

Казахский национальный исследовательский технический университет имени
К.И.Сатпаева

УДК 622.27

На правах рукописи

КЕНЖЕТАЕВ ЖИГЕР СМАДИЕВИЧ

**Повышение эффективности скважинной добычи урана на основе
интенсификации процессов подземного выщелачивания**

6D070700 – Горное дело

Диссертация на соискание ученой степени
доктора философии (PhD)

Научные консультанты:
доктор технических
наук, профессор,
Ракишев Б.

Зарубежный
консультант: доктор
технических наук,
профессор
Бондаренко В.И.,
(Украина).

**Республика Казахстан
Алматы, 2023**

СОДЕРЖАНИЕ

	НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ	4
	ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ	5
	ВВЕДЕНИЕ	6
1	ОСОБЕННОСТИ СКВАЖИННОЙ ДОБЫЧИ УРАНА НА РУДНИКАХ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН	11
1.1	Особенности скважинной добычи урана на рудниках республики Казахстан	11
1.2	Геотехнологические параметры скважинной добычи урана на месторождениях Казахстана	16
1.3	Анализ применяемых методов интенсификации скважинной добычи урана на предприятиях скважинной добычи	19
1.4	Оценка количественно-качественных характеристик проведения РВР на уранодобывающих предприятиях	23
2	ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ПОДЗЕМНОГО СКВАЖИННОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ УРАНОВЫХ РУД	30
2.1	Исследования структуры и количественно-качественных характеристик рудовмещающих пород месторождений урана Сырдарьинской депрессии	30
2.2	Микроскопические исследования керновых проб рудовмещающих пород	32
2.3	Изучение структуры и количественно-качественных характеристик осадкообразований при сернокислотном выщелачивании урановых руд	34
2.4	Подбор химических реагентов для интенсификации геотехнологических процессов скважинной добычи урана	37
2.5	Выщелачивание урана из керновых проб в трубках с применением поверхностно-активных веществ	41
3	ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ КОМПЛЕКСА ХИМИЧЕСКИХ РЕАГЕНТОВ СИНЕРГЕТИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ НА ИНТЕНСИФИКАЦИЮ СКВАЖИННОЙ ДОБЫЧИ УРАНА	54
3.1	Исследования влияния комплекса химических реагентов многофункционального назначения на интенсификацию скважинной добычи урана	54
3.2	Выбор геотехнологических скважин для проведения экспериментальных работ по интенсификации скважинной добычи урана с применением комплекса химических реагентов синергетического действия	61
3.3	Технические средства, необходимые для выполнения экспериментальных работ на геотехнологических скважинах с применением комплекса химических реагентов синергетического действия	64

3.4	Разработка методики проведения экспериментальных опытов на действующих геотехнологических скважинных ячейках ряда месторождений урана	66
3.5	Мониторинг и анализ геотехнологических параметров, расчет удельных расходов на добычу урана	68
3.6	Сравнительный анализ эффективности применения химических реагентов с традиционными методами РВР при интенсификации скважинной добычи урана	75
4	ИЗУЧЕНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ХИМИЧЕСКИХ РЕАГЕНТОВ ПРИ ПОДГОТОВКЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО БЛОКА К ДОБЫЧЕ	77
4.1	Опыт подготовки продуктивного при интенсификации скважинной добычи урана на месторождении Семизбай с применением химических реагентов	77
4.2	Опыт подготовки технологического блока на месторождении Северный Харасан с применением химических реагентов	80
4.3	Мониторинг геотехнологических параметров скважинной добычи урана после проведения экспериментальных работ	82
4.4	Оценка экономической эффективности интенсификации добычи урана с применением комплекса химических реагентов синергетического действия	88
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	93
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	95

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В настоящей диссертации использованы ссылки на следующие стандарты:
Закон Республики Казахстан «О науке» от 18.02.2011 г. № 407-IV ЗРК.

ГОСТ 7.32-2001 - Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления.

ГОСТ 7.1-2003. - Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления.

ГОСТ 7.12-93 – Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Библиографическая запись. Сокращение слов на русском языке. Общие требования и правила.

ГОСО РК 5.04.034-2011: Государственный общеобязательный стандарт образования Республики Казахстан. Послевузовское образование. Докторантура. Основные положения (изменения от 23 августа 2012 г. № 1080);

Правила присуждения ученых степеней от 31 марта 2011 года № 127;

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В настоящем отчете о НИР применяют следующие сокращения и обозначения

ВР	Выщелачивающий раствор
ГТП	Геотехнологическое поле
ГРМ	Горно-рудная масса
Ж:Т	Отношение жидкости к твердому
К	Коэффициент эксплуатации скважины
КФ	Коэффициент фильтрации
МРЦ	Меж-ремонтный цикл
НАО	Некоммерческое акционерное общество
ОВП	Окислительно-восстановительный потенциал
ОПИ	Опытно-промышленные испытания
ПАВ	Поверхностно-активное вещество
ПВ	Подземное выщелачивание
ПР	Продуктивный раствор
ПЗП	Прифильтровая зона пласта
ПСВ	Подземное скважинное выщелачивание
РВР	Ремонтно-восстановительные работы

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы.

Казахстан обладает 14 % мировых разведанных запасов урана и занимает второе место после Австралии, 70 % из них пригодны для разработки скважинным способом. Способ подземного выщелачивания урана в Казахстане применяется на 26 участках, объединенных в 13 уранодобывающие компании. Совокупный объем добычи природного урана составляет более 40 % общемирового уровня.

На предприятиях подземного выщелачивания урана ежегодно увеличивается количество эксплуатационных скважин и технологических блоков. Это вызвано постепенным уменьшением продуктивности вскрываемых блоков и снижением коэффициента использования скважин с 0,9 до 0,7-0,6. А также преобладанием в рудах тонкозернистых агрегатов каолинита, калиевого шпата и гипса образуют многокомпонентные, сложнорастворимые осадкообразования, включающие частицы кремния, гипса и глинистых минералов. Они способствует более интенсивному снижению производительности геотехнологических скважин в связи, с чем возникла проблема интенсификации. При этом отсутствуют действенные инструменты для повышения производительности скважин и предотвращения осадкообразований на длительный период в сложных горно-геологических условиях. Освоение эксплуатационных блоков в этих условиях часто сопровождается серьезными осложнениями и необратимым снижением проницаемости прискважинной зоны продуктивного пласта (ПЗП), что резко увеличивает сроки освоения и приводит к дополнительным затратам. На месторождениях растет доля простаивающих скважин, требующих проведения сложного капитального ремонта, который по затратам соизмерим со строительством новых скважин.

Для повышения эффективности скважинной добычи урана используются химические методы интенсификации, основанные на взаимодействии растворов кислот при гипсовых отложениях (Мамилев В.А., Битимбаев М.Ж., Юсупов Х.А., Язиков В.Г., Жатканбаев Е.Е.). Другими авторами предложены научно-технические решения по подбору рациональных параметров вскрытия и интенсификации скважинной добычи урана в слабопроницаемых рудах (Молчанов, А.А., Дуйсебаев Б.О., Аликулов Ш.Ш., Каримов И.А.). Полученные авторами результаты исследований послужили основой для поиска и разработки нового направления повышения эффективности подземного скважинного выщелачивания урана при многокомпонентных и комплексных осадкообразованиях.

Анализ этих и других работ показывает, что цель поиска новых путей повышения эффективности скважинной добычи урана в сложных горно-геологических условиях, является актуальной, научной, научно-технической задачей.

Цель исследования – установление закономерностей изменения свойств и структуры осадкообразующих компонентов от состава и концентраций химических реагентов для повышения эффективности скважинной добычи урана.

Идея работы, заключается в применении комплекса химических реагентов многофункционального назначения, повышение эффективности подземного скважинного выщелачивания урана за счет интенсификации геотехнологических процессов в сложных горно-геологических условиях.

Задачи исследования:

Для достижения поставленных целей сформулированы и решены следующие задачи:

1. Изучение состава и структуры, физико-химических характеристик руд продуктивного горизонта и осадкообразующих компонентов в прифильтровой зоне скважин урановых месторождений Сырдарьинской депрессии.

2. Установить закономерности изменения фильтрационных характеристик руд продуктивного горизонта и параметров извлечения урана в зависимости от состава рудовмещающих пород и комплекса химических реагентов многофункционального назначения.

3. Разработать методику обоснования рациональных параметров применения химических реагентов многофункционального назначения для повышения эффективности скважинной добычи урановых руд.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Интенсивность осадкообразования при скважинной добычи урана увеличивается в зависимости от гранулометрических и минералогических характеристик руд продуктивного горизонта по экспоненте.

2. При низкой скорости фильтрации растворов в слабопроницаемых рудах, ее снижение исключается при добавлении сульфаминовой кислоты и лигносульфоната в выщелачивающий раствор.

3. Рациональные параметры использования химических реагентов достигаются при прямо пропорциональном увеличении расхода сульфаминовой кислоты от 0,2 до 0,4 кг/т горно-рудной массы (ГРМ), а лигносульфоната от 0,1 до 0,2 кг/т ГРМ при повышенных значениях мелко-тонкозернистой фракции от 40 до 60 % от общей массы руды продуктивного горизонта. При этом площадь обрабатываемой ГРМ увеличивается на 50 %, за счет растекания химических реагентов в продуктивном горизонте.

Основные результаты исследования и их практическое значение:

1. На основе рентгенофазовых исследований и сравнительного анализа минералогического состава руд и осадкообразующих компонентов Сантонского, Маастрихтского и Кампанского продуктивных горизонтов установлены основные факторы влияющие на фильтрационные характеристик руд. Установлено что наличие гипса свыше 5 % и глинистых минералов свыше 20 % а также неоднородность руд продуктивного горизонта образуют осадки затрудняющие процессы скважинной добычи урана. Соотношение

тонкозернистых агрегатов, каолинита, глинистых минералов к средне-крупнозернистым фракциям в горно-рудной массе определяет скорость осадкообразования и снижение фильтрационных характеристик руд продуктивного горизонта.

2. На основании установленных закономерностей изменения свойств и структуры осадкообразования и фильтрационных характеристик руд были выбраны химические реагенты позволяющие эффективно разрушать и предотвращать процессы осадкообразования при скважинной добычи урана. Это достигается за счет применения сульфаминовой кислоты, в качестве понизителя рН раствора с комплексообразующими свойствами, лигносульфонат в качестве пенообразователя и растворителя глинистых минералов. При выщелачивании урана из керновых материалов удалось повысить извлечение урана из руды с 70 до 80 %, снизить удельный расход серной кислоты с 50 до 40 кгH₂SO₄ /кгU, за счет повышения скорости фильтрации с 0,5 до 0,6 м/сут.

3. Разработана технология обработки продуктивного горизонта геотехнологических скважин с низкими фильтрационными характеристиками руд выбранным комплексом химических реагентов многофункционального назначения. Она предусматривает подачу в продуктивный горизонт сульфаминовой кислоты в количестве 0,2 – 0,4 кг/т ГРМ, лигносульфоната 0,1 – 0,2 кг/т ГРМ в зависимости от количества карбонатных и глинистых минералов, коэффициента фильтрации руд в продуктивном пласте. Обоснованы эффективные параметры применения новой технологии в зависимости от минералогических характеристик руд вмещающих пород продуктивного горизонта. В целом обеспечивается интенсификация выщелачивания урана на этапе отработки эксплуатационных блоков и снижение удельных норм серной кислоты в сложных горно-геологических условиях уранодобывающих предприятий Республики Казахстан.

Объект исследования – урановые месторождения Сырдарьинской депрессии.

Предметом исследования являются технология скважинной добычи урановых руд.

Методологическая база научных исследований

При выполнении научных исследований использован анализ и обобщение научно-технической информации, методы математической статистики для обработки экспериментальных данных и технико-экономического обоснования различных вариантов технологий. При проведении лабораторных работ использовано, теоретическое обобщение экспериментальных данных, рентгенофазовый метод исследования минералогических характеристик проб керновых материалов и осадкообразующих компонентов. Экспериментальными работами на геотехнологических скважинах подтверждены полученные результаты с применением разработанной методики проведения испытаний. Она предусматривает сбор и мониторинг данных, отслеживание, сравнительный анализ геотехнологических характеристик скважин до и после

проведения испытаний с применением комплекса химических реагентов многофункционального назначения.

Научная новизна: установлена закономерность изменения физико-химических характеристик осадкообразующих компонентов от минералогического состава руд продуктивного горизонта и концентрации серной кислоты при скважинной разработке. Выявлены эффективные параметры и концентрации химических реагентов для повышения извлечения урана при выщелачивании в трубках в низкопроницаемых рудах. Установлена закономерность изменения расхода химических реагентов от гранулометрических и минералогических характеристик руд продуктивного горизонта при интенсификации скважинной добычи урана.

Соответствие работы направлениям развития науки или государственным программам

Диссертация выполнена в соответствии с проектами АР05131477 по теме: «Разработка новой технологии подземного выщелачивания урана с применением комплекса химических реагентов синергетического действия для скважинной добычи урановых руд», (2018-2020 гг), АР08856422 по теме: «Разработка инновационной технологии интенсификации скважинной добычи урана с применением гидродинамического устройства декольматации в сочетании с комплексом химических реагентов многофункционального назначения» (2020-2022 гг), в рамках грантового финансирования по научным и (или) научно-техническим проектам.

Публикации и апробация работы.

Основные положения диссертационной работы докладывались на E3S Web of Conferences 2020 году, международной научно-практической конференции «Рациональное использование минерального и техногенного сырья в условиях Индустрии 4.0» (г. Алматы, 2019г.), научно-практической конференции "САТПАЕВСКИЕ ЧТЕНИЯ - 2019" (г. Алматы, 2019 г.).

Апробация разработанной технологии интенсификации скважинной добычи урана была проведена в научной лаборатории исследования материалов ТОО «Институт высоких технологий» и в рамках НИР по теме: «Проведение опытно-промышленных испытаний с целью интенсификаций извлечения урана в сложных горно-геологических условиях за счет подбора оптимального состава растворов для РВР с разработкой технологического регламента по применению на ГТП» (2020 г) на месторождениях урана Сырдарьинской депрессии.

По теме диссертации опубликовано 15 печатных работ. Из них шесть в журнале, входящем во 2-ой квартиль по данным по базе данных Scopus (Скопус), пять – в журналах, входящих в 3-й квартиль по базе данных Scopus (Скопус), и четыре в материалах конференций. В каждую опубликованную статью докторантом был внесен достойный вклад, в них отражены выносимые на защиту положения, результаты, полученные докторантом в ходе проведенных исследований.

Получено 3 авторских права на разработанную технологию интенсификации скважинной добычи урана по теме:

- «Способ скважинной добычи урана из карбонатных и низкопроницаемых руд»;

- «Передвижная установка гидродинамической обработки технологических скважин»;

- «Способ интенсификации подземного выщелачивания урана».

1 ОСОБЕННОСТИ СКВАЖИННОЙ ДОБЫЧИ УРАНА НА РУДНИКАХ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

1.1 Особенности скважинной добычи урана на рудниках республики Казахстан

Технология скважинной разработки урановых месторождений предусматривает вскрытие рудного интервала системой геотехнологических скважин, подачу растворителя в нагнетательные скважины и откачку продуктивного раствора содержащего полезный компонент с добычных скважин и последующее сорбционное извлечение урана из раствора [11]. Растворение полезного компонента на месте залегания рудного тела с последующим выносом образовавшихся соединений из зоны реакции, осуществляется движущимся потоком раствора [12]. На добычных предприятиях Казахстана в качестве реагента растворителя применяются растворы серной кислоты, в связи с ее низкой стоимостью, доступностью, сравнительно высокой растворяющей способностью [13]. На рисунке 1 приведена схема движения технологических растворов при подземной скважинной разработке урановых месторождений.

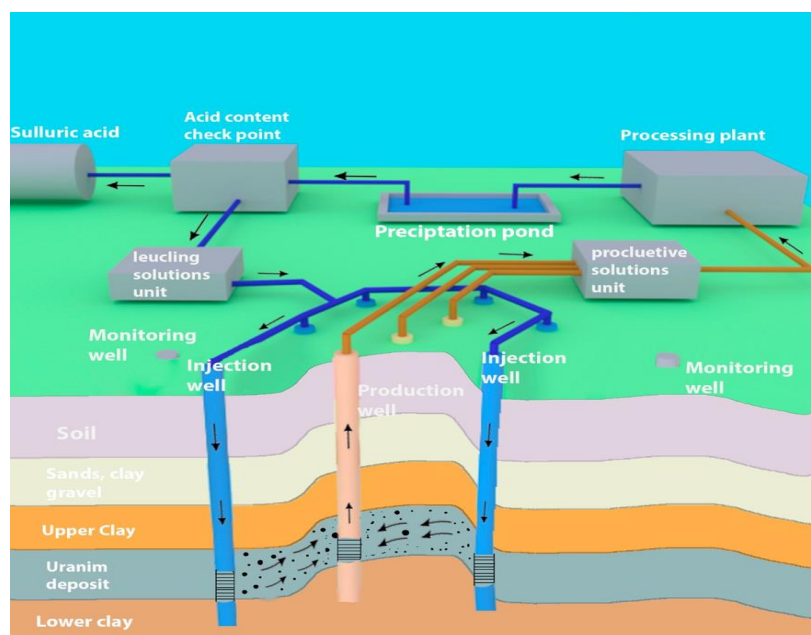


Рисунок 1. Схема движения технологических растворов при скважинной добыче урановых руд

Взаимодействие серной кислоты с минералами рудовмещающих пород вызывает выпадение осадков и образование геохимического барьера, препятствующие движению выщелачивающих растворов и понижающие фильтрационные характеристики рудовмещающих пород [14,15]. Кольматирующие фильтры скважин и прифильтовую зону продуктивного

горизонта осадки, в большинстве случаев, многокомпонентные и могут содержать одновременно сульфаты, сульфиды и карбонаты кальция и магния, соли железа, алюминия и их гидроксиды, а также песок и глину. Осаждаясь на поверхности фильтров и в порах пород продуктивного горизонта со временем укрупняются обезвоживаются и уплотняются [16]. Осадки имеют различную структуру и строение, на различных стадиях формирования обладают различной прочностью и растворяющей способностью. Конгломератные образования осадков связаны с влиянием процессов химической, частично механической, местами ионно-обменной цементацией прилегающих к фильтру пород отложениями [17,18]. В результате со временем производительность добычных и приемистость нагнетательных скважин снижается, сокращаются темпы добычи урана и увеличиваются удельные расходы серной кислоты, трудозатрат и других эксплуатационных расходов. Применяемые на добычных предприятиях методы интенсификации геотехнологических параметров скважин в сложных горно-геологических условиях малоэффективны и требуют длительных остановок в работе и значительного увеличения расхода химических реагентов, электроэнергии, дизельного топлива, трудозатрат, что ведет к повышению эксплуатационных расходов.

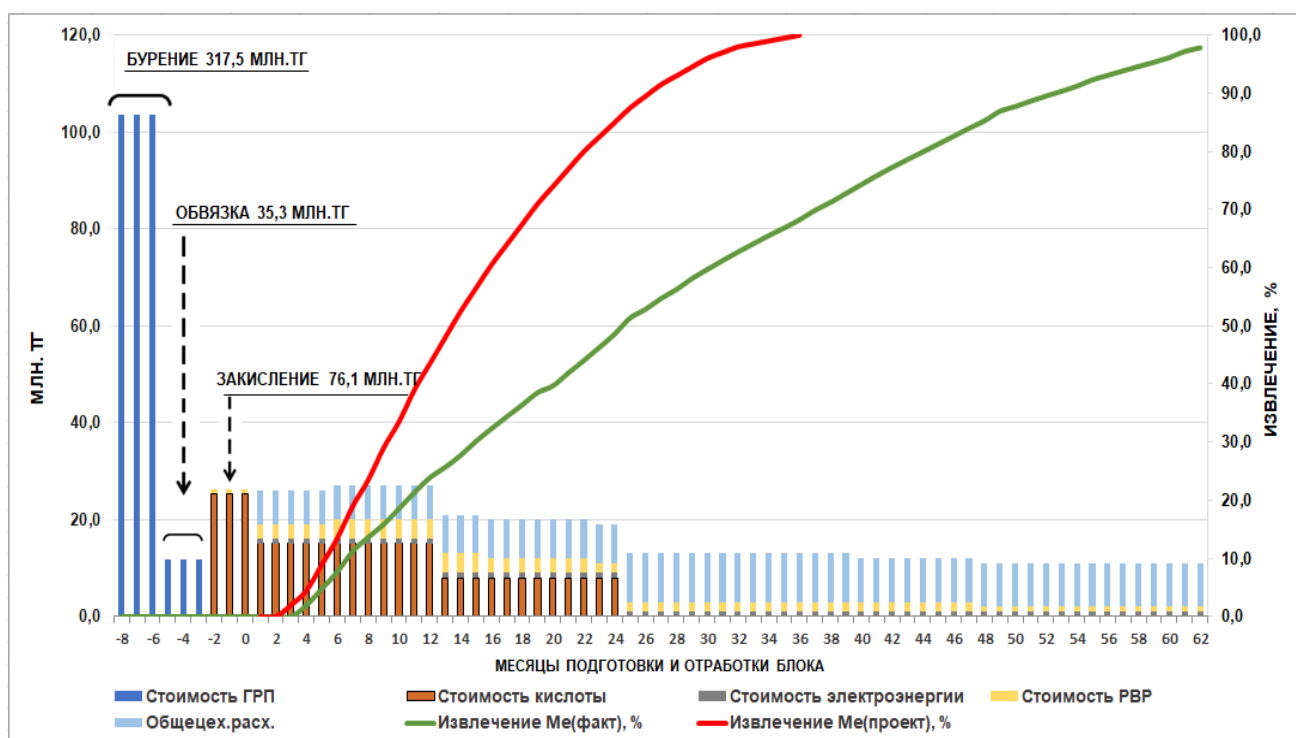


Рисунок 2 – Профиль расходов при подготовке и отработке технологического блока Сырдарьинской депрессии

Анализ и изучение геотехнологических особенностей скважиной добычи урана на месторождениях Сырдарьинской депрессии по которым были рассчитаны средние данные фактической отработки блока, затраты на

сооружение, обвязку и другие сопутствующие расходы на добычу. На рисунке 2 приведен построенный профиль расходов при подготовке и отработке технологического блока.

Из графика видно, что средний период сооружения геотехнологических скважин и обвязки технологического блока с целью вскрытия и отработки продуктивного горизонта составляет по 3 месяца. Данный период обусловлен расходами на бурение и сооружение геотехнологических скважин и расходы связанные с обвязкой скважин и технологического оборудования блока в среднем 317,5 и 35 млн. тенге на блок соответственно. Средний период закисления, т.е. подготовки урановой руды к добыче составляет 3 месяца, основные расходы связанные с закислением блока это приобретение серной кислоты, в среднем на 76 млн. тенге. Средний фактический период отработки блока составляет 62 месяца, при проектных значениях согласно плану горных работ в 36 месяцев, период отработки блока который превысил 36 месяцев считается проблемным. При этом основными затратами предприятия на этапе эксплуатации блока являются общецеховые, расходы на электроэнергию, серную кислоту и ремонтно-восстановительные работы. Период эксплуатации технологического блока является самым затратным для предприятия и при незапланированном увеличении сроков отработки себестоимость добычи увеличивается и снижается рентабельность предприятия.

Увеличение периода отработки в среднем на 26 месяцев вызвано снижением геотехнологических параметров скважин. В результате снижения производительности откачных и приемистости нагнетательных скважин, а также содержания урана в ПР извлечение урана из недр замедляется. Извлечение урана определяется как отношение суммы добытого урана из блока к имеющимся запасам в блоке, выражается в процентах по формуле 1 [19].

$$\varepsilon = \frac{P_U}{P}, \% \quad (1)$$

Где P_U – сумма добытого урана из блока, кг;

P – запасы урана в блоке, кг.

Добытый уран из недр P_U , определяется как количество урана, полученный в продуктивных растворах за определенный промежуток времени, за минусом урана, закаченного в блока с выщелачивающими растворами по формуле 2 [19].

$$P_U = Q_{ПР} * C_{У.ПР} - Q_{ВР} * C_{У.ВР}, \text{ кг} \quad (2)$$

Где: $Q_{ПР} Q_{ВР}$ – количество продуктивного и выщелачивающего раствора добытого из блока и поданного в блок, за определенный промежуток времени, м^3 ;

$C_{У.ПР} C_{У.ВР}$ – среднее содержание урана в продуктивном и выщелачивающем растворе за определенный промежуток времени.

Среднее содержание кислоты в ВР по блоку $C_{к.вр}$ определяется как среднеарифметическое, исходя из среднесуточных концентраций кислоты и объема выщелачивающих растворов за сутки по формуле 3 [19].

$$C_{к.вр} = \frac{\sum C_{i.вр} * Q_{i.вр}}{Q_{вр}}, \text{ г/л} \quad (3)$$

Где: $C_{i.вр}$ - среднесуточная концентрация серной кислоты в выщелачивающих растворах блока по данным расходомеров, г/л;

$Q_{i.вр}$ – объем выщелачивающих растворов по блоку за сутки, м³;

$Q_{вр}$ – объем выщелачивающих растворов по блоку за месяц, м³.

Расход кислоты поданного в недра блока в определенный период времени, определяют как разность весовых количеств кислоты, закаченной в блок с выщелачивающими растворами и откаченной из блока с продуктивными растворами по формуле 4 [19].

$$Q_{к} = Q_{вр} * C_{к.вр} - Q_{пр} * C_{к.пр}, \text{ кг} \quad (4)$$

Где: $Q_{к}$ – количество поданной в недра блока 100 кислоты за время t, кг;

$Q_{вр} Q_{пр}$ – количество поданных в блок выщелачивающих растворов и откаченных из блока продуктивных растворов за время t, м³;

$C_{к.вр} C_{к.пр}$ – концентрация кислоты в выщелачивающих и продуктивных растворах соответственно, г/л.

Удельный расход кислоты $q_{к}$ на килограмм добытого урана рассчитывается по формуле 5 [19].

$$q_{к} = \frac{\sum Q_{к}}{\sum P_{u}}, \text{ кг/кг} \quad (5)$$

Где: $\sum Q_{к}$ – суммарное количество кислоты поданное в блок, кг;

$\sum P_{u}$ – суммарное количество урана добытое на блоке, кг.

Удельный расход кислоты $d_{к}$ на тонну горно-рудной массы рассчитывается по формуле 6 [19].

$$d_{к} = \frac{\sum Q_{к}}{ГРМ}, \text{ кг/т} \quad (6)$$

Где: $\sum Q_{к}$ – суммарное количество кислоты поданное в блок, кг;

ГРМ – горно-рудная масса блока, т.

Однако в оборотном растворе маточнике сорбции остается остаточная серная кислота с кислотностью 1-3 г/л, что сопутствует процессу растворения урана на проблемных блоках. Однако по истечению 36 месяцев общецеховые, а также расходы связанные с проведением работ по восстановлению производительности и приемистости скважин и электроэнергии остаются до

вывода блока из отработки. Увеличение периода отработки влечет за собой повышение эксплуатационных расходов на добычу, перерасход электроэнергии и затрат связанных с проведением ремонтных работ на скважинах. На основе данных анализа профиля, была построена диаграмма отношения основных расходов при отработке месторождения урана (Рисунок 3) от себестоимости добычи.

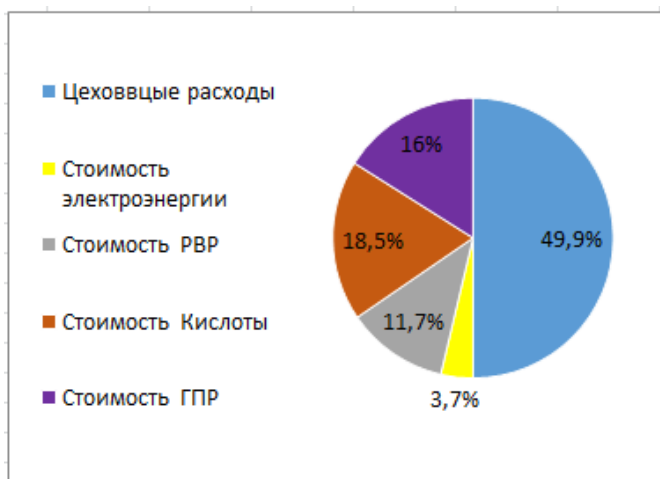


Рисунок 3 – Основные расходы при добычи урана

Как видно из рисунка 3, 49,9 % всех расходов на добычу составляют общецеховые расходы, которые включают фонд оплаты труда работников рудника, затраты на проживание и питание работников, обеспечение материальными средствами в том числе горюче-смазочными материалами и запасными частями, а также транспортные расходы. Вторым по величине затрат является расходы на транспортировку и приобретение серной кислоты и составляет 18,5 %, которая является основным реагентом растворителем. 16 % составляют расходы на горно-подготовительные работы (ГПР) включающие сооружение геотехнологических скважин и обвязку технологических блоков, геофизические исследования и приобретение основного технологического оборудования и расходных материалов к ним. Расходы связанные с проведением работ по восстановлению проницаемости продуктивного горизонта составляют 11,7 %. Затраты на электроэнергию составляют 3,7 %.

На основе расчетных данных профиля расходов, видно, что основные цеховые затраты связаны с жизнеобеспечением добычного комплекса 49,9 %, а также расходы связанные с работами по повышению фильтрационных характеристик пластов 11,7 %, затраты на электроэнергию 3,7 % делятся на протяжении от ввода скважин в добычу до вывода скважин на консервацию. При сокращении времени отработки блоков за счет повышения геотехнологических параметров, повышению производительности добычных и

приемистости нагнетательных скважин эксплуатационные расходы на добычу снизятся.

1.2 Геотехнологические параметры скважинной добычи урана на месторождениях Казахстана

Работа эксплуатационных скважин в сложных и особенных горно-геологических условиях, связанна с рядом факторов снижающих темпы добычи продуктивных растворов и нагнетания технологических растворов в рудоносные горизонты. Одним из факторов является снижение фильтрационных характеристик руд в связи с так называемым эффектом химической или механической, а также комбинированной кольтматации фильтров скважин и рудовмещающих пород продуктивного горизонта. Химический тип осадкообразований обусловлен выпадением осадков в виде гипса, карбонатов магния, кальция, слабо растворимых солей железа, алюминия, и т.д. при повышении рН среды или изменения скорости потока продуктивных растворов, по мере их продвижения по рудоносному горизонту и закупоривают поры в песке. В случае механической кольтматации происходит принос потоком раствора к откачным скважинам мелких и тонких глинистых частиц, которые накапливаются и нарушают первоначальную фильтрацию. Химическая и механическая кольтматации смешиваются и образуют устойчивый геохимический барьер закупоривающий поры, что приводит к снижению скорости фильтрации раствора по рудным телам и сокращению дебита скважин.

С целью разработки эффективных подходов восстановления проницаемости продуктивного горизонта, на примере действующих скважин будет произведен мониторинг и анализ работы геотехнологических скважин в сложных горно-геологических условиях каждого яруса. Специалистами лаборатории произведен выбор проблемных скважин для дальнейшего его анализа и установления последствий влияния рудовмещающих пород на геотехнологические параметры скважин и содержание урана в ПР при подземном скважинном выщелачивании. На основании мониторинга геотехнологических параметров скважин были построены графики средних значений дебитов и содержание урана в ПР скважин Сантонского, Маастрихтского и Кампанского рудных интервалов. На рисунке 4 приведены данные геотехнологических параметров скважин Сантонского яруса.

Как видно из рисунка 4 дебит откачных скважин варьируется в больших пределах 4,6 – 6,5 м³/ч, при сравнительно стабильных значениях близких к проектным 6,2 м³/ч. Однако содержание урана в ПР варьируется в пределах 30 – 124 мг/л и постепенно снижается до минимальных значений.

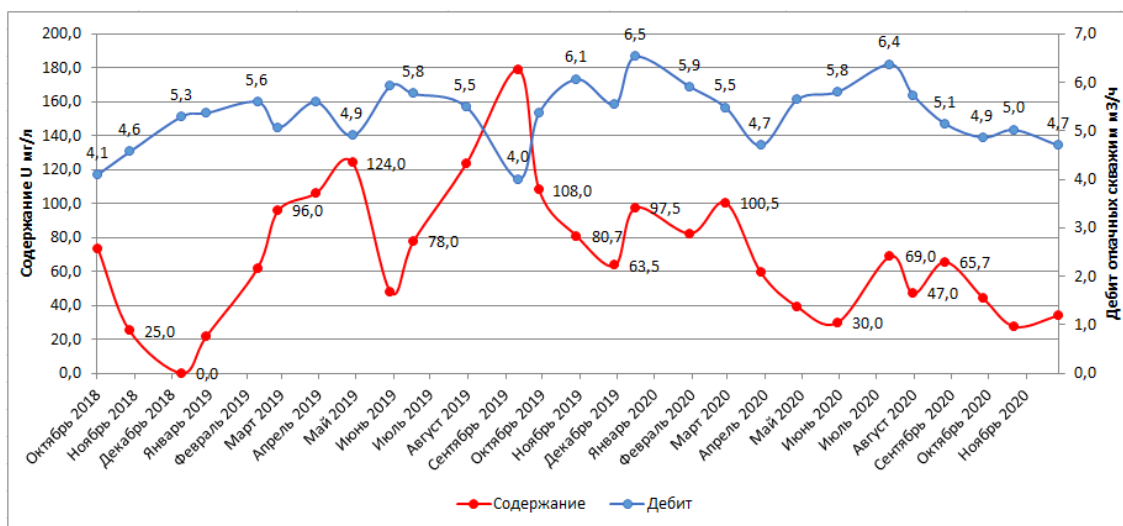


Рисунок 4 – Средние содержание урана в продуктивном растворе и производительность скважин Сантонского яруса

Низкое содержание урана в ПР свидетельствует о образовании устойчивых линий тока и сложной структурой урановой минерализации. Проектные параметры производительности скважин по ПР подтверждают незначительную неоднородность продуктивного горизонта и ни большое осадкообразование. На блоках Сантонского яруса коэффициент использования скважин остается в пределах проектных значений при высокой эффективности традиционных методов интенсификации скважиной добычи. На рисунке 5 приведены результаты мониторинга геотехнологических параметров выбранных скважин Маастрихтского яруса.

