

Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К.И.Сатпаева

УДК 622.27

На правах рукописи

ТОҚТАРҰЛЫ БАҚЫТЖАН
**Интенсификация подземно-скважинного выщелачивания урана с
применением различных реагентов**

8D07203 – «Горная Инженерия»

Диссертация на соискание степени
доктора философии (PhD)

Научные консультанты
Абен Е.Х., к.т.н.,
ассоциированный
профессор Satbayev
University

Оника С.Г., д.т.н.,
профессор, зав.кафедрой
Белорусского
Государственного
технического
университета

Республика Казахстан
Алматы, 2023

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

Введение

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ОБЪЕКТЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Месторасположение объекта

1.2 Краткие геологические характеристики

1.3 Применяемая технология выщелачивание

2. ПРЕДЛАГАЕМАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

2.1 Краткий анализ работ по интенсификации процесса выщелачивания

2.2 Предлагаемая технология

2.3 Методика проведения исследования

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДЛАГАЕМОЙ ТЕХНОЛОГИИ

3.1 Влияние скорости потока жидкости на насыщение кислородом

3.2 Исследование по определению времени достижения максимального насыщения раствора кислородом и влияния расстояния транспортировки на изменение концентрации кислорода, величину ОВП и Fe(III) в выщелачивающем растворе.

3.3 Влияние насыщения раствора кислородом на показатели выщелачивания

3.4 Методика применения окислителя в производственных условиях

3.5 Схемы интегрирования устройства для окисления раствора на линию выщелачивающих растворов

3.6 Опытно-промышленные работы

3.7 Ожидаемый экономический эффект

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

ПРИЛОЖЕНИЯ

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

Настоящие правила составлены на основании следующих нормативных документов:

Закон Республики Казахстан «О науке» от 18.02.2011 г. № 407-IV ЗРК;

ГОСО РК 5.04.034-2011: Государственный общеобязательный стандарт образования Республики Казахстан. Послевузовское образование. Докторантура. Основные положения (изменения от 31 октября 2018 года № 604);

Правила присуждения ученых степеней от 31 марта 2011 года № 127; (изменения от 9 марта 2021 года № 98);

Межгосударственные стандарты: ГОСТ 7.32-2001 (изменения от 2006 г.);

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

Перечень принятых сокращений и терминов

ПСВ - Подземное скважинное выщелачивание

ОВП - окислительно-восстановительный потенциал

pH - водородный показатель

Ж:Т - отношение массы жидкого к массе твердого

ppm - единица измерения концентрации, миллионная доля, равная $1 \cdot 10^{-6}$ от базового показателя

ВР – выщелачивающий раствор

ПР – продуктивный раствор

Закачная скважина - скважина, используемая для введения выщелачивающего раствора в подземные слои с целью растворения минералов урана

Откачная скважина - Скважина, предназначенная для извлечения раствора называемый продуктивный раствор, из подземных слоев.

Кольматация фильтров - Процесс засорения фильтра частицами из минеральной среды, что может снизить эффективность закачки и откачки растворов и вызвать увеличение перепада давления.

Сорбционная колонна - Устройство, специально разработанное для извлечения урана из жидкости или газа с использованием сорбента, обладающего аффинитетом к урану. Такие колонны могут применяться в процессах переработки урановых руд, обогащения урана и других технологических операциях в ядерной промышленности.

Кислород - химический элемент с символом "О", который является важным компонентом атмосферы Земли. В промышленности часто используется в виде газа для дыхания, окислителя в процессах горения и других технических приложениях.

Трубка Вентури - Устройство для измерения или регулирования потока жидкости или газа. Оно состоит из сужающегося сечения трубы, называемого горловиной, которая переходит в более широкую часть, а затем снова сужается. Это создает разницу в давлении, что позволяет измерять или регулировать поток.

Статическое давление - Давление, оказываемое столбом стоячей жидкости или газа, не двигающегося относительно наблюдателя. Это основное давление, которое ощущается в статических условиях без учета движения среды.

Динамическое давление - Давление, связанное с движущейся средой, такой как поток жидкости или газа. Оно обусловлено кинетической энергией частиц среды, которая вызывает давление в направлении движения. Включает в себя как статическое, так и влияние скорости потока

Байпасная линия - Дополнительный или обходной трубопровод, предназначенный для перенаправления потока жидкости вокруг основной системы. Байпасные линии используются, например, для регулирования давления, обхода определенных участков системы.

Введение

Республика Казахстан занимает второе место в мире по запасам урана, и почти 3/4 всех запасов этого элемента поддаются разработке методом подземного скважинного выщелачивания. Особенность месторождений урана в Казахстане заключается в их расположении близ региональных зон пластового окисления. Этот вид месторождений не является распространённым в мире, и поэтому подвергается разработке наиболее передовым, относительно бюджетным и экологически чистым способом подземного скважинного выщелачивания [1,2]. Согласно этой технологии, руда остаётся на месте залегания, где через неё проходят жидкости для выщелачивания минералов из руды. Таким образом, практически полностью сохраняется целостность почвенного покрова, не образуются хвостов и пустой породы. Сравнивая с привычным методом добычи минеральных ресурсов, подземное выщелачивание уменьшает краткосрочное и долгосрочное негативное влияние на население, а также значительно понижает уровень радиоактивности, образуя минимальное количество радиоактивных отходов.

Себестоимость добычи способом подземного выщелачивания через скважины в 2,5-3 раза ниже подземного горными выработками, а коэффициент извлечения при подземном выщелачивании изменяется от 49% до 88%, составляя в среднем 65% [4], поэтому данный метод остается наиболее перспективным.

На сегодняшний день, к разработке стали привлекать участки месторождений с не благоприятными горно-геологическими условиями, такими как: низкий коэффициент фильтрации, бедное содержание урана в руде, глинистость, недостаток трёхвалентного железа в структуре пластовых вод и в горнорудной массе [5,6,7]. В итоге, извлечение урана из разрабатываемых участков составляет около 50% при содержании серной кислоты в выщелачивающих растворах 10-15 г/л.

Как показывает практика выщелачивания урановых руд, на стадиях закисления горнорудной массы в продуктивных растворах наблюдается повышение содержание полезного компонента вместе с увеличением остаточной кислотности. Когда процесс переходит в стадию активного выщелачивания, заметен пик содержания урана в растворе, а затем происходит резкое снижение. Свидетельствуется это тем, что к этому моменту химически активный шестивалентный уран практически полностью переходит в раствор и в рудах остается четырехвалентный уран, который более упорен к действию серной кислоты [8].

Для ускорения процесса выщелачивания существуют два дополнительных требования: равномерная закачка при общем соблюдении баланса и незначительное отклонение забоев скважин от проектных положений (в пределах 1 - 2 м). Несоблюдение этих требований усложняет интерпретацию данных контрольного бурения и снижает точность выполняемых расчетов.

Для сокращения времени работы полигона до достижения требуемой степени извлечения (85-90%) можно уменьшить расстояние между закачными и откачной скважинами или увеличить их производительность. В обоих случаях имеются чисто технические трудности. Так, на глубинах 400 - 700 м в настоящее время практически невозможно пробурить скважины без отклонения фильтра на 3-5 м от проектного положения. Поэтому минимально допустимым расстоянием между откачной и закачными скважинами следует считать 20 - 35 м в соответствии с различной глубиной бурения. Значительно увеличить производительность скважин также невозможно, так как помимо технической сложности и роста затрат на их сооружение определяющим фактором являются фильтрационные свойства продуктивного горизонта.

Ориентировочно время работы полигонов, не имеющих центральной ячейки, до достижения требуемого извлечения, согласно расчету, составляет около 3-лет, а с учетом снижения содержания урана в продуктивном растворе – 4 - 5 лет.

Поэтому, одним из путей интенсификации процесса выщелачивания при подземном скважинном выщелачивании урана является применения различных окислителей.

Цель работы - повышение эффективности подземного скважинного выщелачивания урана с насыщением раствора кислородом.

Идея работы заключается в повышении содержания урана в продуктивном растворе с насыщением выщелачивающего раствора кислородом из воздуха с применением специального инжектора-трубки Вентури.

Задачами исследования являются:

- изучение геологических особенностей и анализ применяемой технологии ПСВ урана на месторождения «Центральный Мынкудук»;
- разработка технологии насыщения выщелачивающего раствора кислородом из воздуха;
- проведение исследований по установлению влияния скорости потока и объема выщелачивающего раствора на концентрацию кислорода в растворе;
- лабораторные исследования влияния насыщения выщелачивающего раствора на показатели подземного скважинного выщелачивания;
- обработка результатов исследования и выдача рекомендации.

Научная новизна:

- предложена технология всаса воздуха и насыщения выщелачивающего раствора кислородом с помощью инжектора-трубки Вентури, отличающиеся созданием внутри инжектора участков с разными давлениями раствора, что повышает перевод кислорода из газообразного состояния в жидкую фазу;

- получены зависимости концентрации кислорода в растворе от скорости и объема выщелачивающего раствора, что позволит установить

максимально возможную концентрацию кислорода в растворе при различных объемах подаваемого раствора в производственных условиях;

- получены зависимости концентрации двух-трехвалентного железа и содержания урана в продуктивном растворе от времени выщелачивания и расстояния транспортировки выщелачивающего раствора после насыщения ее кислородом.

Научные положения, выносимые на защиту:

- применение специального инжектора-трубки Вентури позволит повысить концентрацию кислорода в выщелачивающем растворе за счет изменения давления выщелачивающего раствора при ее прохождении через суженную и расширенную участки инжектора.

- концентрации кислорода в выщелачивающем растворе зависит от скорости и объема подаваемого выщелачивающего раствора, что позволит определить концентрацию кислорода в растворе с учетом регламента подачи выщелачивающего раствора на технологический блок;

- концентрации кислорода, трехвалентного железа в выщелачивающем растворе и содержание урана в продуктивном растворе зависят от времени выщелачивания и расстояния транспортировки от места насыщения раствора кислородом до пласта.

Связь данной работы с другими научно-исследовательскими работами. Диссертационная работа выполнена в рамках темы: «Интенсификация процесса добычи с применением окислителей в процессе выщелачивания на участке «Центральный» месторождения «Мынкудук»» (договор № 438060/2020/1 от 29.05.2020г.).

Объектом исследований является участок «Центральный» уранового месторождения «Мынкудук» в Туркестанской области.

Предметом исследований являются подземное скважинное выщелачивание урана.

Методологическая база исследований:

- анализ современного состояния применения ПСВ урана и НИР по повышению ее эффективности;
- разработка методики проведения лабораторных исследований и опытно-промышленных работ;
- проведение лабораторных и опытно-промышленных работ;
- сбор и анализ статистических данных;
- обработка результатов исследования и выдача рекомендации.

Практическая значимость диссертации заключается в разработке технологии насыщения выщелачивающего раствора для повышения содержания урана в продуктивном растворе и снижения срока отработки запасов урана.

Личный вклад автора. Анализ геологических условий месторождения, обзор литературных источников по теме исследования, проведение лабораторных исследований, обработка результатов лабораторных работ, подготовка выводов.

Реализация выводов и рекомендаций работы.

Опытно – промышленные испытания и исследования осуществлялись в блоке 48-5 участка «Центральный» месторождения «Мынкудык».

Публикаций по диссертациям опубликована 2 статьи, в том числе в журналах:

-(2021) Mining of Mineral Deposits, 15 (3), pp. 39-44. DOI: 10.33271 / MINING 15.03.039, Analyzing changes in a leach solution oxygenation in the process of uranium ore borehole mining;

-(2022) Eurasian Mining, 2 (38) pp. 50-53 Effect of process solution saturation with oxygen on uranium in-situ leaching performance.

Объём и структура работы.

Работа выполнена на кафедре «Горное дело» Казахского национального исследовательского технического университета имени К.И. Сатпаева.

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ОБЪЕКТЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Месторасположение объекта

Месторождение Мынкудук, расположенное в Шу-Сарысуйской депрессии, имеет участок "Центральный" на топографической карте масштаба 1:200 000 L-42-XX, XXI. Общая площадь геологического отвода составляет 40,6 квадратных километров. Район работ находится в Туркестанской области Республики Казахстан.

Географически месторождение расположено на плато Бетпакдала, представляющем собой крупную равнинную возвышенность. С севера и запада плато ограничено эрозионным уступом высотой до 80-100 м, а на юге оно полого наклонено к долине реки Чу. Плато характеризуется слаборасчлененным равнинным рельефом с абсолютными отметками 220-300 м, с котловинами – такырами. Аллювиально-озерно-солончаковые равнины рек Сарысу и Шу, ограничивающие плато с запада и юга, имеют абсолютные отметки 120-160 м.

Гидрографическая сеть района формируется временно действующими реками Шу и Сарысу, снежно-ледниковое питание. Реки имеют водоток только в паводковый период (май-июнь) и затем разбиваются на плесы с горько-соленой водой. Минерализация вод изменяется от 2,1 г/л до 9,0 г/л.

Климат района резко континентальный, характеризуется значительными годовыми и суточными амплитудами температуры, суровой зимой, длительным жарким летом, короткой весной, сухостью воздуха и незначительным количеством осадков. Средняя годовая температура воздуха составляет +6°C, с абсолютными максимумами до +43°C в июне-июле и минимумом -35°C в январе. Суточные колебания температуры воздуха летом достигают 14°C.

Годовая сумма осадков составляет 130-140 мм, с твердыми осадками на уровне 22-40% от общего количества. Влажность воздуха в пределах 56-59%.

С 1988 года экспедиция № 7 осуществила строительство улучшенной грунтовой дороги с гравийным покрытием между п. Тайконур и п. Аксумбе, проходящей через месторождение Инкай и поле месторождения Буденновское. Дорога простирается от п. Тайконур до п. Шиели. Грузоперевозки включают маршруты: п. Тайконур – г. Шымкент (500 км), п. Тайконур – ст. Сузак (220 км), п. Тайконур – г. Алматы (1200 км). Все дороги асфальтированы, за исключением участков до п. Аксумбе (110 км) и п. Шиели (170 км), преобладает автомобильный транспорт.

Ближайшие железнодорожные станции: Кызылорда (160 км), Шиели (170 км), Сузак (220 км). Вдоль газопровода Павлодар-Шымкент проложена ЛЭП-110.

В поселке Тайконур, помимо базы ГРЭ-7 АО «Волковгеология», находятся базы ТОО СП "Инкай" и ТОО СП "Бетпак Дала". Водоснабжение осуществляется из артезианских подземных вод: питьевое из палеоценового

водоносного комплекса с минерализацией 0,7-1,0 г/л, а техническое из мелового водоносного комплекса с соленостью 1-5,0 г/л.

В районе обнаружены месторождения строительных и стекольных песков (Кендерлы, Тогускенское), гравия и галечника (Кызымчек), строительных и буровых глин (Учкудукское, Кызымчек, Уванас). Также выделены месторождения гипсов, поваренной соли и сульфата натрия.

Район месторождения имеет свои особенности и трудности в социально-экономическом развитии, обусловленные удаленностью от развитых

1.2 Краткие геологические характеристики

Участок "Центральный" месторождения Мынкудук характеризуется наличием значительных линз серых глин, которые присутствуют не только в нижней части горизонта, но и охватывают весь его разрез. Это приводит к заметной литолого-фациальной неоднородности мынкудукского горизонта. В нижнем подгоризонте преобладают руслово-стрежневые фации, в то время как в верхнем чаще встречаются косово-русловые песчаные отложения. При этом глинистые прослои играют более значимую роль с востока на запад, проявляя увеличение их мощности и протяженности. Геологическая карта Северо-западной части Шу-Сарысуйской депрессии, а также расположение рудоносных участков месторождения Мынкудук, представлены в приложениях А и Б.

Судя по минералогическому составу руды мынкудукского горизонта, в том числе на участке "Центральный", преобладают коффинит-настурановые формации. Согласно обобщенному балансу урановых минералов на участке, вычисленному на основе результатов рентгенфазового анализа и электронно-микроскопических исследований, коффинит составляет 15%, в то время как настуран – 85% (по общему числу определений, равному 127). Распределение урановых минералов в различных ураноаккумуляторах на участке "Центральный" представлено в таблице 1.

Таблица 1 – Распределение урановых минералов в различных ураноаккумуляторах

	Настуран				Коффинит			
	в тяжелой фракции	в т.ч.			всего опред.	в том числе		
		в обугленном растительном детрите	в рыхл. алеврито запол.	гл. в тяжелой фракции		в обугленном растительном детрите	в рыхл. алеврито-глин. заполнители	в тяжелой фракции
к-во	108	19	64	25	19	6	12	1
вес, %	100	0,4	99,2	0,4	100	0,6	99,3	0,1

Соотношение настурана и коффинита в различных элементах рудных залежей не подчиняется определенной закономерности. Обнаружено, что настуран (UO_2) и коффинит ($USiO_4$) в образцах керна и под микроскопом практически неотличимы. Это объясняется тем, что оба минерала часто встречаются в совокупности и образуют тесные микросрастания, различимые лишь под электронным микроскопом. Макроскопически они представляют собой черные, мягкие, сажистые минералы, встречающиеся в рыхлом проницаемом цементе песков, на корочках терригенных зерен, в микротрещинах и порах этих зерен. В некоторых случаях, в богатых рудах, они формируют гнезда в песке с базальным цементом, полностью замещая обугленную растительную органику и развиваясь вокруг зерен лейкоксенов.

Рудные залежи месторождения Мынкудук представлены протяженными и извилистыми лентами в плане, связанными с границей выклинивания зоны пластового окисления в продуктивных горизонтах. Границы рудных залежей определены по данным каротажа и опробования с учетом заданных критериев содержания урана – 0,01%.

