

**Казахский национальный исследовательский технический университет  
имени К.И. Сатпаева**

**Удк 622.27**

**На правах рукописи**

**ХАЙРУЛЛАЕВ НУРСУЛТАН БАТЫРХАНОВИЧ**  
**Повышение эффективности ПСВ (подземное скважинное  
выщелачивание) урана с активацией раствора**

**6D070700- Горное дело**

**Диссертация на соискание ученой степени  
доктора философии (PhD)**

**Научные консультанты:**  
**АбенЕ.Х., кандидат  
технических наук,  
ассоциированный  
профессор**

**Алиев С.Б., доктор  
технических наук,  
профессор**

**Республика Казахстан  
Алматы, 2022**

Сырьевую базу предприятий, добывающих уран методом подземного выщелачивания, в настоящее время составляют главным образом бедные месторождения гидрогенного генезиса, залегающие в водопроницаемых песчано-глинистых отложениях депрессионных зон земной коры. Эти месторождения, несущими в себе запасы урана до последнего времени не были вовлечены в промышленную разработку традиционными способами добычи по технико-экономическим соображениям. Эта важная задача, имеющая большое народнохозяйственное значение, к настоящему времени в значительной степени решена. Особенно в последнее десятилетие были проведены большие работы по разработке и внедрению в промышленных масштабах геотехнологической добычи урана, получившей название метод подземного выщелачивания.

Подземное выщелачивание – метод добычи урана путем избирательного его растворения химическими реагентами из руд на месте их залегания и последующего извлечения из урансодержащих растворов. Подземное выщелачивание является альтернативой методам открытой и подземной разработки. По сравнению с ними, подземное выщелачивание не требует большого объема выемок или непосредственного контакта рабочих с горными породами по месту их нахождения. Эффективно даже на бедных месторождениях, а также для разработки глубокозалегающих руд.

Несмотря на его преимущество имеется ряд недостатков, основными из которых являются повышение себестоимости добычи и снижение содержания полезного компонента в массиве. Как известно, выщелачивание сопряжено с переработкой больших количеств сырья, стоимость выщелачивающих реагентов в значительной мере определяет себестоимость конечного продукта, так как затраты на реагенты составляют 27 – 45% от эксплуатационных затрат на выщелачивание.

Существуют различные способы повышения извлечения содержания урана в продуктивном растворе. Но они отличаются дороговизной и технологическими сложностями их применения. Поэтому, повышение эффективности подземного скважинного выщелачивания (ПСВ) урана путем повышения содержания урана в продуктивном растворе и снижения себестоимости добычи является актуальной задачей.

**Целью настоящей работы** является повышение содержания урана в продуктивном растворе и снижение расхода реагента при подземном скважинном выщелачивании урана с активацией выщелачивающего раствора.

**Задачами исследования являются:**

- изучение геологических особенностей и анализ применяемой технологии ПСВ урана на месторождении «Центральный Мынкудук»;
- анализ литературных источников и научно-исследовательских работ по повышению эффективности ПСВ урана;
- разработка технологии активации выщелачивающего раствора;

- лабораторные исследования влияния активированного раствора на содержание урана в продуктивном растворе при различных концентрациях реагента и установление времени активации;
- лабораторные исследования по установлению влияния времени выдержки выщелачивающего раствора после активации на содержание урана в продуктивном растворе;
- опытно-промышленные испытания предлагаемой технологии;
- обработка результатов исследования и выдача рекомендации.

**Новизна темы** заключается в повышении содержания урана в продуктивном растворе и снижении расхода реагента путем механической активацией выщелачивающего раствора.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

- активация выщелачивающего раствора до подачи его в закачную скважину приводит к повышению содержания урана в продуктивном растворе и снижает расход реагента. Например, в производственных условиях повышение содержания урана составило 8%, а расход реагента снизился за счет сокращения срока обработки блока;
- содержание урана в продуктивном растворе зависит от времени активации выщелачивающего раствора и времени выщелачивания. Например, с изменением времени выщелачивания до 5 минут, активация раствора в течение 3 минут приводит к повышению содержания урана в продуктивном растворе на 10%, при 5 минутах - на 21% и при 10 минутах – на 18%;
- с течением времени после активации выщелачивающего раствора наблюдается незначительное снижение ее активности, но его активность сохраняется до 30 дней. Например, при активации раствора в течении 3 минут и последующим выщелачиванием 5 минут получены следующие результаты: сразу после его активации содержание урана в продуктивном растворе повышается на 10%, после выдержки в течение 2 часов – на 9,5%, через 30 суток – на 9%.