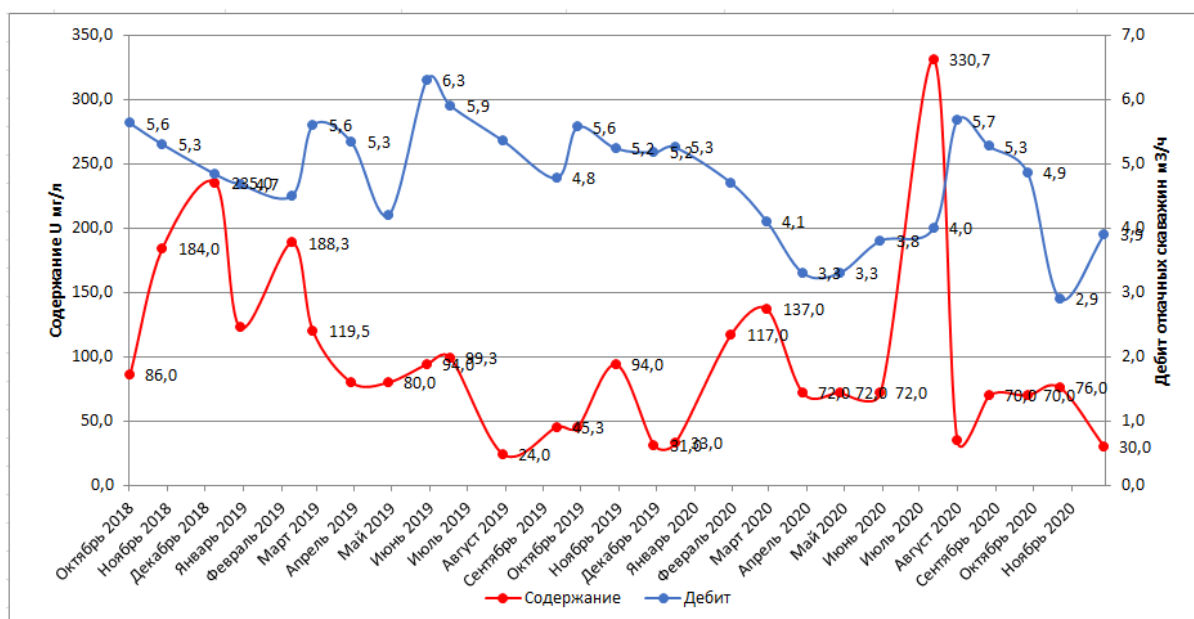


Рисунок 5 – Средние содержание урана в продуктивном растворе и производительность скважин Маастрихтского яруса

Как видно из рисунка 5 на скважинах Маастрихтского яруса колебания средних значений содержания урана в ПР выше чем на Сантонском горизонте, и варьируется в пределах 24 – 330 мг/л. Заметно постепенное волнообразное снижение значения производительности скважин по ПР с 6,3 – 3,3 м³/ч, что значительно ниже проектной производительности откачной скважин. В сложных горно-геологических условиях на скважинах Маастрихтского яруса коэффициент использования скважин ниже проектных значений в связи с осаждением гипса и снижению фильтрационных характеристик пластов. Снижение содержания урана в ПР вызвано образованием геохимического барьера и изменением тока выщелачивающих растворов. Небольшая корреляция значений дебита скважин с проведением ремонтных работ традиционными методами говорит о средней эффективности применяемых методов. Применение комплексных, дорогостоящих методов восстановления проницаемости продуктивного горизонта с целью интенсификации скважинной добычи урана показывает достаточную эффективность, однако в некоторых случаях результаты не удовлетворительные. На рисунке 6 приведены результаты мониторинга геотехнологических параметров выбранных скважин Кампанского яруса.

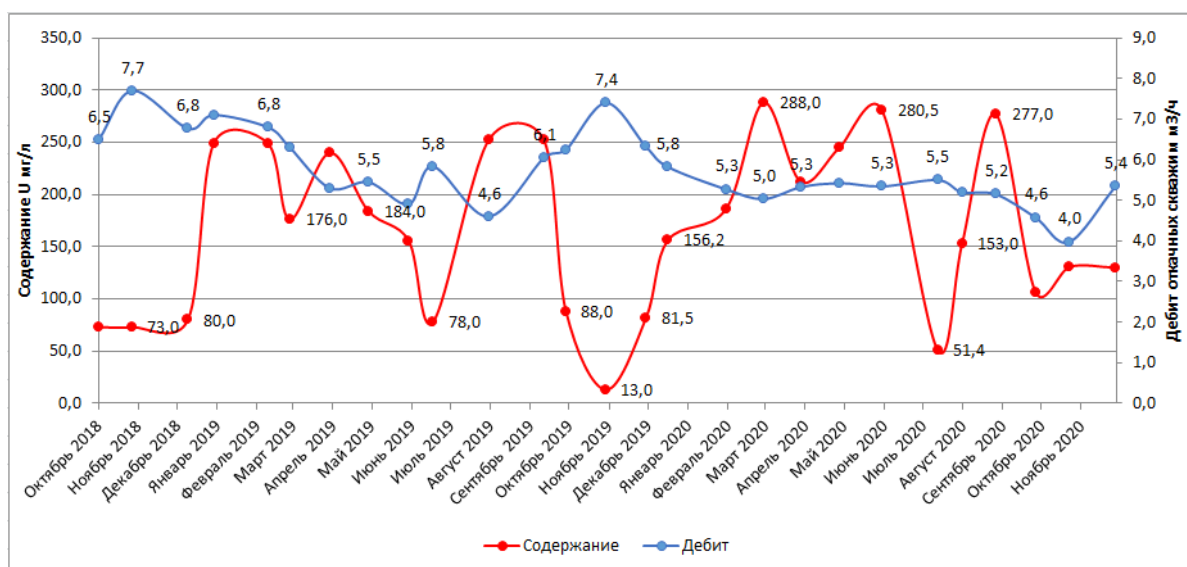


Рисунок 6 – Среднее содержание урана в продуктивном растворе и производительность скважин Кампанского яруса

Как видно из графика среднее содержание урана в ПР колеблется в больших пределах и от 82 до 288 мг/л а средний дебит выбранных скважин постепенно снижался с 7,7 до 4,0 м³/ч. Это свидетельствует о кольматации порового пространства продуктивного горизонта и образовании непроницаемых участков. Средняя производительность откачных скважин по ПР значительно ниже проектных значений, что подтверждает высокую неоднородность продуктивного горизонта и наличие гипсовых и глинистых

минералов в вмещающих породах. Высокие колебания содержания урана в ПР и отсутствие корреляции с проведением ремонтных работ на участке, при стабильном снижении дебита откачных скважин свидетельствует о образовании непроницаемых участков геохимического барьера. На скважинах Кампанского яруса низкая эффективности проведения работ по восстановлению фильтрационных характеристик продуктивного горизонта традиционными методами. Коэффициент использования скважин на Кампанском ярусе ниже проектных значений, что увеличивает период отработки блока, это повышает эксплуатационные расходы и себестоимость и снижает эффективность скважиной добычи урана.

Согласно результатам мониторинга геотехнологических параметров скважин Сантонского, Маастрихтского и Кампанского ярусов было установлено, что геотехнологические параметры скважин Сантонского яруса в пределах проектных. Это обусловлено однородностью минералогического состава продуктивного горизонта и незначительными осадкообразованиями в виде гипса. Параметры добычи на скважинах вскрывающие Маастрихтский рудный интервал незначительно ниже проектных. Это связано с незначительной неоднородностью минералогического состава продуктивного горизонта и вмещающих пород, а также осадкообразованиями в виде гипса. Устранения которых осуществимо традиционными методами повышения фильтрационных характеристик продуктивного горизонта. Процесс скважинной добычи руд на Кампанском ярусе затруднен в виду совокупности высокой неоднородности минералогического состава продуктивного горизонта и образованием многокомпонентных сложно растворимых осадкообразований. Повышение фильтрационных характеристик традиционными методами не эффективен и требует длительных остановок скважин на проведение ремонтных работ, результаты которые оставляют желать лучшего. В результате снижается эффективность скважинной добычи урана, а период отработки блоков увеличивается, в следствии чего повышаются эксплуатационные расходы на добычу и увеличивается себестоимость товара.

1.3 Анализ применяемых методов интенсификации скважинной добычи урана на предприятиях скважинной добычи

На территории Казахстана расположено примерно 14 % общемировых разведанных запасов урана. Казахстан занимает второе место после Австралии, по запасам урана, 70 % из них пригодны для разработки скважинным способом. Разведанные месторождения локализованы в шести провинциях: Шу-Сарысуйская, Сырдарьинская, Северо-Казахстанская, Прикаспийская, Прибалхашская, Илийская, добыча урана ведется в первых трех Кызылординской, Туркистанской и Северо-Казахстанской областях [20]. На

рисунке 7 приведены расположение месторождений урана на территории Казахстана.

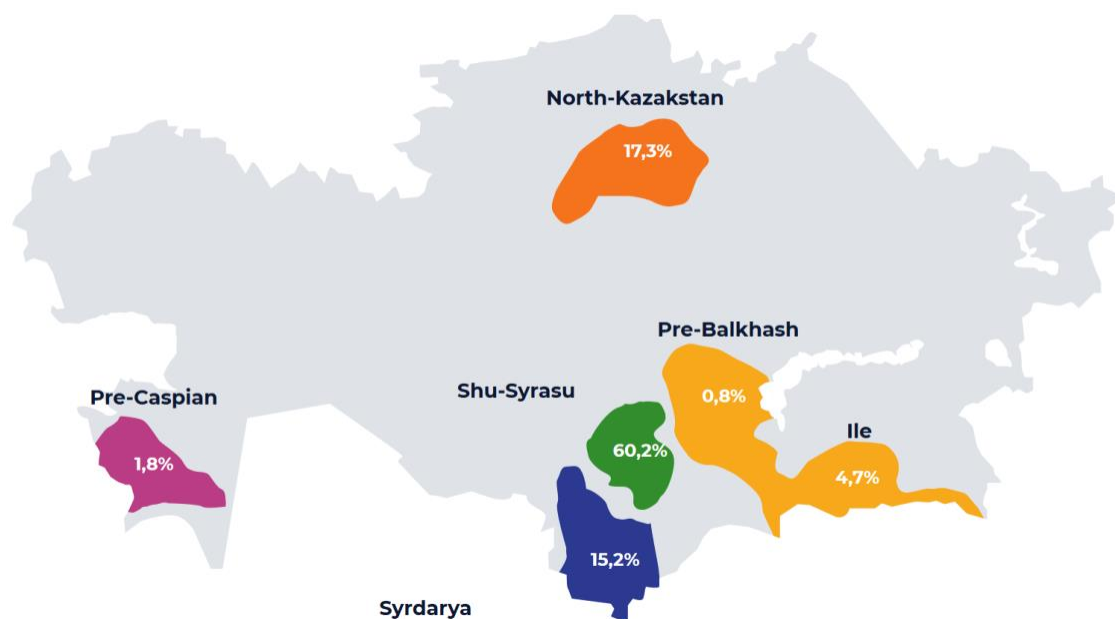


Рисунок – 7 Схема расположения месторождений урана

Разработка пластовых инфильтрационных месторождений урана скважинным способом предполагает замещение поровой жидкости в продуктивном горизонте нагнетаемым раствором растворителем, который вступает во взаимодействие с минералами горных пород [21]. В результате в недрах протекает множество различных физико-химических процессов [22]. При этом эксплуатация геотехнологических скважин показывает, что со временем наблюдается снижение производительности добычных и приемистость нагнетательных скважин. Основной причиной изменений в работе технологических скважин и следовательно всего добычного комплекса является снижение фильтрационных свойств руд продуктивного горизонта и увеличение гидравлических сопротивлений в следствии кольматации.

Применяемые на добычных предприятиях методы и технологические решения по восстановлению или повышению проницаемости пород продуктивного горизонта по характеру работы и используемого технологического оборудования и материалах классифицируются на физические, химические и комбинированные. Для корректного выбора применения определенного метода ремонтно-восстановительных работ (РВР) на скважине следует учитывать характеристики технологического оборудования и материалов, гидрогеологические условия руды, конструкцию скважины и фильтра, и других характерных факторов месторождения.

В таблице 1 приведена краткая характеристика применяемых методов повышения фильтрационных характеристик продуктивного горизонта.

Таблица – 1 Применяемые методы восстановления производительности скважин

Характер воздействия	Метод осуществления	Основное назначение	Эффективность
Гидродинамический	Эрлифтная прокачка	Удаление глинистого раствора, механических взвешенных частиц и примесей из ПЗП	Высокая
	Промывка водой	Удаление песчаных пробок из колонны и фильтровой части скважины	Средняя
Реагентные	Пневмоимпульсная	Удаление мелких пылевидных частиц и глинистых материалов из ПЗП	Средняя
	Серно-кислотная	Растворение железистых и алюминиевых химических отложений	Средняя
	Соляно-кислотная	Растворение железистых, алюминиевых и карбонатных химических отложений	Высокая
Комплексные	Глин-кислотная	Растворение карбонатных и кремниевых химических и механических отложений	Высокая
	Промывка, химическая обработка, поршневание и прокачка	Удаление мелких пылевидных частиц и глинистых материалов из ПЗП и растворение железистых и карбонатных химических отложений	Высокая

Как видно из таблицы основные применяемые методы и технические решения направленные на восстановление производительности геотехнологических скважин делятся на гидродинамические реагентные и комплексные. Гидродинамические методы основаны на удалении твердых и мелкодисперсных, пастообразных с малой прочностью частиц из пласта и препятствующие фильтрации растворов [23].

Реагентные методы основаны на взаимодействии вводимых в пласт химических реагентов с коагулирующими образованиями, растворением их и удаляемые из скважины обычно путем откачки [24].

Комплексные методы обработки скважин основаны на применении самоходных буровых установок для последовательной обработки и воздействия на пласт различными методами, такими как промывка, химическая обработка, поршневание, капитальный ремонт скважин и эрлифтная прокачка [25].

Гидравлические методы применяются на участках преимущественно с механическим типом осадков, позволяет удалять песчаные пробки и глинистые образования во внутренней и наружной части фильтра скважин напором струи промывочного раствора и созданного перепада давления в системе пласт - скважина. В результате происходит обрушение заглинизированной зоны ствола

[26]. Гидравлические методы применяются для разглинизации высоконапорных пластов и осуществляются по следующим технологическим схемам.

Промывка зафильтрованного пространства фильтра через напорный рукав заключается в том, что вода нагнетается по напорному рукаву, размещенному на закольматированном участке фильтра. В результате поток воды устремляется в кольцевой зазор между фильтром и стенками скважины, размывая и удаляя песчаную пробку и глинистую корку. По окончании промывки напорный рукав поднимают, а дно отстойника засыпают гравием [27].

Откачка эрлифтом или струйным насосом создает понижение столба жидкости в скважине. Тем самым создаются условия, при которых пластовое давление становится больше гидростатического давления столба жидкости в скважине. Под действием возникшего перепада давления глинистая корка и осадкообразования разрушается, удаляются при откачке [28].

Гидроимпульсные методы освоения скважин наиболее эффективны и заключаются в воздействии ударных волн на эксплуатируемый продуктивный пласт в сочетании с откачкой. Средства для создания гидроимпульсов могут быть самыми различными: откачка эрлифтом с прерывателем потока жидкости, пневмо-электро взрывы [29].

Эффективность гидродинамических методов достигается при продолжительной обработке закольматированных фильтров скважин за счет низкой себестоимости, мобильности метода. Однако на участках при цементированных многокомпонентных осадкообразованиях гидродинамические методы не мало эффективны.

Реагентная обработка скважин – химический способ регенерации скважин заключающийся в подаче специальных растворов химических реагентов в фильтровую и прифильтровую зону для растворения кольматирующих образований.

Реагентная обработка скважин применяется на участках геотехнологического поля характеризующихся сильной химической кольматацией и в случаях, когда гидро-динамические методы очистки фильтров и прифильтровой зоны не дают положительного результата [30]. Обработка геотехнологических скважин проводится после проведения компрессорной прокачки для удаления песчаных пробок, промывки фильтровой колонны и отстойника, эрлифтной прокачки скважины [31].

Реагентные способы проведения РВР подразделяются по составу:

- сернокислотной обработкой фильтров и прифильтровой зоны 10-20% раствором серной кислоты;

- глино-кислотной обработкой фильтров и прифильтровой зоны 1,5 – 2,5% раствором глино кислоты

Высокая эффективность химической обработки скважин достигается за счет растворяющих способностей различных минеральных кислот осадкообразований, мобильности метода. Однако наблюдается снижение эффективности метода при наличии в фильтре механической кольтмации, песчаных пробок и несвоевременном удалении продуктов химической реакции.

1.4 Оценка количественно-качественных характеристик проведения РВР на уранодобывающих предприятиях

В процессе проектирование отработки геологических блоков планируется проведение ремонтно-восстановительных работ различными методами, предусмотренных себестоимостью добычи. Основными методами по восстановлению проницаемости пород призабойной зоны при проведении РВР является физический, химический и комбинированный. При выборе технологии восстановления проницаемости следует исходить из возможности каждого способа декольтмации фильтров и прифильтровых областей скважин. Также при выборе метода интенсификации необходимо учитывать гидрогеологические условия, технологией бурения, конструкцией скважины, фильтра и других характерных факторов месторождения. В таблице 2 приведены данные проведения работ восстановления производительности скважин по видам на месторождении «Канжуган».

Таблица 2 – Количество проведения работ по восстановлению производительности скважин на руднике «Канжуган»

Методы РВР	Количество, шт	Затраты, тыс. тенге	Себестоимость
Пневмоимпульсная обработка	1861	56016,1	30,1
Эрлифтная прокачка	1897	86882,6	45,8
Тяжелый ремонт	710	21452,4	30,3
Реагентная обработка	209	17179,8	82,2

Как видно из таблицы 2 и рисунка 2 примерно одинаковое количество обработок скважин производится эрлифтной прокачкой и пневмо-импульсной обработкой 1897 и 1861 единиц в год соответственно. Проведение тяжелого ремонта составляет 708 скважин в год, при химических обработок 209 скважин в год. На рисунке 8 приведена сравнительная диаграмма по количеству работ по видам. На рисунке 9 приведена сравнительная диаграмма расходов по видам работ.

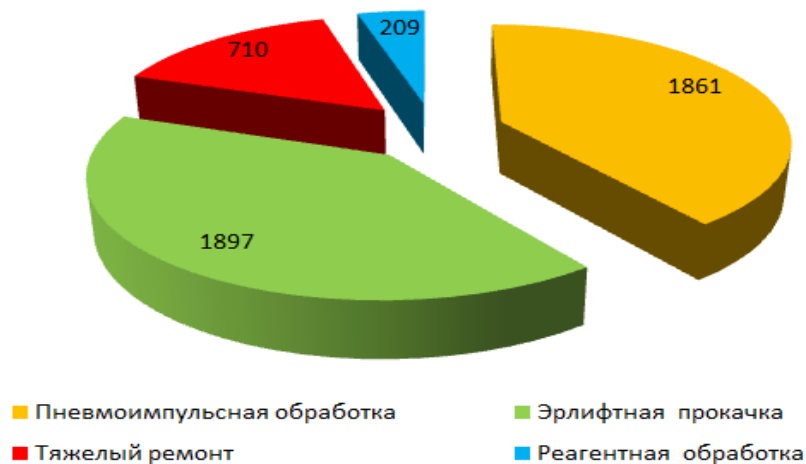


Рисунок 8 - Количество проведения ремонтно-восстановительных работ на месторождении «Канжуган» по видам

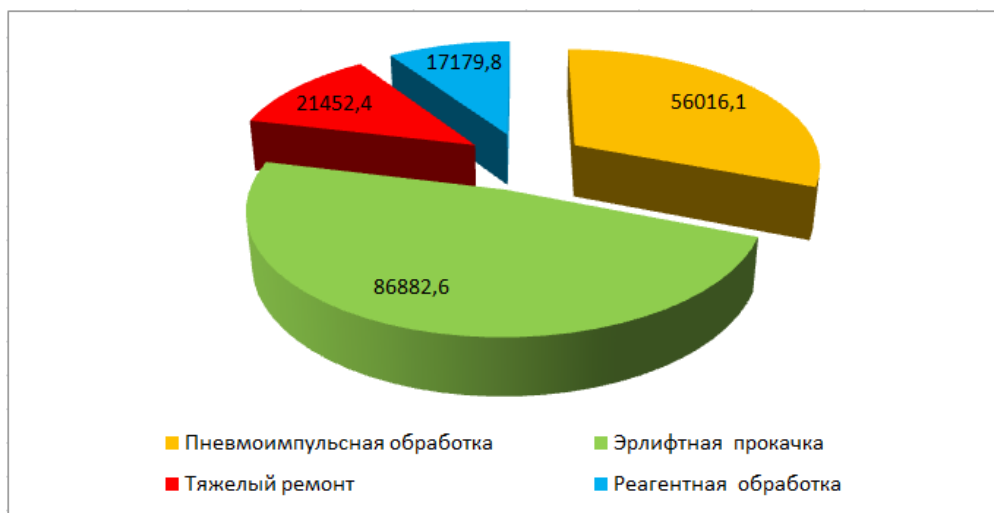


Рисунок 9 – Расходы на проведения ремонтно-восстановительных работ на месторождении «Канжуган» по видам, тыс. тенге

Как видно из рисунка 9 при одинаковых количественных значениях обработок скважин, основные расходы на проведения работ по восстановлению фильтрационных характеристик скважин связаны с проведение эрлифтной обработки и составляют 86 882,6 тыс. тенге в год при себестоимости одной обработки 45,8 тыс тенге. Расходы на пневмоимпульсную обработку составляют 56 016,1 тыс. тенге в год при себестоимости одной обработки 30,1 тыс. тенге. Это обусловлено высокой себестоимостью проведения эрлифтной обработки в связи с расходами на горюче-смазочные материалы, запасные части и расходных материалов. На третьем месте по расходам находятся затраты на тяжелого ремонта, которые составляют 21 452,4 тыс. тенге в год при себестоимости одной обработки 30,3 тыс. тенге. Годовые расходы на проведение химических обработок скважин составляют 17 179,8 тыс. тенге при себестоимости одной обработки 82,2 тыс. тенге. Высокая себестоимость

проведения химической обработки обусловлена затратами на приобретение специальных химических реагентов.

Количественные данные проведения работ по интенсификации скважинной добычи урана по видам на месторождении «Северный Харасан» приведены в таблице 3. На рисунке 10 приведена сравнительная диаграмма по видам работ на месторождении «Северный Харасан».

Таблица 3 - Количество запланированных и проведенных РВР скважин на месторождении «Северный Харасан»

Методы РВР	Количество, шт	Затраты, тыс. тенге	Себестоимость
Эрлифтная прокачка	4458	356 640,0	80,0
Пневмоимпульсная обработка	2278	88 386,4	38,8
Хим.обработка БФА	276	24 591,6	89,1
Тяжелый ремонт	188	22 466,0	119,5

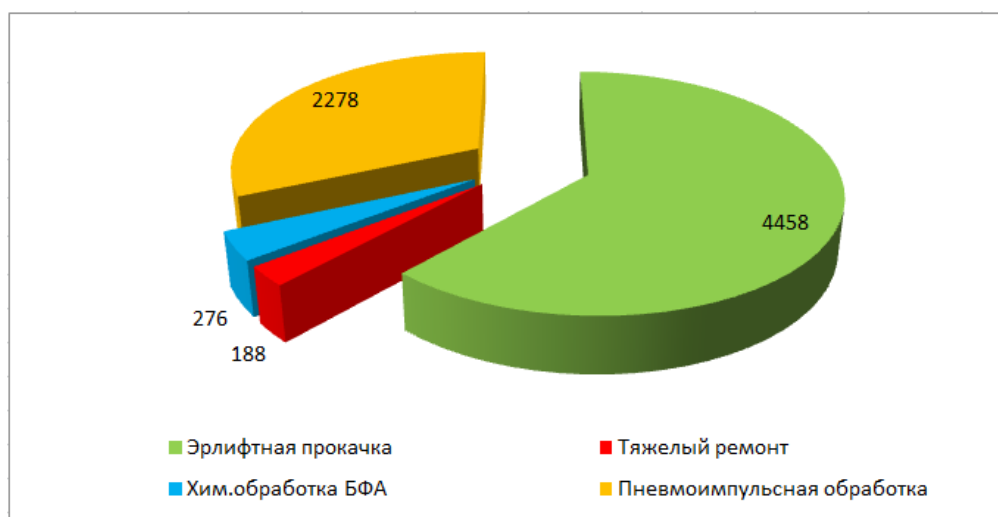


Рисунок 10 – Количество РВР скважин по видам работ на месторождении «Северный Харасан» в количественном соотношении

Как видно из таблицы 3 и рисунка 10 максимально количество обработок скважин у эрлифтной прокачки и составляет 4458 шт в год. На втором месте пневмо-импульсная обработка 2278 шт в год. И химическая обработка и тяжелый ремонт 276 и 188 шт в год соответственно. На рисунке 11 приведена сравнительная диаграмма расходов по видам работ.

Как видно из рисунка 11 основная часть затрат составляет эрлифтная прокачка 356 640 тыс тенге при себестоимости одной обработки 80 тыс. тенге. На втором месте затраты на проведение пневмоимпульсной обработки скважин, которые составляют 88 386,4 тыс. тенге в год, при себестоимости одной обработки 38,8 тыс. тенге. Затраты на проведение химических обработок скважин составляют 24 591,6 тыс. тенге в год при себестоимости одной обработки 89,1 тыс. тенге. Затраты на проведение тяжелого ремонта составляют

22 466 тыс. тенге при средней себестоимости одной обработки 119,5 тыс. тенге. Высокая себестоимость обусловлена низкой производительностью труда и большими трудозатратами при производстве работ.

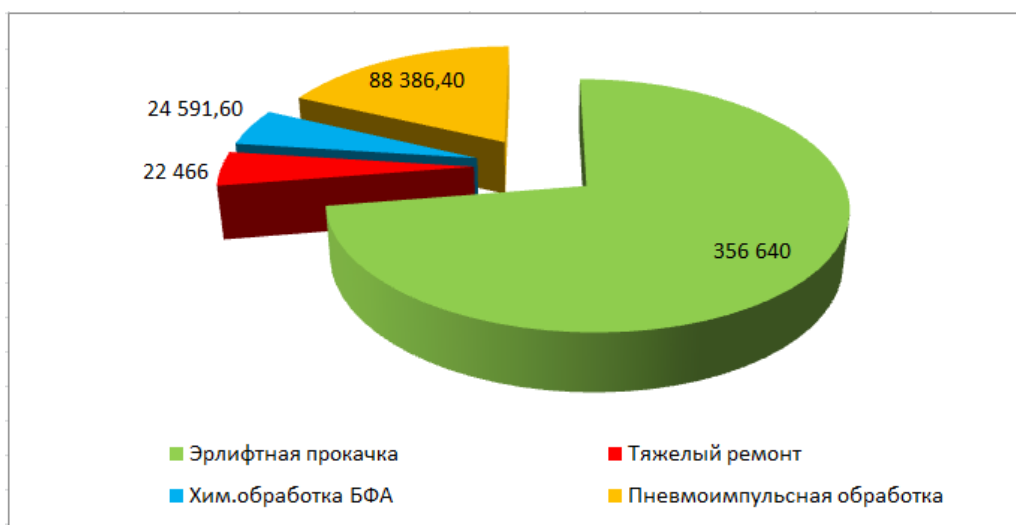


Рисунок 11 - Расходы на проведения ремонтно-восстановительных работ на месторождении «Северный Харасан» по видам, тыс. тенге

Таблица 4 - Количество запланированных и проведенных РВР скважин на месторождении «Ирколь»

Методы РВР	Количество, шт	Затраты, тыс. тенге	Себестоимость
Эрлифтная прокачка	2120	169473,4	79,9
Хим.обработка БФА	1455	143343,3	98,5
Хим обработка H ₂ SO ₄	1376	122118,7	88,7
Тяжелый ремонт	173	53447,5	308,9

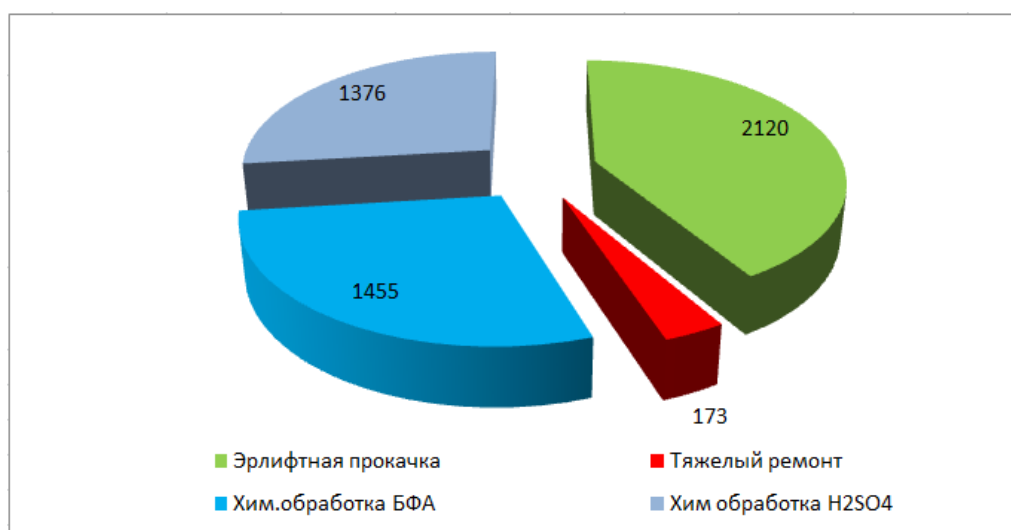


Рисунок 12 – Количество РВР скважин по видам работ на месторождении «Ирколь» в количественном соотношении

Количественные данные проведения работ по интенсификации скважинной добычи урана по видам на месторождении «Ирколь» приведены в

таблице 4. На рисунке 12 приведена сравнительная диаграмма по видам работ на месторождении «Ирколь».

Как видно из таблицы 4 и рисунка 12 максимально количество обработок скважин у эрлифтной прокачки и составляет 2120 шт в год. На втором и третьем месте химическая обработка с применением БФА и химическая обработка с применением серной кислоты 1455 и 1376 шт в год соответственно. Количество проведения тяжелого ремонта составляет 173 обработок в год. На рисунке 13 приведена сравнительная диаграмма расходов по видам работ.

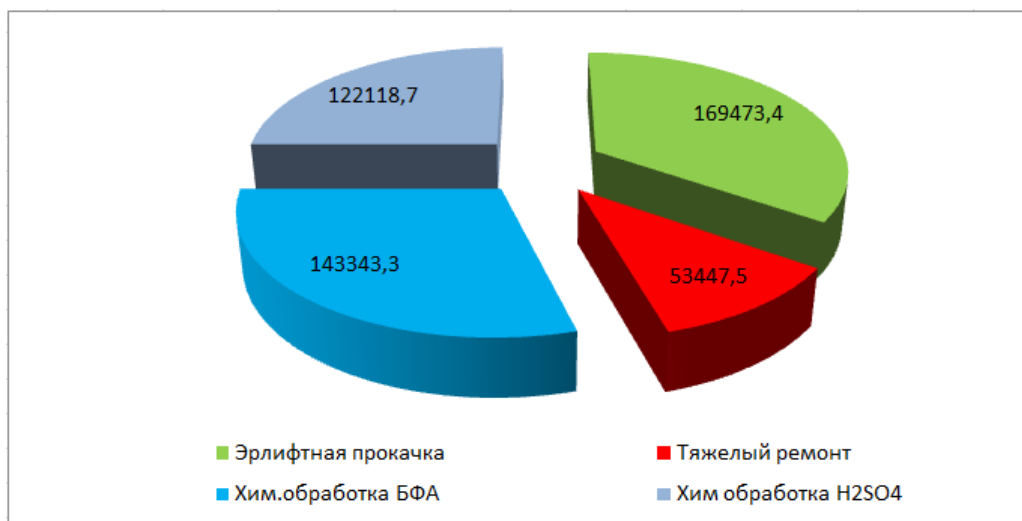


Рисунок 13 - Расходы на проведения ремонтно-восстановительных работ на месторождении «Ирколь» по видам, тыс. тенге

Как видно из рисунка 13 основная часть затрат составляет эрлифтная прокачка 169 473,4 тыс тенге при себестоимости одной обработки 79,9 тыс. тенге. На втором и третьем месте химическая обработка с применением БФА и химическая обработка с применением серной кислоты 143 343,3 и 122 118,7 тыс. тенге в год при себестоимости одной обработки 98,5 и 88,7 тыс. тенге соответственно. Затраты на проведение тяжелого ремонта составляют 53 447,5 тыс. тенге при средней себестоимости одной обработки 308,9 тыс. тенге. Высокая себестоимость также обусловлена низкой производительностью труда и большими трудозатратами при производстве работ.

Количественные данные проведения работ по интенсификации скважинной добычи урана по видам на месторождениях «Северный и Южный Карамурун» приведены в таблице 5. На рисунке 14 приведена сравнительная диаграмма по видам работ на месторождениях «Северный и Южный Карамурун».

Как видно из таблицы 5 и рисунка 14 максимально количество обработок скважин у эрлифтной прокачки и составляет 9354 шт в год. На втором месте химическая обработка с применением серной кислоты 2103 шт в год. Треть место по количеству проведенных обработок занимает

пневмоимпульсный метод и составляет 1424 шт. в год. Химическая обработка с применением бифторида аммония составляет 688 шт в год. Количество проведенных промывки установкой и тяжелого ремонта составляют 573 и 488 обработок в год соответственно. На рисунке 15 приведена сравнительная диаграмма расходов по видам работ.

Таблица 5 - Количество запланированных и проведенных РВР скважин на месторождениях «Северный и Южный Карамурун»

Методы РВР	Количество, шт	Затраты, тыс. тенге	Себестоимость
Эрлифтная прокачка	9354	618773	66,1
Хим обработка H ₂ SO ₄	2103	35792,2	170,1
Пневмоимпульсная обработка	1424	76846,7	53,9
Хим.обработка БФА	688	65460,1	95,1
Промывка скважин	573	34969,6	61
Тяжелый ремонт	448	314153,4	701,2

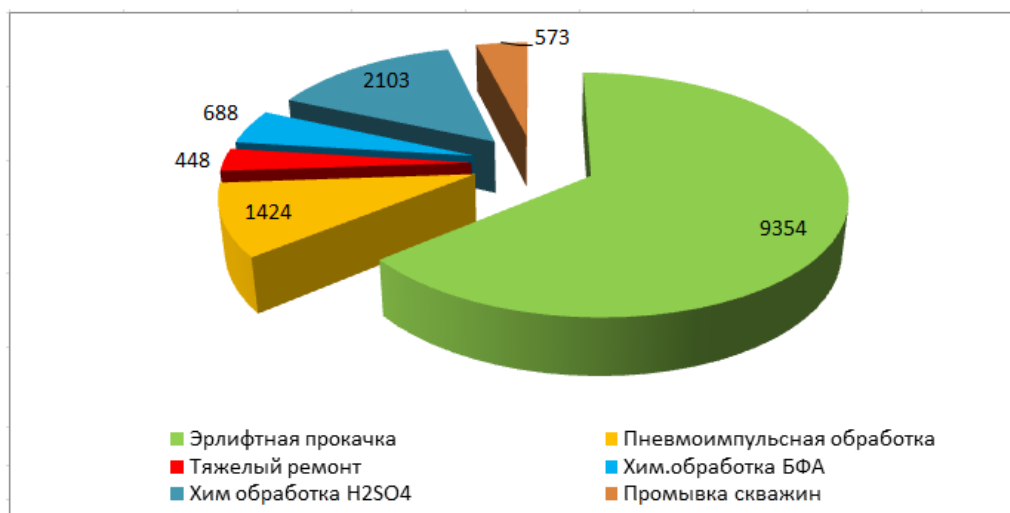


Рисунок 14 – Количество РВР скважин по видам работ на месторождении «Северный и Южный Карамурун» в количественном соотношении

Как видно из рисунка 15 основная часть затрат составляет эрлифтная прокачка 618 733 тыс тенге при себестоимости одной обработки 66 тыс. тенге. На втором месте по сумме затрат расположен тяжелый ремонт скважин, сумма затрат составляет 314 153,4 тыс. тенге в год при себестоимости одной обработки 701 тыс. тенге. Высокая себестоимость тяжелого ремонта скважин обусловлена низкой производительностью труда и большими трудозатратами. Ежегодные затраты на проведение пневмо-импульсной обработки составляют 76 846,7 тыс. тенге, а себестоимость одной обработки 53,9 тыс. тенге. Ежегодные затраты на проведение химических обработок скважин с применением бифторида аммония и серной кислоты 65 460,1 и 35 792,2 тыс. тенге в год при себестоимости одной обработки 95,1 и 170,1 тыс. тенге

соответственно. Затраты на проведение промывки скважин установкой составляют 34 969,6 тыс. тенге при средней себестоимости одной обработки 61 тыс. тенге.