Рудные залежи обычно включают несколько морфологических элементов, таких как ролловое тело (мешок), нижнее и верхнее крылья, а также останцы крыльев или соседнего по вертикали ролла. Кроме того, выделяются оруденение, приуроченное к фильтрационным окнам и каналам, а также изолированные линзообразные и неправильной формы рудные тела, связанные с верхними частями продуктивных горизонтов.

В плане рудные залежи имеют форму неправильных роллов, асимметричных, деформированных и расслоенных, или комбинацию нескольких сближенных роллов. На месторождении Мынкудук обнаружено 24 рудные залежи, из которых 16 локализованы в мынкудукском горизонте, 5 в инкудукском и 3 в жалпакском.

Участок "Центральный" включает залежи 8 и 10, локализованные в мынкудукском горизонте. Описание морфологических особенностей рудных залежей участка "Центральный" проведено во втором этапе детальной разведки, где залежь сужается и приобретает линейный характер. Залежь характеризуется сложным строением в вертикальном разрезе с обилием глин и непротяженных линз.

Для проведения выщелачивания урана используются растворы серной кислоты с концентрацией до 25 г/л при продолжительности от 1,3 до 4,7 месяцев для получения продуктивных растворов с промышленной концентрацией урана (40-50 мг/л) и $pH < 3$. Дебит откачных скважин варьирует от 5,8 до 7,2 м³/час, а приемистость закачки составляет 2-4 м³/час. Осуществляется интенсивное выщелачивание урана с переходом в продуктивный раствор и его переносом в откачные скважины.

Все эксперименты и работы проводятся в соответствии с определенными параметрами, включая регулирование концентрации серной кислоты, pH и другие показатели, чтобы обеспечить эффективность процесса.

Выщелачивание урана проводят рабочими растворами, полученными путем дополнительного укрепления серной кислотой до заданной концентрации (6 – 8 г/л) оборотных и маточных растворов.

Для выявления динамики изменения содержания урана, величин рН и Eh, концентрации 2-х и 3-х валентного железа в продуктивных растворах, ранее, ТОО "ВерШИна" были проведены опытные работы по участку ОПВ [6].

1.3 Применяемая технология выщелачивание

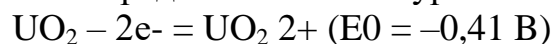
Подземное скважинное выщелачивание (ПСВ) используется, главным образом, при отработке пластово-инфильтрационных месторождений роллового типа, сформированных на восстановительном или сорбционном барьерах (чаще всего — на комплексном восстановительно сорбционном). Специфика ролловых месторождений такова, что в пределах одного месторождения уран неизбежно содержится в различных формах (как минеральных, так и неминеральных), причем в различных зонах ролла преобладают различные урансодержащие формы [7]. Кроме того, на многих месторождениях имеет место существенный разброс коэффициента фильтрации на различных участках. Все эти особенности необходимо учитывать при выборе технологии ПСВ для обеспечения высокой эффективности процесса.

Способы интенсификации ПСВ делятся на 4 класса — гидродинамические, физические, физико-химические и химические. Рациональность применения тех или иных способов зависит от характера конкретного месторождения (условий залегания, минерального состава и свойств вмещающих пород и урановых руд и пр.) [8].

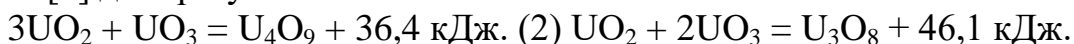
Гидродинамические способы имеют целью увеличение скорости фильтрации растворов в целом и обеспечение максимальной равномерности скорости фильтрации.

Физические, химические и физико-химические способы, как правило, имеют целью интенсификацию химических превращений, хотя некоторые из них могут также обеспечить увеличение скорости фильтрации растворов. Физические и физико-химические способы интенсификации процесса ПСВ в настоящее время применяются весьма ограниченно из-за высоких энергозатрат, хотя в регионах с низкой стоимостью электроэнергии в ряде случаев их применение может быть весьма эффективным. Например, разработанный в Республике Казахстан (РК) физико-химический способ, предусматривающий получение раствора для выщелачивания металлов из руд путем электролиза серной кислоты (в результате чего образуется сильный окислитель — пероксосерная кислота) и последующего разбавления отработанного анолита, не нашел применения в РК вследствие резкого роста стоимости электроэнергии в ураноносных регионах (до 0,075 долл/кВт•ч в конце 2008 г.). Однако для ураноносных регионов РФ, где стоимость электроэнергии составляет всего 0,016—0,028 долл/кВт•ч, указанный способ

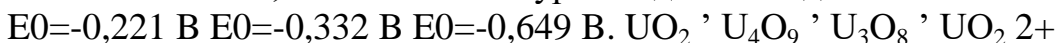
представляется вполне перспективным. Таким образом, наиболее эффективными из способов интенсификации процесса ПСВ являются химические и гидродинамические, причем гидродинамические способы более эффективны, когда процесс лимитируется скоростью фильтрации (т.е. при извлечении урана из легко выщелачиваемых руд, либо при пониженной проницаемости пласта). Химические же способы более эффективны, когда процесс лимитируется скоростью химической реакции (т.е. при извлечении урана из трудно выщелачиваемых руд). Следовательно, выбор того или иного способа интенсификации процесса ПСВ определяется тем, какая из стадий процесса является лимитирующей — кинетическая или диффузионная. Рассмотрим более подробно, в каких формах содержится уран на ролловых месторождениях РФ и РК (с учетом того, что значительная часть месторождений РК разрабатывается совместными казахстанско-российскими предприятиями). В минеральной форме уран представлен, как правило, коффинитом и настураном, а также урановыми чернями — специфической разновидностью настурана, которую иногда рассматривают как самостоятельный минерал. На месторождениях РФ, характерной чертой которых является повышенное содержание титана, незначительная часть урана представлена браннеритом и давидитом. Кроме того, уран присутствует в качестве примеси в ряде минералов — цирконе, кальците, доломите и др. В неминеральной форме уран представлен, как правило, сорбатами на органических веществах (растительном и рыбном детрите), а также глинах, лимоните и др. Настуран представляет собой оксид урана состава $UO_2 + X$, где $X=0,08$. При этом коэффициент X , которым определяется степень окисленности настурана, изменяется в указанных пределах в границах одного месторождения (как правило, в зоне восстановления $X=0,08$ в зоне окисления — $0,67$). Фактически настуран содержит оксиды урана состава UO_2 , U_4O_9 ($=_3UO_2 \cdot UO_3$, $UO_{2,25}$) и U_3O_8 ($=UO_2UO_3$, $UO_{2,67}$) в различных соотношениях. Кристаллографический анализ показывает, что предельная степень окисленности, при которой сохраняется кристаллическая решетка настурана, соответствует U_3O_8 . В большинстве литературных источников окисление настурана в кислой среде описывается уравнением:



Однако при этом не учитывается, что энергия связи UO_2 и UO_3 в сложных оксидах довольно значительна — термодинамический расчет по данным [4] дает результат:



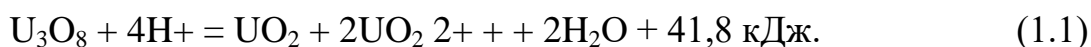
Соответственно, окисление настурана идет постадийно:



Таким образом, окисление UO_2 в U_4O_9 протекает при очень низком значении окислительно-восстановительного потенциала (ОВП), U_4O_9 в U_3O_8 — при несколько более высоком, а окисление U_3O_8 в UO_2^{2+} требует значительно более высокого ОВП — на $0,239 \text{ В}$ выше, чем для реакции (1), поэтому в месторождениях роллового типа в зоне окисления в довольно

широкой области ОВП настуран присутствует именно в виде U_3O_8 . При сернокислотном способе ПСВ выщелачивание U_3O_8 описывается уравнениями:

в отсутствие окислителей



В присутствии окислителей



Поскольку реакция (2) является эндотермической, при ПСВ степень извлечения урана (U^{4+}) пренебрежимо мала (по данным [8], при сернокислотном выщелачивании U_3O_8 в растворах наблюдается соотношение UO_2^{2+}/U_4^{4+}), поэтому в отсутствие окислителей максимальная степень извлечения урана из U_3O_8 составляет 67 %, а в присутствии окислителей 100 %. При этом, поскольку тепловой эффект реакции (3) значительно выше, чем реакции (1), в присутствии окислителя скорость выщелачивания многократно возрастает даже для высокоокисленного настурана.

Из всех вышеперечисленных способов интенсификации ПСВ урана более эффективным является применение различных окислителей. При ПСВ урана желательно применение такого окислителя, который бы сохранял окислительную способность и в кислых, и в нейтральных, и в слабощелочных средах, то есть колебания рН растворов в системе раствор-порода не должны сказываться на окислительной способности применяемого окислителя. Кроме того, в процессе сернокислотного выщелачивания в раствор из вмещающих пород практически всегда переходит Fe^{3+} - естественный окислитель, играющий важную роль, в числе прочего, в качестве катализатора при использовании других окислителей. Из этих окислителей наиболее дешевым окислителем являлся свободный кислород, однако его важным недостатком является его низкая растворимость в воде, что вынуждает подавать его в пласт под давлением для обеспечения достаточно высокой растворимости, поэтому при его использовании неизбежны дополнительные затраты на оборудование.

Таким образом, в настоящее время применение различных способов интенсификации процесса ПСВ урана не нашли широкого применения из-за сложности, ограниченной области их применения и дороговизны. Поэтому, на практике в основном прибегают к повышению концентрации серной кислоты. Доказано, что степень выщелачивания урана возвратными растворами без предварительного окисления железа очень низкая. Повышение концентрации серной кислоты в возвратных растворах несколько

повышает степень выщелачивания урана. Однако, повышение концентрации H_2SO_4 практически в три раза приводит к увеличению степени выщелачивания всего на 4 – 5 %.

Вместе с тем необходимо учитывать, что подземное скважинное выщелачивание сопряжено с переработкой больших количеств сырья, стоимость выщелачивающих реагентов в значительной мере определяет себестоимость конечного продукта, так как затраты на реагенты составляет 27 – 45% от эксплуатационных затрат на выщелачивание.

В настоящей работе, для повышения интенсивности ПСВ урана путем повышения содержания урана в ПР и снижения срока отработки предложен способ окисления двухвалентного железа в трехвалентное путем применения кислорода из воздуха.

2 ПРЕДЛАГАЕМАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

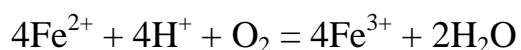
2.1 Краткий анализ работ по интенсификации процесса выщелачивания

Одним из основных препятствий на пути развития метода подземного скважинного выщелачивания является низкая скорость растворения, обусловленная наличием металлов в труднорастворимых соединениях. В связи с этим большое внимание уделяется разработке способов интенсификации процесса.

При подземном скважинном выщелачивании урана в качестве растворителя преимущественно применяются серная кислота, бикарбонат аммония, карбонат и бикарбонат натрия. Преимущества и недостатки этих растворителей, а также условия, определяющие их выбор, подробно описаны в специальной литературе [9].

Значительное усиление процесса выщелачивания достигается также при участии бактерий. Например, тионовые бактерии *Thiobacillus ferrooxidans* могут быть использованы для извлечения меди, никеля, цинка, мышьяка, кадмия, золота и других металлов. В России и Канаде в настоящее время разрабатываются методы бактериального выщелачивания мышьяка и извлечения мельчайших частиц золота из прочных золотосодержащих концентратов перед их подверганием цианированию.

Следует отметить, что в период с 2010 по 2013 год на месторождении Семизбай проводились исследования, направленные на выявление способности определенных хемолитоавтотрофных микроорганизмов использовать энергию для своего роста путем окисления восстановленных форм железа с образованием активной формы трехвалентного железа.



Из проведенных исследований выяснилось, что железooksисляющие микроорганизмы, такие как *A. Ferrooxidans*, способны преобразовывать ионы двухвалентного железа в трехвалентные и одновременно увеличивать количество кислотных остатков глюкуроновой кислоты до трех. Биологически полученное трехвалентное железо обладает более высокой окислительной активностью по сравнению с химически полученным сульфатом трехвалентного железа, примерно на 20%.

Исследования также показали, что использование бактерий, иммобилизованных на твердых носителях, значительно повышает скорость биоокисления. Эффективность этого метода существенно увеличивается с 1-2 г/л железа в час до 10-15 г/л в час, а в некоторых случаях может достигать более 40 г/л в час. В результате работы были проведены исследования бактериального выщелачивания в условиях высокой сложности природных условий, и приведены основные обоснования применения данного метода в контексте месторождения Семизбай.

На месторождениях Южный и Северный Карамурун в Казахстане проведены исследования руд и воздействия изменения температуры на процесс выщелачивания. Обнаружено, что с увеличением температуры (от 20°C до 30°C и 50°C) происходит заметное ускорение процесса выщелачивания, сопровождаемое повышением содержания урана в растворах при одновременном снижении удельных расходов растворов. Влияние температуры растворов на скорость выщелачивания имеет линейный характер в пределах исследованных температур (20÷50°C).

Кроме того, ведутся исследования по применению новых растворителей. Например, на предприятиях России проводились эксперименты по процессу пересмотра выщелачивания урана с использованием низкомолекулярных кислот жирного ряда. Эти низкомолекулярные жирные кислоты, являющиеся отходами от производства синтетических жирных кислот в нефтехимической промышленности, могут быть использованы как самостоятельные выщелачивающие реагенты или как добавки к растворам серной кислоты. Это способствует интенсификации процесса извлечения урана, а также сокращает расход окислителя.

Также проводятся постоянные исследования интенсификации процесса выщелачивания с использованием искусственных окислителей.

Они необходимы в случае:

- Eh в подземных водах меньше -25 мВ;
- в подземных водах присутствует H_2S или в процессе ПСВ образуется H_2S ;
- в ВР соотношение Fe^{3+}/Fe^{2+} меньше единицы, либо содержание Fe^{3+} меньше 0,5 г/л.

В настоящее время в качестве окислителей рассматриваются кислород воздуха, перекись водорода и очищенное трёхвалентное железо в виде $Fe^2(SO_4)_3$. В промышленном масштабе кислород используется на месторождениях Узбекистана, перекись водорода – на месторождении Семизбай. Для Шу-Сарысуйских и Сырдарьинских месторождений, чья доля в добыче урана РК составляет около 98% окислители массового применения не нашли, хотя технические обоснования и расчеты эффективности использования периодически рассматриваются с середины 70-х годов прошлого века.

При отработке Зауральских месторождений, приуроченных к древним долинам и испытавших масштабное вторичное восстановление, успешно используется нитрит натрия ($NaNO_2$). А также проводились испытания по использованию бихромата калия ($K_2Cr_2O_7$) [9].

В результате проведенных экспериментов было подтверждено, что использование возвратных растворов без предварительного окисления железа приводит к низкой степени выщелачивания урана. Повышение содержания серной кислоты в этих растворах приводит к увеличению выщелачивания урана, но увеличение концентрации H_2SO_4 в три раза приводит к незначительному увеличению этого процесса всего на 4-5%. В то

время как добавки нитрита натрия и бихромата калия способствуют значительному росту концентрации урана в продуктивных растворах, превышая эффект, полученный при использовании выщелачивающих растворов с высокой концентрацией серной кислоты, и степени извлечения урана.

В ходе сравнения двух окислителей, использованных в экспериментах, становится очевидным, что применение бихромата калия привело к значительно более эффективному извлечению урана из образцов керна Далматовского месторождения урана, чем использование нитрита натрия. Тем не менее, учитывая высокий класс опасности соединений шестивалентного хрома на стадии опытно-промышленных испытаний технологии, рекомендуется предпочтительно использовать нитрит натрия [10].

На практике промышленных испытаний отмечено, что при разложении нитрита натрия одним из продуктов образуется веселящий газ N_2O , который также колюматрирует поры. В целом, за прошедшие десятилетия, начиная с внедрения в промышленную разработку месторождений урана метода ПСВ, проведен огромный объем лабораторных и натурных исследований процесса на рудах различных месторождений в различных странах.

Анализ различных методов интенсификации выщелачивания показывает, что все они ускоряют процесс и повышают степень извлечения полезного компонента в несколько раз [11]. Тем не менее, эти методы не являются универсальными и могут применяться лишь в зависимости от условий конкретных месторождений.

Один из способов повышения степени окисления заключается в насыщении выщелачивающего раствора кислородом. Практика скважинного подземного выщелачивания подтверждает, что эффективность процесса добычи урана тесно связана с массой кислорода, растворенного в подаваемых (рабочих) растворах. Количество растворенного воздуха, в свою очередь, определяется величинами гидравлических напоров, формируемых при взаимодействии нагнетательных и дренажных (разгрузочных, откачных) технологических скважин.

В ходе развития этой технологии был изучен процесс нагнетания в пласт сжатого воздуха, а также предварительное насыщение воздухом рабочих растворов. В опытном блоке 3 на участке подземного выщелачивания – месторождение Учкудук 10, воздух нагнетали под давлением 2-4 кг/см², до насыщения пород продуктивного пласта кислородом – 0,1 кг/т, что соответствовало величине порового объема [4,6].

Через 30 дней после запуска откачных скважин, содержание урана в продуктивных растворах достигло максимального значения – 35 мг/л, при содержании HCO^3 - 270 мг/л. В сравнении, в блоках сернокислотного режима выщелачивания (без подачи кислорода воздуха) содержание урана в продуктивных растворах достигало максимума в 10 мг/л. Подача воздуха

осуществлялась через нагнетательные скважины с использованием эжектора воздуха через перфорированный шланг, опущенный на забой скважин.

В результате экспериментов было выявлено, что минимальная степень насыщения воздуха, влияющая на интенсивность перехода урана в раствор, начинается с уровня 0,1 кг/т рудной массы.

