наблюдается в других местах. В нашем случае, возьмем I20 раствор закаченный от него должен был откачиваться 100% через откачную скважину Р4, но как видим на рисунке 8 некоторой в раствор в 15% ушел на первый блок на откачной Р2. Еще видно что некоторых местах не все 100% откачивается, например скважинах I17, I15, I28 и I25. Такое распределение наблюдается в других местах. Данный анализ показывает, что распределение дебитов между блоками и скважинами может быть сложным и нелинейным, существенно отличаясь от предполагаемого равномерного распределения. Это подчеркивает важность использования детализированных и точных методов

моделирования и анализа для достоверного прогнозирования работы скважин и определения баланса растворов.

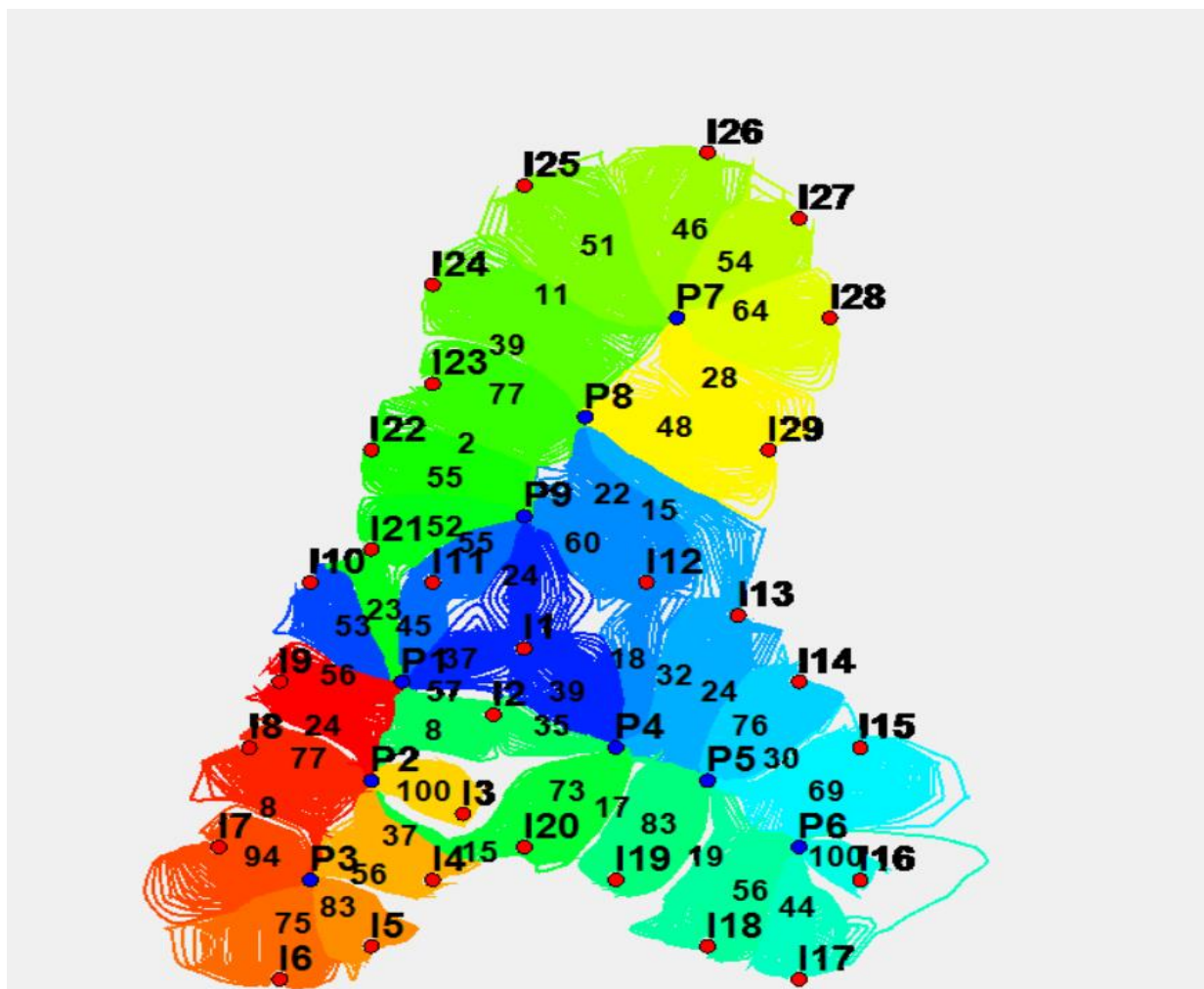


Рисунок 8 – Распределение линий тока в пласте под действием сети скважин (вид сверху)

Однако при рассмотрении распределения дебитов между блоками для всех граничных закачных скважин, это предположение не всегда соблюдается.