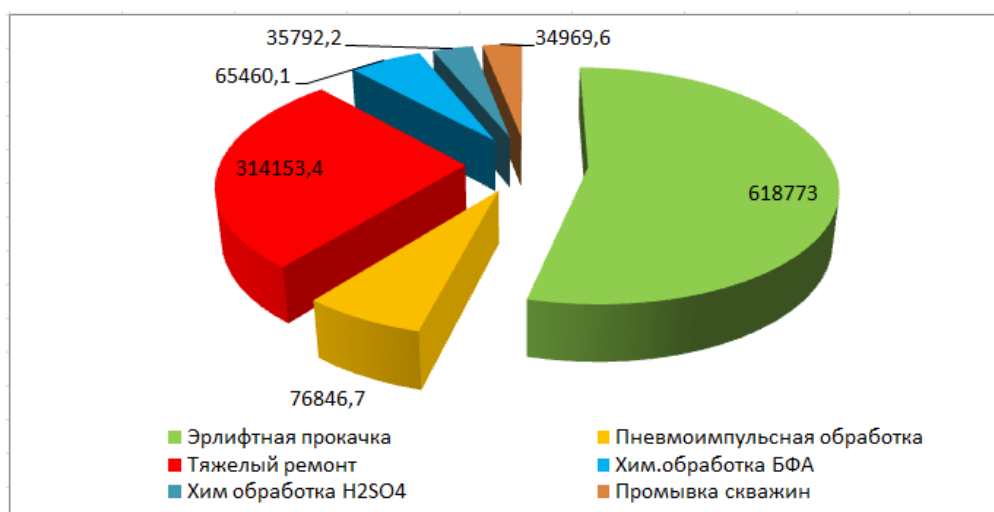


Рисунок 15 - Расходы на проведения ремонтно-восстановительных работ на месторождении «Северный и Южный Карамурун» по видам, тыс. тенге

Анализ эффективности применяемых методов интенсификации производительности скважин на добычных предприятиях показывает высокую распространённость гидродинамических методов с низкой себестоимостью таких как эрлифтная прокачка, пневмо-импульсная обработка. Из реагентных методов наибольшую распространённость имеет химическая обработка с применением бифторида аммония. Это обусловлено высокой эффективностью на участках с высокой химической кольтатацией. Необходимость применение дорогостоящего тяжелого ремонта скважин обусловлено его незаменимостью на участках со сложной структурой осадкообразований при недостаточной эффективности гидродинамического или реагентного метода по отдельности.

2. ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ПОДЗЕМНОГО СКВАЖИННОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ УРАНОВЫХ РУД

2.1 Исследования структуры и количественно-качественных характеристик рудовмещающих пород месторождений урана Сырдарьинской депрессии

Растворение урановых минералов является главным процессом скважинной разработки месторождений, так как это определяет количественные и стоимостные параметры конечного продукта [32]. Серная кислота является основным растворяющим реагентом на предприятиях скважинной добычи Казахстана. Преимуществами серной кислоты является ее доступность в народном хозяйстве, достаточно низкая стоимость, высокая растворяющая способность урановых минералов [33]. Недостатками применения серной кислоты являются ее высокая реакционная способность взаимодействия с карбонатными и глинистыми минералами рудовмещающих пород. Это приводит к осадкообразованию в продуктивном пласте и образованию геохимических барьеров, препятствующие процессам выщелачивания [34]. Выпадение в осадок ранее растворенных компонентов и ПР изменяют линии токов технологических растворов в поровом пространстве, снижают содержание урана в ПР и затрудняют процессы при подземном скважинном выщелачивании урановых руд. Изучение минералогических характеристик рудовмещающих пород позволит установить причины осадкообразования, выбрать эффективные методы и подходы для решения вопросов эффективности технологии скважиной добычи урана. Пробы кернового материала были отобраны из продуктивных пластов Сантонсокого, Маастритского и Кампанского ярусов уранового месторождения «Северный Харасан».

Количественно-качественный анализ минералогического состава руд продуктивного горизонта произведен на автоматическом дифрактометре ДРОН-3 с $\text{Cu}_{K\alpha}$ – излучением, β -фильтр. Условия съемки дифрактограмм: $U=35$ кВ; $I=20$ мА; съемка $\theta-2\theta$; детектор 2 град/мин. Рентгенофазовые характеристики анализировались на полуколичественной основе, выполнялись по дифрактограммам керновых проб порошков из Сантонского, Маастрихтского и Кампанского ярусов месторождения Сырдарьинской депрессии с использованием метода замеренных равных навесок и искусственных смесей. При этом были определены соотношения количественных фаз кристаллических решеток. Изучение и интерпретация результатов дифрактограмм выполнялась с применением известных данных международной картотеки ICDD: наработанная база дифрактометрических

данных порошковых проб PDF2 (Powder Diffraction File) и результатов полученных дифрактограмм очищенных от примесей минералов. В таблице 6 приведены результаты рентгенографических исследований образцов керновых проб.

Таблица 6- Результаты полуколичественного рентгенофазового анализа проб

Минерал	Формула	Сантонский ярус, %	Маастрихтский ярус, %	Кампанский ярус, %
Кварц	SiO_2	90.8	54.7	66.3
Смектит	$\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$		27.0	
КПШ	KAlSi_3O_8	9.2	10.1	5.7
Каолинит	$\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$		6.7	11.6
Гипс				16.4

Как видно из таблицы 6, результаты рентгенофазового анализа керновой пробы Сантонского яруса свидетельствуют о достаточной однородности продуктивного горизонта состоящего из кварца 90,8 % и КПШ – 9,2 %. В данном ярусе снижение фильтрационных характеристик продуктивного горизонта возможно вызвано механической кольматацией и в незначительной степени химическими осадкообразованиями.

Из результатов рентгенофазового анализа керновой пробы Маастрихтского яруса видно, что содержание кварца 54,7 %, КПШ 10,1 % и наличие смектита 27 % а также каолинита 6,7 % свидетельствует о неоднородности продуктивного горизонта. Наличие смектита 27 % свидетельствует о высокой глинистости пробы, а присутствие каолинита 6,7 % показывает о возможных осложнениях при взаимодействии с кислотными растворами и и увеличении объема каолиновой глины. Неоднородность рудовмещающих пород негативно влияет на фильтрационные процессы в пористой среде тем самым замедляет процессы растворения урановых минералов. При повышенной неоднородности продуктивного горизонта повышается вероятность осадкообразований и кольматации пласта. Результаты рентгенофазового анализа пробы кернового материала Кампанского горизонта показывают, что наличие кварца 66,3 %, гипса 16,4 %, каолинита 11,6 % КПШ 5,7 % также свидетельствуют о неоднородности продуктивного горизонта. Присутствие гипса 16,4 % в пробе свидетельствует о наличие непроницаемых участков, перекрывающие линии тока и препятствующие процессу выщелачивания урана. Наличие каолиновой глины 11,6 % свидетельствует о возможном образовании геохимического барьера в следствии набухания каолинита в результате взаимодействия с серной кислотной и образовании ионообменной кольматации. На рисунке 16 показана дифрактограммы керновых проб (а) Сантонского, (b) Маастрихтского и (с) Кампанского ярусов.

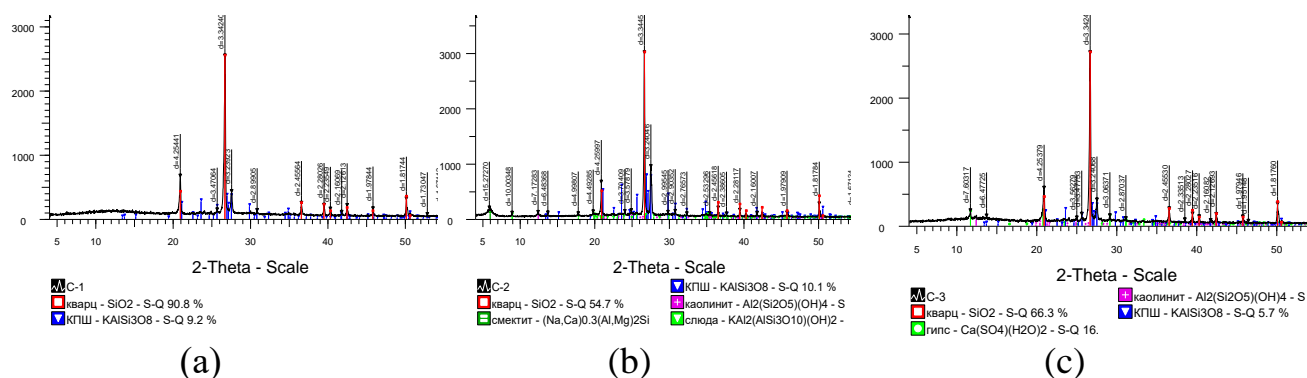


Рисунок 16- Дифрактограмма пробы (a) – Сантонского, (b) – Маастрихтского, (c) - Кампанского яруса

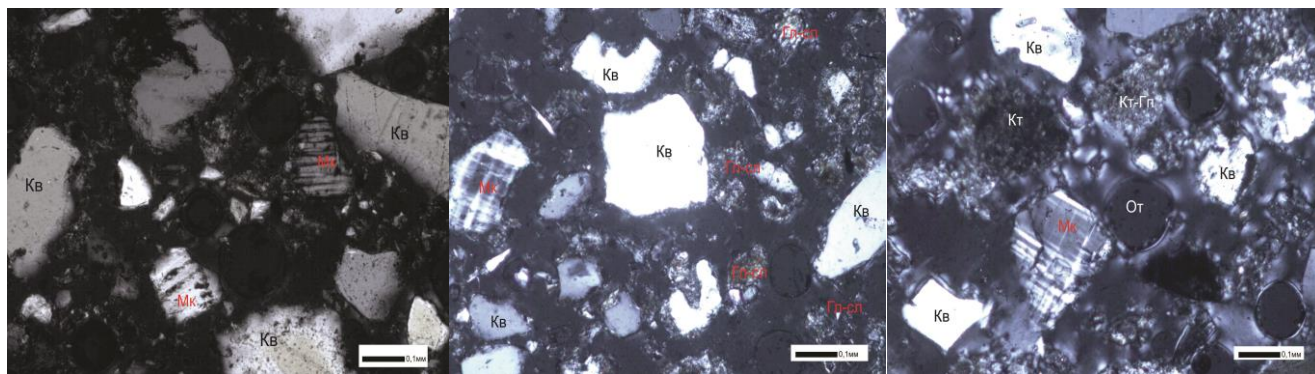
Результаты рентгенофазового анализа керновых проб различных рудных ярусов показывают схожесть минералогического состава Сантонского, Маастрихтского и Кампанского яруса. Однако наличие различных компонентов каолинита 6,7 % и смектита 27 % а в пробе Маастрихтского яруса свидетельствует о образовании ионообменной кольматации вызванной набуханием глинистых минералов в следствии взаимодействия с растворами серной кислоты. Наличие каолина 11,6 % и гипса 16,4 % в керновой пробе Кампанского горизонта свидетельствует о образованием сложно растворимых гипсовых осадкообразований и набуханием каолинита. Наличие непроницаемых участков в продуктивном горизонте приводит к изменению поток выщелачивающих растворов по без рудным участкам и снижению содержания урана в ПР и в следствии замедлению извлечения урана из недр.

2.2 Микроскопические исследования керновых проб продуктивных пластов

Целью микроскопических исследований является исследования минералогического состава керновых проб и определения пространственного наполнения керновых проб с продуктивных горизонтов Сантонского, Маастрихтского и Кампанского ярусов, для сравнительного анализа. Сыпучий материал проб изучался в иммерсионных жидкостях и изготовленных из него прозрачных шлифах под микроскопом марки LEICA DM 2500 P. На рисунке 17 изображены поверхности обработанных керновых проб (a) Сантонского, (b) Маастрихтского, (c) Кампанского ярусов.

Материал пробы (a) Сантонского яруса, внешне светлый со слабым сероватым оттенком. В плоскости прозрачного шлифа в составе пробы диагностированы следующие минералы: кварц, калиевые полевые шпаты и криптокристаллические породы. Кварц представлен обломками зерен неправильной формы, остроугольными, округлыми, размером до 0,2-0,3 мм. Микроклин прозрачный с характерной микроклиновой решеткой. Ортоклаз

сильно пелитизирован, непрозрачный, бурый, что отчетливо видно и в шлифе и в иммерсионном препарате. Показатели преломления проверены в иммерсионной жидкости с показателем преломления 1,525, что соответствует таковому стандартных калиевых полевых шпатов. Обломки пород тонкозернистые, криптокристаллические, прозрачные или полупрозрачные, замутненные, пелитизированные, по составу – кварцевые и полевошпатовые.



(а)

(б)

(с)

Рисунок – 17. Изображения поверхности пробы ядерного материала при увеличении 100, ник+ (а) – Сантонского, (б) – Маастрихтского, (с) – Кампанского яруса

Образец пробы (б) Маастрихтского яруса, внешне аналогичен пробе (а). В плоскости прозрачного шлифа в составе пробы определены следующие минералы: кварц, калиевые полевые шпаты, криптокристаллические кремнистые, глинисто-слюдистые и калишпатовые породы. Кварц представлен обломками зерен неправильной формы, остроугольными, округлыми, размером до 0,2-0,4 мм. Микроклин прозрачный с характерной микроклиновой решеткой. Ортоклаз сильно пелитизирован, полупрозрачный, часто непрозрачный, бурый. Показатели преломления в иммерсионной жидкости около 1,525 и ниже. Обломки пород тонкозернистые, криптокристаллические, прозрачные или замутненные, пелитизированные, по составу – кварцевые, полевошпатовые и глинистые.

Материал пробы (с) Кампанского яруса внешне аналогичен пробам (а) и (б). Под микроскопом в прозрачном шлифе присутствуют кварц, калиевые полевые шпаты – микроклин и ортоклаз, каолинит, тонкозернистые агрегаты каолинита с гипсом. В иммерсионных препаратах состав подтвержден. Кварц представлен обломками зерен неправильной формы, остроугольными, округлыми, размером до 0,2-0,3 мм. Микроклин прозрачный с характерной микроклиновой решеткой. Ортоклаз сильно пелитизирован, полупрозрачный и непрозрачный, бурый. По показателям преломления, определенным в иммерсионных жидкостях, они соответствуют стандартным минералам.

Агрегаты каолинита и гипса тонкозернистые, криптокристаллические, трудно диагностируемые, мутные, пелитизированные.

По сравнительному анализу результатов микроскопических исследований керновых проб различных рудных интервалов видно, что, снимки электронного микроскопа керновой пробы Сантонского яруса однородные включающие кварц с размерами 0,2-0,3 мм и микроклина. По снимкам электронного микроскопа керновых проб Маастрихтского яруса видно неоднородность по мимо кварца с размерами 0,2-0,4 мм присутствуют микроклин и местами глинисто-слюдястые минералы. Снимки керновых проб Кампанского яруса показывают кварц меньших размеров 0,2-0,3 мм и наличие целого ряда минералов включающие микроклин, ортоклаз, каолинит, стягивающие повсеместно агрегат каолинита и гипса.

2.3 Изучение структуры и количественно-качественных характеристик осадкообразований при серноокислотном выщелачивании урановых руд

Практика отработки инфильтрационных месторождений урана с глубоким залеганием рудных тел скважинами показывает, что со временем наблюдается снижение пропускной способности геотехнологических скважин [35]. Основная причина снижения производительности технологических скважин является выпадение в осадок ранее растворенных компонентов вмещающих пород или механического перемещения мелких и тонких частиц из продуктивного горизонта, а также высвобождении углекислого газа. В связи с чем происходит снижение фильтрационных характеристик руд и увеличение гидравлических сопротивлений в пласте продуктивного горизонта. Выделяют следующие виды кольтматации порового пространства продуктивного горизонта [36].

Механический тип кольтматации наблюдается на скважинах вследствие нарушения конструкций фильтров, в следствии смещении дисков или несоответствии проходных отверстий гранулометрическому составу вмещающих пород. При этом происходит наполнение внутренней полости фильтра скважины мелкими твердыми механическими взвесями, отверстия фильтров перекрываются частицами рудовмещающих пород принесенными потоком раствора [37]. В связи, с чем производительность добычных скважин снижается.

Химический тип кольтматации обусловлен влиянием компонентов содержащихся в выщелачивающих растворах и изменением характеристик пластовых вод, в результате происходит взаимодействие компонентов с минералами рудовмещающих пород продуктивного горизонта [38]. При этом содержащиеся в пластовой воде растворенные элементы кальция, магния и алюминия и железа нарушают баланс углекислотного равновесия, что непосредственно приводит к образованию слаборастворимых осадков.

Происходит интенсивное выпадение карбонатных осадков в непосредственно в прифильтровой зоне продуктивного горизонта, при удалении от фильтра скорость выпадения карбонатных осадков уменьшается [39].

Газовая кольматация чаще всего может быть обусловлена выделением CO_2 при реакциях кислоты с карбонатами. Возникает она, когда давление растворенного газа превышает величину гидростатического давления в пласте.

При решении проблем с кольматацией скважин, в первую очередь необходимо определить вид кольматации (кольматантов) скважин, а затем подбором наиболее подходящих декольматантов обрабатывать как фильтр, так и прифильтровую зону. Для определения вида и состава осадкообразований и проведения рентгена-фазового исследования были отобраны пробы кольматации со скважин Сантонского, Кампанского и Маастрихтского рудного интервалов.

Цель рентгенофазовых исследований заключалась в том, чтобы в лабораторных условиях определить и сравнить количественно-качественные характеристики осадкообразований в зависимости от рудовмещающего горизонта при сернокислотном выщелачивании урана. Установление количественно-качественных характеристик кольматантов позволит подобрать эффективные подходы для их разрушения, диспергирования, удаления и дальнейшего предотвращения осадкообразования на длительный период. На рисунке 18 приведены изображения осадкообразований при скважинной добыче урана на (a) – Сантонском, (b) – Маастрихтском, (c) – Кампанском ярусах.

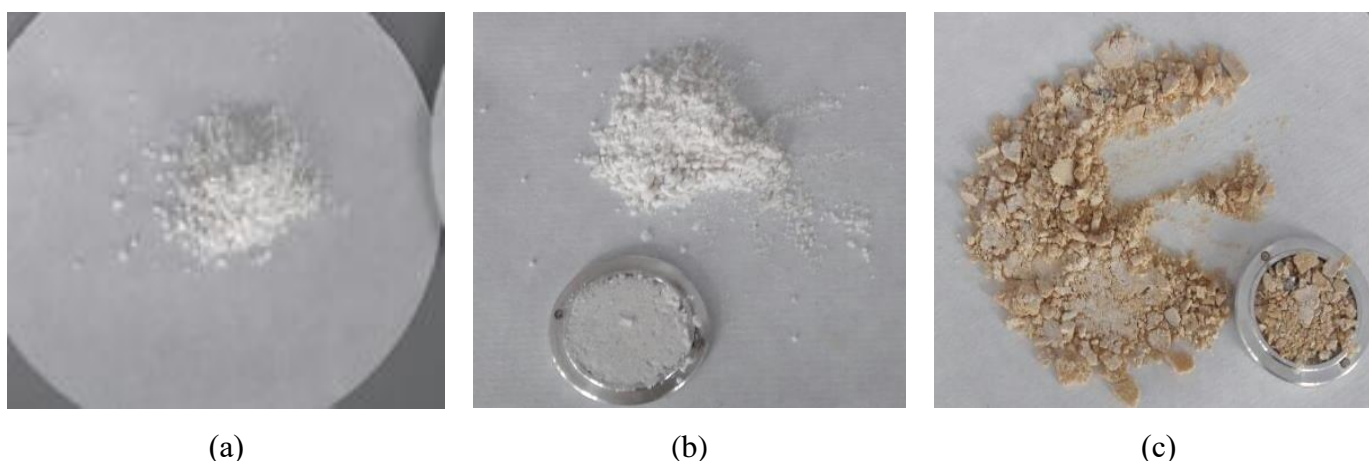


Рисунок – 18. Снимки проб осадкообразований из скважин (a) – Сантонского, (b) – Маастрихтского, (c) – Кампанского горизонтов

Данные осадки были отобраны из добычных скважин вскрывающих Сантонский (a), Маастрихтский (b) и Кампанский (c) рудные горизонты. Как видно из рисунка различие в цвете свидетельствует о различие в составе осадкообразований. Рентгенодифрактометрический анализ проведен на

автоматизированном дифрактометре ДРОН-3 с $Cu_{K\alpha}$ – излучением, β -фильтр. Условия съемки дифрактограмм: $U=35$ кВ; $I=20$ мА; съемка $\theta-2\theta$; детектор 2 град/мин. Рентгенофазовый анализ на полуколичественной основе выполнен по дифрактограммам порошковых проб с применением метода равных навесок и искусственных смесей. Определялись количественные соотношения кристаллических фаз. Интерпретация дифрактограмм проводилась с использованием данных картотеки ICDD: база порошковых дифрактометрических данных PDF2 (Powder Diffraction File) и дифрактограмм чистых от примесей минералов. Для основных фаз проводился расчет содержания [40]. В таблице 7 приведены результаты полуколичественного рентгенофазовых анализов проб осадкообразований.

Из таблицы 2 видно, что осадкообразований проб из скважин Сантонского и Маастрихтского горизонтов однокомпонентные и состоят 100 % из гипса продукта химического происхождения. Осадкообразования пробы из скважины Кампанского горизонта показывают, что осадки многокомпонентные и имеют сложную структуру. Наличие кремния в количестве 35,6 %, альбетита 33,9 %, микроклина 4,9 % подтверждают преобладание механического типа кольматации, наличие гипса в 16,7 % и кальцита 8,9 % присутствие осадков химического происхождения

Таблица 7 - Результаты полуколичественных рентгенофазовых анализов кристаллических фаз проб осадкообразований

Минерал	Формула	Сантонский ярус, %	Маастрихтский ярус, %	Кампанский ярус, %
Quartz	SiO ₂			35.6
Gypsum	Ca(SO ₄)(H ₂ O) ₂	100	100	16.7
Calcite	Ca(CO ₃)			8.9
Albite	(Na _{0.75} Ca _{0.25})(Al _{1.26} Si _{2.74} O ₈)			33.9
Microcline	(K _{0.95} Na _{0.05})AlSi ₃ O ₈			4.9

Результаты рентгенофазовых исследований осадкообразований свидетельствуют, что на скважинах Кампанского горизонта по сравнению с Сантонским и Маастрихтским ярусами кольматация состоит из многих компонентов и имеет сложную структуру. На Кампанском рудном горизонте преобладает механический тип осадков, когда на Сантонском и Маастрихтском ярусах осадкообразования полностью химического происхождения.

На основе результатов исследований были установлены количественно-качественные характеристики осадкообразований из технологических скважин, вскрывающие различные ярусы продуктивного горизонта. Выявлено что на скважинах Кампанского рудного интервала осадкообразования имеют многокомпонентный состав представляющий смесь осадков механического и

химического происхождения. Устранение подобных осадкообразований и повышения фильтрационных характеристик продуктивного горизонта с целью интенсификации процессов подземного выщелачивания затруднительна и требует комплексного подхода и комбинирования гидродинамических и реагентных методов.

2.4 Подбор химических реагентов для интенсификации геотехнологических процессов скважинной добычи урана

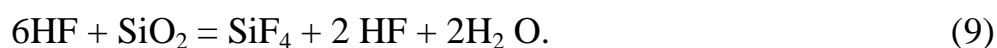
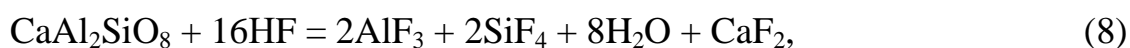
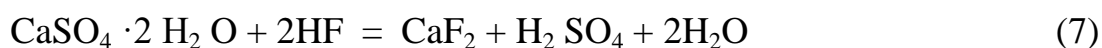
На основе изучения структуры минералогического состава руд и вмещающих пород продуктивного горизонта и анализа природы происхождения осадкообразований был подобран комплекс химических реагентов многофункционального назначения интенсифицирующий процессы протекающие при скважинной добычи урана в сложных горно-геологических условиях. Комплекс химических реагентов многофункционального назначения предназначен для разрушения осадкообразований и повышения фильтрационных характеристик руд в продуктивном горизонте. Созданию условий для растворения урановых минералов и целенаправленному формированию продуктивных растворов. Эффективность комплекса химических реагентов определяется его составом и подбирается в зависимости от геологических особенностей продуктивного горизонта и количественно-качественных характеристик образовавшихся осадков. Химические реагенты, включенные в комплекс обладают растворяющей способностью основных карбонатных и побочных осадкообразований, способствуют активной разглинизацией и созданию дополнительных линий тока в поровом пространстве пласта, а также обладают высокой окисляющей способностью Fe^{2+} до Fe^{3+} при высоких значениях pH, для предотвращения повторного осадкообразования. Интенсификация скважинной добычи урана с применением комплекса химических реагентов позволит повысить скорость отработки технологических блоков и снизить себестоимость конечной продукции.

Опыты по обработке осадкообразований производились на образцах из проб Сантонского, Маастрихтского и Кампанского горизонтов различным составом химических реагентов декольматирующих растворов. Для определения эффективного состава раствора подбирались наиболее растворяющие свойства. Например опыт № 1 включал обработку раствором плавиковой кислоты (10 % от массы) и технической воды (90 %). Опыт № 2 включал обработку раствором плавиковой кислоты (5,0 %) и серной кислоты (10,0 %) ПАВ (1 %) и технической воды (84 %). В таблице 8 приведены параметры декольматирующих растворов для проведения лабораторных исследований.

Таблица 8 - Параметры декольматирующих растворов

Состав	HF, %	H ₂ SO ₄ , %	САК, %
HF	10		
H ₂ SO ₄	5	10	1

В опыте 1 приготовление декольматирующего раствора HF – (10 %), технической воды (90 %) осуществлялось из полуфабриката плавиковой кислоты. Выбор полуфабриката плавиковой кислоты обусловлен ее низкой стоимостью, высокой реакционной способностью с гипсом, алюмосиликатами и кремнистыми соединениями, которые являются составной частью рудовмещающих пород и кольматирующих осадков. В опыте 2 приготовление декольматирующего раствора производилось на основе бифторида аммония и серной кислоты ПАВ при соотношениях HF – 5 %, H₂SO₄ – 10 %, ПАВ – 1,0%, техническая вода – 84 %. Добавление ПАВ обеспечивает увеличение взаимодействия плавиковой кислоты с осадкообразующими минералами. При этом плавиковая кислота полностью утилизируется за счет большого количества кварца, содержащегося в песках. Реакции взаимодействия протекают по формулам:



Выбор серной кислоты в качестве реагента растворителя обусловлен реакционной способностью с окисью алюминия, гидроксидом железа и калия, низкой стоимостью и доступностью на добычных предприятиях. Реакция взаимодействия протекает по формуле:



После проведения лабораторных опытов по обработке проб капельным методом различным составом декольматирующих растворов, осадкообразования были высушены при комнатной температуре. Для детального исследования поверхности проб использовался сканирующий электронный микроскоп. Сравнительный анализ снимков после обработки тем или иным раствором и сопоставление его с исходным изображением позволили визуально установить эффективность состава декольматирующего раствора.

Изображения поверхности осадков до и после обработки различными растворами фиксировались при помощи аналитического сканирующего электронного микроскопа высокого разрешения. Он изготовлен для широкого круга исследовательских задач и контроля качества на субмикронном уровне Tescan MIRA 3 FEG-SEM. Электронная колонна SEM TESCAN MIRA, источник электронов: автоэмиссионный катод Шоттки. Диапазон энергий электронного пучка, падающего на образец: от 200 эВ до 30 кэВ (от 50 эВ с опцией торможения пучка BDT). Для изменения тока пучка в качестве устройства смены апертур используется электромагнитная линза. Ток пучка: от 2 пА до 400 нА с непрерывной регулировкой. Максимальное поле обзора: более 8 мм при WD = 10 мм, более 50 мм при максимальном WD. Разрешение электронной колонны, режим высокого вакуума 1.2 нм при 30 кэВ, детектор SE. 3.5 нм при 1 кэВ, детектор In-Beam SE. 1.8 нм при 1 кэВ, опция торможения пучка BDT. На рисунке 19, приведены снимки проб осадкообразований Маастрихтского горизонта Сырдарьинской депрессии до и после обработки специальными растворами (а) – изображение исходной пробы (b) – изображение пробы после опыта 1, (с) – изображение пробы после опыта 2.

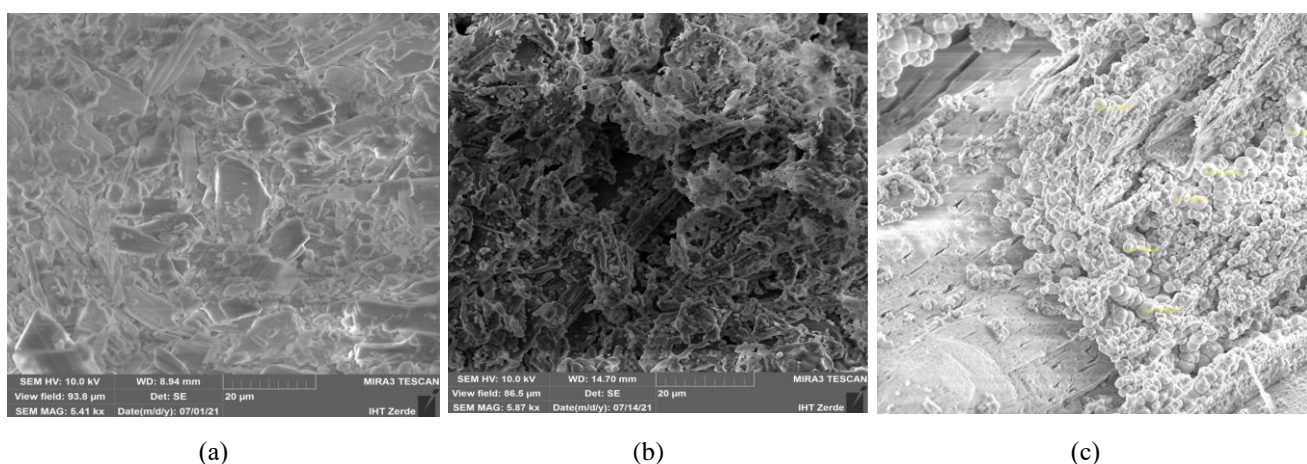


Рисунок – 19. Изображение поверхности проб Маастрихтского яруса: (а) – исходной пробы; (b) – пробы опыта 1; (с) – пробы опыта 2

На рисунке 19,а видно, что поверхность исходной пробы образована из плотных пластинчатых кристаллов с размерами от 5 до 20 μm с характерным каркасным строением без разрывов и трещин в теле. Формы кристаллов вытянуты с хаотичным расположением и равномерным рельефом поверхности. Из рисунка 19,б видно, что после обработки декольматирующим раствором 1, произошло заметное разрушение структуры и изменение форм кристаллов с уменьшением их размеров и плотности с образованием мелких разрыхленных хлопьев. Расположение кристаллов стало не таким плотным с образованием пустот и промоин в поровом пространстве. Заметно частичное растворение

пробы, размеры кристаллов значительно уменьшились с 20 до 5 μm . Это обусловлено растворением части пробы в плавиковой кислоте. Из рисунка 19,с, изображающего данные опыта 2, видно, что изменения структуры пробы схожа с предыдущим опытом с более выраженным характером. Также заметно растворение осадкообразования декольматирующим раствором и образование промоин и крупных трещин по пути движения раствора. Деформированные формы кристаллов с измененными формами и структурой, размеры пустот больше по сравнению с опытом 1. Это обусловлено растворением осадков в плавиковой и серной кислотах и действием ПАВ.

На рисунке 20, приведены снимки проб осадкообразований Кампанского горизонта Сырдарьинской депрессии до и после обработки специальными растворами (а) – изображение исходной пробы (b) – изображение пробы после опыта 1, (с) – изображение пробы после опыта 2.

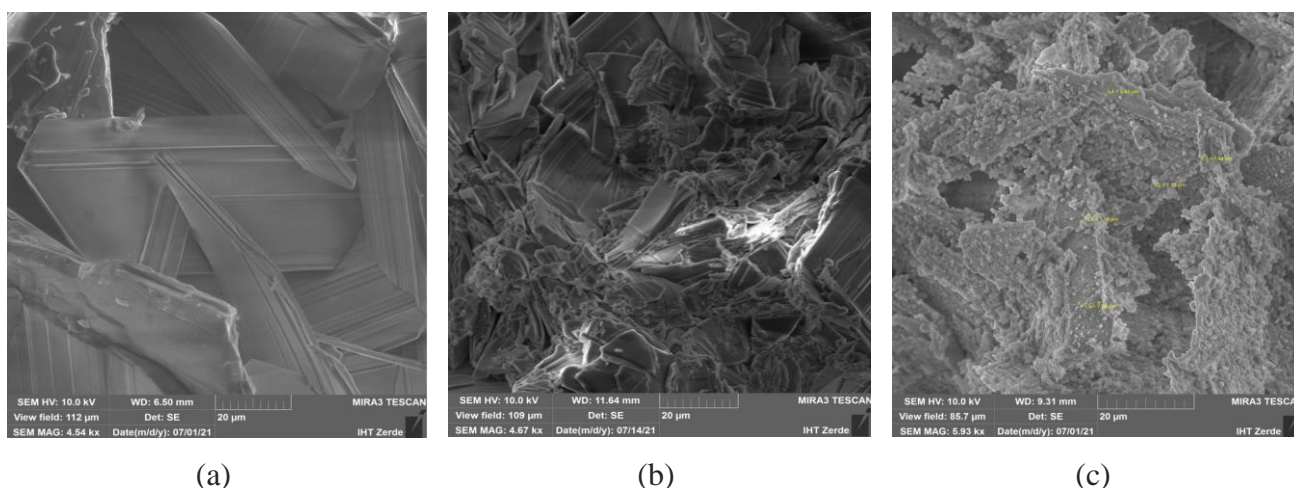


Рисунок – 20. Изображение поверхности проб Кампанского яруса: (а) – исходной пробы; (b) – пробы опыта 1; (с) – пробы опыта 2

Из рисунка 20,а видно, что поверхность исходной пробы образована из плотных кристаллов различных размеров от 20 до 40 μm с характерным каркасным строением без разрывов и трещин в теле. Формы кристаллов прямоугольные с хаотичным расположением и равномерным рельефом поверхности. Из рисунка 20,б видно, что после обработки декольматирующим раствором 1, произошло разрушение структуры и изменение форм кристаллов с уменьшением их размеров и образованием мелких разрыхленных хлопьев. Можно увидеть образование промоин и трещин в теле пробы с образованием пустот и впадин. Заметно частичное растворение пробы, размеры кристаллов уменьшились с 40 до 20 μm . Значительные изменения обусловлены растворением осадков плавиковой кислотой. Рисунок 20,с, с данными опыта 2 показывает, что структура пробы изменилась более существенно, заметно образование множество глубоких пустот и трещин по пути движения раствора.