В основном опробовались три технологические схемы подачи воздуха:

- нагнетание сжатого воздуха и вытеснение пластовых вод продуктивного горизонта за контуры экспериментального участка;

- увеличение давления нагнетаемого воздуха для повышения степени насыщения рабочих растворов;

- нагнетания воздуха через специально разработанный диспергатор, позволяющий не допустить образование в подземных водах диспергированных нерастворимых воздушных пузырьков, приводящих к коагуляции парового объема рудного пласта.

Для насыщения воды кислородом воздуха используют различные системы аэрации, такие как пневматические, механические, гидравлические и комбинированные. В настоящее время наибольшее распространение получили пневматические аэраторы – диспергаторы воздуха. В зависимости от размеров пузырьков воздуха, формирующихся на выходе диспергатора, пневматические аэраторы условно подразделяются на 4 типа: безпузырчатые (размер пузырьков меньше 0,1 мм), мелкопузырчатые (размер пузырьков 1,0 – 3,0 мм), среднепузырчатые (размер пузырьков 5,0 – 8,0 мм) и крупнопузырчатые (размер пузырьков больше 10 мм). Меньший размер пузырьков делает аэратор более эффективным, однако слишком маленький размер может не обеспечивать необходимого перемешивания. В данном исследовании использовались аэраторы второго типа с пузырьками размером 1-3 мм.

Полимерный аэрационный рукав аэратора изготовлен из полиуретана (есть варианты из полипропилена), на котором выполнена микроперфорация с использованием лазерной градуировки. При подаче воздуха аэрационная пленка раздувается, расправляется, устраняя биоотложения и наросты с поверхности рукава, и происходит микропузырчатая аэрация. После отключения воздухоподачи под действием давления столба жидкости микропоры закрываются, и пленка сжимается, исключая попадание воды внутрь аэратора.

При расходе 5 м³ воздуха в час и SOTE 32% количество кислорода, перешедшего в раствор, достаточно для окисления 53,76 кг Fe(II). При скорости подачи 1,6 м³ на скважину на 16 скважин общий объем раствора составит 25,6 м³, в которых при содержании железа 1 г/л будет 25,6 кг.

Известно, что различные факторы, такие как температура и давление, влияют на степень насыщения раствора кислородом. Например, при увеличении температуры раствора с 0°C до 70°C, степень насыщения раствора кислородом снижается с 14,6 мг/л до 2,9 мг/л. Снижение

температуры раствора в условиях подземного скважинного выщелачивания может снизить извлечение урана.

Также, изменение гидравлических напоров (90, 60 и 300 м) влияло на содержание растворенного воздуха в технологических растворах (12, 25 и 100 мг/л). Концентрация урана в этих растворах при pH=3-4 составляла 7, 20 и 50 мг/л, соответственно.

Для окисления U(IV) до U(VI) в карбонатных средах применяют различные окислители, включая кислород, озон, пероксид водорода, тиосульфаты щелочных металлов или аммония, гипохлорит натрия и другие, а также процессы анодного окисления [9].

Экспериментальные исследования, проведенные авторами работы [10], подтвердили, что степень выщелачивания урана возвратными растворами без предварительного окисления железа является очень низкой. Увеличение концентрации серной кислоты в возвратных растворах приводит к некоторому повышению степени выщелачивания урана. Однако увеличение концентрации серной кислоты практически в три раза приводит к увеличению степени выщелачивания всего на 4-5%.

В качестве окислителя может служить тип бактерий *Ferrooxidans*, способных окислять двухвалентное железо (Fe^{2+}) до трехвалентного (Fe^{3+}). Биологическое выщелачивание, используемое для выщелачивания урана из сульфидных руд, представляет собой эффективную альтернативу, особенно при работе с низкосортными и сложными рудами, которые не являются экономически целесообразными для традиционных методов добычи [11].

Другим использованным окислителем, направленным на повышение эффективности выщелачивания урана, является азотистая кислота или ее соли. Известно, что при одновременном присутствии железа и нитрит-ионов окисление урана происходит по каталитическому механизму, где нитрит-ионы выступают в роли катализатора окисления железа, а затем железо окисляет уран [12]. Также для интенсификации процессов выщелачивания могут применяться озон и пероксид водорода. Известно, что пероксид водорода в выщелачивающем растворе обладает высокой окислительной активностью по отношению к урану [13,14].

Вышеупомянутые методы активации выщелачивающих растворов вызывают несомненный интерес, но им присущ целый ряд недостатков.

Применение химических методов - таких как азотная и азотистая кислоты, чистый кислород и пероксид водорода, в процессе окисления U(IV) до U(VI) в карбонатных средах обуславливает ряд технологических и безопасностных аспектов.

Химические реагенты, такие как азотная и азотистая кислоты, являются опасными веществами, и их транспортировка требует соблюдения строгих правил и норм безопасности. Перевозка чистого кислорода и пероксида водорода также подразумевает использование специализированных контейнеров и средств транспорта, учитывая их высокую реакционную активность.

Химические реагенты, особенно агрессивные кислоты, требуют особых условий хранения, например, хранение в специальных емкостях, защищенных от воздействия внешней среды. Чистый кислород и пероксид водорода также требуют хранения под контролем, чтобы избежать возможных рисков и аварий. Дозирование химических реагентов при использовании этих методов является важным этапом. Это требует точного и надежного оборудования для обеспечения правильных пропорций реагентов и избежания перерасхода или недостатка.

Применение химических методов обуславливает необходимость использования технически сложного оборудования, такого как реакторы, системы дозирования, аэраторы и другие устройства, обеспечивающие эффективное проведение процессов окисления. Использование химических методов требует повышенных мер безопасности, включая обеспечение персонала специальными средствами защиты, проведение обучения по безопасности и регулярную проверку оборудования на соответствие стандартам безопасности.

Все эти аспекты делают применение химических методов для окисления U(IV) в карбонатных средах более сложным и требующим внимательного управления, чтобы минимизировать риски и обеспечить эффективное выполнение процесса. [15].

Применение пероксида водорода - одним из значительных недостатков является высокий расход пероксида водорода. Это может существенно увеличивать операционные расходы и делать процесс экономически неэффективным. А также точное дозирование пероксида водорода в выщелачивающий раствор требует сложных технических систем. Проблемы с точностью дозирования могут привести к неравномерному распределению реагента и нежелательным эффектам. Процесс интенсификации с использованием пероксида водорода может создавать дополнительные проблемы, связанные с повышенным давлением в системе. Это требует дополнительных технических мер безопасности, так как пероксид водорода может вызывать интенсивные химические реакции. Требуется внимательный контроль параметров, таких как pH и температура, чтобы избежать нежелательных последствий и обеспечить эффективное выщелачивание урана потому что он является химическим веществом, требующим строгих мер безопасности. Также существует потенциальный риск для окружающей среды, особенно при его крупномасштабном использовании.

Но главной проблемой является - высокий расход пероксида водорода, сопутствующие технические сложности могут сделать этот метод малопригодным с экономической точки зрения, особенно при наличии более эффективных альтернативных методов выщелачивания.

Бактериальное выщелачивание - урана представляет собой биотехнологический метод, который включает в себя использование специальных бактерий, таких как *Thiobacillus ferrooxidans*, способных

окислять двухвалентное железо (Fe^{2+}) до трехвалентного (Fe^{3+}), а также урана. Этот метод, также требует ряда особенных условий:

Бактерии, участвующие в процессе выщелачивания, требуют определенных условий для своего выращивания и поддержания активности. Это включает в себя оптимальные температурные, рН- и питательные параметры. Тщательное контролирование этих условий необходимо для поддержания жизнеспособности бактерий на протяжении всего процесса.

Перед внедрением бактериального выщелачивания необходимо провести анализ месторождения, чтобы определить его пригодность для данного метода. Это включает в себя оценку содержания урана, типа руды и других факторов, влияющих на эффективность процесса. Регулирование температуры, рН и содержания кислорода в среде – ключевые аспекты обеспечения оптимальных условий для жизнедеятельности бактерий. Мониторинг и корректировка этих параметров должны проводиться систематически для поддержания высокой активности бактерий.

Бактерии требуют кислорода для своего обитания, и эффективная система аэрации обеспечивает поддержание оптимального содержания кислорода в растворе. Поддержание равномерного распределения кислорода во всей системе помогает избежать образования зон с недостатком кислорода.

Обеспечение биологической безопасности – важный аспект в работе с живыми микроорганизмами. Это включает в себя меры по предотвращению нежелательного распространения бактерий в окружающую среду. Регулярный мониторинг параметров процесса, таких как содержание металлов и кислотности, а также забор проб для анализа, необходим для контроля эффективности бактериального выщелачивания. [16].

Озонирование раствора для выщелачивания урана также сопряжен с определенными технологическими и экономическими аспектами.

Процесс озонирования требует значительных энергетических затрат на генерацию высокой концентрации озона. Генерация озона может производиться различными способами, например, с использованием ультрафиолетового или коронного разряда, и каждый из них имеет свои энергетические требования. Энергозатраты могут существенно влиять на экономическую целесообразность метода, особенно в случае высоких стоимостей электроэнергии.

Специализированное оборудование необходимо для генерации и интенсивной подачи озона в раствор. Это включает в себя озонаторы, реакторы и системы для равномерного распределения озона в растворе. Затраты на покупку, установку и техническое обслуживание такого оборудования являются дополнительным аспектом, который следует учитывать.

Эффективность процесса озонирования зависит от правильного контроля концентрации озона в растворе. Это требует использования датчиков и систем автоматического регулирования, что также влияет на

стоимость оборудования и его эксплуатацию. Озон является окислителем и может представлять опасность для здоровья человека при высоких концентрациях. Обеспечение безопасности персонала, а также разработка и соблюдение стандартов по предотвращению аварийных ситуаций, требует дополнительных усилий и ресурсов. Озонирование может также оказывать воздействие на окружающую среду, и необходимо внимательное слежение за выбросами озона и его воздействием на водные экосистемы.

Требуется оптимизация процесса озонирования для достижения максимальной эффективности при минимальных затратах. Это включает в себя проведение исследований и тестирование различных параметров, таких как время озонирования и концентрация озона.

Учитывая вышеперечисленные аспекты, реализация озонирования для выщелачивания урана требует комплексного подхода, объединяющего техническую оснастку, инженерные решения и оценку экономической целесообразности.

Из вышеприведенного можно сделать вывод, что различные способы интенсификаций добычи урана путем применения различных окислителей, требуют значительных капитальных и эксплуатационных затрат, а также на охрану окружающей среды.

Для решения данной проблемы предлагается использовать кислород воздуха как окислитель для интенсификации процессов выщелачивания.

Кислород — слабо растворимый в воде газ. Его растворимость прямо пропорциональна, парциальному давлению кислорода над раствором и в существенной степени зависит также от температуры и состава водной фазы.

В ходе развития технологии изучался процесс инъекции сжатого воздуха в пласт и предварительного насыщения рабочих растворов кислородом. Например, на месторождении Учкудук в эксперименте блока 3 подземного выщелачивания воздух инжесктировали под давлением 2-4 кг/см², достигая насыщения пород продуктивного пласта кислородом в объеме 0,1 кг/т, соответствующем поровому объему [17]. Через 30 дней после запуска откачных скважин, содержание урана в продуктивных растворах достигло 35 мг/л, при содержании HCO₃ - 270 мг/л. В сравнении, в блоках с сернокислотным режимом выщелачивания (без инъекции воздуха) содержание урана в продуктивных растворах не превышало 10 мг/л.

Не менее важной задачей является разработка технологий насыщения выщелачивающего раствора, кислородом воздуха. На первый взгляд, очевидным способом насыщения кислородом раствора, является подача газа с помощью воздухоподающего шланга из компрессора, подсоединенного к магистральной трубе, но проблема состоит в том, что на предприятиях, в самой магистральной трубе проходит от 60 м³/час до 130 м³/час раствора. В качестве альтернативы, можно подавать воздух непосредственно в маточный раствор, который находится под открытым небом, но так как на месте подачи воздуха будет относительно низкое давление, то почти весь кислород

улетучится мгновенно, который сведет все попытки интенсификаций раствора на нет.

2.2 Предлагаемая технология

Учитывая вышеприведенные факторы, для насыщения выщелачивающего раствора кислородом предлагается применять трубку Вентури. (Рисунок 1)

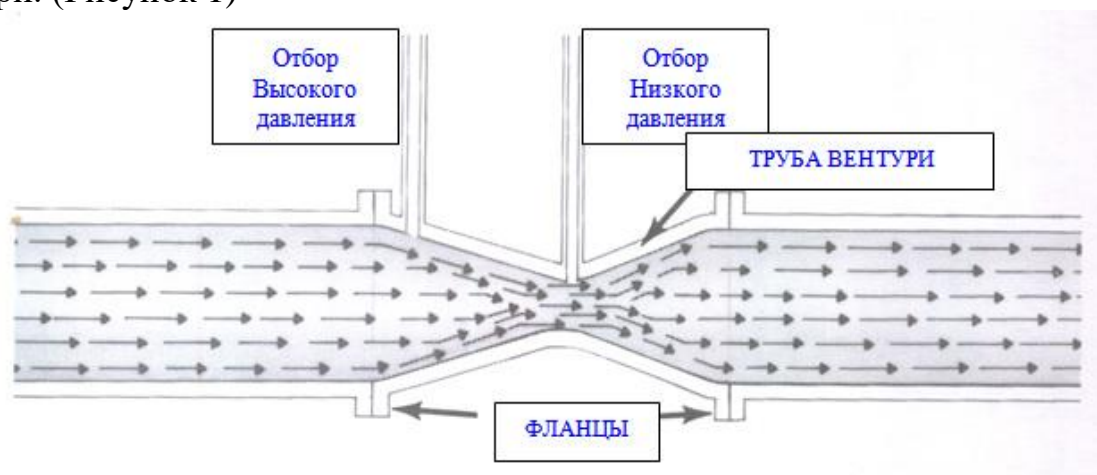


Рисунок 1 – Трубка Вентури

Трубка Вентури — это короткая по длине труба специальной конструкции с сужением или уменьшением диаметра посередине и отверстием для всаса воздуха. При прохождении раствора через сужение трубки Вентури, происходит увеличение скорости потока с одновременным всасом воздуха [18]. Согласно закону Бернулли, тот объем жидкости либо выщелачивающего раствора который проходит через трубу большего диаметра тот же объем жидкости пройдет через узкую часть за единицу времени. Но чтобы обеспечить одинаковый объем жидкости условно в двух точках, то по закону Бернулли скорость потока жидкости в узкой части трубы увеличивается. Чем выше скорость потока, тем ниже статическое давление. Соотношение скорости жидкости и статического давления прямо пропорционально, то есть увеличивая скорость потока жидкости уменьшив диаметр трубы можно уменьшить статическое давление до такого значения, что можно обеспечить всас воздуха из отверстия в зауженной части трубы.

Оно сопровождается активным поперечным перемешиванием, непосредственно в перемещающейся жидкости, после раствор насыщенный газом переходит обратно в область большого диаметра, в данной области скорость потока уменьшается, где раствор переходит обратно к ламинарному режиму течения жидкости и при этом пропорционально увеличивается статическое давление, практика показывает, что давление в значительной степени влияет на растворимость газов в воде. С ростом давления растворимость кислорода воздуха повышается. На растворимость жидких и твердых веществ давление почти не оказывает

влияния. Констатируя данные факты можно утверждать, что данная технология позволяет с наименьшими затратами обогащать рабочий раствор кислородом и исключает возможность газовой коагуляции.

2.3 Методика проведения исследования

Для сравнения результатов выщелачивания с насыщением кислородом, были проведены лабораторные работы с базовой и предлагаемой технологиях. С этой целью были отобраны с восточного и западного флангов участка месторождения Центральный Мынкудык керновые материалы со скважин где приведен рисунок 2



Рисунок 2 – Керновый материал в герметичной емкости

Полевое определение кернового материала - песок серый. Отбор кернового материала произведен с различной глубины скважин с интервалом через 20 см, каждый керн описан. Всего было отобрано по 6 м керна с каждого фланга. Для определения среднего содержания урана в керновом материале, все керны были измельчены, средние содержания урана в керновых материалах восточного и западного флангов соответственно 0,035% и 0,045%.

Для проведения лабораторных работ при базовой и предлагаемой технологии, измельченный керновый материал был утрамбован в специальной трубе и размещен в прозрачный сосуд.

Суть базовой технологии, состоит в том, что керновый материал выщелачивался с емкости для ВР без подключения насоса и трубки вентури, под действием силы гравитации, раствор перемещался по трубке к герметичной емкости для керна с керновым материалом, объем и скорость подачи жидкости регулировался с помощью запорных арматур. Время выщелачивания составляло 9 часов, количество выщелачивающего раствора 12 литров. Пробы продуктивного раствора были отобраны через каждый час, всего было отобрано 18 проб, 9 - с керном с восточного и 9 - с западного фланга.

Модельная лабораторная установка (рисунок 3) состоит из емкости с выщелачивающим раствором, сосудом с керновым материалом и емкости для продуктивного раствора.

К 50 литровой пластиковой емкости был подсоединен гибкий шланг длиной 60 сантиметров, затем для обеспечения необходимой скорости потока жидкости был установлен горизонтальный насос. Жидкость, с высокой скоростью, который обеспечивает насос, проходит через трубку Вентури. Раствор, насыщенный кислородом воздуха сливается в емкость для измерения концентраций растворенного кислорода в жидкости. Бак для измерения кислорода в жидкости состоит из герметичной крышки с одной стороны и электродом с другой. Емкость сконструирована таким образом, что в герметичной крышке было просверлено отверстие для наполнения сборника водой с воздухом, на дне сосуда расположен электрод для замера растворенного кислорода.