В нашем случае, возьмем I20 раствор закаченный от него должен был откачиваться 100% через откачную скважину P4, но как видим на рисунке 8 некоторой в раствор в 15% ушел на первый блок на откачной P2. Еще видим что некоторых местах не все 100% откачивается, например скважинах I17, I15, I28 и I25. Такое распределение наблюдается в других местах. В нашем случае, возьмем I20 раствор закаченный от него должен был откачиваться 100% через откачную скважину P4, но как видим на рисунке 8 некоторой в раствор в 15% ушел на первый блок на откачной P2. Еще видно что некоторых местах не все 100% откачивается, например скважинах I17, I15, I28 и I25. Такое распределение наблюдается в других местах. Данный анализ показывает, что распределение дебитов между блоками и скважинами может быть сложным и нелинейным, существенно отличаясь от предполагаемого равномерного распределения.

Расчеты демонстрируют, что взаимное влияние скважин не ограничивается их непосредственным соседством. На рисунке 9, раствор из скважины I1 распределился между тремя скважинами в различных блоках, и откачивается 24% в P9, 39% P4, 37% в P1.

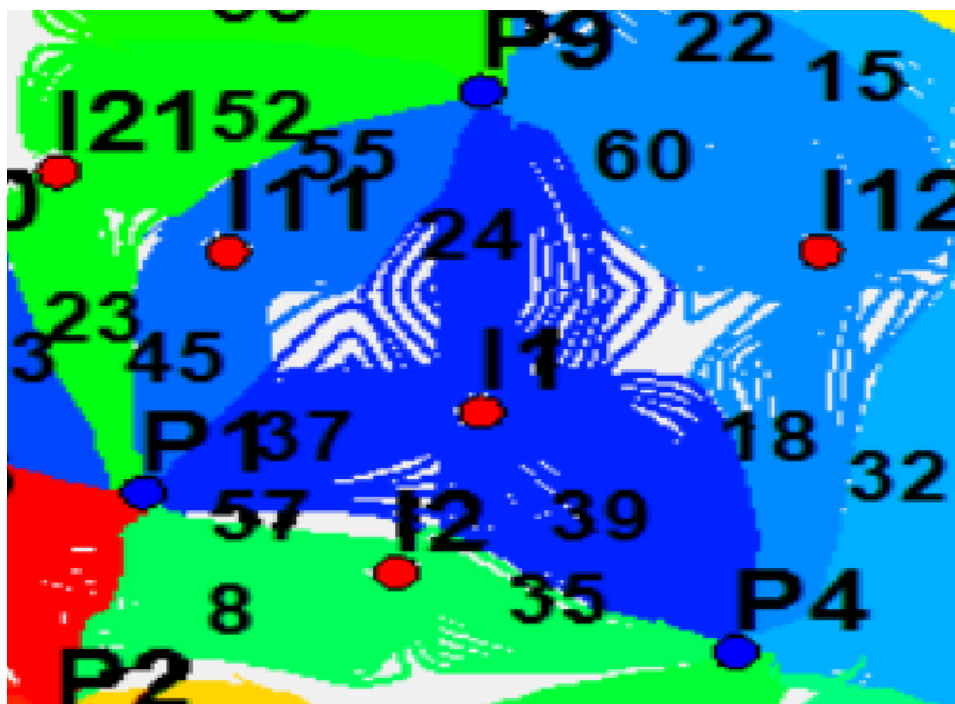


Рисунок – 9 Распределение раствора из скважины I1

На рисунке 9, раствор из скважины I1 распределился между тремя скважинами в различных блоках, и откачивается 24% в P9, 39% P4, 37% в P1. Также следует отметить, что общая сумма линий потока не равна исходному количеству, что указывает на распространение раствора за пределы блока. Так же видно что скважина I13 которая находится во втором блоке, з нее раствор распределился на третий блок и откачивается скважиной P8 (рисунок 10).