Обращает внимание на себя деформированные формы кристаллов с закругленными формами. Разрушение обусловлено растворением осадков в плавиковой и серной кислотах, а проникновение за счет действия ПАВ.

2.5 Выщелачивание урана из керновых проб в трубках с применением поверхностно-активных веществ

Проектирование отработки месторождений и технико-экономическом обоснование скважинной добычи предусматривает исследование состава, содержание урана, глинистость и зернистость вмещающих пород продуктивного горизонта а также проведение лабораторных опытов по выщелачиванию урана из кернового материала в статическом и динамическом режиме [40]. Основной целью моделирования подземного выщелачивания урана является установление закономерностей процесса, в том числе определение различных факторов на результат выщелачивания и выбор оптимальных геотехнологических параметров процесса, которые служат исходными данными для проектирования отработки [41]. Опыты включают выщелачивание урана растворами серной кислоты на нескольких образцах с различной кислотностью для определения экономически обоснованной концентрации растворителя. В целях изучения эффективности применения поверхностно-активных веществ для интенсификации скважинной добычи урана были проведены сравнительные экспериментальные опыты по выщелачиванию урана из кернового материала в трубках. Лабораторные исследования включали изучение минералогического состава керновых проб, определение гранулометрических характеристик вмещающих пород и выщелачивание урана из керна в трубках в динамическом режиме с применением растворов со стандартной, повышенной кислотностью, а также с добавлением специально подобранных ПАВ в качестве интенсификатора выщелачивания урана.

Исследования проводились на материале керновых проб месторождения Чу-Сарысуйской урановой провинции. Исследования гранулометрического состава проб производились на просеивающей машине retsch AS200 basic, в таблице 9 приведены гранулометрические характеристики керновой пробы.

Таблица 9 – Гранулометрический состав технологической пробы

Гранулометрический состав, %								
>2	>1,6	>1,4	>1	>0,8	>0,5	>0,35	<0,35	Сумма
мм	мм	мм	мм	мм	мм	Мм	мм	%
11.05	2.24	1.38	3.15	1.93	6.35	15.46	57.33	100

Результаты гранулометрического анализа (таблица 9) свидетельствует что более 57 % керновой пробы состоит из тонко-мелко зернистой фракции песка,

обломков пород и глинисто-алевритовых частиц, препятствующие фильтрации растворов и процессу выщелачивания урана.

Содержание урана, алюминия, кальция, железа, магния и карбонатности в керновой пробе определялось методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индивидуальной связанной плазмой на спектрометре iCAP 7400. Результаты анализа частных проб представлены в таблице 10. Подготовка пробы включала отбор и взвешивание материала из керновой пробы, а затем формирование технологической пробы для последующего анализа и проведения экспериментальных опытов.

Таблица 10 – Результаты анализа частных проб

№ частной пробы	U, %	CO ₂ , %	Al, %	Ca, %	Fe общ., %	Mg, %
1	0.0502	0,17	4.9640	1.2031	0.8031	0.3694
2	0.0568	0.18	4.5153	1.1953	0.8249	0.4780
3	0.0296	0.10	4.6824	0.8658	1.0250	0.3854
среднее значение	0.0455	0.15	4.7205	1.0881	0.8843	0.4109

Как видно из таблицы 10, среднее содержание карбонатов по CO₂, составляет 0,15 % от общей массы пробы, что свидетельствует о низкой карбонатности рудовмещающих пород. Содержание Al 4,5 – 4,9 % в технологической пробе свидетельствует о наличии полевых шпатов и глинистых минералов.

Проведен рентгенофазовый анализ материала технологической пробы на дифрактометре ДРОН-3. Дифрактограмма пробы рудовмещающих пород показана на рисунке 1, а результаты рентгенофазового анализа приведены в таблице 11.

Таблица 11 – Результаты рентгенофазового анализа материала технологической пробы

Минерал	Формула	Концентрация, %
Кварц	SiO ₂	58.6
Каолинит	Al ₂ (Si ₂ O ₅)(OH) ₄	10.3
Glauconite	(K,Ca,Na) _{0.8} (Al,Fe,Mg) ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂ nH ₂ O	7.9
Calcium Sulfate Hydrate	Ca(SO ₄)(H ₂ O) _{0.5}	7.5
Microcline	(K,Na)AlSi ₃ O ₈	6.4
Альбит	(Na,Ca)(Al,Si) ₄ O ₈	4.1
Хлорит	(Mg,Fe) ₅ Al(Si ₃ Al)O ₁₀ (OH) ₈	2.8
Гематит	Fe ₂ O ₃	2.4

Как видно из таблицы 11, содержание кварца составляет 58,6 %, каолинита 10,3 %, глауконита 7,9 %, микроклина 6,4% и альбита 4,1 %. Наличие сульфата кальция (7,5 %) в продуктивном горизонте будет являться причиной

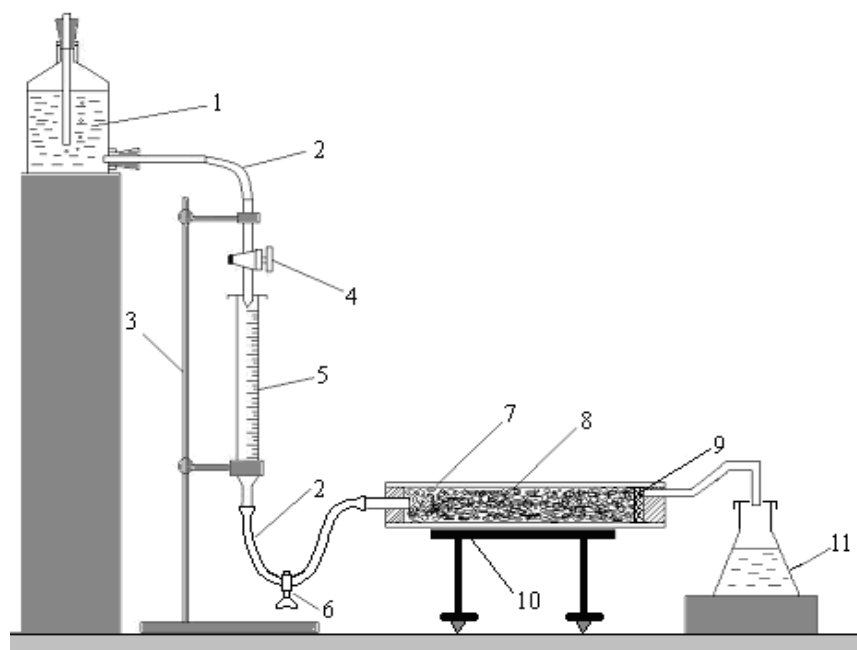
химической кольтмации. Повышенное содержание мелкой фракции в тонкозернистых песках в продуктивном горизонте на практике приводит к затруднению выщелачивания урана в связи с понижением фильтрационных характеристик пород. Это приводит к повышению эксплуатационных расходов на содержание геотехнологических скважин в соответствующем диапазоне технологического регламента нагнетание ВР – откачка ПР, снижение коэффициента использования скважин из-за простоев на проведение ремонтно-восстановительных работ (РВР) [42].

Авторами [43,44] предлагается состав для декольтматирующей обработки ПЗП эксплуатационных скважин в условиях ПСВ урана содержащий соляную кислоту, бифторид аммония и ПАВ. Подача декольтматирующего состава через устье скважины обеспечивает повышение проницаемости продуктивного горизонта, увеличение производительности скважин и увеличение межремонтного цикла скважин. Результат обеспечивается высокой реакционной способностью плавиковой кислоты с химическими осадкообразованиями и глинистыми частицами. Дополнительное применение ПАВ обеспечивает повышение эффективности за счет снижения межфазных натяжений и увеличение растекания в ПЗП. (Патент РК №32021 от 28.04.2017). Однако применение данного состава в целях декольтмации ПЗП скважин не обеспечивает повышение концентрации урана в ПР, и не оказывает воздействия на окислительно – восстановительные параметры растворов.

В качестве реагентов интенсификаторы ПСВ урана были

- *Сульфаминовая кислота (САК)*– (моноамид серной кислоты, амидосерная кислота) $\text{NH}_2\text{SO}_2\text{OH}$, кристаллический продукт бело-серого цвета. Выбор сульфаминовой кислоты обусловлен активным взаимодействием с металлами, их оксидами, гидроксидами и карбонатами. По результатам обменных химических реакций САК образует прочный комплекс с ионами Fe^{2+} , снижает их активность в растворе, в результате чего повышается соотношение $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ и повышается значение Eh раствора, что интенсифицирует процесс выщелачивания урана.

- *Лигносульфонаты* – анионные ПАВ. В воде обычно находятся в коллоидном состоянии (степень гидратации 30-35%). Применение лигносульфоната аммония для повышения проницаемости продуктивного горизонта обусловлено его способностью понижению поверхностного натяжения растворов, создание стойких эмульсии и пен. Лигносульфонат понижает вязкость глинистых растворов, способствуя более эффективному диспергированию глинистых образований значительно повышая пористость продуктивного горизонта [45].



1 – сосуд Мариотта с ВР; 2 – гибкий шланг из кислотостойкой резины или силикона; 3 – штатив; 4 – регулирующий кран; 5 – бюретка с делениями; 6 – винтовой зажим; 7 – трубка; 8 – керновый материал; 9 – пористый фильтр; 10 – опорный столик с регулируемой высотой ножек; 11 – колба с ПР.

Рисунок 21 – Схема лабораторной установки по динамическому выщелачиванию урана из материала керновой пробы

Лабораторные исследования по выщелачиванию урана из проб кернового материала в динамическом режиме позволяют получить информацию о процессе выщелачивания урана и подобрать эффективные режимы кислотности ВР. Фильтрация выщелачивающего раствора через образец рудного материала проводится с помощью установки, показанной на рисунке 21. Фильтрация осуществляется при постоянном перепаде напоров между входом и выходом в трубки и при постоянном расходе раствора. В соответствии с регламентом приготовленный выщелачивающий раствор фильтровался через керновый материал в трубке и собирался в соответствующую сборную емкость для дальнейших анализов и определения коэффициента фильтрации, извлечения урана и удельного расхода серной кислоты.

Выщелачивающий раствор готовился на основе пластовой воды для получения максимально приближенных к реальным условиям. В первых двух опытах кислотность в исходных растворах была стандартная и повышенная, для сравнения эффективности воздействия ПАВ на результаты выщелачивания было принято решение в третьем опыте приготовить раствор со стандартной кислотностью и добавить выбранные химические реагенты. Параметры режимов кислотности выщелачивающих растворов по соответствующим опытам приведены в таблице 12.

Таблица 12 – Параметры регламента кислотности выщелачивающих растворов

Водная отмывка			
Регламент выщелачивания:	Опыт 1	Опыт 2	Опыт 3
Отношение Ж:Т:	Концентрация серной кислоты в ВР		
0-0,2	20	25	20 + 2 г/л САК + 0,5 г/л ЛСТ
0,2-0,8	15	20	15 + 2 г/л САК + 0,5 г/л ЛСТ
0,8-1,5	10	15	10 + 1 г/л САК + 0,25 г/л ЛСТ
1,5-2	5	10	5 + 1 г/л САК + 0,25 г/л ЛСТ
2-2,5	3	5	3
2,5-4	0	0	0

Разработанный режим кислотности растворов предусматривал приготовление выщелачивающего раствора для каждого опыта при соответствующих значениях Ж/Т. Первый опыт предусматривал приготовление растворов со стандартной кислотностью, принятым при разработке месторождений скважинным методом и постепенно снижалась с 20 – 15 – 10 – 5 – 3 г/л серной кислоты при диапазонах Ж/Т 0 – 0,2; 0,2 – 0,8; 0,8 – 1,5; 1,5 – 2,0; 2,0 – 2,5; 2,5 – 4,0. Второй опыт предусматривал приготовление растворов с кислотностью выше стандартной, применяемый в особых условиях с высокими фильтрационными характеристиками руд. Кислотность изменялась по следующей последовательности 25 – 20 – 15 – 10 – 5 г/л серной кислоты в диапазоне Ж/Т 0 – 0,2; 0,2 – 0,8; 0,8 – 1,5; 1,5 – 2,0; 2,0 – 2,5; 2,5 – 4,0. Для определения эффективности подобранных химических реагентов при интенсификации скважинной добычи урана было решено применить растворы стандартной кислотности с добавлением САК 2,0 а ЛСТ 0,5 г/л. Регламент третьего опыта предусматривал приготовление растворов со стандартной кислотностью 20 – 15 – 10 – 5 – 3 г/л и добавлением САК 2 г/л и ЛСТ 0,5 г/л на начальной стадии эксперимента. На всех опытах, при превышении Ж/Т > 2,5 выщелачивающие растворы подавались с нулевой кислотностью.

Процесс выщелачивание урана в естественной проницаемости является сложным гетерогенным процессом, происходящим на границе раздела фаз – твердой и жидкой, содержащей реагент, способный образовывать при взаимодействии с ураносодержащими минералами или породами хорошо растворимые соединения [46]. Для изучения влияние окислителя на выщелачивание урана в трубках фильтрат регулярно собирался на выходе в мерные сосуды для дальнейших замеров и анализа. В полученных пробах замерялся объем раствора в пробе, концентрация урана в растворе, Ж:Т, рН, содержание урана в ПР и степень извлечение и удельный расход серной кислоты на кг урана и на ГРМ. В таблице 13 Определение концентрации урана в растворе производилось титрованием МВИ №36-2019 №KZ06.01.00050-2019 от 11.07.2019 г.

Таблица 13 – Форма записи результатов по выщелачиванию урана в трубках

Время	Геотехнологические характеристики № ___ опыта												
	Δt , час	Σt , час	V ПР, мл	ΣV ПР, мл	Ж: Т	$\Sigma Ж$: Т	C U, г/л	ΣC U, г/л	M, г	ΣM , г	E, %	ΣE , %	H ₂ SO 4, г/л

С помощью опытов по выщелачиванию урана в трубках расчетным путем определяются следующие геотехнологические параметры эксперимента:

- коэффициент фильтрации руды K ;
- средняя концентрация урана в продуктивных растворах C_{cp} ;
- максимальная степень извлечения урана ε из руды;
- величина $Ж/Т$ f процесса (масса (объем) рабочего раствора, приходящегося на единицу массы керна в трубке);
- удельные расходы серной кислоты на единицу массы извлеченного урана и единицу массы руды в трубке.

Коэффициент фильтрации руды K_f рассчитывается с помощью формулы 1, связанный с расходом жидкости Q и перепадом напора [47].

$$K_f = \frac{\Delta V L}{\Delta t \Delta H S}, \quad (11)$$

Где: ΔV – объем отфильтрованного раствора, Δt – время замера пробы, ΔH – перепад гидростатического напора, S – площадь поперечного сечения трубки, L – длина трубки.

Динамика изменения содержания урана в растворе по отношению к $Ж:Т$, показывает достижение исходным значениям максимальных концентрации урана в выходном растворе при соответствующем количестве профильтрованного раствора. Среднее содержание урана в продуктивных растворах определяется по следующей формуле 2 [47].

$$C_{cp}^U = \frac{\sum_{i=1}^n C_i^U \Delta V_i}{\sum_{i=1}^n \Delta V_i}, \quad (12)$$

где n – число проб для выбранного измерения, M_p – исходная масса руды в трубке; ΔV_i – объем раствора в i -ой пробе, C_i^U – содержание урана в i -ой пробе. Суммирование производится по всем пробам n .

Степень извлечения (ε) урана из руды (извлечение по раствору) вычисляется как отношение суммарной массы урана в выходных растворах к его исходной массе в руде (формула 3) [47].

$$\varepsilon = \frac{\sum_{i=1}^n C_i^U \Delta V_i}{M_p C_{\text{исх.тверд}}^U}, \quad (13)$$

где: $C_{\text{исх.тверд}}^U$ – содержание урана в исходной керновой пробе; C_i^U – содержание урана в выходном растворе i -ой пробе, M_p – масса руды в исходной пробе, ΔV_i – объем раствора в i -ой пробе.

Величина Ж:Т при заданной степени извлечения ε определяется по отношению 4 [47].

$$f\varepsilon = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta V_i}{M_p}, \quad (14)$$

где: ΔV_i – объем раствора в i -ой пробе, M_p – масса руды в исходной пробе.

Удельные расход серной кислоты на килограмм урана P_k вычисляется как отношение суммарной массы израсходованной на опыт к массе извлеченного урана за опыт формула 5 [47].

$$P_k = \frac{\sum_{i=1}^n (C_0^K - C_i^K) \Delta V_i}{\sum_{i=1}^n C_i^U \Delta V_i}, \quad (15)$$

где C_0^K – исходная концентрация кислоты в рабочем растворе; C_i^K – концентрация кислоты в i -ой пробе (остаточная), C_i^U – содержание урана в выходном растворе i -ой пробе, M_p – масса руды в исходной пробе, ΔV_i – объем раствора в i -ой пробе.

Удельные затраты реагента на единицу обработанной горнорудной массы (кислотёмкость руды) определяется по формуле 6 [47].

$$P_k = \frac{\sum_{i=1}^n (C_0^K - C_i^K) \Delta V_i}{M_p}, \quad (16)$$

где C_0^K – исходная концентрация кислоты в рабочем растворе; C_i^K – концентрация кислоты в i -ой пробе (остаточная), M_p – масса руды в исходной пробе, ΔV_i – объем раствора в i -ой пробе.

После окончания экспериментальных опытов и расчета геотехнологических параметров делаются предварительные выводы эффективности принятого режима выщелачивания для скважинной добычи урана. Исследования по выщелачиванию урана в трубках позволяют получить информацию о влиянии концентрации серной кислоты и ПАВ, скорости движения растворов на геотехнологические параметры выщелачивания урана. На основе полученных результатов лабораторных опытов были

проанализированы данные и построены графики изменения содержания урана в растворе, коэффициента фильтрации, степень извлечения урана, удельный расход серной кислоты, расход серной кислоты на единицу ГРМ по отношению Ж:Т.

Исследования процессов выщелачивания урана предусматривает замеры значений содержания урана в растворе, в зависимости от скорости отдельных стадий определяется скорость перехода урана в раствор. Продолжительность отдельной стадии и растворения урановых минералов зависит от состава вмещающих пород. На рисунке 22 приведен построенный график содержания урана в ПР по отношению Ж:Т.

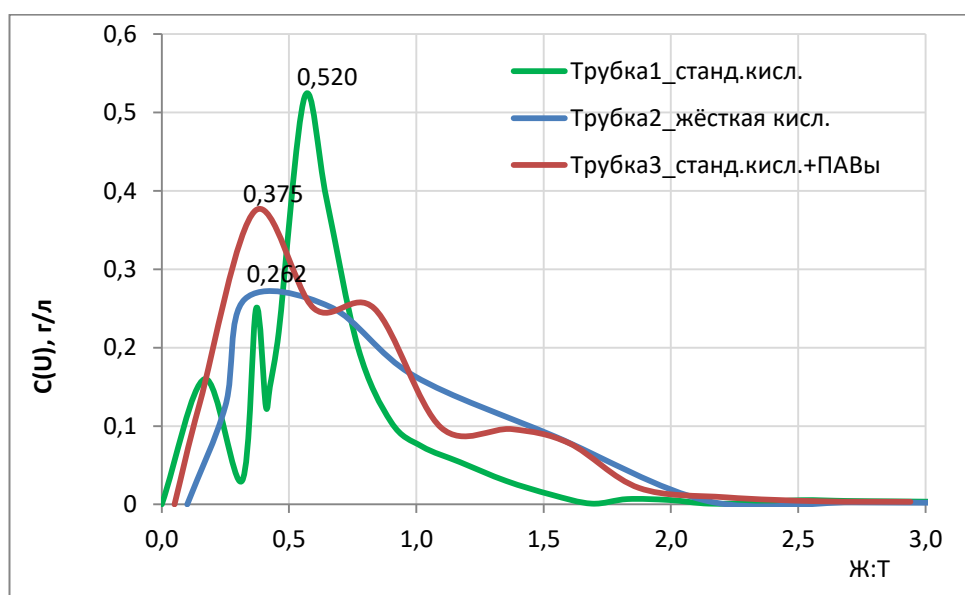


Рисунок 22 – Содержание урана в растворе по отношению Ж:Т

Как видно из рисунка 22 содержание урана на первом опыте при стандартной кислотности достигла максимальных значений в 520 мг/л при Ж/Т в 0,6 с последующим резким понижением до 80 мг/л при Ж/Т в 0,9. Данные свидетельствуют, что снижение кислотности в ВР с 15 до 10 мг/л в диапазоне Ж/Т от 0,8 – 1,5 снижает растворяющую способность растворов и снижает содержание урана в ПР. На втором опыте видно, что содержание урана достигла максимальных значений в 262 мг/л при ранних значениях Ж/Т в 0,375, с постепенным понижением содержание урана в ПР до 80 мг/л при значениях Ж/Т в 1,6. Данные свидетельствуют интенсивном преодолении порога растворимости и достижении активного выщелачивания урана на более ранней стадии благодаря большей кислотности ВР. Низкое содержание урана в ПР возможно вызвано осадкообразованием в пробе и переотложением урановых минералов с повторным растворением. На третьем опыте, содержание урана в ПР достигла значений в 375 мг/л при схожих с опытом 2 значениях Ж/Т 0,380 и последующим плавным снижением содержание урана в ПР до 80 мг/л при Ж/Т

в 1,6. Это показывает о высокой эффективности растворяющей способности ВР с добавлением ПАВ при низких значениях Ж/Т и предотвращением осадкообразования в поровом пространстве.

Фильтрационные характеристики руд при протекании процессов взаимодействия растворителя и урановых минералов с дальнейшей транспортировкой к зонам выгрузки является одними из ключевых параметров и определяется коэффициентом фильтрации руды [48]. На рисунке 23 приведен график изменения коэффициента фильтрации (K_f) от Ж/Т.

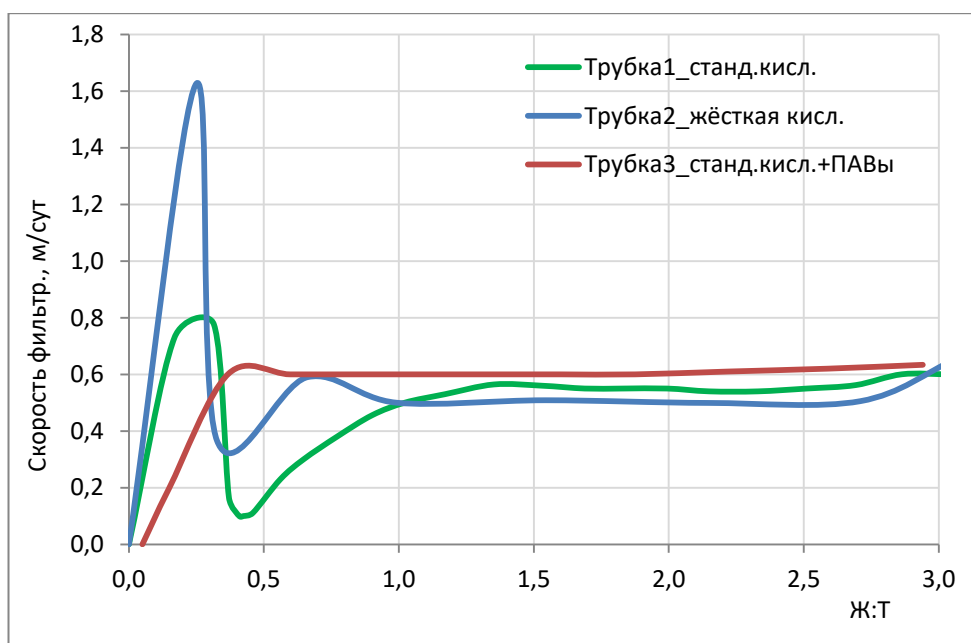


Рисунок 23 – Динамика изменения коэффициента фильтрации в зависимости от Ж:Т

Как видно из рисунка 23 скорость фильтрации растворов при первом опыте, резко снижается до минимальных значений в 0,1 м/сут при диапазоне Ж/Т 0,2 – 0,4, после чего постепенно повышается до 0,6 при Ж/Т 1,5. На втором опыте, средняя скорость фильтрации растворов немного ниже. Данные первых двух опытов свидетельствуют, что высокая кислотность в ВР на начальном этапе снижает фильтрационные характеристики, а последующее снижение кислотности снижает коагуляционные эффекты. Средняя скорость фильтрации на третьем опыте немного превышает предыдущих результатов в диапазоне Ж/Т в 0,2 – 0,6, возможно это вызвано действием ПАВ и предотвращением осадкообразований при высокой кислотности ВР. Скорости фильтрации на всех опытах приблизительно одинаковая, и варьируется в диапазоне от 0,4 до 0,6 м/сутки. Такие значения являются удовлетворительными и соответствуют максимально реальным условиям выщелачивания урана.

Для определения эффективности воздействия ПАВ на выщелачивание урана и сравнение с параметрами при стандартном и жестком режиме

кислотности растворов были рассчитаны данные и построены графики извлечения урана. Значения степени извлечение урана наиболее информативны и показательны для эффективности процесса перевода урановых минералов в раствор в виду отражения суммарной массы урана в выходных растворах и времени протекания процесса. На рисунке 24 приведены графики изменения извлечения урана в зависимости от Ж/Т по опытам.

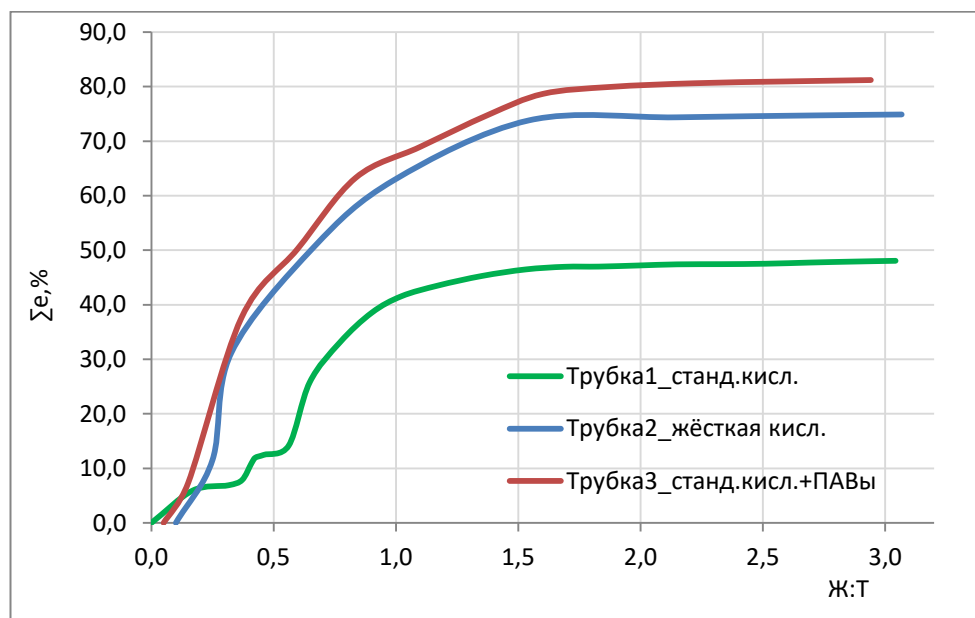


Рисунок 24 – Степень извлечения урана по отношению к Ж:Т

Как видно из рисунка 24 сравнительные значения извлечения урана по опытам, максимальные значения извлечения урана в 80 % достигнуто на третьем опыте, при применении растворов со стандартной кислотностью и добавлением ПАВ. Резкое повышение происходит от 0 до 65 % в диапазоне Ж/Т от 0 до 0,8, при максимальной кислотности ВР, обусловленное повышением растворяющей способности урановых минералов и предотвращением осадкообразований и повышенными фильтрационными характеристиками. Кривая степени извлечения урана на втором опыте достигает 74 %, что свидетельствует о интенсивном извлечении урана растворами с жестким режимом кислотности. Достижение извлечения урана на первом опыте всего 48 % при стандартной кислотности, свидетельствует о недостаточной растворяющей способности растворов и низкими фильтрационными характеристиками растворов. Несмотря на высокое содержание урана в ПР в диапазоне Ж/Т от 0 до 0,8, низкие фильтрационные характеристики не позволяют повысить извлечение.

Для определения эффективного и экономически обоснованного режима кислотности растворов, необходимости добавления ПАВ при интенсификации выщелачивания урана определяются параметры удельных расходов серной кислоты на килограмм добытого урана. На рисунке 25 приведены графики

изменения удельных расходов серной кислоты на килограмм урана по отношению Ж/Т в опытах.

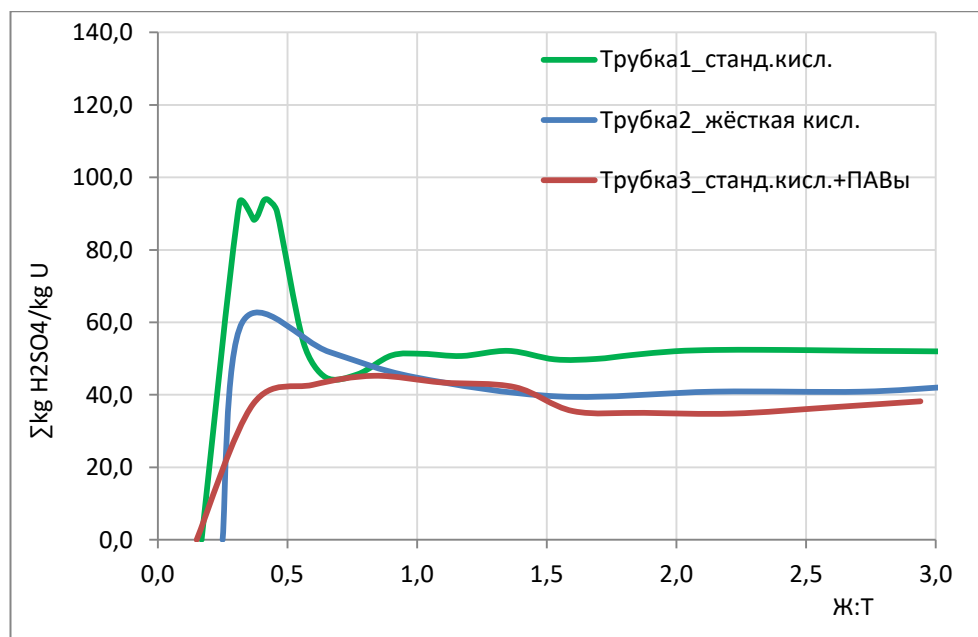


Рисунок 25 – Удельный расход серной кислоты по отношению Ж:Т

Как видно из рисунка 25 удельных расходах серной кислоты на выщелачивание урана, что на первом опыте, при стандартной кислотности ВР удельные расход серной кислоты достигает максимальных значений 93 кг/кгU, в диапазоне Ж/Т в 0,2 – 0,8, после чего резко снижается до 50 кг/кгU. Средние значения удельных расходов серной кислоты на первом опыте составляют 60 кг/кгU. Резкое увеличение удельного расходования серной кислоты связано с высокой кислотностью в рабочих растворах и низкой степенью извлечения урана в соответствующий период Ж:Т, по причине низких фильтрационных характеристик. Максимальные значения удельного расхода серной кислоты на втором опыте, при жесткой кислотности ВР достигают 60 кг/кгU, а средние значения всего опыта составляют 45 кг/кгU. Пониженные значения удельных расходов на втором опыте по сравнению с первым опытом, обусловлено более интенсивным извлечением урана в соответствующий период Ж:Т, по причине большей кислотности ВР. Кривая удельного расхода серной кислоты на третьем опыте, при стандартной кислотности с добавлением ПАВ сглаженная и не имеет резких скачков и пиков, в среднем составляет 40 кг/кгU. Низкий расход серной кислоты обеспечен высокими показателями добычи за счет растворяющей способности ПАВ, что в свою очередь на практике ведет к экономии серной кислоты и других эксплуатационных расходов на добычу.

Для подбора оптимальной концентрации кислоты и необходимости добавления ПАВ в расчет принимается параметры удельных расходов серной кислоты на единицу ГРМ, то есть кислотоёмкость пород. На рисунке 26

приведен график удельного расхода серной кислоты на единицу ГРМ в зависимости от Ж/Т.

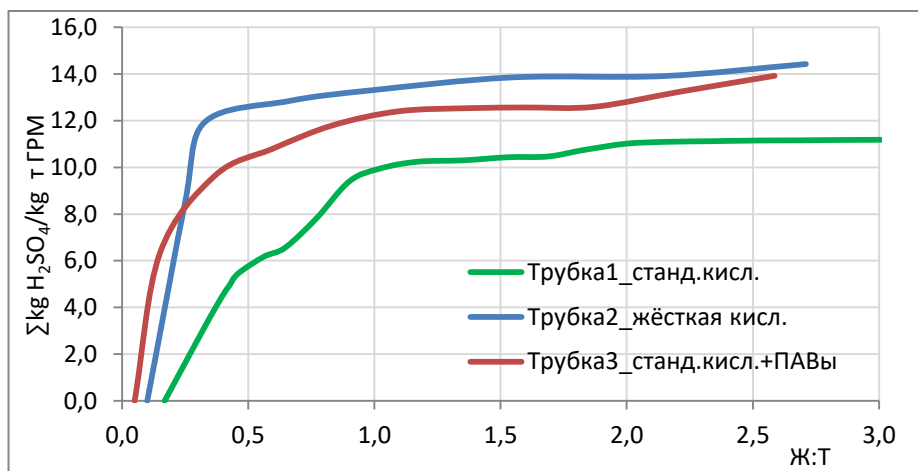


Рисунок 26 – Расход серной кислоты на единицу ГРМ по отношению Ж:Т

Как видно из рисунка 26 расхода серной кислоты на единицу ГРМ по отношению Ж/Т при проведении второго опыта с растворами жесткой кислотности, максимальный расход в 13 кг/ГРМ, при третьем опыте 11,5 кг/ГРМ, а при первом опыте 10 кг/ГРМ были достигнуты при Ж/Т 1,0. Высокий расход серной кислоты второго опыта обусловлен повышенной кислотностью ВР и достаточными фильтрационными характеристиками руды для оборота растворов. Средние значения третьего опыта по сравнению с первым и вторым опытами свидетельствует, что расход серной кислоты с добавлением ПАВ для обработки единицы ГРМ затрачивается меньше чем при жесткой кислотности, однако выше чем при стандартной кислотности. Это обусловлено повышенными фильтрационными характеристиками и интенсивности процессов оборота растворами. Низкие значения расхода серной кислоты на единицу ГРМ при первом опыте, при стандартной кислотности ВР свидетельствуют о наличии остаточной кислотности в ПР, не вступившая в реакцию.