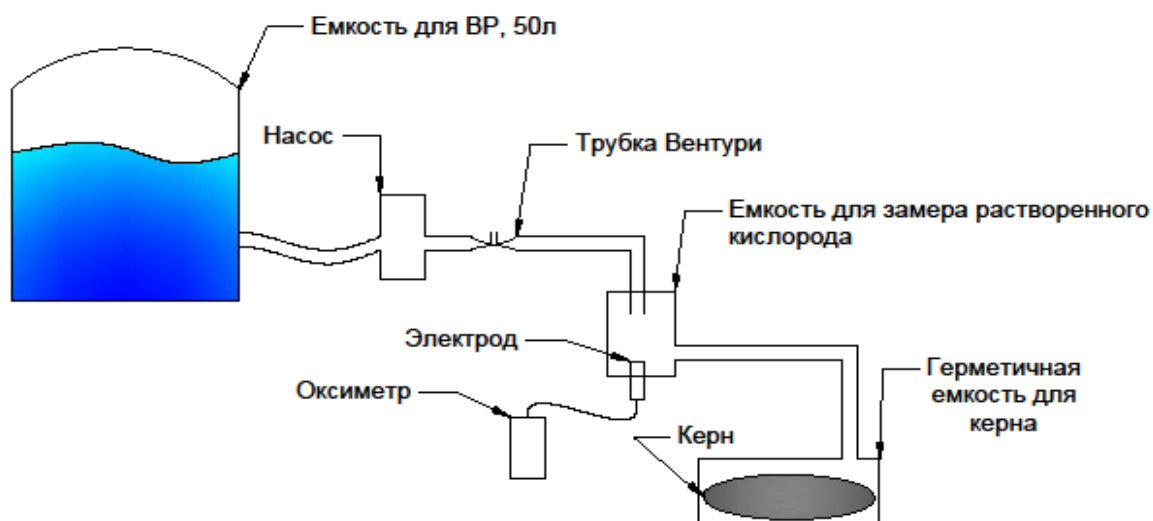


Рисунок 3 - Модельная лабораторная установка

Концентрация кислоты составляла 20 г/л, величина окислительно-восстановительного потенциала (ОВП) была определена с помощью прибора ИТ-1101, а содержание урана - в лаборатории рудника. Время выщелачивания составляло 9 часов, количество выщелачивающего раствора 12 литров. Пробы продуктивного раствора были отобраны через каждый час, всего было отобрано 18 проб, 9 - с керном с восточного и 9 - с западного фланга.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДЛАГАЕМОЙ ТЕХНОЛОГИИ

3.1 Влияние скорости потока жидкости на насыщение кислородом

В производственных условиях, в зависимости от параметров и производительности технологического блока в закачные скважины подается различный объем выщелачивающего раствора. Для установления влияния скорости потока и объема, подаваемого раствора на степень насыщения кислородом были проведены лабораторные работы. Результаты лабораторных работ по установлению влияния скорости потока и объема, подаваемого раствора на степень насыщения кислородом сведены в таблицу 2.

Таблица 2 - Влияния скорости потока и объема, подаваемого раствора на степень насыщения кислородом

Скорость потока (V), м/сек	Объем воздуха (Q _p), л/час	Концентрация кислорода(q), мг/л
0		4,03
0,3	60,0	6,3
0,65	110,0	7,8
1,0	97,0	8,2
1,8	97,0	8,5

Как видно из таблицы 2, в исходном растворе концентрация кислорода составляет 4,03 мг/л, а уже при скорости потока раствора 0,3 м/сек, концентрация кислорода достигает 6,3 мг/л. Дальнейшее увеличение скорости потока раствора с 0,3 м/сек до 1,8 м/сек, приводит к повышению концентрации кислорода в растворе с 6,3 мг/л до 8,5 мг/л, т.е. степень насыщения раствора кислородом повышается более чем в два раза, чем в исходном растворе. Необходимо отметить, что при повышении скорости потока до 0,7 м/сек наблюдается резкой повышение концентрации кислорода в растворе, а при дальнейшем повышении скорости потока до 1,8 м/сек наблюдается незначительное изменение концентрации кислорода в растворе. При этом, максимальная концентрация кислорода в растворе достигается при прохождении через трубопровод объема воздуха 97 л/час, дальнейшее увеличение объема воздуха до 110 л/час наоборот приводит к снижению концентрации кислорода до 7,8 л/час. Отсюда можно сделать вывод о том, что с изменением диаметра трубопровода есть максимальная скорость потока раствора и соответственно объем воздуха при которых обеспечивается максимальное насыщение выщелачивающего раствора кислородом.

Опыты показали, что применения трубки Вентури для насыщения раствора кислородом весьма эффективны и относительно менее трудоемкий процесс, так как, традиционно, аэрацию (насыщение кислородом) жидкости

осуществляют при помощи дорогостоящих установок, такие как компрессор, оксигенатор с применением чистого кислорода, перекись водорода и т.д. Суть компрессора, состоит из насильственного нагнетания воздуха в жидкость с помощью труб погруженного в воду, но максимальное насыщение кислородом воздуха в растворе будет аналогично с предлагаемой нашей технологией а также трудно осуществим в предприятиях где необходимо насытить кислородом большой объем жидкости. Применение оксигенатора вместе с чистым кислородом можно добиться высокого обогащение воды кислородом, который достигает до 50 мг/л. Но эксплуатировать оксигенатор очень сложно и дорогостоящее в промышленных масштабах. Хороший результат показывает использование перекиси водорода в выщелачивающем растворе по части насыщения кислородом, но данный химический раствор является весьма дорогостоящим в промышленности, что сразу сказывается в экономической целесообразности.

Обработкой данных лабораторных работ получены зависимости концентрации кислорода в растворе от скорости потока раствора и объема раствора (рисунок 4).

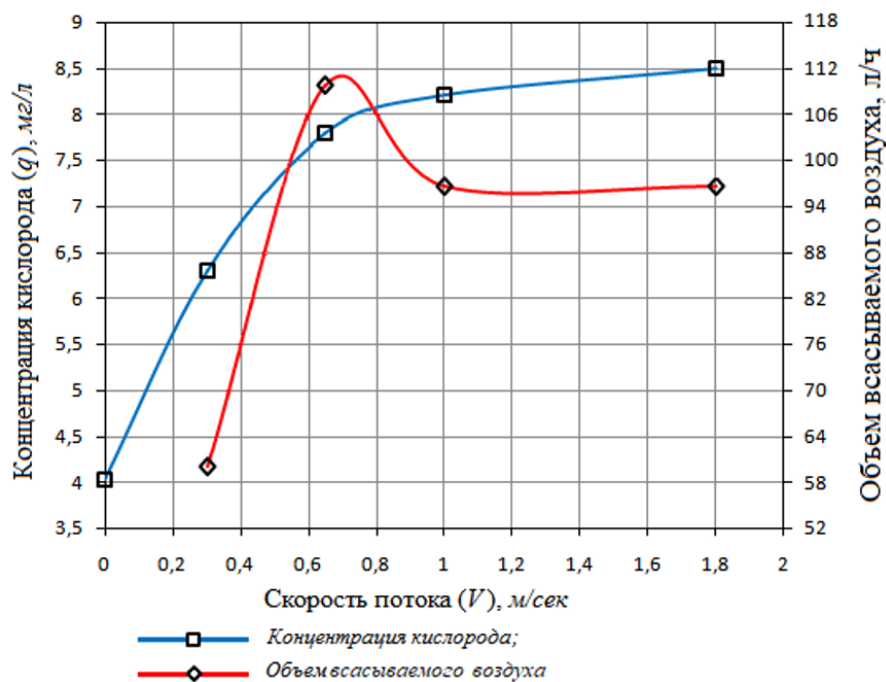


Рисунок 4 - Зависимости концентрации кислорода в растворе от скорости потока и объема раствора

После установления оптимальной скорости потока раствора, дальнейшие исследования были проведены при скорости потока, которая обеспечивает максимальное насыщение кислородом 0,7 м/сек. Далее, необходимо было установить количество растворяемого кислорода и коэффициента растворимости кислорода от объема всасываемого воздуха. При этом, объем раствора составляла 7,0 л, время насыщения раствора

воздухом изменяли от 0 до 2 мин 10 сек., скорость всасывания воздуха через трубку Вентури изменялся от 1,13 л до 3,25 л, скорость потока 0,7 м/с, расстояние от места насыщения кислородом до пласта изменяли до 80м. Всего было проведено 5 лабораторных работ, сперва с исходным раствором без насыщения, затем с насыщением раствора кислородом. Результаты проведенных исследований приведены в таблице 3.

Таблица 3 - Количество растворяемого кислорода и коэффициента растворимости кислорода от объема всасываемого воздух

№ пробы	Время насыщения раствора t, с	Объем всасываемого воздуха, V_v , л	Количество подаваемого кислорода на 1 л раствора, Q, мг/л	Количество растворяемого кислорода на 1 л раствора, Q_p , мг/л	Коэф-т растворимости, K_p , %
Исх раствор	-	-	-	1,1	-
ПР1	130	3,25	141,3	9,12	6,5
ПР2	90	2,25	97,85	9,06	9,2
ПР3	60	1,5	65,24	8,8	13,5
ПР4	45	1,13	48,93	8,2	16,8

Как видно из таблицы 3, с увеличением времени насыщения раствора, увеличивается количество подаваемого кислорода на 1 л раствора и количество растворяемого кислорода, но снижается коэффициент растворимости. Например, при увеличении времени насыщения раствора с 45 секунд до 130 секунд, количество подаваемого кислорода на 1 л раствора и количество растворяемого кислорода на 1 л раствора увеличивается соответственно с 48,9 мг/л до 141,3 мг/л и 8,2 мг/л до 9,12 мг/л. Коэффициент растворимости при этом снижается с 16,8% до 6,5%, т.е. из 48,9 мг/л подаваемого кислорода на 1 л раствора в жидкую фазу переходит 8,2 мг/л, а из 141,3 мг/л - 9,12 мг/л.

Далее исследования были проведены для выявления влияния концентрации серной кислоты на насыщение выщелачивающего раствора кислородом. При этом концентрацию серной кислоты изменяли от 1 г/л до 23 г/л. Результаты лабораторных работ сведены в таблицу 4

Таблица 4 Изменение насыщения выщелачивающего раствора кислородом от концентрации серной кислоты

Концентрация серной кислоты, г\л	1,0 без насыщения)	1,0	4,0	7,0	10,0	13,0	18,0	23,0
Концентрация кислорода, г/л	4,94	9,11	7,58	8,0	7,24	9,30	8,50	9,52

Обработкой данных лабораторных работ получена зависимость насыщения выщелачивающего раствора от концентрации серной кислоты (рисунок 5).



Рисунок 5 - Зависимость насыщения выщелачивающего раствора от концентрации серной кислоты

Как видно из рисунка 5, до насыщения выщелачивающего раствора кислородом и концентрации серной кислоты от 1 г/л, концентрация кислорода в растворе было 4,94 мг/л, после насыщения соответственно составляла 9,11 мг/л. С повышением концентрации серной кислоты до 10 г/л, насыщение кислородом заметно снизился до 7,5 мг/л, дальнейшее повышение концентрации серной кислоты привело к повышению насыщения до 9,5 мг/л.

В целом, повышение концентрации серной кислоты приводит к повышению насыщения раствора кислородом.

3.2 Исследование по определению времени достижения максимального насыщения раствора кислородом и влияния расстояния транспортировки на изменение концентрации кислорода, величину ОВП и Fe(III) в выщелачивающем растворе.

После установления оптимальной скорости потока раствора, дальнейшие исследования были проведены при скорости потока, которая обеспечивает максимальное насыщение кислородом 0,7 м/сек. При проведении лабораторных работ по установлению изменения насыщенности раствора кислородом и ее влияния на величину ОВП, время отбора пробы составляло 251 минут, через определенный интервал времени. Результаты лабораторных исследований по установлению времени насыщения раствора кислородом, а также изменение величины ОВП от концентрации кислорода сведены в таблицу 5. При этом, концентрацию серной кислоты составляло 10 г/л.

Таблица 5 – Изменение насыщенности раствора кислородом и величины ОВП от времени

№	Время отбора пробы, минут	Насыщение раствора кислородом, мг/л	ОВП, mV
1	До насыщения	6,3	332
2	После насыщения	10,45	
3	6	10,0	
4	9	9,98	
5	11	9,96	334
6	15	9,93	
7	25	9,86	
8	30	9,77	337
9	40	9,68	
10	50	9,54	
11	65	9,50	339
12	После насыщения 67	10,36	
13	99	9,92	
14	128	9,38	343
15	После насыщения 131	10,03	

Как видно из таблицы 5, в исходном выщелачивающем растворе концентрация кислоты составляло 6,3 мг/л, сразу после насыщения раствора кислородом с помощью трубки Вентури, концентрация кислорода повышается до 10,45 мг/л, т.е на 66%. С течением времени, первоначальная концентрация кислорода постепенно снижается и после 65 минут, концентрация кислорода в растворе снизился до 9,5%, при этом величина ОВП повысился с 332 mV до 339 mV. Максимальное значение ОВП 343mV было достигнуто через 128 минут после насыщения раствора кислородом, далее значение ОВП оставался на уровне 340 mV.

Обработкой данных таблицы 5 были получены зависимости изменения насыщенности раствора кислородом и величины ОВП от времени (рисунок 6)

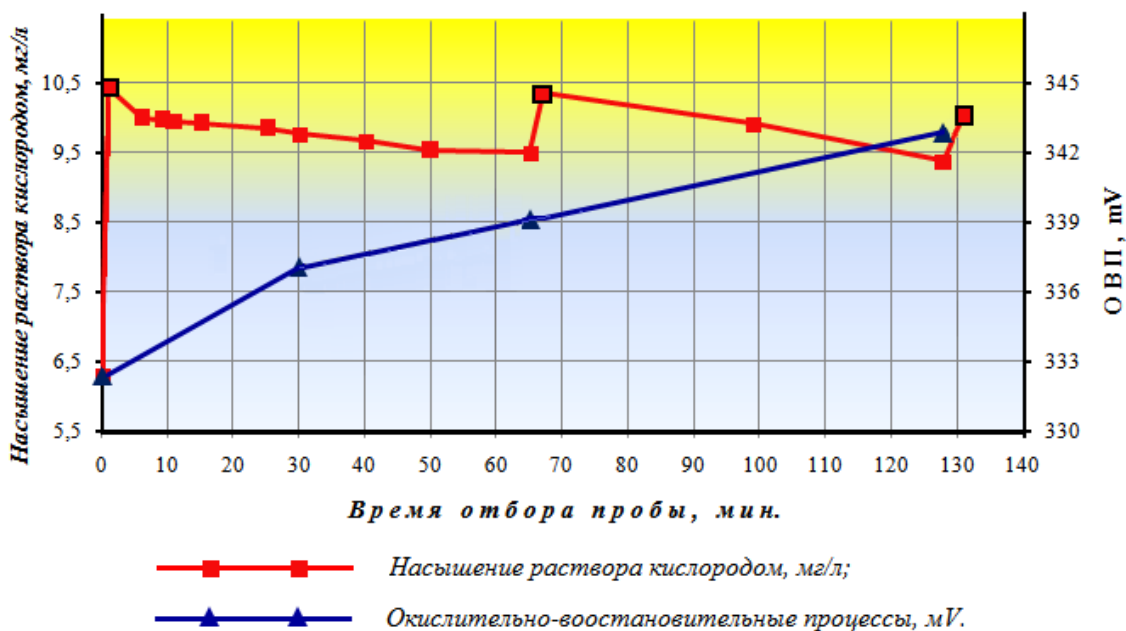


Рисунок 6 – Изменение насыщенности раствора кислородом и величины ОВП от времени

Далее были проведены лабораторные работы по установлению изменения концентрации кислорода, величины ОВП и Fe(III) в растворе от расстояния после насыщения. При этом расстояние транспортирования раствора изменяли от 0 м до 60 м, концентрацию серной кислоты 10 г/л, концентрация кислорода в растворе составляло 8,4 мг/л. Результаты лабораторных работ сведены в таблицу 6

Таблица 6 – Изменение концентрации кислорода, величины ОВП и Fe(III) в растворе от расстояния после насыщения

Расстояние транспортировки, м	Концентрация кислорода, мг/л	ОВП, mV	Содержание Fe(III), мг/л
ВР(0)	8,4	436	434
ПР(0)	10,48	437	462
ПР(10)	11,3	439	467
ПР(20)	12,3	440	476
ПР(30)	12,5	440,6	455
ПР(40)	12,8	440	426
ПР(50)	13,2	438,5	442
ПР(60)	13,79	437	448

Как видно из таблицы 6, сразу после насыщения раствора кислородом, его концентрация в растворе повышается с 8,4 мг/л до 10,48 мг/л, т.е. повышается на 24%, при этом величина ОВП изменяется с 436 mV до 437 mV, а содержание Fe(III) – с 434 мг/л до 462 мг/л. С увеличением расстояния

транспортирования с 0м до 60м наблюдается повышение концентрации кислорода до 13,8 мг/л, т.е. повышается на 65%. При длине транспортирования 20м, величина ОВП повысилась только до 440 мV, а содержание Fe(III) до 476 мг/л, т.е. на 10%, дальнейшее увеличение расстояния транспортирования до 60м наоборот привело к снижению величины ОВП до 437 мV, а содержание Fe(III) до 448 мг/л. Обработкой данных таблицы получены зависимости концентрации кислорода, величины ОВП и Fe(III) в растворе от расстояния после насыщения (рисунок 7).