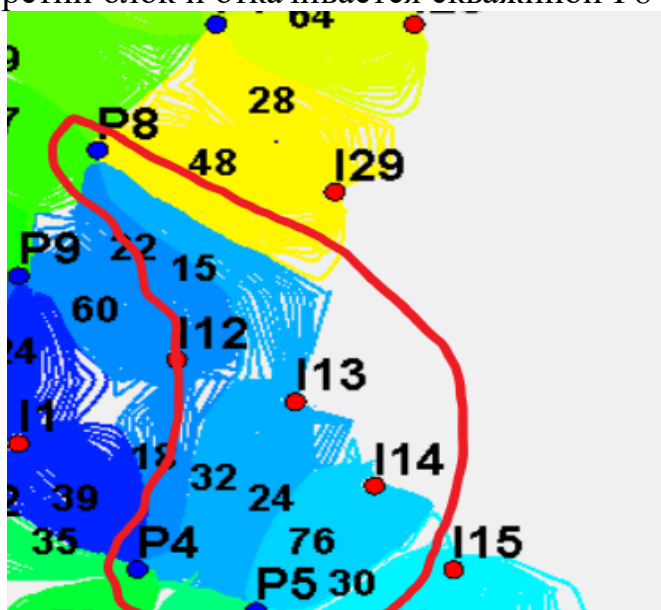


Рисунок 10 – Распределение раствора из скважины I13

Визуализируются только те линии потока, которые достигают откачной скважины. Исходя из этого, учет только смежных скважин между различными блоками не дает полной картины баланса, поскольку наблюдается распространение раствора в пласте. Это подчеркивает важность использования детализированных и точных методов моделирования и анализа для достоверного прогнозирования работы скважин и определения баланса растворов.

3.2 Выводы и рекомендации

Формулируются выводы о влиянии феномена растекания раствора на баланс растворов и о необходимости его учета при расчете баланса. Выдвигаются рекомендации по использованию разработанных методов в практике подземного выщелачивания.

Одним из преимуществ моделирования потока жидкости в пористых средах с использованием метода линий тока (SL-моделирование) по сравнению с классическими подходами является его высокая вычислительная эффективность. Однако стоит отметить, что эта эффективность достигается за счет упрощения особенностей потока, использования неконсервативной формулировки и принятия других допущений. Несмотря на эти упрощения, SL-моделирование во многих случаях предоставляет решения, которые трудно достичь с помощью других методов. Это важно для больших моделей, в которых миллионы ячеек представляют подземное месторождение, или когда требуется выполнить моделирование для сотен вероятных геологических реализаций. В этом контексте эффективность моделирования с точки зрения использования памяти и вычислительных ресурсов играет ключевую роль [10].

Растекание раствора в подземном выщелачивании является значимым феноменом, который влияет на баланс растворов. Этот процесс может приводить к несбалансированности растворов в системе, так как раствор может распространяться за пределы технологического блока.

С экономической точки зрения, растекание раствора может приводить к увеличению затрат на реагенты и энергию, а также может вызвать снижение общей эффективности добычи. Более того, если раствор распространяется за пределы технологического блока, это может привести к необходимости дополнительного промывания, что также увеличивает затраты.

С точки зрения экологии, растекание раствора также может иметь серьезные последствия. Если раствор распространяется за пределы технологического блока, это может привести к загрязнению окружающей среды, включая почву и подземные воды. Это может вызвать негативные последствия для окружающей среды и потребовать дорогостоящих мер по очистке и восстановлению.

Для качественного моделирования процесса подземного выщелачивания и расчета баланса растворов необходимы реальные данные. Они могут быть получены из различных источников, таких как геологические исследования,

операционные данные добычи, исследования скважин и лабораторные анализ и еще:

- Оптимизация процесса растворов: Понимание гидродинамических условий скважин и месторождений может помочь вам оптимизировать процесс введение растворов. Изменить скорость или объем раствора, чтобы уменьшить утечку.