Проведенные гранулометрические исследования керновых проб свидетельствует о преобладании > 57 % от общей массы тонко-мелкозернистой фракции вмещающих породах, что приводит к затруднению выщелачивания урана и образованию механической кольтматации в продуктивном горизонте. Рентгенофазовые исследования проб кернового материала показывают наличие глинистых минералов более 14 % от общей массы, способствующие химической и механической кольтматации скважин и прифильтровой зоны пласта. Результаты свидетельствуют о сложной структуре продуктивного горизонта, неоднородности и низкими фильтрационными характеристиками. Опыт вскрытия и отработки блоков со сложной структурой и низкими

фильтрационными характеристиками вмещающих пород показывает затруднение подготовительных работ и длительным этапом эксплуатации в виду низких темпов оборота растворами, не достаточного коэффициента использования скважин. Это вызывает дополнительные затраты на серную кислоту, проведение РВР, электроэнергию и повышает эксплуатационные расходы на добычу.

В лабораторных условиях установлено что, добавление в ВР ПАВ в незначительных объемах позволило повысить интенсивность извлечение урана до 80 % без увеличения удельного расхода серной кислоты, и увеличения скорости фильтрации растворов. Пониженные значения удельных расходов серной кислоты на единицу добытого урана в 40 кг/кгU свидетельствует о экономической эффективности добавление ПАВ на начальной стадии выщелачивания урана в сложных горно-геологических условиях и участках с высоким содержанием глинистых минералов.

Высокая кислотность ВР приводит к увеличению концентрации урана в ПР, и повышению темпов выщелачивания. Однако, на практике повышение концентрации серной кислоты в ВР приводит к увеличению ее удельных расходов, дополнительного появления коагуляционного эффекта. Добавление ПАВ при выщелачивании способствует повышению интенсивности извлечения урана и снижению удельных расходов серной кислоты, понижению коагуляционного эффекта и снижению эксплуатационных расходов.

3 ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ КОМПЛЕКСА ХИМИЧЕСКИХ РЕАГЕНТОВ СИНРГЕТИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ НА ИНТЕНСИФИКАЦИЮ СКВАЖИННОЙ ДОБЫЧИ УРАНА

3.1 Исследования влияния комплекса химических реагентов многофункционального назначения на интенсификацию скважинной добычи урана

На основе изучения природы химических осадкообразований и анализа основных породообразующих минералов продуктивного горизонта был подобран комплекс химических реагентов многофункционального назначения интенсифицирующий процессы протекающие при скважинной добычи урана в сложных горно-геологических условиях. Эффективность комплекса химических реагентов определяется его составом и подбирается в зависимости от геологических особенностей продуктивного горизонта и количественно-качественных характеристик образовавшихся осадков. Химические реагенты, включенные в комплекс обладают растворяющей способностью основных карбонатных и побочных осадкообразований, способствуют активной разглинизацией и создание дополнительных линий тока в поровом пространстве пласта, а также обладают высокой окисляющей способностью Fe^{2+} до Fe^{3+} при высоких значения рН, для предотвращения повторного осадкообразования. Интенсификация скважинной добычи урана с применением комплекса химических реагентов позволит повысить скорость отработки технологических блоков и снизить себестоимость конечной продукции.

Изучение эффективности воздействия комплекса химических реагентов производилось на геотехнологическом поле месторождения урана в Сырдарьинской депрессии при проведении опытных работ. Экспериментальные работы проводились на геотехнологических скважинах с низкими значениями МРЦ и недостаточной производительностью по ПР, а также, на скважинах с низким содержанием урана в ПР. Полу-промышленные испытания включали подачу специально подобранных химических реагентов в продуктивный горизонт через устье выбранных технологических скважин с одновременным нагнетанием выщелачивающего раствора (ВР) в них, до достижения расчетного радиуса растекания растворов от фильтра скважин. Далее, после подачи, необходимого количества химических реагентов и ВР, на добычных скважинах производили компрессорную прокачку, и запускали в работу, а нагнетательные скважины оставались в работе под давлением ВР. Подбор химических реагентов осуществлялся по характеристикам, на соответствие поставленной задаче каждого агента в сложных горно-геологических условиях сернокислотного выщелачивания урана.

Эффективность воздействия того или иного химического реагента на интенсификацию скважинной добычи урана определялась по результатам мониторинга и анализа геотехнологических параметров до и после проведения экспериментальных работ. Оборудование и схема подачи химических реагентов в продуктивный горизонт показана на рисунке 27.

Оборудование для приготовления и подачи растворов химических реагентов состоит из емкости и насоса, которые изготовлены из коррозионностойкого материала, в связи с тем, что они контактирует с ВР укрепленный серной кислотой. Одновременно нагнетаемые ВР в скважины, обеспечивал распространение растворов химических реагентов в продуктивном горизонте, на эффективный радиус растекания ограниченный сверху и с низу непроницаемыми породами. Регулирование растекание и дозирование растворов осуществлялась при помощи насосного агрегата и запорной арматуры (рисунок 27).

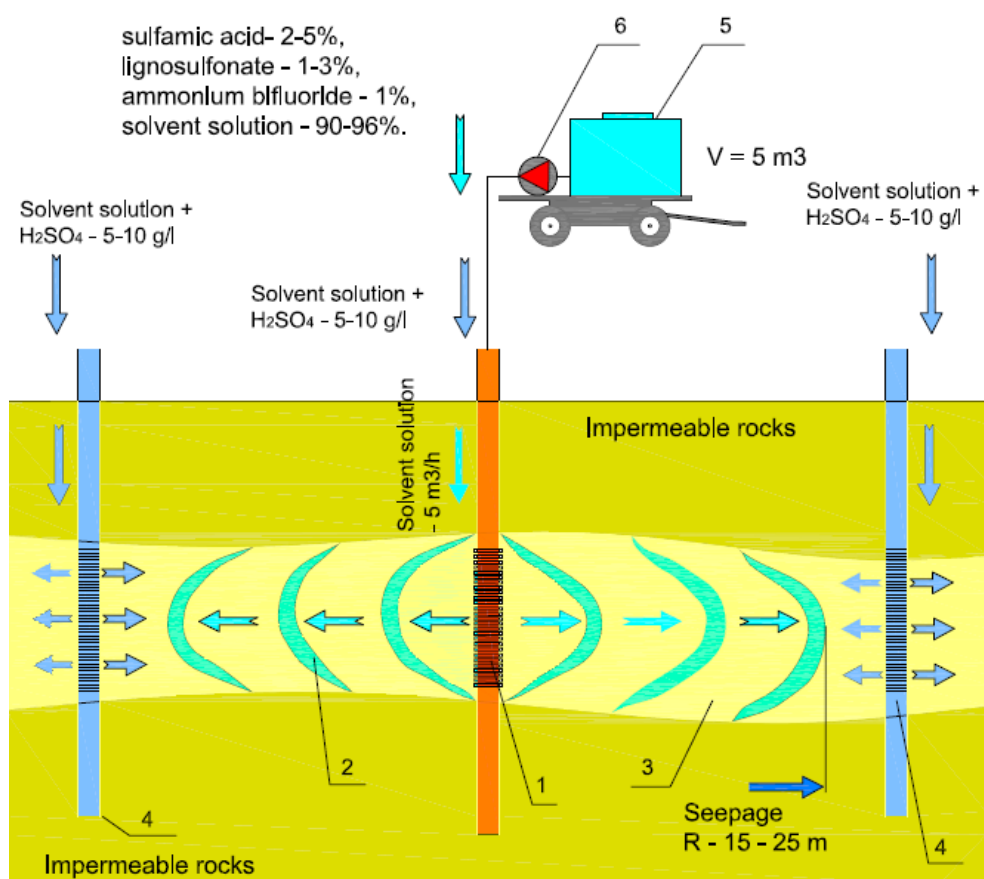
При изучении эффективности воздействия химических реагентов на интенсификацию скважинной добычи урана были подобраны и применены следующие химические реагенты:

- *Бифторид аммония* ($NH_4F \cdot HF + NH_4F$) (БФА) - существует в виде бесцветных кристаллов, легко и быстро растворимых в воде. Выбор бифторида аммония, для повышения проницаемости продуктивного горизонта, обусловлен его способностью к реакции обмена с минеральными кислотами (серная, соляная, азотная кислоты) и образованию плавиковой кислоты. Плавиковая кислота, образуемая в результате реакции, с легкостью взаимодействует с алюмосиликатами и кремнистыми соединениями, являющихся составной частью рудовмещающих пород и осадкообразований. В результате происходит растворение, как осадков, так и части терригенной составляющей песков, в целом увеличивая эффективную пористость массива рудного блока [49].

- *Сульфаминовая кислота (САК)* – (моноамид серной кислоты, амидосерная кислота) NH_2SO_2OH , кристаллический продукт бело-серого цвета. Выбор сульфаминовой кислоты обусловлен активным взаимодействием с металлами, их оксидами, гидроксидами и карбонатами. По результатам обменных химических реакций САК образует прочный комплекс с ионами Fe^{2+} , снижает их активность в растворе, в результате чего повышается соотношение Fe^{3+}/Fe^{2+} и повышается значение Eh раствора, что интенсифицирует процесс выщелачивания урана [49].

- *Лигносульфанаты* – анионные ПАВ. В воде обычно находятся в коллоидном состоянии (степень гидратации 30-35%). Применение лигносульфоната аммония для повышения проницаемости продуктивного горизонта обусловлено его способностью понижению поверхностного натяжение растворов, создание стойких эмульсии и пен. Лигносульфанат

понижает вязкость глинистых растворов, способствуя более эффективному диспергированию глинистых образований значительно повышая пористость продуктивного горизонта [49].



1 – фильтровая колонна добычной скважины; 2 – распространение растворов химических реагентов в продуктивном горизонте; 3 – закольматированный продуктивный горизонт; 4 – фильтровая колонна нагнетательных скважин; 5 - емкость для приготовления растворов химических реагентов; 6 – насос для подачи растворов химических реагентов.

Рисунок 27 – Схема подачи химических реагентов в продуктивный горизонт

Интенсивность отработки вскрытых запасов эксплуатационных блоков зависит от производительности добычных скважин по ПР и содержанию урана в растворе, при учете коэффициента использования скважин. В связи с этим мониторинг геотехнологических параметров скважин до и после проведения экспериментальных работ включал ежедневные замеры среднесуточных данных дебита скважин по ПР, а также еженедельное определение содержания урана в ПР, уровня рН и еН содержания солей железа и остаточной кислотности. После чего данные скважины усреднялись, до среднемесячных значений, которые приведены в таблице 14.

Таблица 14 – Данные мониторинга геотехнологических параметров скважин до и после проведения экспериментальных работ

Значения	До обработки				После обработки			
	1	2	3	4	5	6	7	8
Месяц								
C U, mg/l	28	20	14	102	96	146	120	38
Q, m ³ /h	8.0	7.8	7.8	8.0	8.0	8.0	8.0	7.8
pH	6.6	6.4	5.9	4.8	5.5	2.78	5.6	6.2
Fe ³⁺	76	76	84	84	226	167	279	195
Fe ²⁺	200	200	140	140	112	28	307	446
SO ²⁻ ₄ , g/l	8.38	7.42	8.88	7.44	6.72	6.48	12.48	14.64
eH	300	300	305	308	380	167	140	140

Мониторинг геотехнологических параметров и подробный анализ содержания урана, солей железа, значений pH и eH в ПР, до и после проведения обработки, показывает фактическое состояние процесса добычи на выбранной скважине. Содержание урана в ПР до обработки не превышает 30 мг/л, при высоких значениях pH раствора (5,9 – 6,6), обусловлено кольматацией порового пространства продуктивного горизонта, нейтрализацией серной кислоты и поступлением пластовых вод. Стабильные значения дебита скважины в пределах проектных 8,0 м³/ч подтверждают данное предположение. После обработки скважины наблюдается стабильное и продолжительное увеличение содержания урана в ПР с 36 до 146 мг/л, снижение значений pH раствора (2,3-4,8) вызванное воздействием химических реагентов. Однако, на девятый месяц мониторинга содержание урана в ПР начало постепенно снижаться с 120 до 38 мг/л, при восстановлении прежних значений pH раствора, вызванное нейтрализацией внедренных химических реагентов в результате повторной кольматацией порового пространства продуктивного горизонта осадкообразованиями. Постепенная интенсификация процесса скважинной добычи урана и увеличение продолжительности без перебойной работы скважины обусловлена постепенным разрушением геохимического барьера под воздействием химических реагентов синергетического действия в пористой среде. Применение комплекса химических реагентов синергетического действия позволяет повысить скорость отработки технологического блока и снизить удельные расходы серной кислоты на выщелачивание урана в сложных горно-геологических условиях.

Протекающие окислительно-восстановительные реакции и фильтрационные процессы в пласте в значительной мере определяют эффективность технологии скважинной добычи урана, полноту извлечения металлов в раствор, удельные расходы химических реагентов, энергозатрат и в целом технико-экономические и экологические показатели производства [50]. Согласно полученным результатам, на рисунке 28 показан построенный график

динамики изменения концентрации урана во времени в зависимости от уровня рН в ПР. Как видно из рисунка 28 первоначальные значения рН раствора, были на высоком уровне – 6,55, что свидетельствует о разубоживании продуктивных растворов пластовыми водами, в следствии образования геохимического барьера в пласте препятствующий линиям тока выщелачивающего раствора. Низкие значения содержания урана в ПР подтверждают предположения блокирования растворителя кольматацией. После подачи растворов химических реагентов многофункционального назначения в продуктивный горизонт, происходит заметное снижение и колебание значений рН раствора в пределах уровня 2,33 – 5,54 вызванное взаимодействием химических реагентов многофункционального назначения в пласте. Колебания уровня рН в растворе вызваны влиянием движения фронта ВР в поровом пространстве продуктивного горизонта, так первое снижение рН вызвано подходом ВР содержащий химические реагенты поданные в пласт через устье скважины, второе снижение вызвано воздействием фронта ВР от нагнетательных скважин. Двух этапное повышение содержания урана в ПР обусловлено восстановлением фильтрационных характеристик и линии тока продуктивного горизонта. Последующее опробование скважины показывает плавное увеличение и стабилизация прежнего – до экспериментального значения рН на уровне 6,21, что подтверждает прекращение взаимодействие комплекса химических реагентов в продуктивном горизонте и восстановлении геохимического барьера и кольматации пласта.

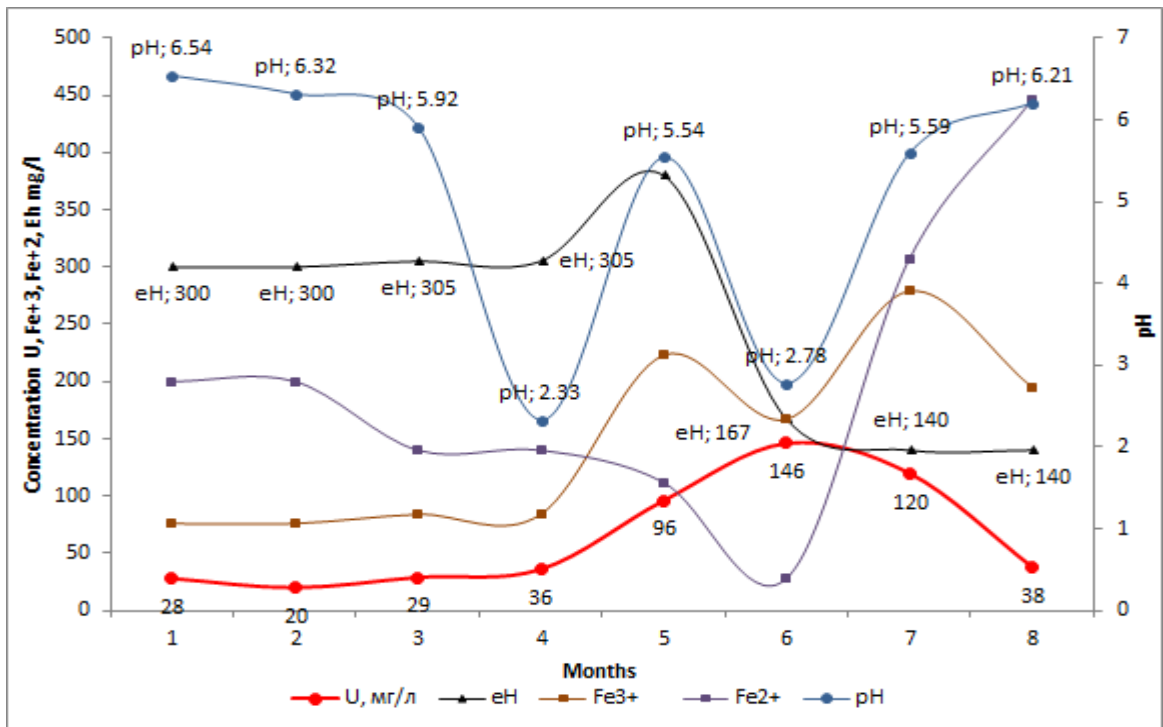


Рисунок 28 – Динамика изменения содержания урана в ПР в зависимости от уровня рН, Eh, Fe³⁺, Fe²⁺.

Динамика изменения концентрации урана во времени в зависимости от уровня Eh в ПР в период с первого по четвертый месяцы мониторинга параметров скважины, значения Eh были стабильными на уровне 300-308 мВ, повышение содержание урана в ПР обусловлено переходом растворимых урановых минералов в раствор. На пятом месяце контроля происходит повышение уровня Eh до 380 мВ, обусловленное подходом фронта ВР от нагнетательных скважин, активизацией окислительно-восстановительных процессов в продуктивном горизонте. Дальнейшее наблюдение показывает снижение значений Eh раствора с 380 до 167 – 140 мВ, что, свидетельствует о затухании окислительно-восстановительного процесса в пласте в следствии образования кольматации.

Динамика изменения содержания урана во времени в зависимости от содержания Fe²⁺ в ПР, показывает, что до проведения экспериментальных работ на протяжении четырех месяцев мониторинга, содержание Fe²⁺ было стабильно низким на уровне 200 - 140 мг/л, обусловленное осаждением Fe²⁺ в пласте в связи с разубоживанием ПР пластовой водой и повышением уровня рН. На пятом - шестом месяцах наблюдений, содержание Fe²⁺ понизилось с 140 до 28 мг/л, вызванное воздействием комплекса химических реагентов многофункционального назначения в пласте и массовым окислением Fe²⁺ до Fe³⁺. На девятом месяце контроля мы видим резкое увеличение содержания Fe²⁺ до 446 мг/л, обусловленное прекращением окисления Fe²⁺ в пласте. Дальнейшее снижение содержания Fe²⁺ в ПР до 84 мг/л, свидетельствует о осаждении железа в продуктивном горизонте и кольматации порового пространства.

График изменения содержания урана во времени в зависимости от содержания Fe³⁺ в ПР, показывает, что содержание Fe³⁺ в растворе остается неизменным на протяжении четырех месяцев опробования. С четвертого по пятый месяцы мониторинга видно заметное увеличение содержания Fe³⁺ в ПР до уровня 223 мг/л, вызванное воздействием комплекса химических реагентов многофункционального назначения в пласте и массовым окислением Fe²⁺ до Fe³⁺. С пятого по шестой месяц наблюдений видно резкое снижение концентрации Fe³⁺ в ПР до 167 мг/л, однако на седьмой месяц контроля заметное увеличение содержания трехвалентного железа в растворе до 279 мг/л, обусловленное массовым окислением Fe²⁺ до Fe³⁺. Дальнейшее снижение содержание железа в ПР свидетельствует о снижении окислительно-восстановительной активности раствора в продуктивном горизонте, вызванное повторной кольматацией продуктивного горизонта.

Выщелачивание урана в условиях естественной проницаемости, зависит от целого ряда факторов, в которые входят основная и сопутствующая минерализация урана, средняя бортовая концентрация урана в пласте, состав и

зернистость песков, среднее содержание карбонатов в пласте, а также режимов вскрытия, закисления и выщелачивания продуктивного горизонта. В сложных горно-геологических условиях значения отработки блоков и геотехнологические параметры скважин, не достигают проектных показателей, в связи с низким содержанием урана в ПР и частыми остановками скважин на проведение восстановительных работ. Из рисунков видно что на начало эксперимента содержание урана в ПР колебалось в районе 20-30 мг/л., а уровень рН был высоким 6,55, содержание Fe^{3+} и Fe^{2+} было также низким 84 - 140 мг/л соответственно, а уровень Eh был стабилен на уровне 305 мВ, что свидетельствует об образовании геохимического барьера препятствующий потоку выщелачивателя в пласте. Последующая подача комплекса химических реагентов показало восстановление первоначальной проницаемости и стабильное увеличение соотношение Fe^{3+}/Fe^{2+} оказывающая прямо пропорциональное влияние на концентрацию урана в ПР при повышенных значения уровня рН. Стабильное увеличение содержания урана в продуктивном растворе от 30 до 146 мг/л свидетельствует окисления U^{4+} до U^{6+} и высокой эффективности применяемого комплекса.

Результаты рентгенофазовых анализов свидетельствуют о том, что кольматирующие отложения относятся к химическому типу, являющиеся многокомпонентными и могут содержать одновременно соли кальция, железа, магния и их гидроксиды, карбонаты кальция и магния, а также песок и глину. Они осаждаются на поверхности фильтров и в порах прилегающих водоносных пород под действием силы тяжести или адсорбируются под действием сил поверхностного натяжения. Осаждение химических образований на пути фильтрации выщелачивающего раствора негативно действует на процесс выщелачивания, блокируют доступ выщелачивающего раствора. Образование геохимического барьера в продуктивном горизонте снижает значения отработки технологических блоков, тем самым увеличивает себестоимость конечной продукции. Интенсификация скважинной добычи урана, с применением эффективного комплекса химических реагентов основана на эффективном разрушении геохимического барьера и последующим увеличением обменных реакций пористой среды.

Результаты экспериментальных исследований интенсификации скважинной добычи урана с применением химического комплекса реагентов многофункционального назначения свидетельствуют о эффективности метода. Постепенная интенсификация процесса выщелачивания урана и увеличение содержания урана в растворах обусловлена постепенным разрушением геохимического барьера, восстановлением первоначальной проницаемости продуктивного горизонта под воздействием химических реагентов синергетического действия. Применение комплекса химических реагентов

синергетического действия позволяет повысить скорость обработки технологического блока и снизить удельные расходы серной кислоты на выщелачивание урана в сложных горно-геологических условиях.

Интенсификацию скважинной добычи урана в сложных горно-геологических условиях необходимо осуществлять с применением комплекса химических реагентов многофункционального назначения в зависимости от состава рудовмещающих пород. Подача эффективных концентраций химических реагентов в выщелачивающий раствор в сочетании с традиционными методами регенерации скважин интенсифицируют процесс выщелачивание урана.

3.2 Выбор геотехнологических скважин для проведения экспериментальных работ по интенсификации скважинной добычи урана с применением комплекса химических реагентов синергетического действия

Работа эксплуатационных скважин в сложных горно-геологических условиях, сопряжена с рядом факторов затрудняющих темпы добычи продуктивных растворов и подачи выщелачивающих растворов в рудоносные горизонты [51]. Одним из таких факторов является так называемый эффект химической кольтматации прифилтровой зоны и филтра откачной скважины. При химической кольтматации нерастворимые соли алюминия, железа, кальция, магния и т.д. выпадают в осадок при росте рН показателя в продуктивных растворах по мере их продвижения по рудоносному горизонту и закупоривают поры в песке. Также принесенные потоком раствора от нагнетательных скважин к откачным мелкие и тонкие глинистые частицы накапливаются и нарушают первоначальную филтрацию. Химическая и механическая кольтматации смешиваются и образуют устойчивый геохимический барьер закупоривающий поры, что влечет за собой снижение филтрации раствора по рудным телам и падение дебита скважины [52]. Для решения этой проблемы применяются различные способы декольтматации, самым распространённым из них является химическая обработка прифилтровых зон скважин крепкими растворами соляной или плавиковой кислоты. Данный способ применяется на всех откачных скважинах где проявляются признаки химической и механической кольтматации, к тому же он является наиболее удобным и дешёвым [53].

Выбор эксплуатационных скважин для проведение экспериментальных работ производился совместно со специалистами рудника Хорасан-1. В таблице 15 приведены геотехнологические параметры работы выбранных скважин.

Таблица 15 – Геотехнологические параметры добычных скважин для проведения экспериментальных исследований

№ п/п	№ скважины	Ме, до ОПИ (мг/л)	рН, до ОПИ	Дебит до ОПИ (м ³ /час)	Дебит после прокачки ХРВС (м ³ /час)	МРЦ до ОПИ (суток)	Интервал фильтров от и до, м	К эксплуатации, (средний)
1	90-6-3	126	1,54	3,0	7,0	17	622,2-630,2	0,76
2	92-4-4	98	2,31	2,0	Нет притока	7	663,8-668,8	0,5
3	90-3-2р	80	2,42	2,0	9,0	7	631,5-639,5	0,67
4	60-4-3	228	2,03	5,0	8,7	14	598,9-604,9	0,71
5	92-4-1	14	1,34	2,0	7,0	12	642,3-648,3	0,66
6	5-1-4-8	106	3,58	2,9	7,0	5	644,2-648	0,40

Как видно из таблицы 8, на выбранных технологических скважинах фактические значения производительности по ПР не превышают 3-4 м³/час, отстают от проектных (6,2 м³/ч), а МРЦ скважин варьируется в пределах 7-22 дней. Выбранные скважины 90-6-3, 90-3-2р, 92-4-4, 92-4-1, 60-4-3, и 5-1-4-8 отличаются низкой производительностью по ПР и минимальными значениями МРЦ в пределах 7-23 суток, в результате химической и механической кольтации. В результате чего в прифильтровой зоне пласта образуется устойчивый геохимический барьер понижающий проницаемость продуктивного горизонта, а скважинные фильтры снижают пропускную способность. Частые остановки скважин на ожидание и проведение РВР понижают коэффициент эксплуатации скважины и снижают интенсивность отработки эксплуатационного блока и повышают расходы на проведение дополнительных ремонтных работ. Низкие значения коэффициента эксплуатации скважин обусловлены недостаточной эффективностью традиционных методов РВР.

Откачная скважина 90-6-3 была сооружена и введена в эксплуатацию в июне месяце 2017 года на блоке №90, залежи 10, Маастрихтского горизонта. Начальная производительность скважины по ПР соответствовала проектным значениям и колебалась в диапазоне 6,5-7,0 м³/ч, содержание урана соответствовало проектным значениям и составляло 102-136 мг/л. Однако в последствии дебит и период бесперебойной работы скважины снизился до минимальных значений, результаты компрессорной прокачки были не стабильными и не превышали 17 суток, химическая обработка скважин с применением БФА повышала стабильность работы скважины на 39 суток. Скважина часто простаивала в ожидании РВР и в режиме закачке ВР в скважину. Литологические характеристики скважины показывают что интервал фильтров посажен в пески среднезернистые с высоким коэффициентом фильтрации в 18,95 и мелкозернистые с средним КФ – 7,73, примерно в равных частях. Наличие мелкозернистого песка и средней карбонатности в 0,8% в

интервале фильтра объясняет низкий дебит и МРЦ скважины, по причине образования устойчивой непроницаемой зоны в ПЗП.

Откачная скважина 92-4-4 была сооружена и введена в эксплуатацию в декабре 2017 года на блоке 92, залежи 10, Маастрихтского горизонта. Начальный дебит скважин не достигал проектных значений и составлял 2,8-3,8 м³/ч и минимальными значениями МРЦ, как видно из таблицы 8 при компрессорной прокачке на скважине нет притока, а содержание урана в ПР не превышает 100 мг/л. Скважина по долгу простаивала в ожидании РВР или в режиме подачи ВР в скважину. Литологические характеристики скважины показывают что интервал фильтров посажен в пески мелкозернистые и среднезернистые с преобладанием мелкозернистых песков, с низким КФ – 2,1. Преобладание мелкозернистых песков в интервале фильтра скважины и наличием перепада уровня между откачной и нагнетательной скважиной объясняет низкий дебит и отсутствие притока раствора при компрессорной прокачке.

Реверсная скважина 90-3-2р была запущена в эксплуатацию в апреле 2018 года на блоке 90 залежи 10, Маастрихтского горизонта. Первоначальный дебит составлял 9,3 м³/ч, однако, дебит стремительно снижался до 4,0 м³/ч, а традиционные методы РВР не давали продолжительного результата и средний МРЦ составил 7 суток. Скважина по долгу простаивала в ожидании РВР или была на закачном режиме. Содержание урана в ПР постепенно увеличивалось с 38 до 80 мг/л но низкий дебит скважины и частые простои скважины на РВР не давал результата. Литологические характеристики скважины показывают что интервал фильтров посажен в песчаник на карбонатном цементе, алевролит, песок мелкозернистый с низким КФ – 2,3. Наличие песчаника на карбонатном цементе, алевролитов и песка мелкозернистого обуславливает низкий дебит скважины по ПР, низкую эффективность РВР скважины традиционными методами.

Откачная скважина 60-4-3 была введена в эксплуатацию в январе 2018 года на блоке 60, Маастрихтского горизонта. Первоначальный дебит скважины соответствовал проектным значениям и составлял 6,5 м³/ч, однако через несколько месяцев дебит начал постепенно снижаться, с одновременным снижением традиционных методов РВР, средний МРЦ составляет 9 суток. Содержание урана в ПР постепенно снижалось с 415 до 146 мг/л по причине кольматации продуктивного горизонта. Скважина часто простаивала в ожидании РВР или в режиме закачки ВР. Литологические характеристики скважины показывают что интервал фильтров посажен в пески мелкозернистые, с низким КФ – 1,77. Что объясняет постепенное снижение дебита и содержание урана в ПР по причине образования непроницаемой зоны в ПЗП и блокированию потоков раствора с нагнетательных скважин.

Эксплуатация скважин с низким содержанием урана в ПР и низкой производительностью по ПР и МРЦ увеличивает период отработки технологического блока. Что влечет за собой увеличение эксплуатационных расходов на добычу урана, повышение расхода серной кислоты на

выщелачивание, дополнительное проведение ремонтных работ с привлечением специального оборудования и расходных материалов, привлечение дополнительного персонала для обслуживания ГТП и расходу химических реагентов на переработку ПР. Для повышения производительности скважин по ПР, увеличению периода бесперебойной работы скважин, повышение коэффициента эксплуатации скважин, повышение содержание урана в ПР необходимо подобрать и разработать эффективные параметры применения комплекса химических реагентов синергетического действия.

3.3 Технические средства, необходимые для выполнения экспериментальных работ на геотехнологических скважинах с применением комплекса химических реагентов синергетического действия

Проведения ОПИ включала работу по подбору эксплуатационных скважин входящие в парк технологических скважин рудника с геотехнологическими параметрами ниже проектных значений, таких как производительность скважины по ПР, содержание урана в ПР или коэффициент эксплуатации скважины. Основной причиной частого выхода из строя откачных скважин на ГТП рудника «Хорасан-1» является химическая и механическая кольматации, которая подразумевает под собой нарастание кристаллов гипса на фильтровую колонну и закупоривании прифильтровой зоны принесенными тонкими и глинистыми частицами с последующим снижением дебита. Химические и механические осадки образуют устойчивый геохимический барьер, имеющий необратимый характер в зоне, активной фильтрации доступной воздействию серноокислых растворов. На эксплуатационных блоках с повышенным содержанием карбонатности и глинистости продуктивного горизонта наиболее сильно проявляются признаки химического и механического осадкообразования. Полнота взаимодействия карбоната кальция с серной кислотой зависит от степени его дисперсности. В тех случаях, когда он входит в состав алевроит-глинистой фракции хорошо проницаемых песчаных отложений, как правило, происходит полное его взаимодействие с раствором H_2SO_4 . Часть $CaCO_3$, составляющей песчаную и более крупные фракции, обычно не успевает целиком прореагировать за время проведения подземного выщелачивания на данном участке. Этому способствует формирование непроницаемых гипсовых пленок, особенно вокруг массивных карбонатных образований – отдельных включений, прослоев и линз, которые препятствуют взаимодействию кислоты с остаточными карбонатами. Образование непроницаемых участков в рудных телах продуктивного горизонта блокируют линии тока и снижают извлечение урана на блоке, понижают содержание металла в ПР.

Для устранения химических и механических осадкообразований, применяется специально разработанная и изготовленная установка для проведения химической обработки скважин декольматирующим раствором на основе 2-4% бифторида аммония. Установка для проведение

декольматирующих обработок состоит из смонтированного на платформе прицепа МАЗ пластиковой емкости – цистерны, коррозионностойкого перистальтического насосного агрегата, и заправочных и нагнетающих резиновых рукавов. При помощи установки с удлиненным рукавом серная кислота с добавлением бифторида аммония подается на устье скважины. Применение бифторидного комплекса при регенерации скважины – химический способ восстановления производительности скважин заключающийся в подаче специальных химических растворов в фильтровую область и прифильтовую зону для растворения колющих образований.



Рисунок 29 – Оборудование передвижного узла приготовления и подачи декольматирующих растворов в скважины

Для проведения работ по приготовлению и подаче декольматирующего раствора наливным способом необходимо следующее оборудование, на рисунке 29 показана разработанная и изготовленная установка для приготовления и подачи декольматирующего раствора в скважины:

а) платформа передвижная с гибким рукавом для соединения со скважиной;

б) химически стойкий емкость – цистерна из пластика (5 м^3) – 1 шт.

При принудительной подаче бифторидного комплекса необходимо применять дополнительное оборудование:

а) перистальтический насосный агрегат из коррозионностойкого материала (пластика) с производительностью $6-9 \text{ м}^3/\text{ч}$;

б) запорная арматура и гибкий рукав для подачи растворов химических реагентов в скважину.

3.4 Разработка методики проведения экспериментальных опытов на действующих геотехнологических скважинных ячейках ряда месторождений урана

Реагентная обработка скважин применяется на участках работ характеризующихся сильной химической кольматацией и в случаях, когда классические способы очистки фильтровой колонны и прифильтровой зоны не дают положительного результата [54]. Реагентная обработка технологических скважин проводится после проведения ремонтно-восстановительных работ по удалению песчаных пробок, промывки фильтровой колонны и отстойника, эрлифтной прокачки скважины [55]. При проведении экспериментальных работ на откачных скважинах рудника Хорасан-1, выполнялась работа по декольматации скважин с применением бифторидного комплекса, после чего производилась подача комплекса химических реагентов синергетического действия в продуктивный горизонт с последующим отслеживанием геотехнологических параметров скважин.