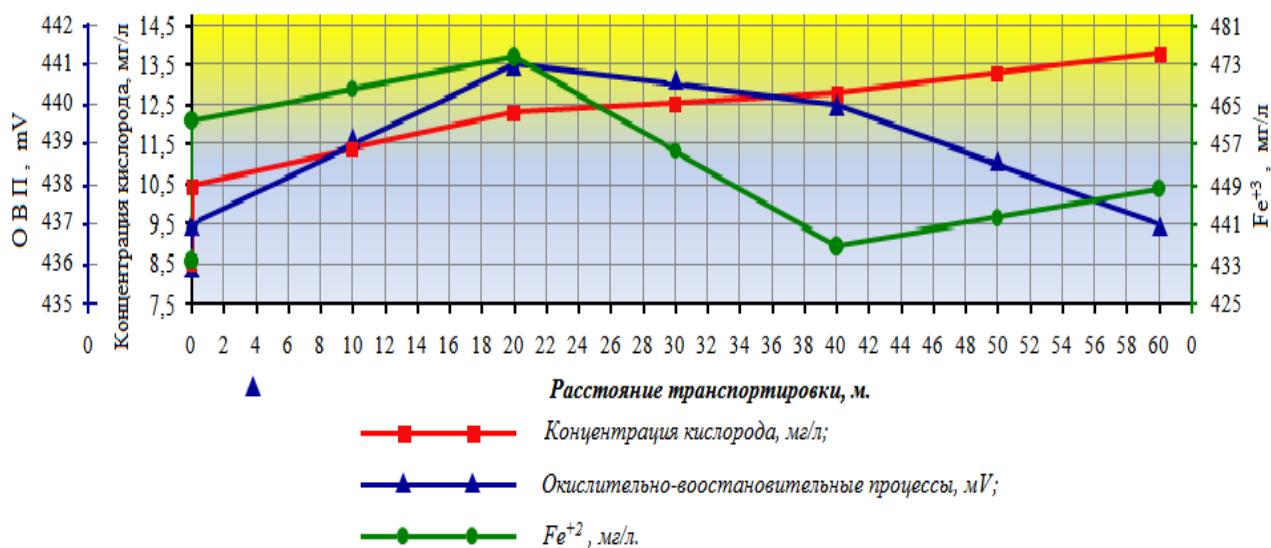


Рисунок 7 – Зависимости концентрации кислорода, величины ОВП и Fe(III) в растворе от расстояния после насыщения.

3.3 Влияние насыщения кислорода на показатели выщелачивания

В начале исследования были проведены при базовой технологии затем с насыщением выщелачивающего раствора кислородом для установления влияния насыщенного кислородом раствора на концентрацию двух-трехвалентного железа, величину ОВП и содержание урана в ПР. В исходном выщелачивающем растворе концентрация кислоты составляло 6,3 мг/л, сразу после насыщения раствора кислородом с помощью трубки Вентури, концентрация кислорода повышается до 10,45 мг/л, т.е. на 66%.

Таблица 7 – Результаты анализа содержания урана, величин ОВП, двух-трехвалентного железа (восточный фланг, керн 1)

№ проб	Fe ⁽⁺²⁾ , мг/л	Fe ⁽⁺³⁾ , мг/л	Содержание урана, мг/л	ОВП, mV	Время отбора пробы, час
ВР1	270	310	2,10	340	0
ПР1	300	318	18,4	340	1
ПР2	290	318	18,4	344	2
ПР3	362	322	18,6	345	3
ПР4	365	324	19,3	346	4
ПР5	368	324	18,7	345	5
ПР6	362	320	19,6	346	6
ПР7	360	322	20,0	346	7
ПР8	356	326	18,9	348	8
ПР9	354	320	18,8	346	9

Как видно из таблицы 7 с увеличением времени выщелачивания величина ОВП изменяется незначительно, от 340 до 348 mV. При этом концентрация Fe(III) в ВР составляла 310 мг/л и с увеличением времени выщелачивания увеличилась до 324 мг/л, но затем снизилась до 320 мг/л. Концентрация Fe(II) повысилась с 270 мг/л до 368 мг/л, но затем незначительно снизилась до 354 мг/л. За время выщелачивания содержание урана в ПР изменялось не значительно в пределах 18,4 – 20,0 мг/л. В целом среднее содержание урана в ПР составило 18,63 мг/л, концентрация Fe(II) повысилась на 27%.

Таблица 8 – Результаты анализа содержания урана, величин ОВП, двух-трехвалентного железа (западный фланг, керн 2)

№№ проб	Fe ²⁺ , мг/л	Fe ³⁺ , мг/л	Содержание урана, мг/л	ОВП, mV	Время отбора пробы, час
ВР2	288	312	1,90	334	0
ПР1 ¹	290	312	20,8	336	1
ПР2 ¹	290	310	21,25	338	2
ПР3 ¹	292	304	20,54	338	3
ПР4 ¹	289	315	20,58	340	4
ПР5 ¹	294	306	18,62	340	5
ПР6 ¹	290	304	18,22	342	6
ПР7 ¹	290	295	18,20	338	7
ПР8 ¹	288	305	18,0	340	8
ПР9 ¹	290	296	18,0	340	9

Как видно из таблицы 8 до насыщения раствора кислородом концентрация Fe(II) и Fe(III) составляла соответственно 288 и 312 мг/л, а величина ОВП колеблется в пределах с 334 до 342 mV. За время

выщелачивания содержание урана в ПР изменялось в пределах 18,0 – 21,25 мг/л. В целом среднее содержание урана в ПР составило 19,35 мг/л.

Результаты лабораторных работ по насыщению кислородом воздуха приведены в таблице 9 и 10.

Таблица 9 – Результаты анализа содержания урана, величин ОВП и двух-трехвалентного железа (восточный фланг, керн 1)

№№ проб	Fe ²⁺ , мг/л	Fe ³⁺ , мг/л	Содержание урана, мг/л	ОВП, mV	Время отбора пробы, час
ВРЗ	300	320	1,80	360,0	0
ПР10	296	331	20,91	360,8	1
ПР11	298	320	21,65	370,2	2
ПР12	298	330	24,28	373,9	3
ПР13	294	335	23,84	375,8	4
ПР14	294	338	23,46	380,6	5
ПР15	292	345	23,0	382,8	6
ПР16	294	341	23,15	387,6	7
ПР17	296	347	24,0	380,5	8
ПР18	294	347	23,20	381,6	9

Как видно из таблицы 9, до насыщения раствора кислородом концентрация Fe(II) и Fe(III) составляла соответственно 300 и 320 мг/л, после насыщения раствора кислородом и с увеличением времени выщелачивания величина ОВП возрастает с 360 до 387 mV. При этом концентрация Fe(III) повысилась до 347 мг/л, а концентрация Fe(II) незначительно снизилась до 292 мг/л. За время выщелачивания содержание урана в ПР изменялось незначительно в пределах 20,9 – 24,2 мг/л. В целом среднее содержание урана в ПР составило 23,05 мг/л, концентрация Fe(III) повысилась на 5%, а величина ОВП – на 4,7%

Обработкой данных таблицы 10 получены графики зависимостей концентрации Fe(II), Fe(III), величины ОВП и содержания урана в ПР от времени выщелачивания (рисунок 8).

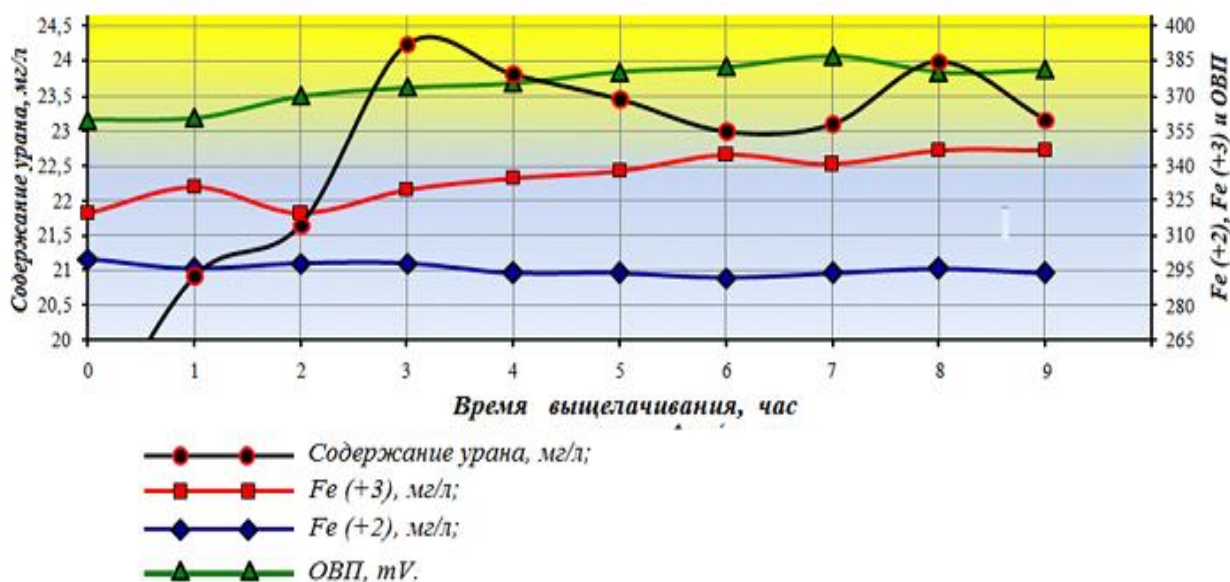


Рисунок 8 – Зависимости концентрации Fe(II), Fe(III), величины ОВП и содержания урана в ПР от времени выщелачивания

Таблица 10 – Результаты анализа содержания урана, величины ОВП и двух-трехвалентного железа (западный фланг, керн 2)

№ проб	Fe ²⁺ , мг/л	Fe ³⁺ , мг/л	Содержание урана, мг/л	ОВП, mV	Время отбора пробы, час
ВР4	310	330	2,1	364,4	0
ПР19	301	334	24,81	368,0	1
ПР20	300	340	25,25	378,5	2
ПР21	290	360	25,80	405,0	3
ПР22	294	354	27,26	396,0	4
ПР23	290	358	25,82	403,0	5
ПР24	302	342	26,94	406,5	6
ПР25	286	358	27,62	403,0	7
ПР26	280	358	28,25	403,0	8
ПР27	260	365	27,84	418,0	9

Как видно из таблицы 10, до насыщения раствора кислородом концентрация Fe(II) и Fe(III) составляла соответственно 310 и 330 мг/л, после насыщения раствора кислородом и с увеличением времени выщелачивания величина ОВП возрастает с 364 до 416 mV. При этом концентрация Fe(III) повысилась до 365 мг/л, а концентрация Fe(II) незначительно снизилась до 260 мг/л. За время выщелачивания содержание урана в ПР изменялся незначительно и колебался в пределах 24,8 – 28,2 мг/л. В целом среднее содержание урана в ПР составляла 26,62 мг/л, концентрация Fe(III) повысилась на 7%, а величина ОВП –на 14,0%.

Обработкой данных таблицы 10 получены графики зависимостей концентрации Fe(II), Fe(III), величины ОВП и содержания урана в ПР от времени выщелачивания (рисунок 9).

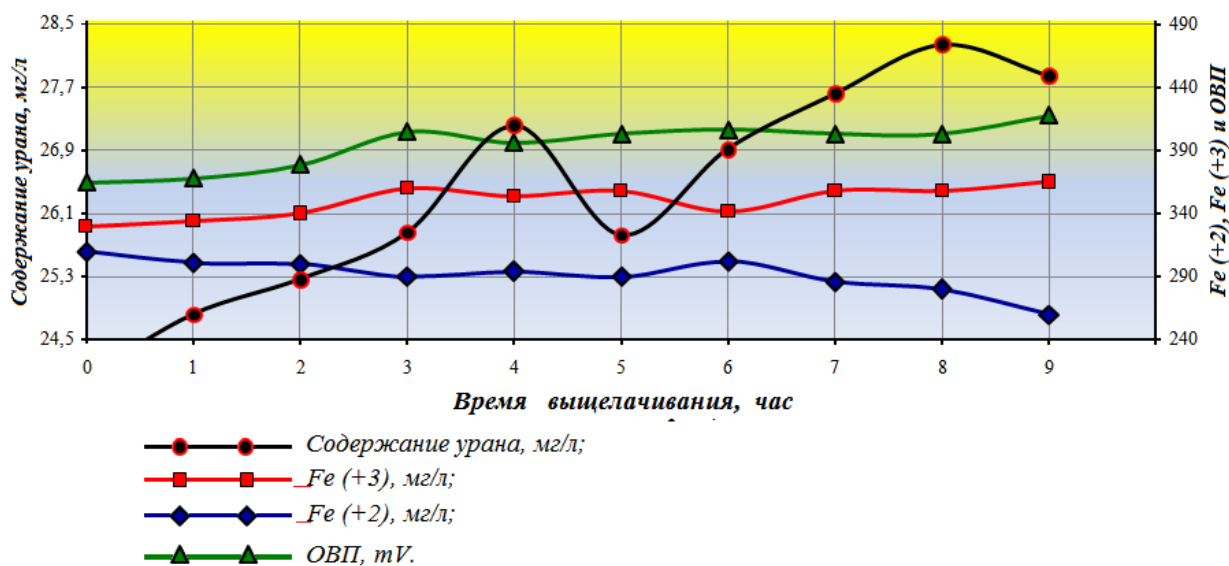


Рисунок 9 – Зависимости концентрации Fe(II), Fe(III), величины ОВП и содержания урана в ПР от времени выщелачивания

В лабораторных условиях, скорость подачи раствора была принята как в производственных условиях, т.е. 0,7 м/сек. и в результате всаса воздуха через трубку Вентури, концентрация кислорода в выщелачивающем растворе составляла 10,45 мг/л. Указанная концентрация кислорода позволила повысить концентрацию Fe(III) в выщелачивающем растворе по сравнению с базовым раствором, и соответственно поддерживать повышенную концентрацию Fe(III) в продуктивном растворе.

После обработки данных лабораторных исследований были получены графики зависимостей содержания урана в ПР от времени выщелачивания при базовой технологии и при применении насыщения ВР кислородом (рисунки 10 и 11).

Керн №1

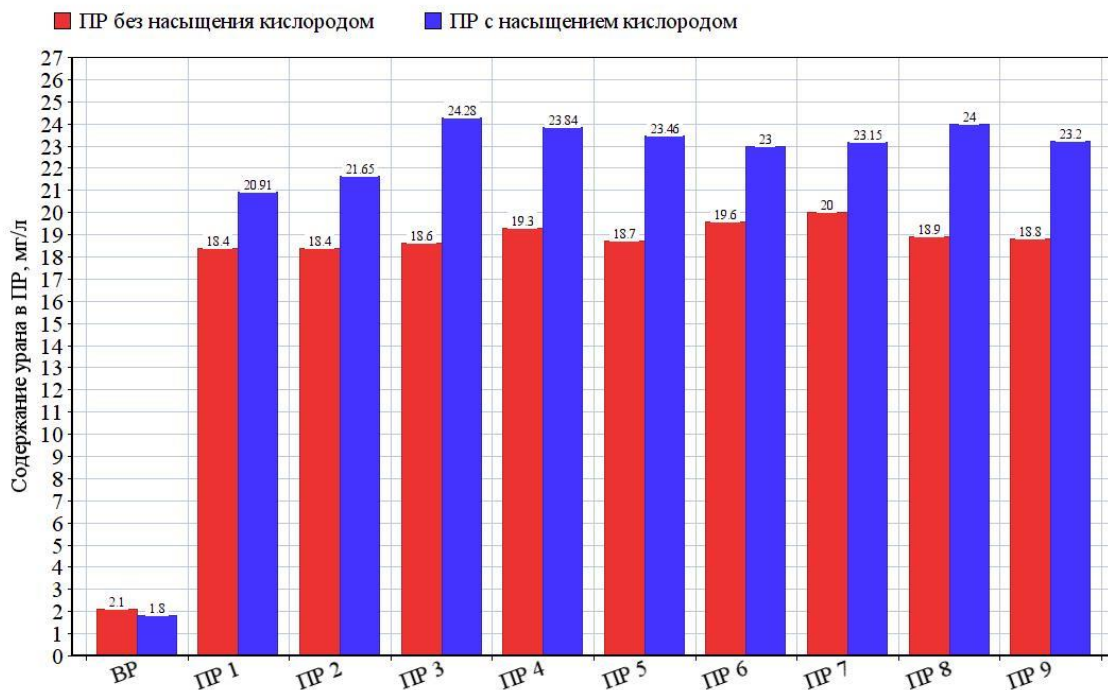


Рисунок 10 – Зависимости содержания урана в ПР (кern № 1) от времени выщелачивания при базовой технологии и при насыщения ВР кислородом.

Керн №2

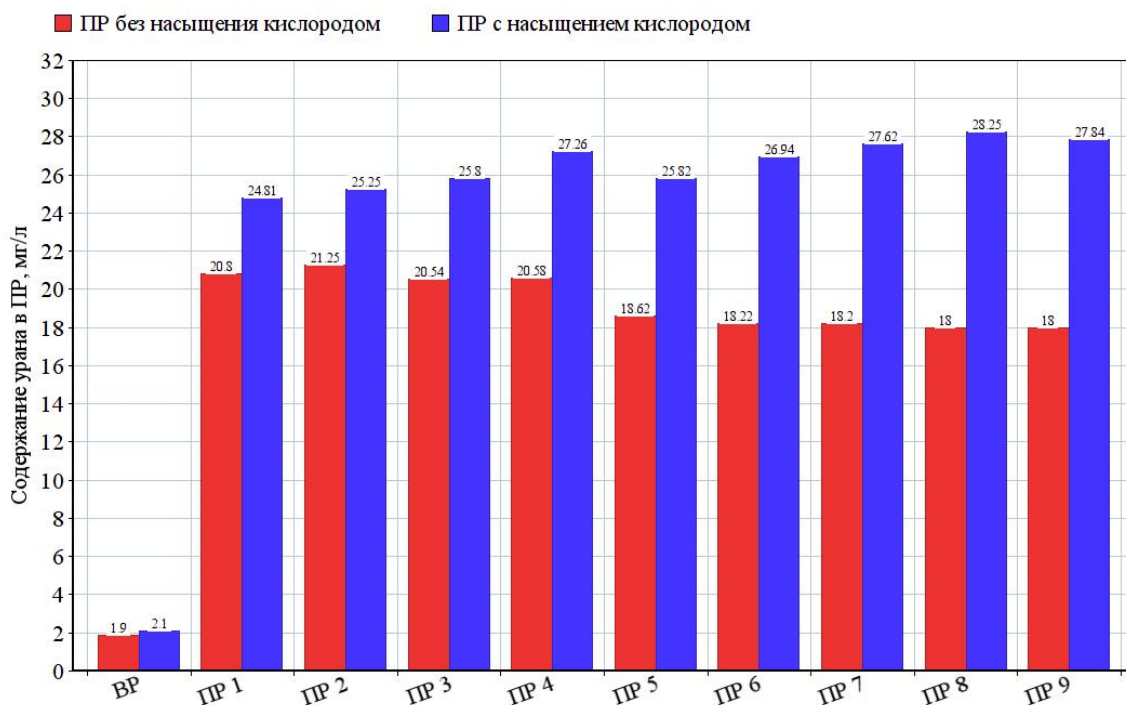


Рисунок 11 – Зависимости содержания урана в ПР (кern № 2) от времени выщелачивания при базовой технологии и при насыщения ВР кислородом.