- Пересмотр геометрии скважин: Если возможно, рассмотрение возможность пересмотра геометрии скважин и выщелачивания для уменьшения "узких мест". Например, изменение расстояния между скважинами или их ориентации может помочь улучшить распределение раствора.

- Улучшение системы возврата растворов: Возможно, улучшение или обновление системы возврата растворов может помочь уменьшить потери.

Подобранные данные должны быть достоверными и полными, чтобы модель была реалистичной и могла точно предсказать поведение системы. Кроме того, они должны быть актуальными, чтобы отражать текущее состояние пласта и операционных параметров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе данной работы был проведен детальный обзор метода ПСВ и его применения в современных условиях. Была исследована актуальность этой темы, а также были выявлены основные проблемы, связанные с расчетом баланса растворов в процессе подземного выщелачивания. В частности, было обнаружено, что стандартный подход к расчету баланса растворов может привести к неоднородному распределению раствора и неэффективному использованию ресурсов.

В ответ на эти проблемы, применил новый подход к моделированию процесса выщелачивания, основанный на законе сохранения массы и Дарси, а также методе Поллока. Этот подход позволяет нам учесть неоднородности пласта и расстояния между скважинами, что приводит к более точному расчету баланса растворов.

С помощью программного обеспечения, предоставленного научным руководителем, мы провели расчеты для нескольких смежных блоков. Результаты показали, что наш подход может эффективно оптимизировать распределение раствора и улучшить общую эффективность процесса выщелачивания.

В результате работы над дипломной работой было подтверждено, что разработанная модель является эффективным инструментом для более точного и реалистичного моделирования процесса выщелачивания, что в свою очередь позволяет повысить эффективность добычи минералов методом подземного выщелачивания и снизить его негативное экологическое воздействие.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ЛИТЕРАТУР

- 1 Геотехнология урана: учебное пособие под общей редакцией Ю.В. Демехова, Б.М. Ибраева; авт.-сост.: И.П. Поезжаев, К.Д. Полиновский, О.А. Горбатенко, Е.Н. Панова, К.Ж. Буленова, Е.М. Карманов, П.А. Блынский, О.А. Битовт. – Алматы: 2017. – 328 с.
- 2 Методические рекомендации по подземному скважинному выщелачиванию урана – Алматы: 2006. – 306 с.
- 3 НИА РК Вестник Национальной инженерной академии Республики Казахстан. 2022. М. Б. Курмансейит, К. Ш. Узбекалиев, М. С. Тунгатарова, К. А. Алибаева, А. Калтаев. – 14 с.
- 4 Szymkiewicz, A. (2013). Darcy's law and related topics: Review and synthesis. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*. – С.97-106.
- 5 Rudarsko-geološko-naftni zbornik (The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin) UDC: 622.1 DOI: 10.17794/rgn.2021.4.5 Original scientific paper. – P.52-54.
- 6 Bauer, S., Beyer, C., Dethlefsen, C., Dietrich, P., Duttmann, R., Ebert, M., Feeser, V., Görke, U., Köber, R., Kolditz, O., Rabbel, W., Schanz, T., Schäfer, D., Würdemann, H., Dahmke, A. (2013). Impacts of the use of the geological subsurface for energy storage: an investigation concept. *Environmental Earth Sciences*, 70(8). – P. 335–343.
- 7 Renard, P., & de Marsily, G. (1997). Calculating equivalent permeability: a review. *Advances in Water Resources*, 20(5-6). – P. 253-278.
- 8 Saad, Y., & Schultz, M. H. (1986). GMRES: A generalized minimal residual algorithm for solving nonsymmetric linear systems. *SIAM Journal on scientific and statistical computing*, 7(3), 856-869. Zhong, L., & Bruining, H. (2012). Analysis of Miscible Displacement by Streamline Simulation. *Journal of Contaminant Hydrology*, 131(1-4). – P. 72-82.
- 9 Reservoir Simulation Copyright © 2007 by the Society for Industrial and Applied Mathematics. – 219 p.
- 10 Анализ применений математического моделирования пластовых систем на базе метода линий тока Сидельников К.А., К.Т.Н. Васильев В.В. – 11 с.