Для повышения геотехнологических параметров скважин была разработана методика проведения ОПИ с применением химического комплекса реагентов синергетического действия для повышения эффективности скважинной добычи урана в сложных горно-геологических условиях. Проведение ОПИ также включала оценку эффективности влияния химических реагентов на геотехнологические параметры скважин (изменение содержания урана в ПР, производительности скважины по ПР, определении рН, ОВП). Для проведения опытно-промышленных испытаний по повышению скважинной добычи урана и эксплуатации технологических блоков составлена рецептура растворов с применением химических реагентов синергетического действия

Для определения эффективности и воздействие на геотехнологические параметры комплекса химических реагентов синергетического действия было решено подавать комплекс химических реагентов через сеть откачных и нагнетательных скважин. Химические реагенты подавались после проведение декольматирующей обработки скважин бифторидным комплексом и повышение приемистости откачной скважины до 5 м³/час. Необходимость обеспечения достаточной приемистости скважины в 4,5 – 5 м³/час обусловлено необходимостью наибольшего распространения химических реагентов в продуктивном горизонте от фильтра скважины. Максимальное растекание комплекса от фильтра скважины осуществляется при одновременной подаче выщелачивающего раствора от трубопровода ВР. Расчет растекания и удаления химических реагентов производится по эффективной мощности продуктивного горизонта на расчетный радиус с охватом в 18 – 25 м от фильтра обрабатываемой скважины.

Параметры подачи ВР в откачные скважины и расчетные данные растекания химических реагентов в продуктивном горизонте от фильтра скважины, при проведении ОПИ, указывают следующие расчетные значения: общий объем поданного ВР; расход серной кислоты; приемистость скважины;

объем горно-рудной массы; площадь растекания ВР; расчетный радиус растекания ВР в продуктивном горизонте. В таблице 16 приведены расчетные данные растекания химических реагентов от фильтра скважин при проведении экспериментальных работ.

Таблица 16 - Данные подачи ВР в скважины и расчетные данные растекания х/р на расстояние от фильтра скважин

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
№/ пп	Мэф, м	V _{ГРМ} , м ³	Q _{ГРМ} , тн	ВР, м ³	H ₂ SO ₄ , тн	Прием-ть Q, м ³ /ч	время зак. расч.,	Ж/Т	R, м
1	11.2	14203.6	24146.2	3125	21.9	4.0	26	0.13	20.1
2	9.6	13069.1	22217.5	2875	20.1	1.9	41	0.13	20.8
3	7.6	9850.9	16746.5	2167	15.2	4.3	21	0.13	20.3
4	14.6	14836.4	25221.8	3264	22.8	4.0	34	0.13	18.0
5	10.0	10636.4	18081.8	2340	16.4	3.9	25	0.13	18.4
	5.0	7200.0	12240.0	1584	11.1	4.4	15	0.13	21.4
		69796.4	118653.8	15355	107.5	22.5		0.13	

Распространение комплекса химических реагентов контролируется объемом подаваемого ВР в скважину откуда рассчитывается радиус растекания химических реагентов от фильтра скважины. По мере продвижения химические реагенты в продуктивном горизонте взаимодействуют с химическими и механическими осадкообразованиями а также урановой минерализацией.

Помимо разрушения химической кольматации, реагенты устраняют тонкие глинистые частицы, механической кольматации тем самым повышают проницаемость и предотвращают закупорку порового пространства на длительный период времени [56]. При восстановлении первоначальной проницаемости рудовмещающих пород происходит повышение извлечение урана и интенсификация геотехнологических процессов скважинной добычи урана, за счет увеличения линий токов в рудных телах [57]. Для этого необходимо обеспечить требуемую приемистость откачной скважины и контролировать подачу ВР с момента запуска нагнетания в скважину ВР до момента достижения эффективного радиуса растекания химических реагентов в продуктивном горизонте.

Экспериментальные работы включали проведение работ по повышению приемистости с последующей обработкой 6 откачных скважин и контура нагнетательных скважин. Для повышения приемистости откачных скважин применялась изготовленная установка химической обработки скважин с применением бифторида аммония 2-4% и укрепленного 4-5% серноокислотного раствора. Непосредственная подача комплекса химических реагентов синергетического действия в откачные скважины производилась после достижения требуемой приемистости откачных скважин с последующим нагнетанием ВР в скважину по достижению эффективного радиуса растекания химических реагентов от фильтра скважины. Обработка контура

нагнетательных скважин включала работы по повышению приемистости скважины ВР и добавление комплекса химических реагентов после запуска откачной скважины в добычу.

Как видно из таблицы 16 на блоках с низкими значениями производительности скважин по ПР и МРЦ но более высоким содержанием урана в ПР был подобран состав химических реагентов включающий общий расход на откачную скважину №90-6-3 не превышает БФА – 175 кг, САК – 400 кг, ЛСТ – 280 кг, FeCl₃ – 480 кг. При том что Бифторид аммония подавался в начале и в конце эксперимента для повышения приемистости откачной скважины и достижения эффективного радиуса растекания химических реагентов. Приемистость данной скважины в среднем составляла 4,0 м³/ч. Обработка нагнетательных скважин по 12,5 и 25 кг БФА взаимодействующих с данной откачной скважиной производилось на момент запуска откачной скважины в добычу.

3.5 Мониторинг геотехнологических параметров блоков после проведения экспериментальных работ

Технологический процесс скважинной добычи урана, предполагает растворение полезного компонента на месте залегания рудного тела с последующим выносом образованных соединений движущимся потоком растворителя от нагнетательной скважины к откачной [58]. В результате в недрах протекают различные физико-химические процессы: образование газов, растворение отдельных минералов, перенос твердых взвешенных частиц с потоком раствора, выделение в поровой среде химических осадков, вследствие чего происходит увеличение гидравлических сопротивлений и образование непроницаемых участков вокруг фильтра [59]. В большинстве случаев осадки, кольматирующие фильтры и ПЗП, являются многокомпонентными и могут содержать одновременно соли железа, марганца и их гидроксиды, карбонаты кальция или магния, соединения кремнекислоты и сульфиды, а также песок и глину. Они осаждаются на поверхности фильтров и в порах прилегающих водоносных пород, затрудняют движение выщелачивающего раствора [60]. При выщелачивании вмещающих пород, со средним содержанием карбонатов в продуктивном горизонте превышающие 1,2 – 1,5% и средней глинистостью выше 15% процессы осаждения многокомпонентных кольматантов скоротечно и значительно снижают проницаемость пород, образуя устойчивый геохимический барьер. Восстановление первичной проницаемости традиционными методами малоэффективно.

В целях определения эффективности данного подхода в целях интенсификации скважинной добычи урана в сложных горно-геологических условиях был проведен мониторинг геотехнологических параметров скважин до и после проведения экспериментальных работ. Для более точного расчета и установление фактических параметров отработки скважин был определен средний МРЦ скважин, коэффициент эксплуатации эксплуатационных скважин, среднемесячные значения содержания урана в ПР, и

производительность скважины по ПР. После чего высчитывался среднемесячная добыча урана на скважине, по результатам данных строился график изменения параметров работы скважин. На рисунках 30 – 35 изображены графики изменения содержания урана в ПР – синий цвет, и производительности скважин по ПР – зеленый цвет, период обработки – фиолетовый цвет, а также расчетные значения среднемесячной добычи урана на скважине – оранжевый. В таблицах 17 – 22 приведены расчетные данные МРЦ и коэффициента эксплуатации скважины до и после проведения ОПИ.

На рисунке 30 показан построенный график основных геотехнологических параметров скважины 60-4-3 вскрывающая Маастрихтский рудный горизонт. В таблице 17 приведены результаты сравнительного анализа параметров коэффициента эксплуатации и период бесперебойной работы скважины.

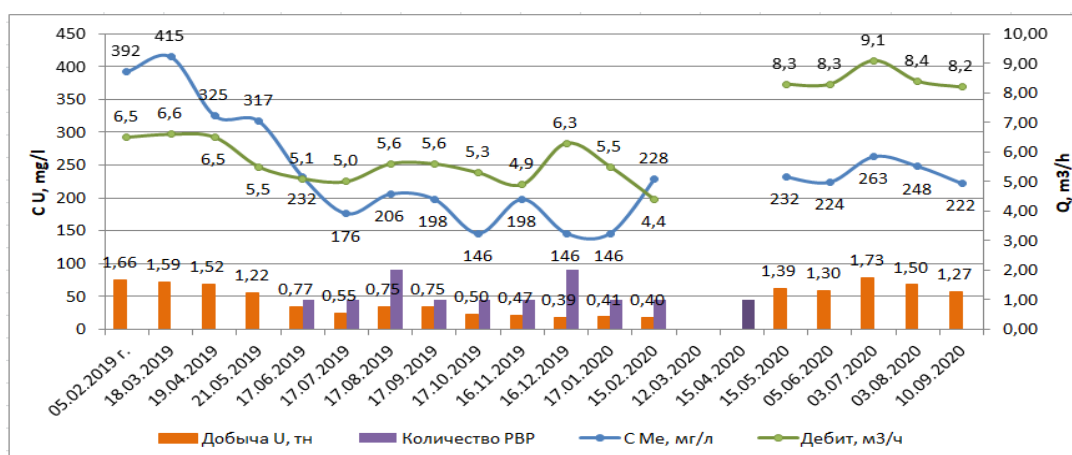


Рисунок 30 – Мониторинг геотехнологических параметров до и после проведения ОПИ скважины 60-4-3

Как видно из рисунка 30 с момента запуска скважины в добычу в феврале 2019 г содержание урана в ПР постепенно снижалось с 400 до 146 в феврале 2020 г, при нестабильной производительности скважины по ПР в 5,3 м³/ч, МРЦ – 22 дней и *K* эксплуатации – 0,71 до проведения ОПИ.

Таблица 17 – Данные МРЦ и *K* эксплуатации до и после ОПИ скважины 60-4-3

Значения	До ОПИ	После ОПИ
<i>K</i> эксплуатации	0,71	1,36
МРЦ	22	120

Низкие параметры МРЦ и производительности скважины по ПР обусловлены сильной кольматацией скважины, а низкие значения *K* эксплуатации отражает частые простои скважин и простои в ожидании РВР или на закачку ВР в скважину для повышения дебита скважины, все это подтверждает низкую эффективность традиционных методов проведения РВР на скважине. Добыча урана на скважине в данных условиях затруднена и постепенно снижалась с 1,6-1,2 до 0,3-0,4 т урана в месяц. Скважина

простаивала два месяца из-за низкой эффективности РВР. После проведения экспериментальных работ и запуска скважины в добычу, производительность скважины по ПР составила 8,3 м³/ч при содержании урана в ПР в 232 мг/л, а расчетная добыча урана на скважине составила 1,39 т в месяц, без проведения РВР. На рисунке 31 показан построенный график основных геотехнологических параметров скважины 92-4-1 вскрывающая Маастрихтский рудный горизонт. В таблице 18 приведены результаты сравнительного анализа параметров коэффициента эксплуатации и период бесперебойной работы скважины.

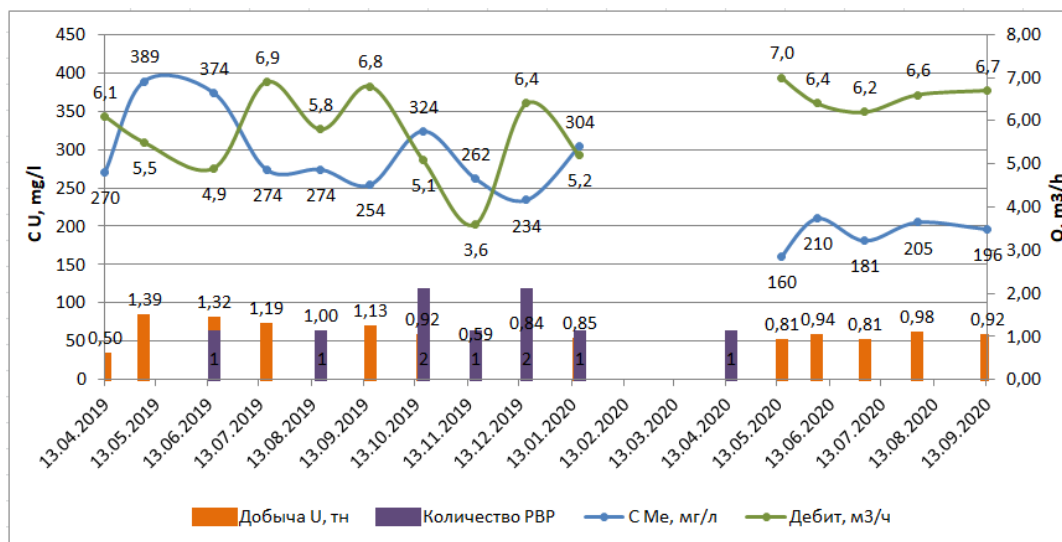


Рисунок 31 – Мониторинг геотехнологических параметров до и после проведения ОПИ скважины 92-4-1

Значения K эксплуатации составила 1,36 а МРЦ – 120 дней (наблюдение), все это свидетельствует о эффективной разкольматации скважины и интенсификации геотехнологических процессов выщелачивании. Повышение дебита скважины в два раза и стабилизация содержания урана в ПР в диапазоне 230 мг/л свидетельствует о повышении извлечении урана.

Таблица 18 – Данные МРЦ и K эксплуатации до и после ОПИ скважины 92-4-1

Значения	До ОПИ	После ОПИ
K эксплуатации	0,66	1,06
МРЦ	12	115

Откачная скважина 92-4-1 была введена в эксплуатацию в декабре 2017 г и для анализа был выбран последний отрезок времени в 12 месяцев с наиболее стабильными данными производительности скважины по ПР. На данной скважине также прослеживается постепенное снижение содержание урана в ПР с апреля 2019 г до февраля 2020 г с 389 до 304 мг/л при нестабильном дебите скважины в 5,2 м³/ч, не достигающих проектных 6,2 м³/ч. Средние значения МРЦ скважины – 12 дней при K эксплуатации – 0,66, также обусловлено сильной кольматацией скважины и низкой эффективностью традиционных

методов РВР, частыми остановками и простоями на ожидание РВР или нагнетание ВР в скважину для повышения дебита.

На рисунке 32 показан построенный график основных геотехнологических параметров скважины 90-6-3 вскрывающая Маастрихтский рудный горизонт. В таблице 19 приведены результаты сравнительного анализа параметров коэффициента эксплуатации и период бесперебойной работы скважины.

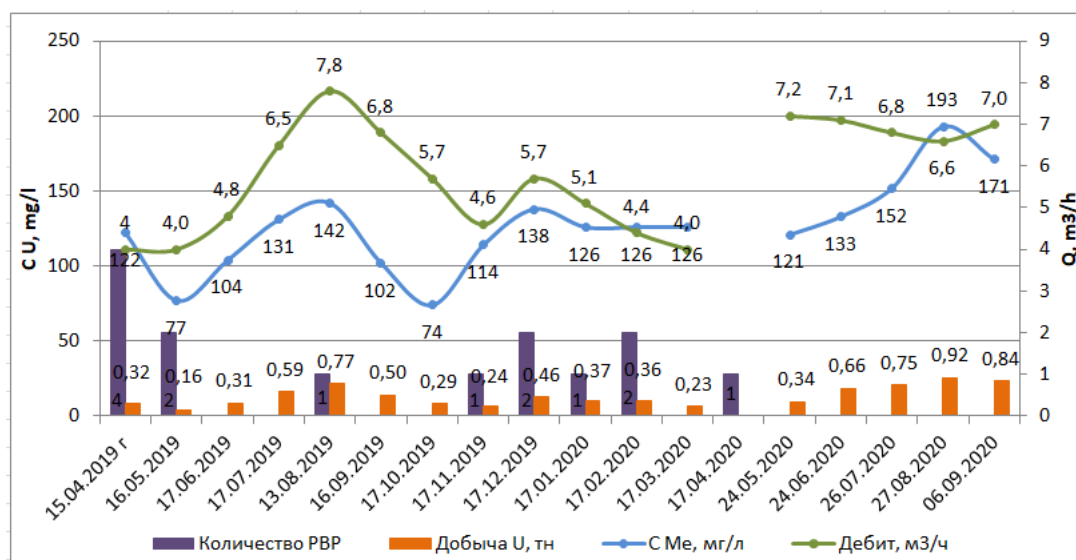


Рисунок 32 – Мониторинг геотехнологических параметров до и после проведения ОПИ скважины 90-6-3

В данных условиях добыча урана также затруднена и постепенно снижалась с 1,39-1,32 до 0,84-0,85 т урана в месяц. Скважина простаивала два месяца из-за низкой эффективности РВР. После проведения ОПИ содержание урана в ПР стабилизировалось на уровне 210 мг/л и дебит скважины повысился до 7,0-6,4 м³/ч, МРЦ – 115 дней (наблюдение), *K* эксплуатации – 1,06. Данные параметры свидетельствуют о расколматации ПЗП скважины и повышении извлечение урана, что подтверждает стабилизация добычи урана на уровне 0,81-0,94 т в месяц без проведения РВР.

Таблица 19 – Данные МРЦ и *K* эксплуатации до и после ОПИ скважины 90-6-3

Значения	До ОПИ	После ОПИ
<i>K</i> эксплуатации	0,76	1,12
МРЦ	17	110

Откачная скважина 90-6-3 была введена в эксплуатацию в марте 2017 г и для анализа был выбран последний отрезок времени в 12 месяцев с наиболее стабильными данными производительности скважины по ПР. На данной скважине прослеживаются колебания среднего содержания урана в ПР в диапазоне 77 – 142 мг/л и постепенным понижением дебита скважины с 7,2 до 4,0 м³/ч, не достигающих проектных 6,2 м³/ч. Средние значения МРЦ скважины

– 17 дней при K эксплуатации – 0,76, также обусловлено сильной кольматацией скважины и низкой эффективностью традиционных методов РВР, частыми остановками и простоями на ожидание РВР или нагнетание ВР в скважину для повышения дебита. В данных условиях добыча урана не стабильна и зависела от периодичности проведения РВР на скважине и в среднем составляла 0,39 т урана в месяц. Скважина простаивала более месяца из-за низкой эффективности РВР. После проведения ОПИ содержание урана в ПР повысилось с 121 до 193 мг/л, при повышении производительности скважины по ПР до 7,2 м³/ч в мае и постепенном снижении до 6,1 м³/ч в сентябре месяце. Значения МРЦ – 110 дней (наблюдение), K эксплуатации – 1,1. Данные параметры свидетельствуют о раскольматации ПЗП скважины и повышении извлечение урана, что подтверждает стабилизация добычи урана на уровне 0,66-0,75 т в месяц без проведения РВР. На рисунке 33 показан построенный график основных геотехнологических параметров скважины 5-4-8 вскрывающая Компанский рудный горизонт. В таблице 20 приведены результаты сравнительного анализа параметров коэффициента эксплуатации и период бесперебойной работы скважины.

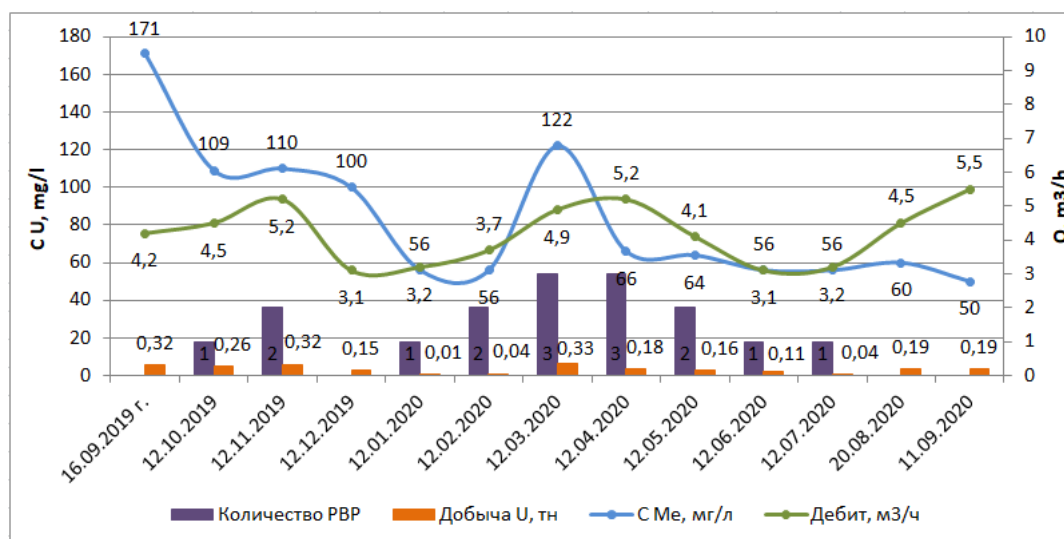


Рисунок 33 – Мониторинг геотехнологических параметров до и после проведения ОПИ скважины 5-1-4-8

Таблица 20 – Данные МРЦ и K эксплуатации до и после ОПИ скважины 5-1-4-8

Значения	До ОПИ	После ОПИ
K эксплуатации	0,4	0,7
МРЦ	5	45

Согласно мониторингу геотехнологических параметров скважины 5-1-4-8 результаты опробования ПР показывают, что содержание урана в ПР постепенно снижалось с 171 до 56 мг/л при незначительных колебаниях дебита скважины в пределах 3,2 – 5,2 м³/ч за последние 12 месяцев стабильной работы скважины. Значения МРЦ скважины до проведения ОПИ составляли 5 дней, K

эксплуатации – 0,4, частые остановки скважины и ожидание РВР а также низкий коэффициент эксплуатации скважины и недостаточный дебит скважины по ПР обусловлен низкой эффективностью традиционных методов РВР и на скважине необходимо постоянное проведение ремонтных работ. Добыча урана на скважине в затрудненных условиях обусловлена сильной колmataцией и низкой эффективностью традиционных методов РВР, и составляла в среднем 0,2 т/месяц. Скважина по долгу простаивала в результате частых остановок и ожидания РВР или подачи ВР в скважину для повышения дебита скважины. После проведения ОПИ содержание урана стабилизировалось в диапазоне 60 мг/л, а дебит скважины повысился до 4,5 и постепенно повышается до 4,7 м³/ч. МРЦ (наблюдение) более 20 дней а *K* эксплуатации – 0,7. После проведения ОПИ добыча урана достигла прежние значения и составила 0,2 т/мес, без проведения РВР. На рисунке 34 показан построенный график основных геотехнологических параметров скважины 92-4-4 вскрывающая Маастрихтский рудный горизонт. В таблице 21 приведены результаты сравнительного анализа параметров коэффициента эксплуатации и период бесперебойной работы скважины.

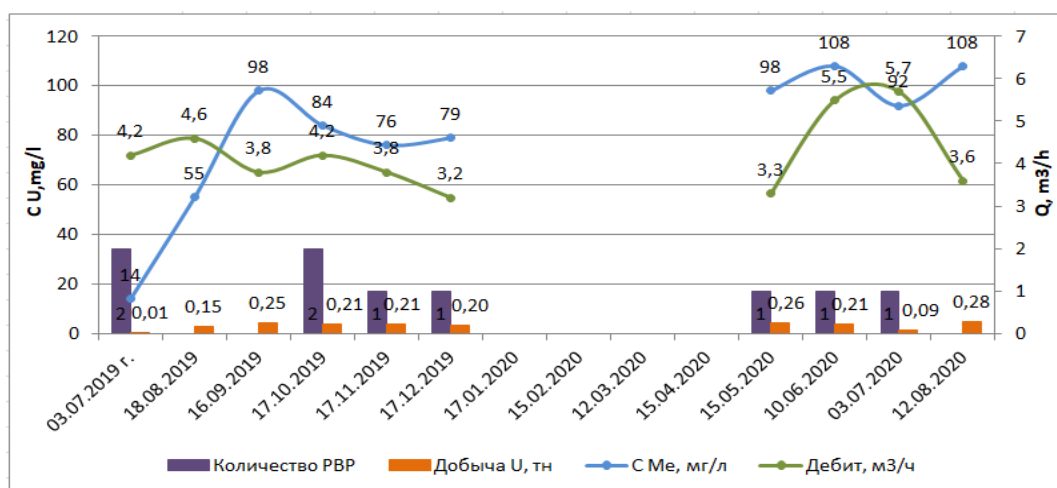


Рисунок 34 – Мониторинг геотехнологических параметров до и после проведения ОПИ скважины 92-4-4

Таблица 21 – Данные МРЦ и *K* эксплуатации до и после ОПИ скважины 92-4-4

Значения	До ОПИ	После ОПИ
<i>K</i> эксплуатации	0,5	0,5
МРЦ	7	7

Результаты опробования ПР на скважине 92-4-4 показывают что содержание урана в ПР колебалось в диапазоне 98-79 мг/л при постепенном снижении дебита скважины с 4,6 до 3,2 м³/ч за последние 6 месяцев работы скважины. Значения МРЦ скважины до проведения ОПИ составляли 7 дней, *K* эксплуатации – 0,5. Скважина по долгу простаивала из-за низкой эффективности традиционных методов РВР и постоянно требовала проведение ремонтных работ. После проведения ОПИ содержание урана в ПР

стабилизировалось на уровне 92 – 108 мг/л, а дебит скважины в начале повысился до 5,5 но потом снизился до уровня 3,6 м³/ч. МРЦ не увеличился и *K* эксплуатации не изменился. После проведения ОПИ добыча урана не превысила прежние значения и составила 210-280 кг/мес, с проведением РВР. На рисунке 35 показан построенный график основных геотехнологических параметров скважины 90-3-2р вскрывающая Маастрихтский рудный горизонт. В таблице 22 приведены результаты сравнительного анализа параметров коэффициента эксплуатации и период бесперебойной работы скважины.

Таблица 22 – Данные МРЦ и *K* эксплуатации до и после ОПИ скважины 90-3-2р

Значения	До ОПИ	После ОПИ
<i>K</i> эксплуатации	0,67	0,90
МРЦ	20	57

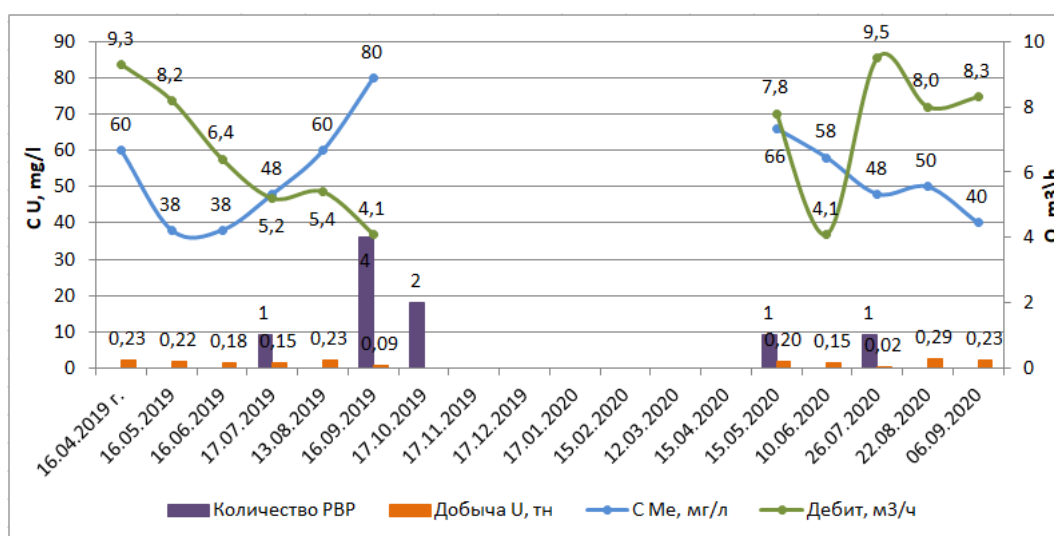


Рисунок 35 – Мониторинг геотехнологических параметров до и после проведения ОПИ скважины 90-3-2р

Результаты опробования ПР на скважине 90-3-2р показывают что содержание урана в ПР колебалось в диапазоне 60-80 мг/л при постепенном снижении дебита скважины с 9,3 до 1,0 м³/ч с момента запуска скважины в добычу в апреле 2017 г. Значения МРЦ скважины до проведения ОПИ составляли 20 дней, *K* эксплуатации – 0,67. Скважина по долгу простаивала из-за частых остановок скважины на ожидание проведение РВР или на подачу ВР в скважину с целью повышения дебита скважины, обусловленная низкой эффективности традиционных методов РВР. После проведения ОПИ содержание урана в ПР стабилизировалось на уровне 66 и постепенно снижалось до 40 мг/л, а дебит скважины в начале повысился до 7,8 но потом снизился до уровня 4,1 м³/ч. МРЦ повысился до 57 а *K* эксплуатации увеличился до 0,90. После проведения ОПИ добыча урана превысила прежние значения и составила 200-290 кг/мес, с проведением РВР.

3.6 Сравнительный анализ эффективности применение химических реагентов с традиционными методами РВР при интенсификации скважинной добычи урана

Ремонтно-восстановительные работы в скважинах выполняются с целью восстановить проектную производительность откачных и приемистость закачных скважин снизившаяся в результате осадкообразований в фильтре и прифильтровой зоны пласта до критически минимального уровня [61,62]. Основное влияние на снижение производительности и приемистости скважин оказывает набухание глинистых минералов и перекрытию порового пространства [63]. Повышение рН в продуктивном горизонте влечет выпадение в осадок алюмосиликатов, сульфатов кальция и магния и железистых осадков с образованием геохимического барьера [64,65]. Образованный геохимический барьер создает непроницаемые зоны в которые не проникает выщелачивающий раствор в результате чего извлечение замедляется. При сильном проявлении механической и химической коагуляции, параметры работы скважины снижаются при понижении эффективности традиционных методов РВР. Комплекс химических реагентов синергетического действия включает реагенты позволяющие диспергировать набухшие глинистые минералы и разрушать геохимический барьер. Уменьшение набухания глин и растворение осадков позволяет в значительной мере увеличить проницаемость продуктивного горизонта что обеспечивает достаточную интенсивность выщелачивания урана в продуктивном горизонте с повышенной карбонатностью и глинистостью [66].

Применение комплекса химических реагентов на скважинах с низкими значениями дебита, МРЦ а также с низким коэффициентом эксплуатации скважины, на участках с малой эффективностью традиционных методов РВР, позволяет восстановить проектные параметры дебита скважин по ПР, повысить эффективность традиционных методов РВР и увеличить добычу урана. Повышение дебита скважины по ПР основано на эффективности комплекса химических реагентов удалять продукты механической и химической коагуляции и предотвращать осадкообразование на длительный период времени. Сравнительные параметры МРЦ по видам РВР до и после проведения ОПИ приведены в таблице 23.

Данные сравнительных параметров работы скважин основаны на результатах мониторинга геотехнологических параметров скважин до и после проведения ОПИ и подсчета МРЦ скважин. Как можно увидеть из данной таблицы выбранные для проведения ОПИ скважины 1 – 7 отличались низкими дебитами и МРЦ, в результате чего K эксплуатации не достигали проектного показателя 0,8. Низкие дебиты скважин и МРЦ данных скважин обусловлены недостаточной эффективностью традиционных методов РВР, в результате чего добыча на данных скважинах была затруднена. После проведения ОПИ дебит скважин достиг проектных значений с повышением K эксплуатации, повысился МРЦ скважин и содержание урана в ПР. Добыча урана повысилась и стабилизировалась без дополнительного проведение РВР. Понижение

содержание урана в ПР на скважине 92-4-1 с первоначальных 304 до 210 связано с тем что до проведение ОПИ скважина работала не стабильно с низким дебитом в среднем 2,0 м³/ч при МРЦ – 12 суток и *K* эксплуатации 0,66, что означает, что скважина частенько простаивала в ожидании РВР, в результате возможно произошло накопление растворенного урана в ПР.

Таблица 23 – Сравнительные параметры МРЦ по видам РВР до и после проведения экспериментальных работ

№ п/п	№ скважины	Ме до ОПИ, мг/л	Ме после ОПИ, мг/л	Дебит до ОПИ, м ³ /час	Дебит после ОПИ, м ³ /час	МРЦ XR VS, суток	МРЦ х/о, суток	МРЦ х/о + БФА, суток	МРЦ комплекс, суток	<i>K</i> эксплуатации до ОПИ	<i>K</i> эксплуатации после ОПИ
1	90-6-3	126	193	3,0	7.2	17	28	39	110	0,76	1.1
2	92-4-4	79	98	2,0	5.5	7	7	13	7	0,50	0.50
3	90-3-2р	54	66	2,0	7.8	20	26	-	57	0,67	0.90
4	60-4-3	228	263	4,3	8.3	22	-	22	120	0,71	1.36
5	92-4-1	304	210	2,0	7.0	12	22	7	115	0,66	1.06
6	5-1-4-8	56	60	2,9	4.5	5	4	13	45	0,40	0.70

После ОПИ содержание урана в ПР стабилизировались на уровне 210 мг/л, а дебит составил стабильные 7,0 м³/ч, при бесперебойной работы скважины, МРЦ – 115 суток, а *K* эксплуатации повысился с 0,66 до 1,06. Добыча урана на данной скважине стабилизировалась и достигла прежних параметров без дополнительного проведения РВР.

По результатам сравнительных параметров работ скважин до и после проведения ОПИ можно заключить о высокой эффективности работы комплекса химических реагентов синергетического действия на эксплуатационных скважинах на блоках с низкими параметрами дебита, МРЦ и *K* эксплуатации, и незначительной эффективности воздействия химических реагентов на блоках с достаточной проницаемостью и низкой кольматацией скважин. Происходит интенсификация скважинной добычи урана, повышается извлечение урана, дебит скважин увеличивается и снижается потребность скважин в проведении РВР.

4 ИЗУЧЕНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ХИМИЧЕСКИХ РЕАГЕНТОВ ПРИ ПОДГОТОВКЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО БЛОКА К ДОБЫЧЕ

4.1 Опыт подготовки продуктивного при интенсификации скважинной добычи урана на месторождении Семизбай с применением химических реагентов

На основе изучения природы химических осадкообразований и анализа основных породообразующих минералов продуктивного горизонта был подобран комплекс химических реагентов многофункционального назначения интенсифицирующий процессы протекающие при скважинной добычи урана в сложных горно-геологических условиях [67]. Эффективность комплекса химических реагентов определяется его составом и подбирается в зависимости от геологических особенностей продуктивного горизонта и количественно-качественных характеристик образовавшихся осадков. Химические реагенты, включенные в комплекс обладают растворяющей способностью основных карбонатных и побочных осадкообразований, способствуют активной разглинизацией и создание дополнительных линий тока в поровом пространстве пласта, а также обладают высокой окисляющей способностью Fe^{2+} до Fe^{3+} при высоких значения рН, для предотвращения повторного осадкообразования. Интенсификация скважинной добычи урана с применением комплекса химических реагентов позволит повысить скорость отработки технологических блоков и снизить себестоимость конечной продукции.