Сравнение результатов проведенных лабораторных работ показывает, что если при базовой технологии выщелачивания среднее содержания урана в продуктивном растворе составляет 18,63 мг/л и 19,36 мг/л соответственно при кернах с восточного и западного флангов, то при насыщении рабочего раствора кислородом - соответственно 23,05 мг/л и 26,62 мг/л. Можно утверждать, что по сравнению с базовой технологией выщелачивания, предлагаемая нами технология позволила увеличить содержание урана на 23,7% и 37,5% соответственно при кернах с восточного и западного флангов месторождения.

3.4 Методика применения окислителя

Как показали результаты лабораторных исследований применение в виде кислорода приводит к повышению концентрации трехвалентного железа в растворе и содержания урана в продуктивных растворах.

Для проведения опытно-промышленных работ было предусмотрено подготовить схемы насыщения выщелачивающих растворов объемом не менее 120 м³/ч на один технологически блок и сохранением степени насыщения кислородом до глубины 350 м.

При объеме подачи выщелачивающего раствора объемом 120 м³/ч, указанная глубина без учета расстояния от места насыщения до закачной скважины будет достигнута за 7,3 минут. Лабораторными исследованиями установлено, что сохранение насыщения кислородом незначительно снижается с течением времени, поэтому за это время, когда раствор достигнет необходимой глубины, концентрация кислорода в растворе снизится на 0,04%.

Если магистральный трубопровод на руднике имеет диаметр 225 мм, тогда трубка Вентури с таким же диаметром будет иметь диаметр отверстия всаса 50 мм. При непрерывной работе трубки Вентури, насыщение раствора кислородом будет 11,0 -12,0 мг/л.

По результатам лабораторных работ было установлено, что не обязательно насыщать весь раствор кислородом, достаточно насытить кислородом 50% раствора. При этом насыщение кислородом максимум снизится всего на 3-5%. Поэтому параллельную линию можно сооружать трубопроводом, диаметром в два раза меньше, чем основной магистральный трубопровод. В обоих случаях, т.е. когда основной и магистральный трубопроводы одинакового диаметра или разного диаметра, для получения необходимого насыщения раствора кислородом, с помощью блока управления можно регулировать подачу кислорода в раствор.

При необходимости, установку для насыщения раствора кислородом можно управляет блоком управления в автоматизированном режиме.

3.5 Схемы интегрирования устройства для окисления раствора на линию выщелачивающих растворов

Для интегрирования устройства на линию выщелачивающего раствора подготовлены схемы по насыщению раствора кислородом (рисунок 12).

В технологическом узле закисления, после доукрепления раствора серной кислотой сооружается параллельная линия (байпас) к магистральному трубопроводу. При этом, в основной магистральный трубопровод и в параллельный трубопровод (байпас) устанавливаются краны ДУ-200. В параллельный трубопровод, после крана устанавливается трубка Вентури, причем для исключения слива раствора в случае экстренной остановки подачи раствора, отверстие всаса в трубке Вентури будет оснащен обратным клапаном.

Блок управления состоит из металлического корпуса TDM ЩМП-1 IP54 (395×310×220), внутри которого установлен частотный преобразователь СНF 100А-004G/ 5R5P-4, вводной автоматический выключатель и модуль таймера.

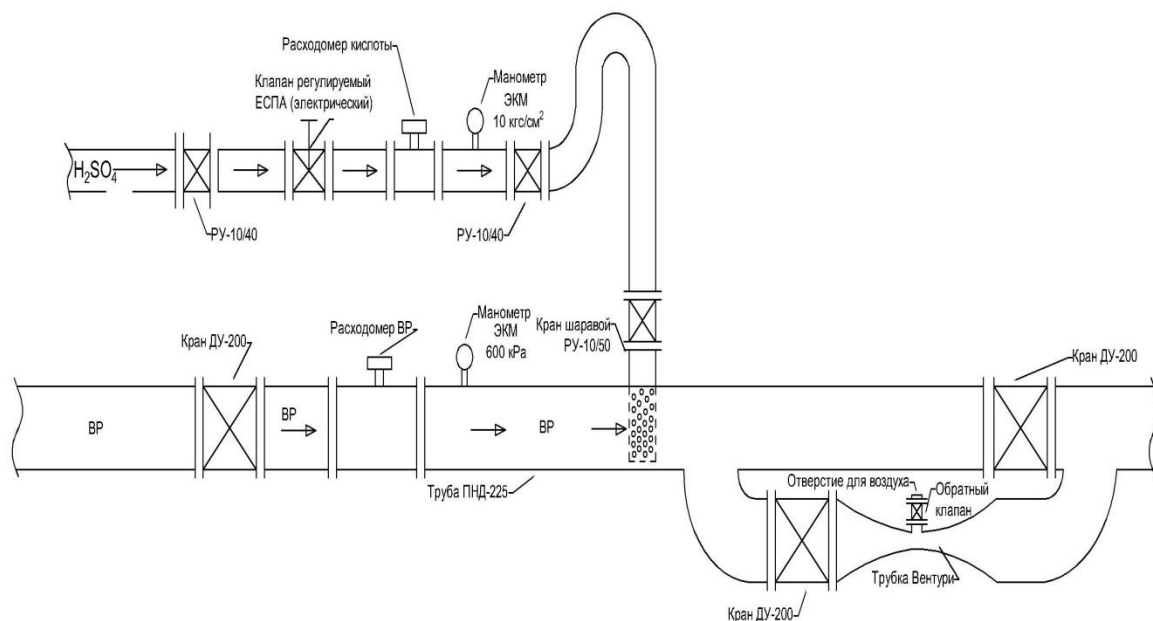


Рисунок 12 Схема интегрирования установки по насыщению раствора кислородом (без резервной линии)

3.6 Опытно-промышленные работы

3.6.1 Краткая характеристика опытного блока

Для проведения опытных работ был выбран блок 48-5 участка «Центральный» месторождения «Мынкудык».

Опытный блок участка Центральный характеризуется присутствием довольно мощных линз серых глин, которые отмечаются не только в нижней части горизонта, но и по всему его разрезу (рисунки 13, 14).

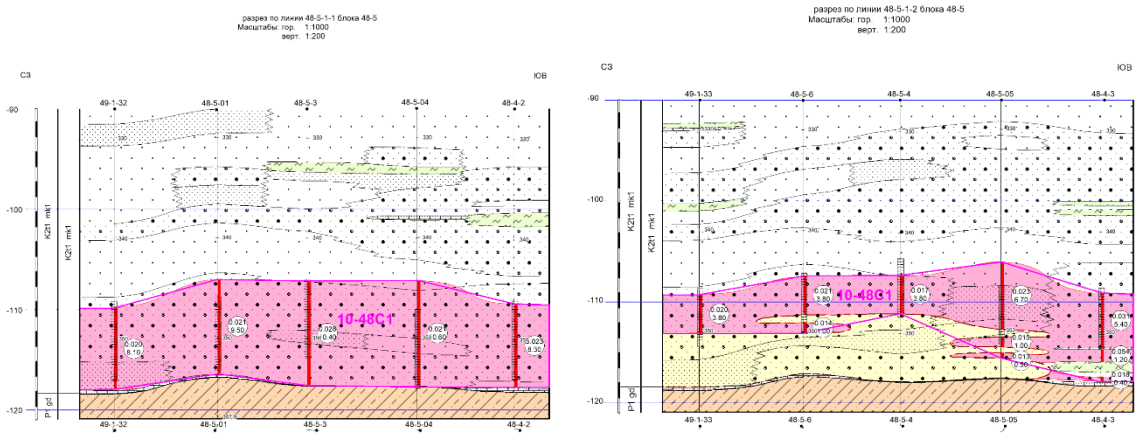


Рисунок 13 Разрезы по линии 48-5-1-1 и 48-5-1-2

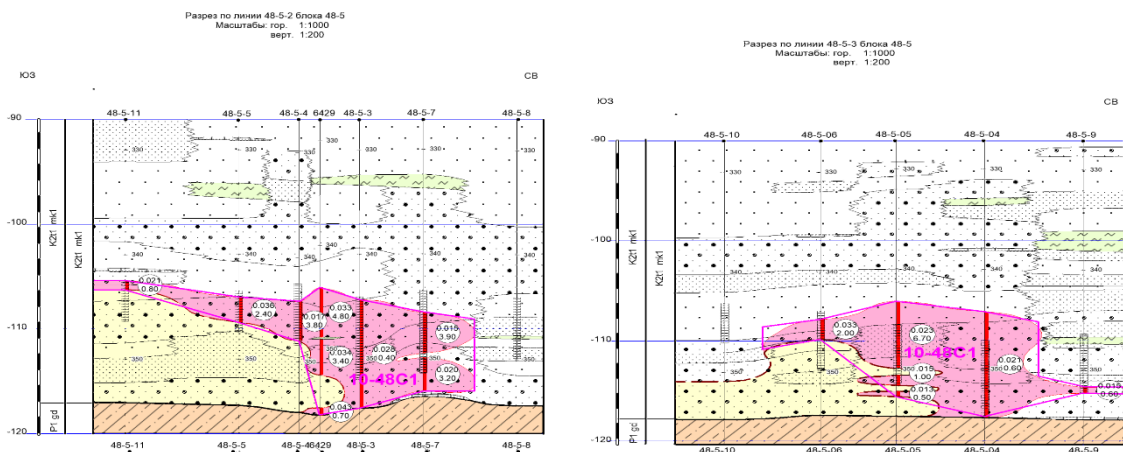


Рисунок 14 Разрезы по линии 48-5-2 и 48-5-3

На опытном блоке всего ГРМ 330,8 тыс.т, вскрытых запасов 31,8т. Дебит откачных скважин 6,8 м³/час. Рядная схема расположения скважин, количество закачных скважин 11, откачных 4.

Схема расположения и обвязки технологических скважин приведена на рисунке 15.

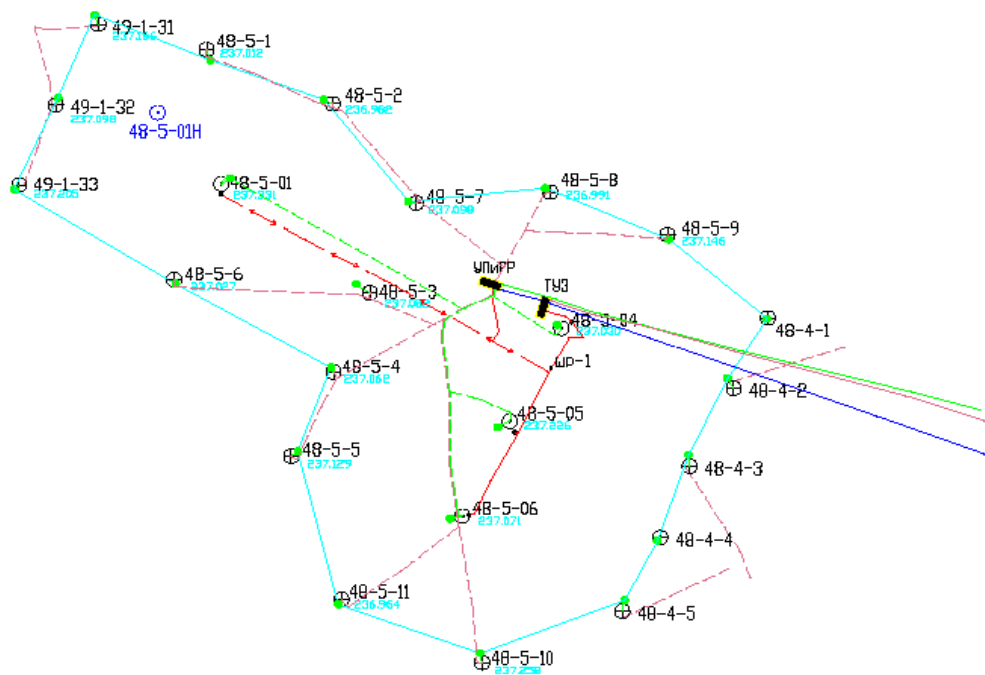


Рисунок 15 - Схема расположения и обвязки технологических скважин опытного блока

Согласно технологическому регламенту (таблица 11) приемистость скважин изменяется от 2,8 м³/час до 4,9 м³/час.

Таблица 11 – Регламент подачи выщелачивающего раствора

К-во	№ закачных скважин	Объем подачи по регламенту, м ³ /час
1	48-5-1	3,0
2	48-5-2	3,0
3	48-5-3	4,9
4	48-5-4	2,8
5	48-5-5	2,8
6	48-5-6	3,0
7	48-5-7	3,2
8	48-5-8	3,2
9	48-5-9	3,2
10	48-5-10	2,8
11	48-5-11	2,8
	Всего	34,4

3.6.2 Выбор параметров трубки Вентури и монтаж устройства

Для выбора основного диаметра трубки Вентури, которая обеспечит необходимую скорость выщелачивающего раствора, среднюю приемистость закачных скважин примем $3,1 \text{ м}^3/\text{час}$.

Как известно, скорость потока жидкости зависит от поперечного сечения трубки

$$V = Q / S, \text{ м/сек}$$

где Q – объем выщелачивающего раствора, $\text{м}^3/\text{час}$;

S – площадь поперечного сечения трубки, м^2 .

Подставив известные исходные данные по блоку получим

$$0,7 = 3,1 / 3600 * S,$$

$$\text{Отсюда } S = 3,1 / 3600 * 0,7$$

Для того, чтобы найти диаметр трубки

$$\pi d^2 / 4 = 3,1 / 3600 * 0,7$$

$$\text{Тогда } d = \sqrt{(3,1 * 4) / 3600 * 0,7 * 3,14} = 0,0395 \text{ м} = 40 \text{ мм}.$$

Зная основной диаметр трубки, находим диаметр суженной части трубки Вентури:

$$d_c = d / 5 = 40 / 5 = 8 \text{ мм}$$

Таким образом, для обеспечения максимального насыщения выщелачивающего раствора кислородом необходимо изготовить трубку Вентури с основным диаметром 40 мм и диаметром суженной части 8 мм (рисунок 16).



Рисунок 16 - Трубка Вентури с обратным клапаном для опытного блока

С учетом регламента работы закачных скважин, данная установка окислителя эффективно будет работать при их преемственности от $2,0\text{м}^3$ /час, так как при дальнейшем снижении преемственности всаса воздуха не будет.

С 20 марта 2022 года окислители были установлены в технологическом узле распределения выщелачивающих растворов в 13 закачных скважин (сборка и установка приведены на рисунках 17, 18 акты установки окислителей приведены в приложении В, Г)

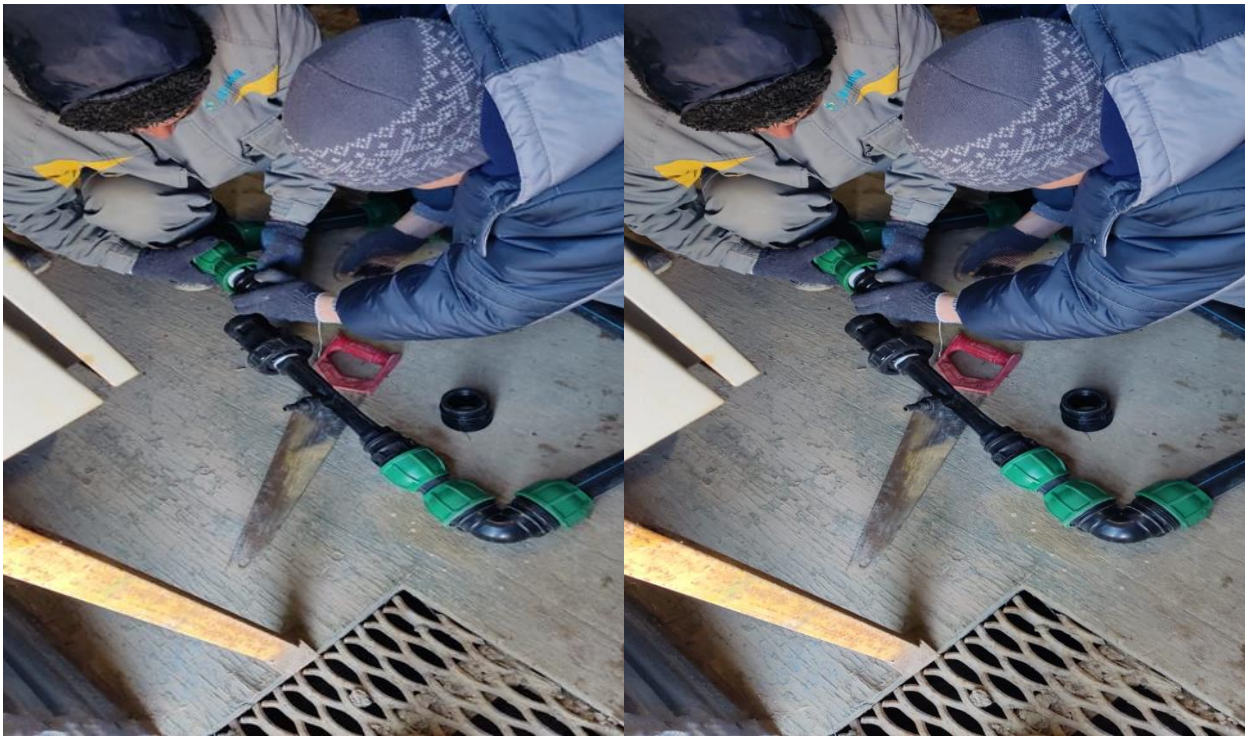


Рисунок 17 Сборка установки



Рисунок 18 - Установленные окислители на линию выщелачивающего раствора

3.6.3 Результаты опытно-промышленных работ

Для получения сравнительных данных концентрации кислорода до подключения окислителя и после подключения окислителя были проведены замеры. Прибор оксиметр для определения концентрации кислорода дает возможность его использовать дистанционно. Поэтому оксиметр был размечен в пластмассовую емкость, которая опускалась сверху закачной скважины и по мере заполнения емкости выщелачивающим раствором можно было зафиксировать концентрацию кислорода в растворе в режиме реального времени. Замеры были проведены в скважинах 48-5-4, 48-5-10 и 48-5-11 (таблица 12).