Изучение эффективности химических реагентов производились, при проведении экспериментальных работ, на ячейках на этапе активного выщелачивания на руднике «Семизбай». Экспериментальные работы на руднике «Семизбай» проводились на геотехнологических ячейках скважинах с низким содержанием урана в ПР и недостаточной производительностью скважин по ПР. Опыт включал расчет эффективных параметров растекания растворов и подачу химических реагентов в продуктивный горизонт, через устье технологических скважин с одновременным нагнетанием ВР в них, до достижения расчетного радиуса растекания растворов от фильтра откачной скважины. Далее на откачной скважине производили компрессорную прокачку и запускали в работу, а нагнетательные скважины оставались в работе под давлением ВР. Расход химических реагентов рассчитывался в зависимости от глинистости продуктивного горизонта и составлял в пределах 01-02 кг/т обрабатываемой ГРМ. Эффективность воздействия того или иного химического реагента на интенсификацию скважинной добычи урана определялась по результатам мониторинга и анализа геотехнологических параметров до и после проведения экспериментальных работ. Мониторинг геотехнологических параметров скважин предусматривают ежедневное опробование ПР и определение содержание урана, рН, в ПР, замера дебита скважины и расчет коэффициента извлечения, после данные усреднялись до среднемесячных, на основании которых строились графики с основными параметрами. На рисунках

36 показаны графики геотехнологических параметров скважин до и после экспериментальных работ на геотехнологической скважине 83-4-8 месторождении «Семизбай».

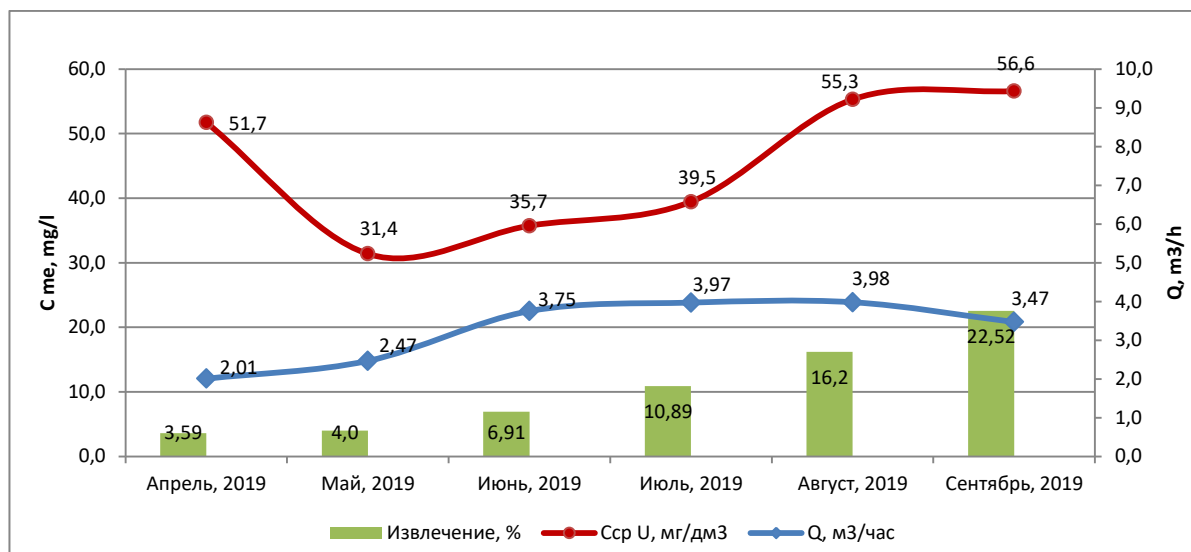


Рисунок 36 – Геотехнологические параметры скважины 83-4-8 до и после проведение экспериментальных работ

Экспериментальные работы на скважине 83-4-8 проводились в мае месяце, после чего скважина была запущена в работу в первых числах июня. Из рисунка 36 можно увидеть, что до проведения экспериментов, изначально содержание урана в ПР резко снижалось с 51,7 до 31,4 мг/л, при низких значениях производительности в 2,01 – 2,47 м³/ч, в связи с образованием геохимического барьера и образованием непроницаемых для выщелачивающего раствора зон в продуктивном горизонте. После проведения экспериментальных работ, и запуска скважину в работу, можно заметить, незначительное увеличение содержания урана в ПР в июне – июле месяцах, с 31,4 до 39,5 мг/л, однако в этом промежутке времени дебит скважины значительно увеличился с средних 2,47 до 3,97 м³/ч. это вызвано повышением проницаемости продуктивного горизонта пласта и разрушением геохимического барьера. Последующее увеличение содержания урана с 39,5 до 56,6 мг/л связано с поступлением фронта растворов с повышенным содержанием урана движущегося от нагнетательных скважин технологической ячейки. Повышенное содержание урана повысило коэффициент извлечения урана из недр с июня месяца (после эксперимента) и составил 6,91, июле 10,89, август 16,20, 22,52 в сентябре. На рисунках 37 показаны графики геотехнологических параметров скважин до и после экспериментальных работ на геотехнологической скважине 73-6-6 месторождении «Семизбай».

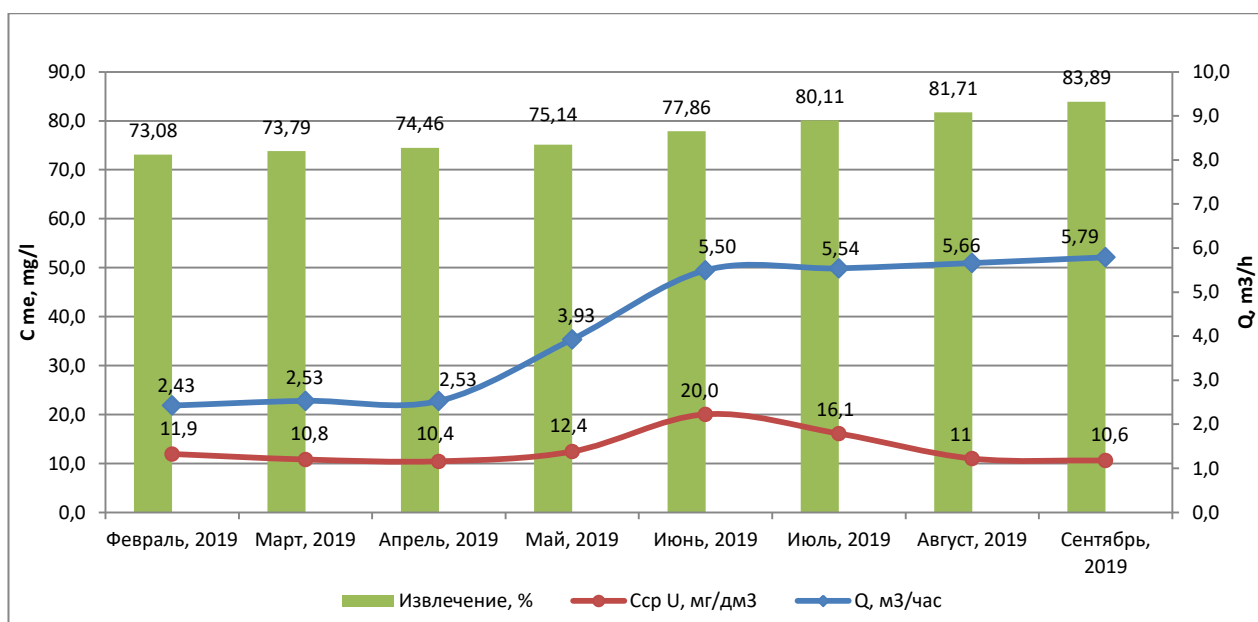


Рисунок 37 – Геотехнологические параметры скважины 73а-б-б до и после проведение экспериментальных работ

Экспериментальные работы на скважине 73а-б-б также проводились в мае месяце, после чего скважина была запущена в работу первых числах июня месяца. Из рисунка 37 можно увидеть, что до проведения экспериментов, изначально содержание урана в ПР было стабильно низким в диапазоне 10-11 мг/л, при низких значениях производительности в 2,5 м³/ч, в связи с образованием геохимического барьера и образованием непроницаемых для выщелачивающего раствора зон. После проведения экспериментальных работ, и запуска скважину в работу, можно заметить, значительное увеличение содержание урана в ПР в июне – июле месяцах, с 12,4 до 20,0 мг/л, и одновременным восстановлением дебита скважины с 2,5 до 5,5 м³/ч. это вызвано повышением проницаемости продуктивного горизонта скважины и разрушением геохимического барьера в пласте. Последующее понижение содержание урана до исходных значений 11 мг/л связано с отработкой запасов и вымыванием урановой минерализацией потоками ВР. Прирост извлечение урана из недр в период февраль – май месяцы составлял 0,68%, а в периоде июнь – сентябрь после эксперимента составил 2,72%.

По результатам анализа экспериментальных работ на скважинах рудника Семизбай мы наблюдаем значительное увеличение содержания урана в ПР и повышение дебита эксплуатационных скважин, что увеличивает коэффициент извлечение урана из недр. Применение выбранных химических реагентов в целях интенсификации скважинной добычи урана положительно отразились на динамике добычи урана в следствии восстановления фильтрационных характеристик и эффективному разрушению геохимического барьера и предотвращения осадкообразования в пористой среде.

4.2 Опыт подготовки технологического блока на месторождении Северный Харасан с применением химических реагентов

Процесс подготовки геотехнологического блока включает этапы сооружения и обвязка сетей технологических скважин, прокладка трубопроводов, дорог и установка оборудования, обвязка скважин поверхностными коммуникациями для безопасной эксплуатации блока [68]. Закисление блока – это процесс, необходимый для создания в рудовмещающем горизонте геохимической и гидродинамической обстановки, обеспечивающий процесс перевода урана в раствор [69,70]. Поскольку вытеснение пластовых вод в эксплуатационном блоке носит не поршневой а рассредоточенный характер, закисление происходит не равномерно. При этом наиболее быстро закисляются пласты рудовмещающего горизонта с большим коэффициентом фильтрации и меньшей карбонатностью [71,72]. При проведении ОПИ на вновь сооруженных технологических скважинах на этапе закисления ГРМ включают:

Этап 1. Подачу в откачные скважины технологического блока выщелачивающего раствора (H_2SO_4 концентрация-15 г/л), при достижении ВР радиуса растекания от скважины в 20-25 м подача химических реагентов через откачные скважины - лигносульфоната аммония (ЛСТ) 100-200 кг/скв с последующей подачей сульфаминовой кислоты (САК) 400-500 кг/скв, методом сухой засыпки. Последующая подача ВР в откачные скважины;

Этап 2 включает повторную обработку откачных скважин технологического блока при достижении выщелачивающего раствора (H_2SO_4 концентрация-15 г/л) радиуса растекания от скважины в 35-40 м подача бифторида аммония 100-150 кг/скв, ЛСТ – 75-150 кг/скв, САК – 200-300 кг/скв методом сухой засыпки и продавливание химических реагентов ВР (H_2SO_4 концентрация-15 г/л) до полного завершения закисления блока. Исследования эффективности химических реагентов производились, при проведении экспериментальных работ, на этапе подготовки технологического блока к добыче на руднике «Харасан-2».

Экспериментальные работы на этапе закисления на блоках с высоким содержанием карбонатов и глинистых отложений предусматривали разработку мягкого регламента опережающего закисления с постепенным наращиванием кислотности в растворе. Подача растворов на первом этапе предусматривала в откачные скважины с нарастающей кислотностью с 5 до 25 г/л. Подачу растворов с стабильной кислотностью 25 г/л в торцевые нагнетательные скважины второй этап, и в остальные предусматривал третий этап. Подачу химических реагентов в откачные и нагнетательные скважины при закислении блока предусматривалась на всех этапах. Для эксперимента по применению химических реагентов интенсификатора выщелачивания урана был выбран отдаленный технологический блок 9-7-6 с высоким содержанием карбонатов >2% в продуктивном горизонте находящийся на этапе сооружения. Эксплуатационный блок 9-7-6 состоит из шести откачных и семнадцати нагнетательных скважин, вскрывающие 158,2 тыс. тонн ГРМ, вмещающие 73,1

тонн урана, с средней продуктивностью 5,7 кг/м². Продолжительность и количество поданных химических реагентов зависит от необходимого и эффективного радиуса растекания химических реагентов от фильтра скважин. Подсчет запасов по блоку 9-7-6 приведен в таблице 24. Из таблицы 24 видно что, средняя рудная мощность составляет 2,58 м, при средней эффективной мощности 6,2 м и среднем содержании урана в руде 0,130 %.

Таблица 24 – Расчетные данные по блоку 9-7-6

Коэффициент рудоносности	Рудная площадь (тыс. м ²)	Средняя мощность (м)	Объём руды (тыс м ³)	Рудная масса (тыс. т)	Среднее содержание (%)	Продуктивность (кг/м ²)	Запасы урана (т)	Средняя мощность эффективная (м)	ГРМ (тыс.т)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.96	12.827	2.58	33.1	56.3	0.130	5.7	73.1	6.2	135,2

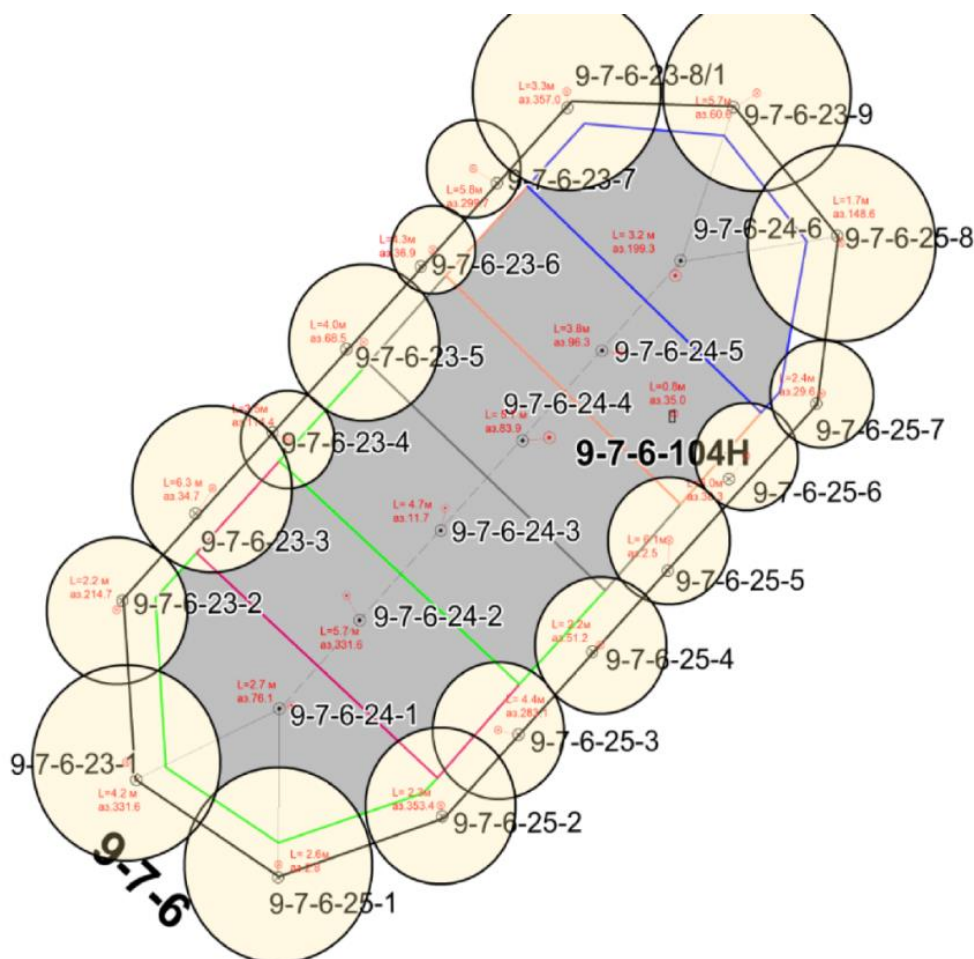


Рисунок 38 – Схема закисления блока 9-7-6 и расчетные площади и радиусы растекания растворов

Подача закисляющих растворов в недра осуществлялась согласно разработанного регламента и расчета площади закисления блока. На рисунке 38 приведена схема скважин блока с расчетными радиусами растекания закисляющих растворов в продуктивном горизонте. При постепенном

повышении кислотности раствора и переходе с 5 до 15 г/л на первом этапе, приемистость откачных скважин резко упала с 1,2-1,6 м³/ч до 0,6-0,8 м³/ч, что подтверждает данные о повышенной карбонатности блока. На традиционных блоках снижение приемистости скважин приводит к прерыванию закисления на проведение ремонтно-восстановительных работ на скважинах и вызывает кольматационный эффект по причине прерывания поступления растворов с серной кислотой и увеличению эксплуатационных расходов. Однако, добавление химических реагентов повышающие фильтрационные характеристики руд повышают приемистость скважин при увеличении кислотности и сокращают время закисления блоков. Повышение проницаемости продуктивного горизонта повысит приемистость закачных и дебит откачных скважин на этапе активного выщелачивания, снизит и предотвратит эффект кольматации порового пространства, тем самым увеличит эффективность выщелачивания урана в недрах.

После закисления технологического блока и подачи химических реагентов в недра, откачные скважины прокачивались и запускались в добычу. Для установления эффективности повышения проницаемости продуктивного горизонта данные дебитов, периоды бесперебойной работы технологических скважин записывались для анализа и сравнения с другими аналогичными блоками со схожими параметрами.

4.3 Мониторинг геотехнологических параметров скважинной добычи урана после проведения экспериментальных работ

Эффективность воздействия комплекса химических реагентов на интенсификацию скважинной добычи урана определялась по результатам мониторинга и анализа геотехнологических параметров экспериментального блока и сравнением с контрольным блоком. Выбор контрольного блока производился по схожему строению геологических характеристик и составу вмещающих пород, на котором производились РВР традиционными методами. На рисунке 39 показан график мониторинга дебита скважин и периоды бесперебойной работы на экспериментальном и контрольном блоках.

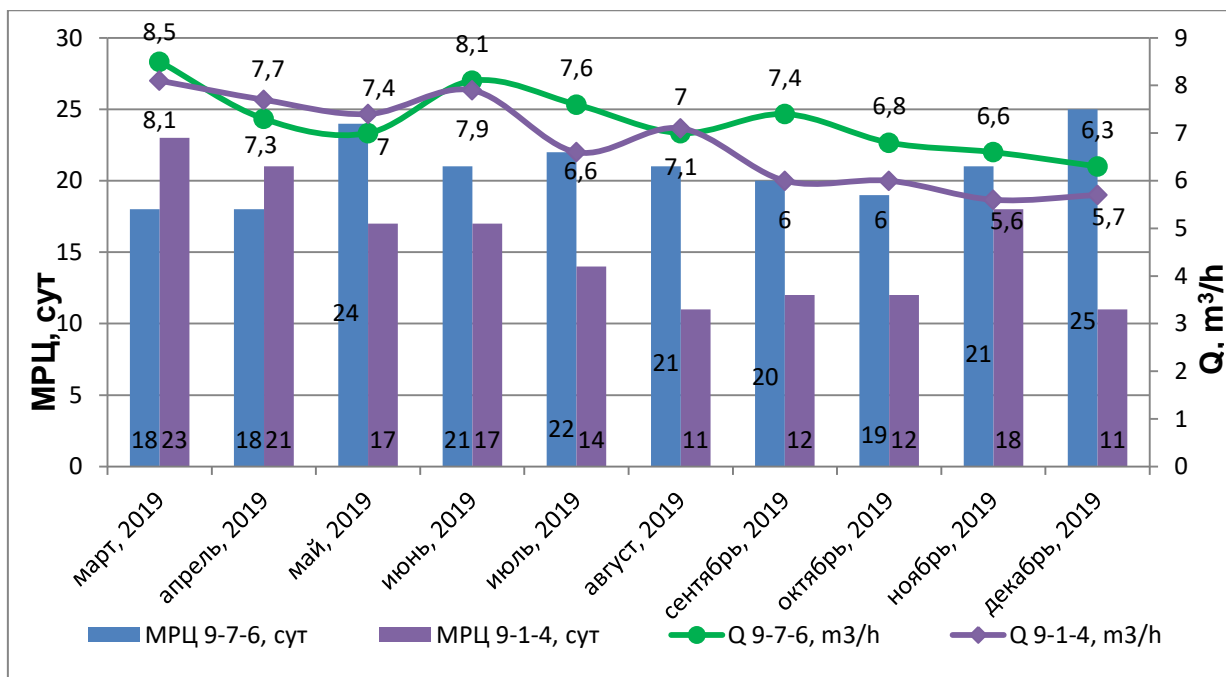


Рисунок 39 – Результаты мониторинга дебита и МРЦ скважин экспериментального и контрольного блока

Сравнительный анализ мониторинга производительности и периода бесперебойной работы скважин (рисунок 7) показывает, что при запуске скважин в добычу в марте месяце дебит добычных скважин был приблизительно одинаковый, на экспериментальном 8,5 и на контрольном 8,1 м³/ч. Среднее МРЦ на скважинах экспериментального блока составляло 18 суток, а на контрольном блоке 23 суток. Однако в последующем средний дебит скважин на экспериментальном блоке постепенно снижался с 8,5 до 6,3 м³/ч при увеличении МРЦ с 18 до 25 суток. На контрольном блоке средний дебит скважин снижался с 8,1 до 5,7 м³/ч, при снижении МРЦ с 23 до 11 суток. Данные свидетельствуют, что применение нового метода интенсификации скважинной добычи на экспериментальном блоке повысили производительность скважин и увеличили средний период бесперебойной работы скважин. На рисунке 40 приведены результаты сравнительного анализа извлечения и затрат на РВР экспериментального и контрольного блоков.

Сравнительный анализ извлечения урана и затрат на РВР показывает, что извлечение на экспериментальном блоке стабильно при незначительных затратах на проведение РВР на скважинах. Это связано с применением нового метода интенсификации скважинной добычи урана на экспериментальном блоке. Извлечение урана на контрольном блоке нестабильно и требует постоянного проведения РВР на скважинах, с этим связаны затраты на проведение РВР на скважинах для поддержки технологических скважин в рабочем состоянии. Это связано со сложными горно-геологическими условиями вскрытых руд и вмещающих пород экспериментального и контрольного блоков и низкой эффективности традиционных методов проведения РВР на скважинах.

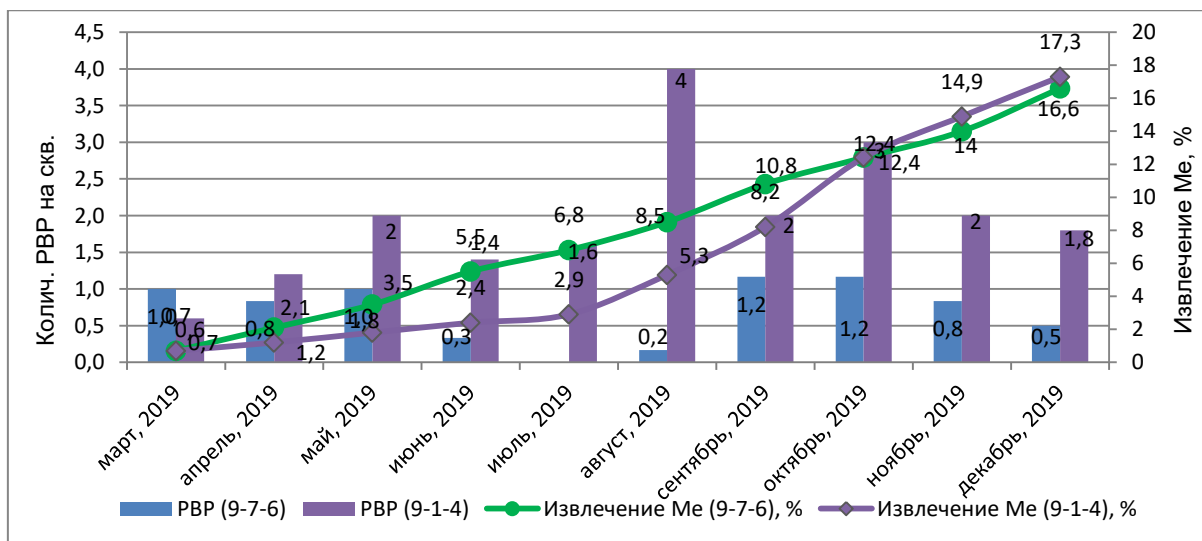


Рисунок 40 – Результаты мониторинга извлечения и расходов на РВР экспериментального и контрольного блока

Как можно увидеть, из графика после запуска откачных скважин в добычу средние значения производительности скважин на двух блоках приблизительно одинаковы в диапазоне 8 – 8,5 м³/ч, а значения МРЦ составляют 20 – 23 суток. На второй месяц работы средние дебиты скважин значительно снижаются до 7,3 – 7,6 м³/ч при МРЦ в 21 суток, в связи с активной кольматацией порового пространства и образованием геохимического барьера в продуктивного горизонта. Однако в мае и последующих месяцах средний дебит откачных скважин блока 9-7-6 восстанавливается и повышается с 7,0 до 8,1 м³/ч, а МРЦ составляет 24 - 25 суток, когда значения скважин блока 9-1-4, постепенно снижаются с 6,5 до 5,5 м³/ч, а МРЦ – с 17 до 11 суток. Повышенные значения производительности блока 9-7-6 вызваны повышением фильтрационных характеристик прискважинной зоны пласта и меньшим эффектом кольматации порового пространства. Добавленные химические реагенты во время закисления блока положительно отразились на этапе активного выщелачивания, повышая проницаемость и предотвращая осадкообразования в пористой среде.

Для повышения эффективности скважинной добычи урана за счет интенсификации геотехнологических процессов и восстановления проницаемости прифильтровой зоны пласта авторами была разработана и опробована методика химической обработки скважин специальным раствором. Данная методика воздействия на пласт предусматривает - подачу растворов комплекса химических реагентов в фильтровую зону, в продуктивный горизонт для ее реагирования с осадкообразованиями, растворение и удаление продуктов реакции за пределы скважины путем эрлифтной откачки. На рисунке 41 приведена разработанная схема составляющих работ по интенсификации скважинной добычи урана.

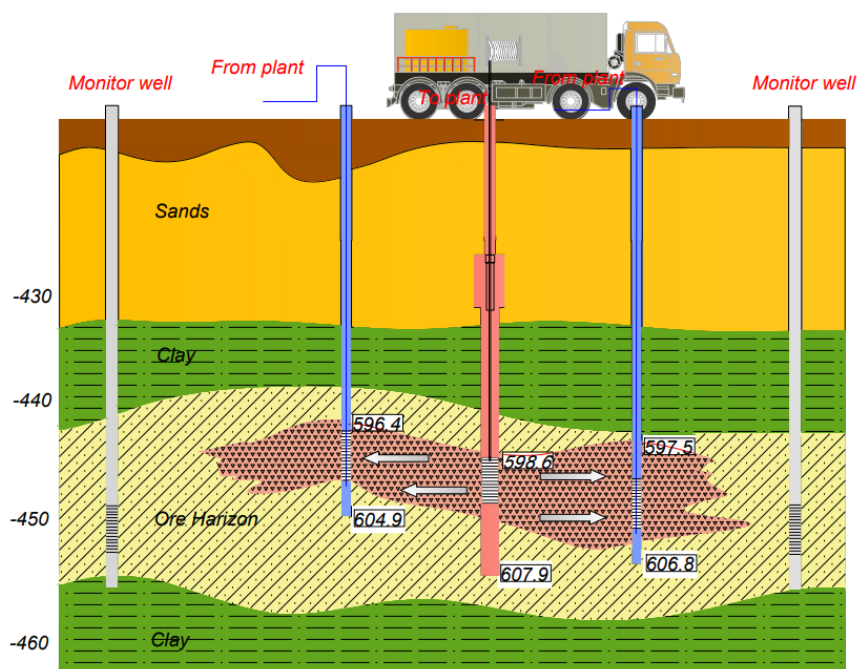


Рисунок 41 – Схема интенсификации скважинной добычи урана
 1 – продуктивный горизонт; 2 – непроницаемые породы; 3 – осадкообразования в ПЗП; 4 – откачной скважины; 5 – нагнетательная скважина; 6 – оборудование для проведение химических обработок; 7 – напорный рукав; 8 – емкость – цистерна; 9 – перекачивающий насос.

Как видно из рисунка 41, основная масса осадкообразований 3, происходит в продуктивном горизонте 1, непосредственно в зоне разгрузки растворов и повышения скорости движения растворов от нагнетательных скважин 5, к откачным скважинам 4. Проведение химической обработки с применением комплекса химических реагентов предусматривает приготовление растворов на специальном оборудовании 6, и подачу по напорному рукаву 7 до фильтровой части скважин 4. При этом приготовленный специальный раствор подается из емкости цистерны 8, перекачивающим насосом 9. Подача декольматирующих растворов на основе бифторида аммония (10 %), серной кислоты (10 %), непосредственно в фильтровую часть технологических скважин позволяет снизить расход химических реагентов и повысить проникающую способность для большего разрушения и диспергирования осадков.

Для организации экспериментальных работ при скважинной добыче урана, соблюдении технологического режима выщелачивания, расчета требуемого объема декольматирующих растворов и химических реагентов необходимо было рассчитать нижеследующие геотехнологические параметры: отношение жидкости к твердому (Ж:Т), расчетный радиус растекания.

Отношение Ж:Т рассчитывалось по формуле [73]:

$$\text{Ж:Т} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{\text{BP}}}{S h_3 \delta}, \quad (17)$$

где: $Q_{ВР}$ – количество поданного в недра ВР за время t , $м^3$; S – выщелачиваемая площадь, $м^2$; $h_э$ – эффективная мощность продуктивного горизонта, $м$; δ – объемная масса рудовмещающих пород и руд, $т/м^3$.

Расчетная площадь растекания растворов от фильтра по продуктивному горизонту определялась по формуле [73]:

$$S = \frac{Q_D}{0,22h_э} \quad (18)$$

где Q_D – объем деколматырующего растворов поданный в скважину, $м^3$; 0,22 – усредненный коэффициент пористости вмещающих пород продуктивного горизонта. Радиус растекания деколматырующих растворов определялся по формуле [73]:

$$R = \left(\frac{S}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (19)$$

Оборудование для приготовления и подачи растворов химических реагентов состоит из емкости и насоса, которые изготовлены из коррозионностойкого материала. В связи с тем, что они контактирует с серной и плавиковой кислотами.

Опытно-промышленные испытания по изучению эффективности химических обработок непосредственно фильтровой части технологических скважин проводились на месторождении Сырдарьинской депрессии. Фотоснимок изготовленного и внедренного оборудования для повышения фильтрационных характеристик руд по разработанной методике на месторождениях Сырдарьинской и Чу-Сарысуйской депрессиях представлен на рисунке 42.



Рисунок 42 – Разработанное технологическое оборудование для повышения фильтрационных характеристик руд с применением разработанных составов

При разработке, изготовлении и адаптации установок, производилась учитывались реальные геотехнологические условия месторождений Сырдарьинской и Чу-Сарысуйской депрессии. При проведении производственных экспериментов строго согласовывались разработанные и утвержденные технологические регламенты.

Ниже приведены данные по 20 эксплуатационным скважинам с применением различных рецептов декольматирующего раствора. Разработанный декольматирующий раствор включает: техническую воду, бифторид аммония, серную кислоту в различных пропорциях. В таблице 25 приведены параметры рецептов декольматирующего раствора и обработанные результаты экспериментальных работ.

Таблица 25 – Параметры декольматирующих растворов и результаты опытных работ

Состав	Объём ВР, м ³	H ₂ SO ₄ , кг	NH ₄ F*HF, кг	Количество обработанных скважин	МРЦ до, суток	МРЦ после, суток
H ₂ SO ₄ + NH ₄ F*HF	3	150	19	5	16	127
H ₂ SO ₄ + NH ₄ F*HF	2	100	12	5	22	118
H ₂ SO ₄ + NH ₄ F*HF	1	50	6	5	21	95
H ₂ SO ₄	3	300		5	11	36

Как видно из таблицы 25, были приготовлены декольматирующие растворы объемом 3 м³, 2 м³, и 1 м³ на основе бифторида аммония, с концентрацией HF – 1,2 %, и H₂SO₄ – 5 %. Для сравнительного анализа был приготовлен декольматирующий раствор на основе 10 % серной кислоты объемом 3 м³. Анализ производительности эксплуатационных скважин до и после экспериментальных работ позволил определить эффективность химической обработки скважин инновационным методом. На рисунке 43 приведена диаграмма периодов бесперебойной работы скважин до и после проведения экспериментальных работ. Синим цветом показаны, средние значения периода бесперебойной работы выбранных скважин после восстановления фильтрационных характеристик пластов традиционными методами. Красным цветом показаны периоды бесперебойной работы скважин после проведения химической обработки инновационным методом с применением разработанных рецептов.

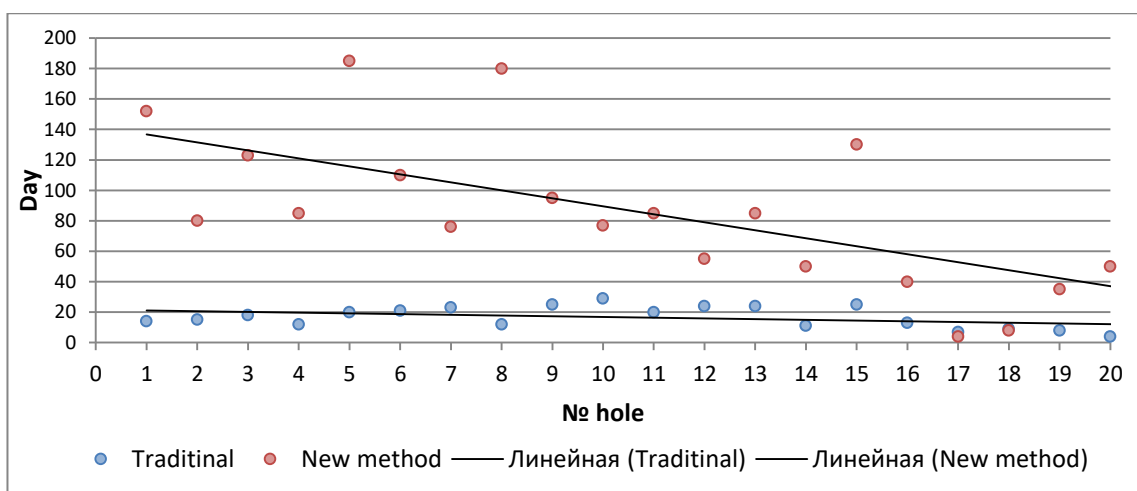


Рисунок 43 – Результаты сравнительного анализа периода бесперебойной работы геотехнологических параметров скважин

Сравнительный анализ приведенных данных показывает, что на выбранных геотехнологических скважинах до проведения экспериментов средний период бесперебойной работы составлял 16 суток. После применения инновационного метода восстановления фильтрационных характеристик среднее значение периода бесперебойной работы скважин составил 84 суток. На скважинах, обработанных декольматирующим раствором объемом 3, 2 и 1 м³ на основе H₂SO₄ + NH₄F*HF период бесперебойной работы превысил в среднем 127, 118, 95 суток соответственно. При этом период бесперебойной работы скважин, обработанных составом H₂SO₄ 3 м³ составил 36 суток, что превышает традиционный показатель более чем в два раза.

Эти результаты высоки и подтверждают неоспоримую эффективность инновационного комплексного метода интенсификации скважинной добычи урана на месторождениях с низкими фильтрационными характеристиками руд.

4.4 Оценка экономической эффективности интенсификации добычи урана с применением комплекса химических реагентов синергетического действия

Комплекс химических реагентов представляет собой систему химических реагентов синергетического действия для интенсификации скважинной добычи урана. Особенность данного комплекса – это повышение проницаемости рудовмещающих пород, эффективное разрушение геохимического барьера и препятствие осадкообразованию в продуктивном горизонте. Опытно-промышленные испытания по применению комплекса химических реагентов включают последовательную подачу комплекса химических реагентов в продуктивный горизонт через устье откачной скважины и одновременную подачу ВР. Обработка скважины производится при обеспечении соответствующей пропускной способности (приёмистости) скважины для достижения эффективного радиуса растекания химических реагентов в продуктивном горизонте.

Эффективность применения комплекса химических реагентов синергетического действия при интенсификации скважиной добычи урана определяется из расчета суммарного прироста дополнительно добытого урана из недр за вычетом затрат на приобретение использованных химических реагентов. Прирост дополнительно добытого урана определяется по каждой скважине индивидуально в зависимости от параметров и превышения исходных значений концентрации урана в ПР и производительности откачной скважины по ПР.

Затраты на применение комплекса химических реагентов синергетического действия складываются из расходов на приобретение каждого химического реагента входящего в комплекс. Количество и состав применяемых химических реагентов на скважине изменяется в зависимости от сложности горно-геологических условий, геохимического барьера и геотехнологических параметров обрабатываемой скважины.

Рыночная стоимость химических реагентов на день закупа:

- сульфаминовая кислота 1 кг – 448 тг;
- лигносульфонат аммония 1 кг – 332 тг;
- хлорид железа 1 кг – 286 тг;
- бифторид аммония 1 кг – 940 тг.

Расчет прироста добычи урана производился по результатам опробования ПР скважин на содержание урана до и после проведения ОПИ и ежедневного замера дебита скважины по ПР. Для чистоты эксперимента опробование ПР скважин осуществлялось один раз в пять дней. В таблице 26 приведены расчетные значения добычи урана до и после проведения ОПИ.

На скважине 60-4-3 добыча урана до проведения экспериментальных работ составляла 523 – 654 кг в месяц (в среднем 604 кг урана). Средние значения МРЦ составляли 14 суток, для поддержания текущего уровня добычи на скважине 1-2 раза в месяц производились ремонтные работы, компрессорная прокачка, химическая обработка, подача ВР в скважину. После ОПИ значения добычи удвоились и составили 998 – 1560 кг урана в месяц (в среднем 1395 кг уран). Произошло повышение добычи урана с 604 до 1395 кг в месяц при увеличении периода бесперебойной работы скважины с 14 до 120 суток.

Таблица 26 – Расчетные данные добычи урана со скважин по месяцам

№ скважины	Добыча U в месяц, кг									
	До ОПИ					После ОПИ				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
60-4-3	474	385	411	397	152	1 390	1 298	1 727	1 503	1 070
92-4-1	593	837	846	260	70	808	939	810	976	917
92-4-4	153	251	205	208	200	256	207	85	281	45
90-3-2р	145	234	92	40	60	204	149	21	289	210
90-6-3	244	458	374	361	235	345	659	746	919	588
5-1-4-8	334	176	159	105	38	189	191	-	-	-

Сравнительный анализ снижения себестоимости при применении нового метода интенсификации подземного скважинного выщелачивания урановых руд на рисунке 44 приведен. Снижение себестоимости за счет сокращения затрат на РВР – 10 %, электроэнергии – 5 %, цеховых расходов на 4 % за счет сокращения отработки блоков в среднем с 62 до 56 месяцев и повышения эффективности РВР.

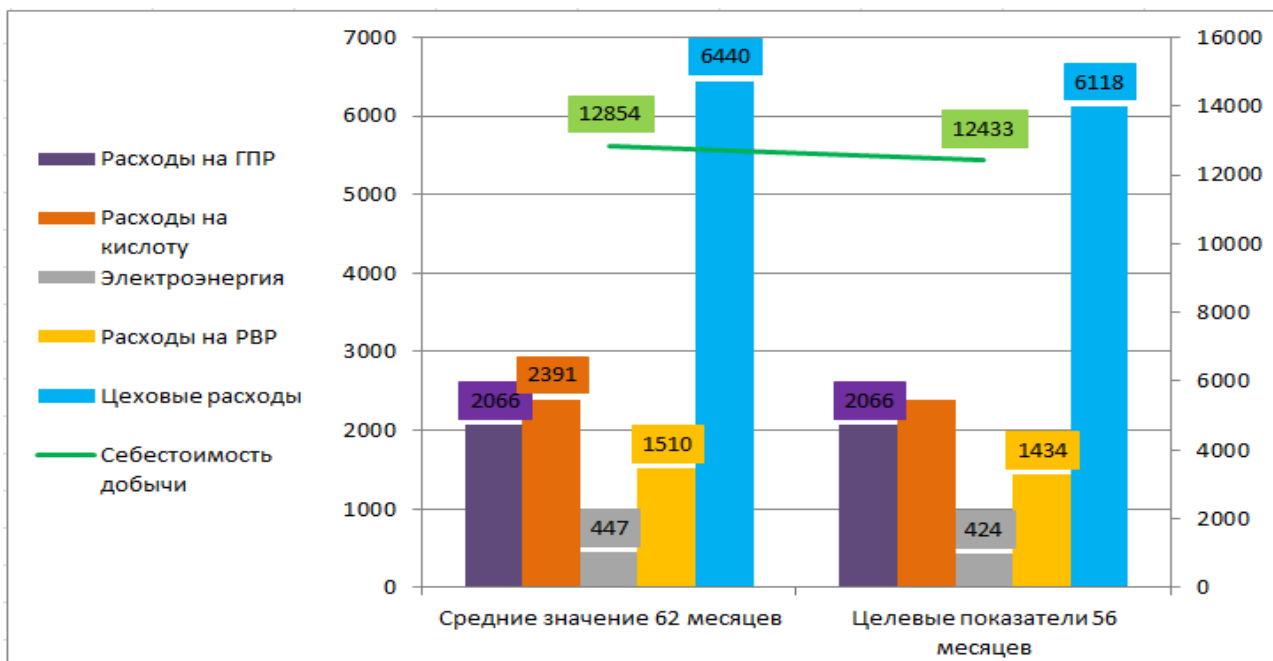


Рисунок 44 – Сравнительный анализ себестоимости добычи урана

Как видно из рисунка 44 расчетная себестоимость добычи урана при средней отработке блока в 62 скважины составляет 12 854 тенге. Расходы состоят из основных статей цеховые расходы – 6440 тенге, расходы на РВР – 1510 тенге, электроэнергия – 447 тенге, серная кислота – 2391 тенге, горно-подготовительные работы – 2066 тенге. Применение новой технологии интенсификации подземного скважинного выщелачивания урана позволяет сократить расходы на РВР на 10 % за счет увеличения дебита периода бесперебойной работы технологических скважин. Это приводит к уменьшению простоя скважины и увеличению коэффициента работы скважин и сокращению периода отработки блоков в среднем на 6 месяцев. При этом сокращаются цеховые расходы на 5 % и расходы на электроэнергию на 5 %.

Расход химических реагентов составил: сульфаминовая кислота - 400 кг, лигносульфонат аммония - 280 кг, бифторид аммония - 75 кг, железо хлорное - 480 кг. Затраты на химические реагенты составят:

$$(400 \cdot 448) + (280 \cdot 332) + (480 \cdot 286) + (75 \cdot 940) = 479\,940 \text{ тенге.}$$

На скважине 92-4-1 добыча урана до проведения экспериментальных работ составляла в среднем 460 кг урана в месяц. Средние значения МРЦ составляли 12 суток, для поддержания текущего уровня добычи на скважине 1-2 раза в месяц производились ремонтные работы, компрессорная прокачка, химическая обработка, подача ВР в скважину. После ОПИ значения добычи повысились и

составили в среднем 890 кг урана в месяц. Произошло повышение добычи урана с 250 до 897 кг в месяц при увеличении периода бесперебойной работы скважины с 12 до 115 суток. Расход химических реагентов составил: сульфаминовая кислота - 200 кг, лигносульфонат аммония - 440 кг, бифторид аммония - 175 кг, железо хлорное - 160 кг. Затраты на химические реагенты составят:

$$(200*448)+(440*332)+(160*286)+(175*940) = 445\ 940 \text{ тенге.}$$

На скважине 92-4-4 добыча урана до проведения экспериментальных работ составляла в среднем 200 кг урана в месяц. Средние значения МРЦ составляли 7 суток, низкие МРЦ обусловлены не эффективностью традиционных методов РВР, в результате чего скважина по долгу простаивала в ожидании ремонтных работ, компрессорной прокачки, химической обработки, подачи ВР в скважину. После ОПИ значения добычи не превысили прежние значения и составили в среднем 175 кг урана в месяц, МРЦ не увеличился. Расход химических реагентов составил: сульфаминовая кислота - 400 кг, лигносульфонат аммония - 280 кг, бифторид аммония - 200 кг, железо хлорное - 320 кг. Затраты на химические реагенты составят:

$$(400*448)+(280*332)+(320*286)+(200*940) = 551\ 680 \text{ тенге.}$$

На скважине 90-3-2р добыча урана до проведения экспериментальных работ составляла в среднем 115 кг урана в месяц. Средние значения МРЦ составляли 20 суток, низкие значения добычи обусловлены малой эффективностью традиционных методов РВР, в результате чего скважина по долгу простаивала в ожидании ремонтных работ, компрессорной прокачки, химической обработки, подачи ВР в скважину. После ОПИ значения добычи не значительно превысили прежние параметры и составили в среднем 175 кг урана в месяц, средние значения МРЦ составили 30 суток. Расход химических реагентов составил: сульфаминовая кислота - 400 кг, лигносульфонат аммония - 280 кг, бифторид аммония - 75 кг, железо хлорное - 480 кг. Затраты на химические реагенты составят:

$$(400*448)+(280*332)+(480*286)+(75*940) = 479\ 940 \text{ тенге.}$$

На скважине 90-6-3 добыча урана до проведения экспериментальных работ составляла в среднем 335 кг урана в месяц. Средние значения МРЦ составляли 17 суток, низкие значения добычи обусловлены малой эффективностью традиционных методов РВР, в результате чего скважина по долгу простаивала в ожидании ремонтных работ, компрессорной прокачки, химической обработки, подачи ВР в скважину. После ОПИ значения добычи превысили прежние параметры и составили в среднем 650 кг урана в месяц, средние значения МРЦ составили 110 суток. Расход химических реагентов составил: сульфаминовая кислота - 400 кг, лигносульфонат аммония - 280 кг, бифторид аммония - 175 кг, железо хлорное - 480 кг. Затраты на химические реагенты составят:

$$(400*448)+(280*332)+(480*286)+(175*940) = 573\ 940 \text{ тенге.}$$

На скважине 5-1-4-8 добыча урана до проведения экспериментальных работ составляла в среднем 160 кг урана в месяц. Средние значения МРЦ составляли 5 суток, низкие значения добычи и МРЦ обусловлены малой

эффективностью традиционных методов РВР, в результате чего скважина по долгу простаивала в ожидании ремонтных работ, компрессорной прокачки, химической обработки, подачи ВР в скважину. После ОПИ значения добычи превысили прежние параметры и составили в среднем 190 кг урана в месяц, средние значения МРЦ составили 30 дней. Расход химических реагентов составил: сульфаминовая кислота - 175 кг, лигносульфонат аммония - 140 кг, бифторид аммония – 150 кг, железо хлорное - 80 кг. Затраты на химические реагенты составят:

$$(175*448)+(140*332)+(80*286)+(150*940) = 288\ 760 \text{ тенге.}$$

Результаты экономической оценки влияния комплекса химических реагентов на интенсификацию скважинной добычи урана основываются на расчете прироста добычи урана за минусом затраченной суммы на приобретение химических реагентов по скважинам. В таблице 18 видно что максимальный прирост добычи урана в происходит после применения химических реагентов на блоках 60, 90, 92, 5-1 с низкими значениями МРЦ 6-17 суток и низкой производительностью скважины по ПР 3-4 м³/ч. Положительное воздействие химических реагентов обусловлено способностью эффективно разрушать геохимический барьер из механической и химической коагуляции и предотвращать осадкообразования в пласте.

На основе проведенных экспериментальных исследований, можно отметить положительное воздействие химических реагентов на этапе активного выщелачивания урана, а также при закислении на участках с повышенной карбонатностью и глинистостью продуктивного горизонта. Одним из условий эффективности воздействия химических реагентов является локализация подачи и концентрация работ на отдельных участках и ячейках, с низким коэффициентом фильтрации <1-2. А также целостность геотехнологических ячеек для совокупного охвата ГРМ, и подачи реагентов в откачные и нагнетательные скважины. В результате воздействия химических реагентов происходит активное разрушение образованных непроницаемых геохимических барьеров и продолжительное предотвращение дальнейших осадкообразований в продуктивном горизонте. На участках при преобладании механического типа осадкообразований с явным суффозионными проявлениями применение данных химических реагентов не оправдано, закупоренные колоны и фильтры скважин не поддаются воздействию. Также на участках с благоприятными фильтрационными характеристиками расход химических реагентов увеличивается а результаты снижаются в следствии увеличения площади растекания. Интенсификацию скважинной добычи урана в сложных горно-геологических условиях необходимо осуществлять с применением комплекса химических реагентов многофункционального назначения в зависимости от состава рудовмещающих пород [74]. Подача эффективных концентраций химических реагентов в выщелачивающий раствор в сочетании с традиционными методами регенерации скважин интенсифицируют процесс выщелачивание урана.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных исследований:

1. На основании проведенных исследований изучены количественно-качественные параметры руд и вмещающих пород ряда месторождений. Например, Сантонский ярус состоит из кварца (90,8 %) и калий-полевого шпата (9,2 %), Маастрихтский ярус из кварца (54,7 %), калий-полевого шпата (10,1 %), смектита (27 %), каолинита (6,7 %), Кампанский ярус состоит из кварца (66,3 %), гипса (16,4 %), каолинита (11,6 %), калий-полевого шпата (5,7 %). Установлены основные факторы, влияющие на снижение фильтрационных характеристик и выпадения в осадок компонентов. Изучение структуры и состава осадкообразований при скважинной добыче урана в зависимости от состава продуктивного горизонта показало, что на скважинах Сантонского и Маастрихтского горизонтов осадкообразования химического происхождения состоят из гипса (100 %) Осадкообразования на скважинах Кампанского горизонта преимущественно состоят из кремния (35 %), альбетита (33 %), микролина (5 %), гипса (16 %) и кальцита (8 %). В соответствии с ними подобран состав химических реагентов декольматирующих растворов для разрушения и предотвращения осадкообразований при скважинной добыче урана. Физико-химические свойства рудовмещающих пород и осадкообразующих компонентов урановых месторождений Сырдарьинской и Шу-Сарысуйской депрессии были положены в основу подбора химических реагентов для эффективного разрушения и предотвращения осадкообразования в условиях скважинной добычи урана.

2. Выявлена закономерность изменения свойств и структуры осадкообразований в прифильтровой зоне в зависимости от состава рудовмещающих пород и комплекса химических реагентов многофункционального назначения. В лабораторных условиях установлено что, добавление в ВР ПАВ в незначительных объемах позволило повысить интенсивность извлечение урана до 80 % без увеличения удельного расхода серной кислоты, и увеличения скорости фильтрации растворов. Пониженные значения удельных расходов серной кислоты на единицу добытого урана в 40 кг/кгU свидетельствует о экономической эффективности добавление ПАВ на начальной стадии выщелачивания урана в сложных горно-геологических условиях и участках с высоким содержанием глинистых минералов. Высокая кислотность ВР приводит к увеличению концентрации урана в ПР, и повышении темпов выщелачивания. Однако, на практике повышение концентрации серной кислоты в ВР приводит к увеличению ее удельных расходов, дополнительного появления кольматационного эффекта. Добавление ПАВ при выщелачивании способствует повышению интенсивности извлечения

урана и снижению удельных расходов серной кислоты, понижение кольтматационного эффекта и снижению эксплуатационных расходов.

3. Разработана методика обработки геотехнологических скважин с применением специальных химических реагентов для разрушения и предотвращения осадкообразования в пористой среде продуктивного горизонта. Проведены опытно-полевые испытания по интенсификации геотехнологических параметров скважинной добычи урана на месторождениях «Ирколь» и «Северный Харасан» с применением разработанного комплекса химических реагентов синергетического действия. Мониторинг и анализ результатов исследований показали, что содержание урана в ПР повышается на 10 – 20 %, восстановление проницаемости продуктивных пластов и удлинение периода бесперебойной работы скважин на 20 – 30 %, извлечение урана из недр на 10 – 15 %. Техничко-экономические показатели применения комплекса химических реагентов синергетического действия при интенсификации скважинной добычи урана в сложных горно-геологических условиях позволяют сократить эксплуатационные затраты на добычу на 15 – 20 %. Разработанные научно-методические рекомендации по применению комплекса химических реагентов синергетического действия в различных горно-геологических условиях способствуют повышению эффективности скважинной добычи урана.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Яшин, С.А. Подземное скважинное выщелачивание урана на месторождениях Казахстана / С.А. Яшин // Горный журнал. - 2008. - № 3. - С. 45 - 49.
- 2 Носков, М.Д. Добыча урана методом скважинного подземного выщелачивания: учеб. пособие / М.Д. Носков. – Северск: Изд-во СТИ НИЯУ МИФИ, 2010. – 83 с.
- 3 Урановые месторождения Казахстана: справочник / Н.Н. Петров [и др.]. – Алматы: Изд-во Гылым, 1995. - 264 с.
- 4 Инструкция по подземному скважинному выщелачиванию урана: методические рекомендации / В.Г. Языкков [и др.]. – Алматы: НАК Казатомпром, 2006. – 307 с.
- 5 Матаев, М.М. Подбор эффективных методов ремонтно-восстановительных работ при подземном выщелачивании урана / М.М. Матаев, Ж.С. Кенжетаяев // Успехи современного естествознания. - 2015. - №6. - С. 1001-1005.
- 6 Матаев, М.М. Новые подходы регенерации скважин при подземном выщелачивании урана / М.М. Матаев, Ж.С. Кенжетаяев // Инновации в комплексной переработки минерального сырья: сб. науч. работ. международного научно-практ. конференции Абишевские чтения-2016. – Алматы: 2016. – С. 138-142.
- 7 Юсупов, Х.А. Повышение эффективности отработки сложных гидрогенных месторождений урана с применением пероксида водорода / Х.А. Юсупов, Д.А. Джакупов, Е.С. Башилова // Горный журнал Казахстана. – 2018. - №2. – С. 18-21.
- 8 Юсупов, Х.А. Применение бифторида аммония для химической обработки скважин при подземном выщелачивании урана / Х.А. Юсупов, С.Б. Алиев, Д.А. Джакупов, Е.А. Ельжанов // Горный журнал. – 2017.- №4. – С. 57-60.
- 9 Битимбаев, М.Ж. Химическая кольматация и способы ее устранения при подземном выщелачивании металлов / М.Ж. Битимбаев // Вестник Национальной инженерной академии Республики Казахстан. - 2009. - №2. - С. 122-125.
- 10 Забазнов, В.Л. Виды кольматации скважин при подземном скважинном выщелачивании урана и методы борьбы / В.Л. Забазнов, А.П. Патрин, В.М. Зинченко, А.А. Калошин, Л.И. Евтеева // Актуальные проблемы урановой промышленности II междунар. конф: сб. науч. работ. – Алматы: НАК Казатомпром, 2002. - С. 38 - 44.
- 11 Горбатенко, О.А. Ремонтно-восстановительные работы на геотехнологических скважинах предприятий ПСВ урана: учеб. пособие / О.А. Горбатенко [и др.]; под ред. Ю.В. Демехова. – Алматы: НАК Казатомпром, 2017.- 194 с.

- 12 Добыча урана методом подземного выщелачивания: учеб. – метод, пособие / В.А. Мамилов [и др.]. – М.: Атомиздат, 1980. – 248 с.
- 13 Nikitina, Yu. G., Poyezzhayev, I. P., Myrzabek, G. A. Improvement of opening schemes of wellfields to optimize the cost of mining uranium // *Gornyi Vestnik Uzbekistana*.- 2019.-Vol.1.P.6 - 11.
- 14 Matev, M.M. The impact of ammonium bifluoride complex on colmatating formations during the process of in situ uranium leaching / M.M. Mataev, B.R. Rakishev, G.S. Kenzhetaev // *International journal of advanced research*. - 2017. - № 5. P.147-154.
- 15 Uralbekov, B., Burkitbayev, M., & Satybaldiev, B. Evaluation of the effectiveness of the filtration leaching for uranium recovery from uranium ore // *Chemical Bulletin Of Kazakh National University*.-2015.-Vol.3.P. 22-27.
- 16 Rakishev, B., Bondarenko, V., Matayev, M., & Kenzhetaev, Z. Influence of chemical reagent complex on intensification of uranium well extraction // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*.- 2019.-Vol. 6. P.25-30.
- 17 Omarbekov, Y., Yussupov, K. Improving the technology of uranium mining under the conditions of high groundwater pressure // *Mining of Mineral Deposits*.-2020. –Vol.3.P.112-118.
- 18 Юсупов Х.А., Джакупов Д.А., Башилова Е.С. Влияние схем вскрытия технологических блоков при отработке месторождений урана./Труды университета.- Караганда, №3 2018.- С.76-78
- 19 Rakishev, B., Kenzhetaev, Z., Shampikova, A., & Toktaruly, B. Increasing of filtration characteristics of ore bodies in borehole uranium mining. *E3S Web Of Conferences*.- 2020.-Vol.168, 00014.
- 20 Rakishev, B., Mataev, M., & Kenzhetaev, Z. Analysis of mineralogical composition of sediments in in-situ leach mining of uranium // *Mining Informational And Analytical Bulletin*.- 2019.-Vol.7.P.123-131.
- 21 Kenzhetaev Z.S., Nurbekova M.A., Togizov K.S., Abdraimova M.R., Toktaruly, B. (2021) Methods for intensification of borehole uranium mining at the fields with low filtration characteristics of ores. *Mining of Mineral Deposits*, 15 (3): 95-101.
- 22 Kuandykov T., Nauryzbayeva D., Yelemessov K., Karmanov T., Kakimov U., Kolga A. (2020) Development and justification of a hydro-impulse method for increasing ore permeability in conditions of uranium borehole production. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences*, 6(444):126-133
- 23 Ивашечкин, В.В. Регенерация скважинных и напорных фильтров систем водоснабжения: монография / В.В. Ивашечкин, А.М. Шейко, А.Н. Кондратович. – Минск: Изд-во БНТУ, 2008. – 277 с.
- 24 Романенко, В.А. Восстановление производительности водозаборных скважин: учеб. для вузов / В.А. Романенко, Э.М. Волницкая. – Л.: Недра, 1986. – 112 с.

25 Yussupov Kh., Jakupov D. The effect of the concentration of sulfuric acid on the distance between the wells in the uranium leaching// Горный журнал Казахстана.- 2018. -№2.-С. 13-14.

26 Юсупов Х.А., Джакупов Д.А., Назарбаева Н.А. Выбор схемы и параметров скважин технологического блока/ Международная научно-практическая конференция «Научное и кадровое сопровождение инновационного развития горно-металлургического комплекса». - Алматы, 2017.-С.168-170

27 Джакупов Д.А. Влияние искривления технологических скважин на показатели выщелачивания урана/ Труды Сатпаевских чтений «Инновационные решения традиционных проблем: инженерия и технологии».-Алматы,2018.С. 878-880

28 Толстов Е.А., Толстов Д.Е. Физико-химические геотехнологии освоения месторождения урана и золота в Кызылкумском регионе. «Геоинформцентр» Москва 2002 г.- 286 с

29 Alikulov, S., Sobirov, Z., & Khaidarova, M. Research and implementation of the methods of limiting the diffidence of product solutions and the intensification of underground leaching workflows // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Gornyi Zhurnal. -2018.-Vol.3.P.100-106.

30 Джакупов Д.А. Выбор схемы расположения технологических скважин при разработке многоярусных рудных залежей// Сборник статей V международной научно-практической конференции «Современные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации».- Пенза, 2018. С. 210-212

31 Ракишев Б.Р., Федоров Б. В. Техника и технология сооружения геотехнологических скважин. – Алматы, 2013. - 260 с

32 Rakishev, B., Mataev M.M., Kenzhetayev, Z., Shampikova, A., Tohtaruly B. «Innovative methods for intensifying borehole production of uranium in ores with low filtration characteristics». News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences. – 2020. - 6(444), - P. 213-219.

33 Rakishev, B., Mataev M.M., Kenzhetayev, Z., Altaybayev, B., Shampikova, A. Research into leaching of uranium from core samples in tubes using surfactants// Mining of Mineral Deposits. – 2020 – 14(4), - С. 97-104.

34 Rakishev B.R., Yazikov E.G.,Mataev M.M., Kenzhetaev Z.S. Studies of uranium leaching from core sample in tubes using an oxidizer// *Gornyi Zhurnal*. 2021, (9), С 84 – 89.

35 Kassenov, A.K., Syzdykov, A.H., Spirin, V.I., Moldabekov, M.S., Bukenova, M.S. Methods for calculating cavitators for devices designed by satbayev university for cleaning oil and gas wells. News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences, 2020, 2(440), стр. 81–86

36 Kassenov, A.K., Spirin, V.I., Moldabekov, M.S., Faizulin, A.Z., Baibussinova, Z.B. The analysis of modern technology and technique applied in

the completion of geotechnological wells and remedial works in them. News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences, 2018, 3(429), стр. 96–102

37 Юсупов Х.А., Джакупов Д.А., Башилова Е.С. Влияние схем вскрытия технологических блоков при отработке месторождений урана./Труды университета.- Караганда, №3 2018.- С.76-78

38 Саттаров Г.С., Першин М.Е., Колпакова Е.В., Лильбок Л.А., Есаулов В.Н. Научные аспекты развития работ подземного выщелачивания урана в НГМК // Горный вестник Узбекистана, 2007 г., т.28, № 1, с.39-45.

39 Khawassek, Y., Taha, M., & Eliwa, A. Kinetics of Leaching Process Using Sulfuric Acid for Sella Uranium Ore Material, South Eastern Desert, Egypt // International Journal Of Nuclear Energy Science And Engineering.- 2016.-Vol. 6(0).P. 62-68.

40 Абдульманов И.Г., Фазлуллин М.И., Мосев А.Ф., Пименов М.К., Савинова Н.К. Комплексы подземного выщелачивания//под ред. Кедровкого О.Л. –М.: Недра, 1992. – 263 с.

41 De Silva, V., & Ranjith, P. Evaluation of injection well patterns for optimum fracture network generation host-rock formations: An application in in-situ leaching// Minerals Engineering.-2019.-Vol.137.P.319-333.

42 Khawassek, Y.M. Kinetics of Leaching Process Using Sulfuric Acid for Sella Uranium Ore Material, South Eastern Desert / Y.M. Khawassek, M.H. Taha*, A.A. Eliwa // Egypt International Journal of Nuclear Energy Science and Engineering. - 2016. - V 6. - P. 62-73.

43 Филиппов, А.П. Редокс-процессы и интенсификация выщелачивания металлов: монография / А.П. Филиппов, Ю.В. Нестеров. – М.: Руда и металлы, 2009. – 544 с.

44 Филиппов, А. П. Лигносульфонат аммония – добавка, интенсифицирующая сернокислотное выщелачивание урана из руд / А.П. Филиппов, Ю.В. Нестеров // Химическая технология. - 2001. - №8. - С. 21-25.

45 Филиппов, А. П. Опытнo-промышленные испытания подземного выщелачивания урана с использованием HNO_2 в качестве окислителя / А.П. Филиппов, Ю.В. Нестеров // Горный журнал. - 2004. - № 10. - С. 52 - 55.

46 Edwards, C.R., Oliver, A.J. Uranium processing: A review of current methods and technology // JOM.-2000.-Vol. 9. P.12-20.

47 Акынов Г.Б., Алыбаев Ж.А., «Изучение влияния пероксида водорода на выщелачивание урана кислотным способом в условиях месторождения «Ирколь» // Вестник КазННТУ – Алматы, 2016. - №1. – С. 493-497

48 Kenzhetaev Z.S., Kuandykov T.A., Togizov K.S., Abdraimova M.R., Nurbekova M.A. (2022) Selection of rational parameters for opening and drilling of technological wells underground uranium leaching. News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences, 3 (453): 115 – 127.

49 Kenzhetaev Z.S., Nurbekova M.A., Togizov K.S., Abdraimova M.R., Toktaruly, B. (2021) Methods for intensification of borehole uranium mining at the

fields with low filtration characteristics of ores. *Mining of Mineral Deposits*, 15 (3): 95-101.

50 Satybaldiyev, B., Lehto, J., Suksi, J., Tuovinen, H., Uralbekov, B., Burkitbayev, M., Understanding sulphuric acid leaching of uranium from ore by means of $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ activity ratio as an indicator // *Hydrometallurgy*.- 2015.- Vol.155. P. 125–131.

51 Евтеева Л.И. Исследование и разработка методов интенсификации процесса подземного выщелачивания урана, (на примере месторождения Уванас): дис. канд. тех. наук. -М.: ВНИИХТ, 1986. – 134 с

52 Солодов И.Н., Рычков В.Н., Пастухов А.М. и др. Повышение межремонтного периода закачных скважин за счет очистки технологических растворов от твердых взвешенных веществ // VI международная науч.-практ. конф. «Актуальные проблемы урановой промышленности: сб докл - Алматы, 2010.- С. 42 -46.

53 Интыкбаев А.М., Алыбаев Ж.А. Основы подземного выщелачивания урана и примеры решения задач. – Алматы. – 2011.- 193 с.

54 Grenthe, I., Stumm, W., Laaksuharju, M., Nilsson, A.C., Wikberg, P. Redox potentials and redox reactions in deep groundwater systems // *Chemical Geology*.-1992.-Vol.1-2.P.131-150.

55 Izgec, O., Zhu, D., & Hill, A. Numerical and experimental investigation of acid wormholing during acidization of vuggy carbonate rocks // *Journal Of Petroleum Science And Engineering*.- 2010.-Vol.74, No.1-2.P.51-66.

56 Lach, P., Cathelineau, M., Brouand, M., & Fiet, N. In-situ Isotopic and Chemical Study of Pyrite from Chu-Sarysu (Kazakhstan) Roll-front Uranium Deposit // *Procedia Earth And Planetary Science*.- 2015.-Vol.13.P.207-210.

57 Litvinenko, V.G., Sheludchenko, V.G., Filonenko, V.S. Improvement of agitation leaching of uranium ore // *Gornyi Zhurnal*.- 2018.-Vol.7.P.69-72.

58 Mudd, G. Critical review of acid in situ leach uranium mining: 2. Soviet Block and Asia. *Environmental Geology*.-2001.-Vol.41(3-4).P. 404-416.

59 Park, B., Dempsey, B.A. Heterogeneous oxidation of Fe(II) on ferric oxide at neutral pH and a low partial pressure of O_2 // *Environmental Science and Technology*.- 2005.-Vol.17.P.6494-6500.

60 Tang, S., Huang, R., Wang, S., Bao, C., & Tang, C.. Study of the fracture process in heterogeneous materials around boreholes filled with expansion cement // *International Journal Of Solids And Structures*.- 2017. –Vol.112. P.1-15.

61 Umanskii, A.B., Klyushnikov, A.M. Development of $\text{NaNO}_2\text{-O}_2$ system as an oxidant at uranium leaching processes // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*.- 2012.-Vol. 1-P.193-198.

62 Zeng, S., Zhang, N., Zhang, S., Sun, B., Tan, K., Duan, X., & Du, X. Fractal characteristics of uranium-bearing sandstone structure and their effects on acid leaching // *Energy Science & Engineering*.- 2019.-Vol.7, No.5.P.1852-1866.

63 Youlton, B., and Kinnaird, J., Gangue–reagent interactions during acid leaching of uranium // *Minerals Engineering*.- 2013.-Vol. 52. P. 62–73.

64 Rashad, M.M. Kinetics of uranium leaching process using sulfuric acid for Wadi Nasib ore, South western Sinai, Egypt / M.M. Rashada, S.A. Mohamedb, E.M. EL sheikha, H.E. Miraa, G.M. Abd el Wahaba, S.A. Zakia // Aswan University Journal of Environmental Studies. – 2020. – V 2. – P. 171-182.

65 Bahig, M.Atia1., Mohamed, A. Gado1., Mohamed, F.Cheira1. Kinetics of uranium and iron dissolution by sulfuric acid from Abu Zeneima ferruginous siltstone, Southwestern Sinai, Egypt // Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration. – 2018. –V 3. – P. 1-12.

66 Chen, J., Zhao, Y., Song, Q., Zhou, Z., & Yang, S. Exploration and mining evaluation system and price prediction of uranium resources // Mining of Mineral Deposits, 2018. 12(1),P. 85 – 94.

67 Шаталов В.В. Состояние и перспективы сырьевой базы отрасли // Атом – пресса. – февраль 2003. – №8.

68 Gavin M. Mudd, Critical review of acid in situ leach uranium mining: 1. USA and Australia, Cases and Solutions, Environmental Geology, 2001, Vol. 41 p. 390-391.

69 Armstrong D., Jeuken B. Management of In-Situ Recovery (ISR) Mining Fluids in a Closed Aquifer System// Proceedings of the International Mine Water Conference, 19-23 October 2009.-New York: Curran Associates, 2009. P. 688-697.

70 Анатолевский П.А., Малоян А.В., Шнееров С.М. Эксплуатация и ремонт водяных скважин. – М.: Недра, 1964.- 195 с.

71 Рекомендации по виброагентному восстановлению производительности скважин // ВНИИВОДГЕО. – М., 1980.- 114 с.

72 Справочник по растворимости / Под ред. В. Б. Коган, С. К. Огородникова, В. В. Кафарова. Л.: Химия. 1970. - 345 с.

73 Перельман А.И. Гидрогенные месторождения урана. - М.: Атомиздат, 1980. - 270 с.

74 Armstrong D, Jeuken B. Management of in-situ recovery (ISR) mining fluids in a closed aquifer system. Abstracts of the International Mine Water Conference, 2009, South Africa, p. 703-712.