Таблица 12 - Концентрация кислорода до и после окислителя

№ скважин	Концентрация кислорода до окислителя, мг/л	Концентрация кислорода после окислителя, мг/л
48-5-4	5,01	9,0
48-5-11	3,0	9,02
48-5-10	3,4	8,35

Как видно из таблицы 12, концентрация кислорода до окислителя в скважинах разная и изменяется от 3,0 мг/л до 5,01 мг/л. После насыщения раствора кислородом концентрация кислорода изменился от 8,35 мг/л до 9,02 мг/л. Если в растворе скважины 48-5-4 насыщение кислородом после окислителя повысился на 79,6%, то в растворе скважины 48-5-11 –на 200%. Также были отобраны пробы выщелачивающего раствора из закачных скважин данного блока для сравнения концентрации двух-трехвалентного железа до запуска окислителя и после запуска окислителя (таблица 13).

Таблица 13 - Концентрации двух-трехвалентного железа до запуска окислителя и после запуска окислителя

№ скважины	Концентрация Fe ⁺² до окислителя, г/л	Концентрация Fe ⁺² после окислителя, г/л	Концентрация Fe ⁺³ до окислителя, г/л	Концентрация Fe ⁺³ после окислителя, г/л
48-5-11	1,29	1,27	0,21	0,24
48-5-4	1,34	1,27	0,15	0,24
48-4-2	1,30	1,15	0,16	0,22
48-4-3	1,27	1,09	0,14	0,22
48-4-4	1,26	1,01	0,17	0,28
48-5-7	1,32	1,18	0,15	0,28
48-5-3	1,26	0,90	0,16	0,29

Как видно из таблицы 13 концентрация двухвалентного железа после окисления выщелачивающего раствора на разных закачных скважинах снижается от 1,6% до 28% , в среднем на 12%, а концентрация трехвалентного железа повышается от 14,2% до 86,6%, в среднем на 57,3%.

На рисунке 19 приведены сравнение концентрации двух-трехвалентного железа до окислителя и после окислителя.

Отсюда можно сделать вывод о том, что после окисления выщелачивающего раствора кислородом происходит снижение концентрации двухвалентного железа и повышение трехвалентного железа.

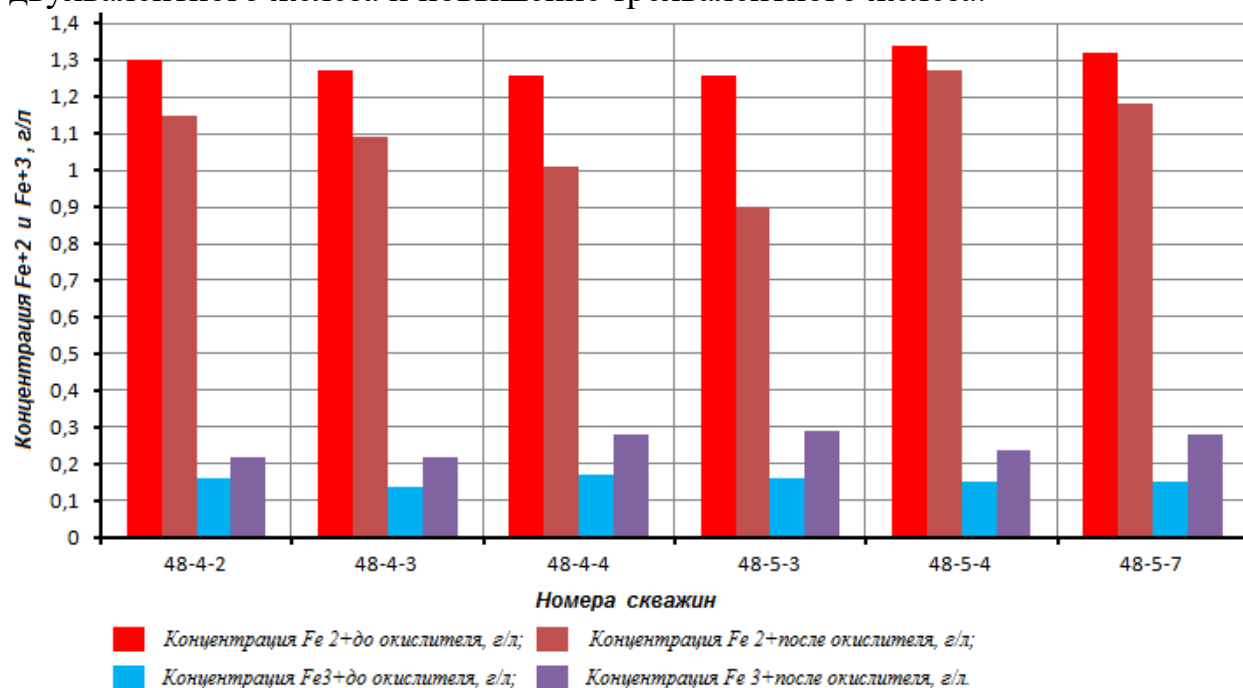


Рисунок 19 Сравнение концентрации двух-трехвалентного железа до окислителя и после окислителя.

Как видно из таблицы 13, с подключением окислителя с марта по август 2022 года концентрация Fe²⁺ снизилась с 1,99 г/л до 1,04 г/л, т.е. на 48%, а концентрация Fe³⁺ повысилась с 0,1 г/л до 0,17 г/л, т.е. на 70%. После отключения окислителя в августе месяце, в сентябре концентрация Fe²⁺ обратно начал повышаться с 1,04 г/л до 1,15 г/л, а концентрация Fe³⁺ - снижаться с 0,17 г/л до 0,14 г/л, т.е. соответственно на 10,5% и 17%.

Пробы продуктивного раствора на содержание урана и величины рН брались из откачных скважин 48-5-04, 48-5-05 и 48-5-06 (вокруг которых в закачных скважинах были установлены окислители) согласно регламента и дополнительно, между установленными датами. При этом необходимо отметить, что со дня установки окислителей средняя концентрация серной кислоты было снижено с 12 г/л в марте месяце до 3,0 г/л в сентябре.

С учетом расстояния между закачной и откачной скважинами, коэффициента фильтрации, положительные результаты опытно-промышленных испытаний были получены через 20-30 дней со дня запуска окислителя. В таблице 14 приведены изменение содержания урана в откачных скважинах до и после установки окислителя.

Таблица 14 – Изменение содержания урана в откачных скважинах до и после установки окислителя

Откачные скважины	48-5-01		48-5-04		48-5-05		48-5-06	
	U, мг/л	pH	U, мг/л	pH	U, мг/л	pH	U, мг/л	pH
Дата анализа пробы								
27.02.2022	182	2,1	122	2,0	155	2,0	113	1,8
08.03.2022	178	1,8	118	1,5	156	1,7	88	2,2
24.03.2022	120	2,0	117	1,6	145	1,9	78	2,0
27.03.2022	150	2,0	114	1,8	141	2,1	75	1,6
10.04.2022	158	1,8	108	1,5	127	1,8	85	2,1
24.04.2022	156	1,8	111	1,5	119	1,7	84	1,9
27.04.2022	155	1,9	108	1,61	118	1,77	81	2,1
11.05.2022	134	1,9	90	1,69	94	1,82	80	2,05
20.05.2022	-	-	86	1,71	96	1,94	80	2,06
23.05.2022	135	2,1	90	1,9	97	2,0	86	2,2
29.05.2022	132	2,02	88	1,79	96	1,90	87	2,09
11.06.2022	141	1,94	73	1,81	81	1,86	75	2,05
21.06.2022	139	2,06	72	1,90	80	1,97	76	2,10
28.06.2022	136	1,83	72	1,63	80	1,75	78	1,90
04.07.2022	133	1,82	66	1,83	70	1,74	72	1,97
21.07.2022	113	1,97	55	1,77	62	1,93	62	2,08
28.07.2022	131	1,85	57	1,65	64	1,84	66	1,98
11.08.2022	110	1,96	50	1,81	61	1,89	60	1,98
29.08.2022	124	2,02	54	1,88	68	1,89	70	2,01
10.09.2022	114	1,86	51	1,75	71	1,8	68	1,84
20.09.2022	116	1,94	50	1,81	64	1,95	64	2,0
10.10.2022	107	1,94	52	1,8	67	1,91	61	1,93
20.10.2022	108	1,98	48	1,8	70	2,08	58	2,04
29.10.2022	102	1,72	51	1,66	69	1,74	57	1,76
11.11.2022	93	1,92	42	1,88	57	1,97	52	1,98
20.11.2022	91	2,0	42	2,0	57	2,0	56	2,1

Как видно из таблицы 14, если в продуктивном растворе откачной скважины 48-5-06 с 27.02.2022 года наблюдался снижение содержания урана с 113 мг/л до 75 мг/л, т.е. на 33,6%, то после установки окислителя с 19.03.2022г. по 21.03.2022г. на закачные скважины вокруг откачной скважины наблюдается повышение содержание урана с 75 мг/л до 85 мг/л, т.е. на 13,3 %. В дальнейшем было незначительное снижение содержания урана в продуктивном растворе до 80 мг/л. Это объясняется снижением объема закачиваемого раствора в скважины 48-4-5, 48-5-10, 48-5-11 (т.е. 3 скважины из 5) ниже установленного регламента из-за кольматации фильтров скважин, что привело к остановке всаса воздуха установкой и

насыщения раствора кислородом. После проведенной РВР и с течением времени наблюдается повторное повышение содержания урана в растворе с 80 мг/л до 86 мг/л.

На остальных двух откачных скважинах 48-5-05 и 48-5-04, до установки окислителя с 15.04.2022г. наблюдались постоянное снижение урана в продуктивных растворах с 155 мг/л до 95 мг/л и с 122 мг/л до 90 мг/л соответственно, после окисления раствора кислородом снижение содержания урана в растворе остановилось, наблюдается повышение содержания урана в продуктивном растворе на 3-4 мг/л. Это также объясняется снижением объема закачиваемого раствора в скважины ниже установленного регламента из-за кольматации фильтров скважин, что привело к остановке всаса воздуха установкой и насыщения раствора кислородом.

В ходе проведенных опытно-промышленных работ с 20.03.2022 года, для получения сравнительных данных, нами работа окислителей были остановлены с 20.05.2022г. до 31.05.2022г., затем с 12.06.2022г. до 01.08.2022г. Как видно из таблицы 2.4, через 20-30 дней после остановки работы окислителей наблюдается резкое снижение содержания урана в продуктивном растворе. Например, после остановки работы окислителей с 20.05.2022г. до конца месяца содержание урана в продуктивных растворах из откачных скважин 48-5-05, 48-5-06 снизился соответственно с 97 мг/л до 81 мг/л и с 86 мг/л до 75 мг/л, т.е. на 16,5% и на 12,8%. С подключением окислителей с 1 июня до 12 июня, содержание урана в откачной скважине 48-5-06 повысился с 75 мг/л до 78 мг/л, т.е. на 4%, а на остальных двух откачных скважинах снижение содержания урана в продуктивных растворах остановилась.

При остановке работы окислителей с 12.06.2022г. по июль 2022г. содержание урана в продуктивных растворах из откачных скважин 48-5-05, 48-5-06 снизился соответственно с 80 мг/л до 61 мг/л и с 70 мг/л до 60 мг/л, т.е. на 23,8% и на 14,3%. С подключением окислителей с 01.08.2022 г. по 14.08.2022г. наблюдается повышение содержания урана в продуктивных растворах из откачных скважин 48-5-4, 48-5-05, 48-5-06 соответственно с 50 мг/л до 54 мг/л, с 60 мг/л до 68 мг/л и с 60 мг/л до 70 мг/л, т.е. на 8%, на 13,3% и 16,7%.

После отключения окислителя с 15.08.2022г. соответственно наблюдается снижение содержания урана в продуктивном растворе с 54 мг/л до 50 мг/л, с 68 мг/л до 64 мг/л и с 70 мг/л до 64 мг/л.

Необходимо отметить, что до установки окислителя концентрация серной кислоты изменялся в пределах 20-12 г/л, а с марта по сентябрь 2022 года, т.е. во время проведения опытно-промышленных испытаний концентрация серной кислоты в выщелачивающем растворе (по данным рудника) изменялся незначительно, с 3,0 г/л до 8,0 мг/л.

Обработкой данных таблицы 2.4 получены зависимости содержания урана в продуктивном растворе до и после окисления выщелачивающего раствора и концентрации серной кислоты (рисунок 20).

Результаты опытно-промышленных работ приведены на рисунке 20.

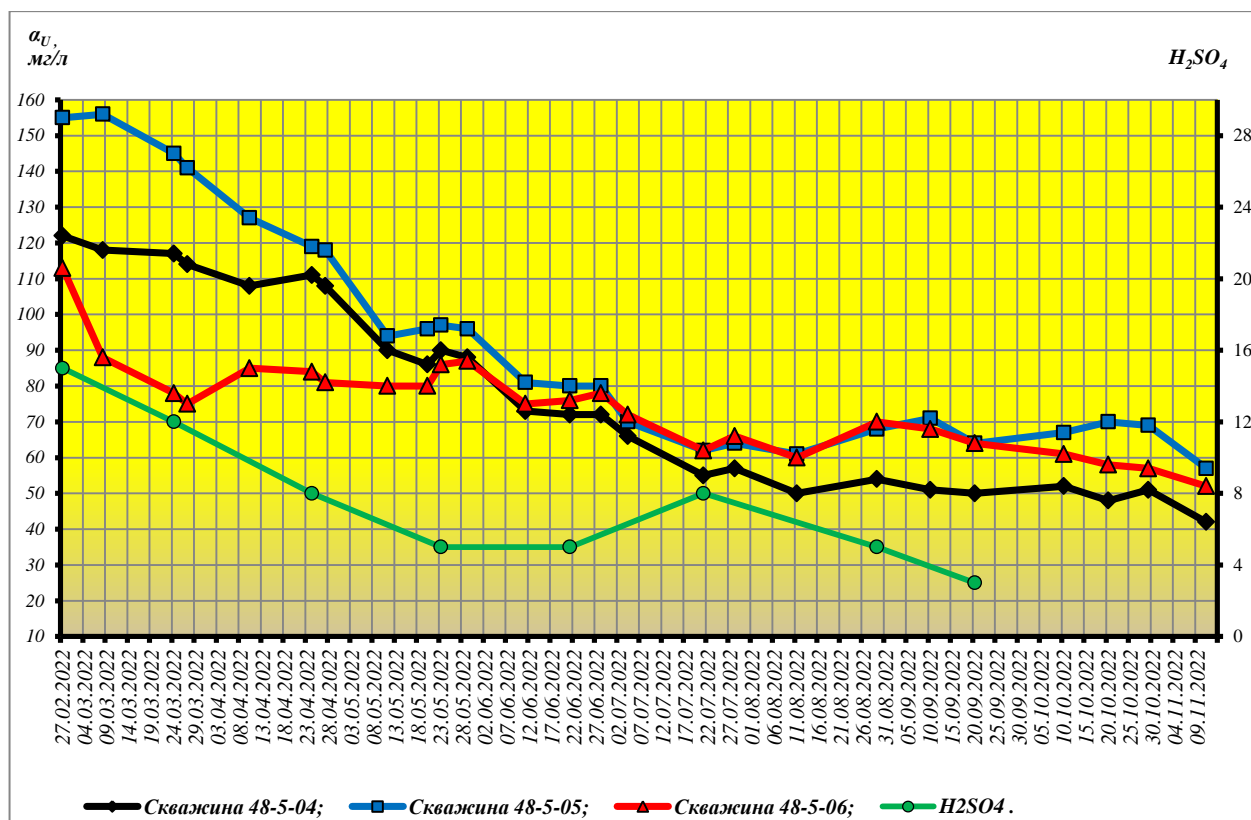


Рисунок 20 - Зависимости содержания урана в продуктивном растворе до и после окисления выщелачивающего раствора

Опытно-промышленными работами доказано влияние предлагаемой технологии окисления выщелачивающего раствора кислородом на концентрацию двух-трехвалентного железа в выщелачивающем растворе и на содержание урана в продуктивном растворе. Во всех 3 откачных скважинах наблюдается повышение содержания урана на 13% с подключением окислителей в закачных скважинах вокруг откачных скважин и снижение содержания урана после их отключения.

3.7 Ожидаемый экономический эффект

Ожидаемый экономический эффект рассчитан с учетом снижения расхода серной кислоты и электроэнергии за счет сокращения срока отработки запасов блока при условии применения технологии насыщения выщелачивающего раствора кислородом. Для расчета принят блок с запасом урана 307 тонны, среднее содержание урана в продуктивном растворе 120 мг/л.

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{\text{СК}} + \mathcal{E}_{\text{ЭН}} - \mathcal{Z}_{\text{ПТ}}, \text{ тг/год}$$

где $\mathcal{E}_{\text{СК}}$ – экономия средств за счет снижения расхода серной кислоты,

$\mathcal{E}_{\text{ЭН}}$ – экономия средств за счет снижения расхода электроэнергии, тг;

$Z_{пт}$ – дополнительные затраты при применении предлагаемой технологии, тг.

Экономия средств за счет снижения расхода серной кислоты

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{ск} &= (T_б - T_п) Q_{вр} \times q \times C_{ск} / 1000\ 000 = \\ &= (19\ 187 - 17\ 268) 120\ 000 \times 6 \times 24\ 600 / 1000\ 000 = 33\ 989\ 328\ \text{тг} \end{aligned}$$

где $T_б$, $T_п$ – соответственно время отработки запасов блока при базовой и предлагаемой технологиях, час;

$Q_{вр}$ – расход выщелачивающего раствора на блок, л/час;

q – расход серной кислоты на доукрепление 1 л раствора, г/л;

$C_{ск}$ – цена 1 тонны серной кислоты, тг/т.

Экономия средств за счет снижения расхода электроэнергии

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{эН} &= (T_б - T_п) \times q_{эН} \times C_{эН} \times N_н = \\ &= (19\ 187 - 17\ 268) \times 7 \times 22 \times 15 = 4\ 432\ 890\ \text{тг} \end{aligned}$$

где $q_{эН}$ – часовой расход электроэнергии, кВт/час;

$C_{эН}$ – цена электроэнергии, тг/кВт.

$N_н$ – количество насосов, шт

Дополнительные затраты при применении предлагаемой технологии

$$\begin{aligned} Z_{п} &= C_{в} + 2C_{кр} + C_{м} + C_{р} = \\ &= 100\ 000 + 2 \times 250\ 000 + 15\ 000 + 15\ 000 = 630\ 000\ \text{тг} \end{aligned}$$

где $C_{в}$ – цена трубки Вентури, тг;

$C_{кр}$ – цена запорного крана, тг;

$C_{м}$ – цена манометра для параллельной линий, тг;

$C_{р}$ – цена расходомера, тг.

Тогда $\mathcal{E} = 33\ 989\ 328 + 4\ 432\ 890 - 630\ 000 = 37\ 792\ 218\ \text{тг}$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных лабораторных работ можно сделать следующее заключение.

1. Предложенная технология насыщения раствора кислородом с использованием трубки Вентури позволит при прохождении раствора через сужение трубки обеспечить всас воздуха и активное перемешивание воздуха с раствором, что способствует эффективному переходу кислорода из воздуха в раствор за счет изменения давления в растворе.

2. Проведенными лабораторными работами установлены зависимости:

- концентрации кислорода в растворе от скорости и объема выщелачивающего раствора, что позволит установить максимально возможную концентрацию кислорода в растворе при различных объемах подаваемого раствора в производственных условиях;

- концентрации кислорода и трехвалентного железа в выщелачивающем растворе от расстояния транспортировки, что позволит определить время достижения максимального насыщения раствора кислородом;

- двух-трехвалентного железа и содержания урана в продуктивном растворе от времени выщелачивания при насыщении раствора кислородом.

3. Преимуществами данной технологий являются низкие капитальные, эксплуатационные затраты, простота монтажа и обслуживания, и не требует использования расходных материалов в виде химических добавок.

4. Насыщение рабочего раствора кислородом обеспечивает окисление двухвалентного железа в трехвалентную, что приводит к повышению содержания урана в продуктивном растворе и сокращению срока отработки запасов урана в технологическом блоке.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Суходолов А.П. Мировые запасы урана: перспективы сырьевого обеспечения атомной энергетики.// Известия Иркутской государственной экономической академии. 2010. № 4(72) С.166-169

2 Boytsov A. Worldwide ISL Uranium Mining Outlook: presentation//Proceedings of the International Symposium on Uranium Raw Material for the Nuclear Fuel Cycle: Exploration, Mining, Production, Supply and Demand, Economics and Environmental Issues (URAM-2014),23-27 June 2014.-Vienna: IAEA, 2014. P.1-23

3 Mark S. Pelizza, Craig S. Bartels, Introduction to uranium in situ recovery technology, Uranium for Nuclear Power, Woodhead Publishing, 2016, Pages 157-213, ISBN 9780081003077, doi.org/10.1016/B978-0-08-100307-7.00007-7.

4 Голик В. И., Страданченко С. Г., Масленников С. А. Концепция добычи металлов выщелачиванием // Вестник Кемеровского государственного университета. Серия: Биологические, технические науки и науки о Земле. 2018. № 1. С. 49-60.

5 Khalidilla Yussupov, Yernur Omarbekov, Improving the technology of uranium mining under the conditions of high groundwater pressure. Mining of Mineral Deposits. Volume 14 (2020), Issue 3, 112-118.

6Нестеров, Филиппов. Редокс-процессы и интенсификация выщелачивания металлов. М.: «Руда и Металлы», 2009. ISBN 978-5-98191-048-7.

7 Юсупов Х.А., Джакупов Д.А. Исследование применения бифторида аммония для химической обработки скважин. Горный журнал, Москва, №4. 2017, с.57-60.

8 Овсейчук В.А., Зозуля А.М. Снижение технологических потерь урана при подземном выщелачивании за счет растворения гидроксида уранила. // Вестник Забайкальского государственного университета. 2019. Т.25. №4.С.4–12. DOI:10.21209/2227-9245-2019-25-4-4-12

9 Червяков Н.М., Андреев А.В., Бояринцев А.В., Степанов С.И. Кинетика окислительного растворения диоксида урана и октаоксида триурана в водных растворах карбоната натрия // Успехи в химии и химической технологии. 2020. Том 34. №9.

10 Пастухов А. М. Применение искусственных окислителей для интенсификации процесса подземного выщелачивания урана: заключительный отчет о НИР / УрФУ. Екатеринбург, 2013. 34 с.

11 Anna H. Kaksonen, Aino-Maija Lakaniemi, Olli H. Tuovinen, Acid and ferric sulfate bioleaching of uranium ores: Journal of Cleaner Production, Volume 264, 2020, 121586, ISSN 0959-6526, doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121586.

12 Колтунов В.С., Марченко В.И. Кинетика окисления U(IV) азотистой кислотой, катализируемого ионами трехвалентного железа. Радиохимия. 1973. Т. 15. № 1. С. 78-84

13 Ходжиев С.К., Назаров Х.М., Эффективность действия пероксида водорода, как окислителя диоксида урана, в зависимости от pH среды. //

Доклады академии наук Республики Таджикистан. 2018. №3

14 Юсупов Х. А., Алешин А. П., Башилова Е. С., Цой Б. В. Применение пероксида водорода для интенсификации подземного выщелачивания урана. «Обогащение руд», 2021. № 2. С.21-26.

15 Проект Федерального закона N 584587-5 от 10.10.2011. О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в части совершенствования нормирования.

16 Тураев Н.С., Жерин И.И. Химия и технология урана. — М.: Руда и металлы, 2006. ISBN 5-98191-019-4.

17 Толстов Е.А. Физико-химические геотехнологии освоения месторождений урана и золота в Кызылкумском регионе.- М.: Издательство Московского государственного горного университета, 1999.

18 Khalidilla Yussupov, Yerbolat Aben, Armanbek Omirgali, Azamat Rakhmanberdiy. Analyzing a denitration process in the context of underground well uranium leaching. Mining of Mineral Deposits Volume 15 (2021), Issue 1, 127-133.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

Геологическая карта Северо-западной части Шу - Сарысуйской депрессии. Расположение рудоносных участков месторождения Мынкудук.

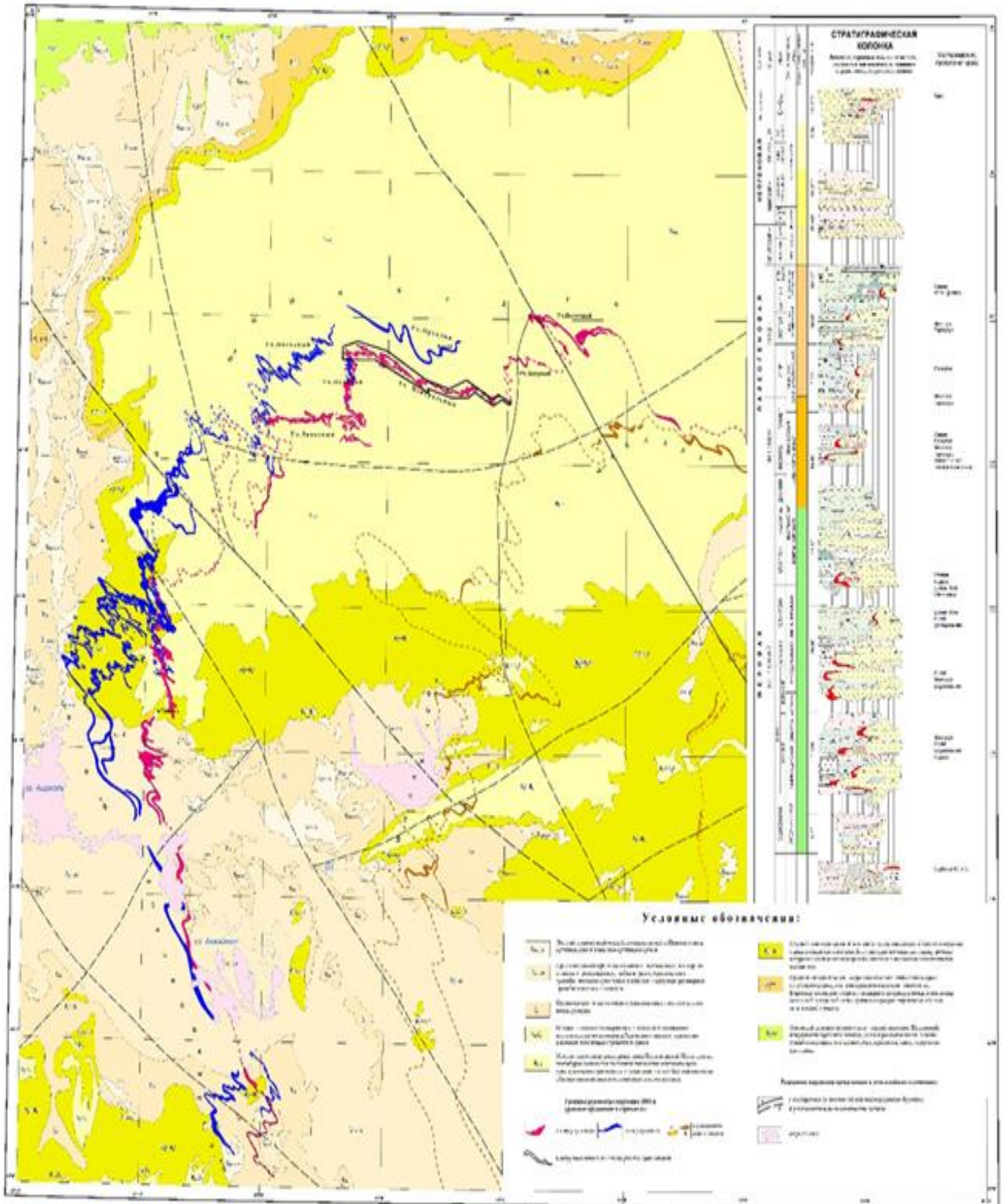
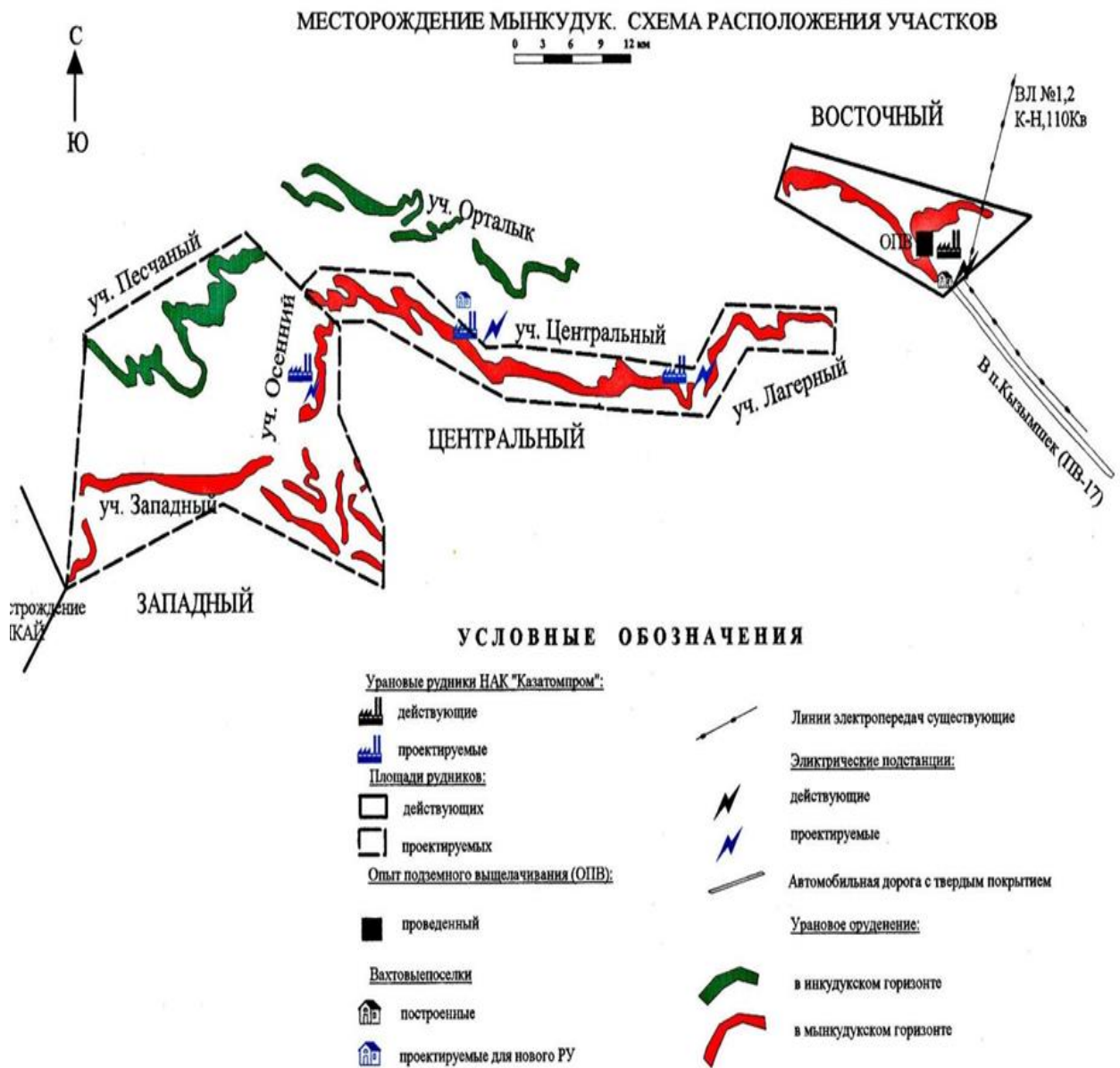


Схема расположения участков месторождения



«ОРТАЛЫҚ «ҚАЗЫП ШЫҒАРАТЫН
КӘСІПОРНЫ» ЖШС



ТОО «ДОБЫВАЮЩЕЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
«ОРТАЛЫҚ»

«Орталық Мынкудук» кәсіпорны

Рудник «Центральный Мынкудук»

АКТ

«20» 05 2022г.

Тема: «Установка для насыщения кислородом»

Мы, нижеподписавшиеся, представители рудника «Центральный Мынкудук» и Казахского национального исследовательского технического университета им.К.И.Сатпаева составили настоящий акт о том, что установки для насыщения раствора кислородом установлены на линии выщелачивающего раствора закачных скважин 48-5-10, 48-5-11, 48-5-4 и 48-5-5 блока 48-5 для проведения промышленных испытаний.

От рудника «Центральный Мынкудук»:

Начальник ГГО рудника Khl Ержанов К.Б.

От КазННТУ им. К.И. Сатпаева:

К.т.н., г.н.с. СМ Мырзахметов С.С.

Магистр наук, СНГ ЖК Хайруллаев Н.

Докторант, НС БТ Токтарулы Б.

«ОРТАЛЫҚ «ҚАЗЫП ШЫҒАРАТЫН
КӘСІПОРНЫ» ЖШС



ТОО «ДОБЫВАЮЩЕЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
«ОРТАЛЫҚ»

«Орталық Мынқудық» кәсіпорны

Рудник «Центральный Мынқудық»

«9» 04 2014 г.

АКТ

Тема: «Установка для насыщения кислородом»

Мы, нижеподписавшиеся, представители рудника «Центральный Мынқудық» и Казахского национального исследовательского технического университета им.К.И.Сатпаева составили настоящий акт о том, что установки для насыщения раствора кислородом установлены на линии выщелачивающего раствора закачных скважин 48-5-3, 48-5-7, 48-5-8, 48-5-9, 48-4-1, 48-4-2, 48-4-3, 48-4-5 блока 48-5 для проведения промышленных испытаний.

От рудника «Центральный Мынқудық»:

И.о. зам. начальника ГГО рудника  Смайлов К.Б.

От КазННТУ им. К.И. Сатпаева:

Магистр наук, СНС _____ Хайруллаев Н.

Докторант, НС _____ Токтарулы Б.