#### **Научная новизна работы:**

- разработана технология повышения содержания урана в продуктивном растворе, отличающаяся обработкой выщелачивающего раствора на активационной установке до его подачи в закачную скважину;
- получена зависимость содержания урана в продуктивном растворе от времени активации выщелачивающего раствора, позволяющая установить оптимальное время активации и обеспечить максимальное содержание урана в продуктивном растворе;
- получена зависимость содержания урана в продуктивном растворе от времени выдержки выщелачивающего раствора после активации, что позволит установить снижение активности выщелачивающего раствора за время его транспортировки от места активации до пласта.

**Связь данной работы** с другими научно-исследовательскими работами. Диссертационная работа выполнена в рамках хозяйственного

договора №50 – ТОО – 19 от 20.02.2019г «Разработка технологии интенсификации процессов денитрации и выщелачивания в условиях участка «Центральный» месторождения «Мынкудук».

**Объектом исследований является** месторождение «Центральный Мынкудук», расположенный в Сузакском районе Туркестанской области.

**Предметом исследований является** технология активации рабочего раствора при ПСВ урана.

**Методологическая база исследований:**

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

**Практическая значимость** диссертации заключается в разработке технологии активации рабочего раствора для повышения содержания урана в продуктивном растворе и снижения расхода реагента.

**Публикации и апробация работы.** Результаты работы докладывались на международных научно-технических и научно – практических конференциях:

- Сатпаевские чтения на тему «Инновационные технологии – ключ к успешному решению фундаментальных и прикладных задач в рудном и нефтегазовом секторах экономики РК» 2019 (год);
- Сборник научных трудов 15-й международной конференции по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики. Минск – Тула – Донецк, 29 – 30 октября 2019 г.
- Сатпаевские чтения 2020 – 2021 на тему «Разработка рудных и нерудных ископаемых»; 2021 год.

**Публикации,** включают статьи в журналах «Горный Журнал Казахстана» (Алматы, 2021), «Новости науки Казахстана» (Алматы, 2021), а также в рейтинговых журналах «Mining of mineral deposits», (Днепр, 2019), «Известия» НАН РК (Алматы, 2021), «Уголь» (Москва, 2021).

**Структура и объем работы:** Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения, библиографического списка из 21 наименований и содержит 65 страниц машинописного текста, 35 рисунков, 13 таблиц и 3 приложения.

Автор выражает искреннюю признательность и благодарность научным консультантам, ассоциированному профессору Абен Е.Х. и профессору Алиеву С.Б. за полезные советы, ценные замечания и постоянное внимание в ходе выполнения данной работы.

## Основная часть

Месторождение Мынкудук является Центральным участком, который расположен в центральной части Чу – Сарысуйской провинций. Поселок Шиели является ближайшей железнодорожной станцией, находящаяся в 240 км. Связь с железнодорожными станциями и районом работ производится спецавтотранспортом. Непосредственно поблизости Мынкудукского месторождения населенных пунктов нет. Самые ближние населенные пункты это – поселок Кыземшек, который находится в 96км, и поселок Тайконур, находящийся в 70км.

Руды Мынкудукского горизонта, на участке Центральный в особенности, являются коффинит – настурановыми. Участок Центральный включает в себя залежи 8 и 10, локализованные в мынкудукском горизонте в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристика размеров рудных залежей участка Центральный месторождения Мынкудук

Номера залежи	Интервал профилей		Протяженность, км	Ширина залежи, м		Глубина залегания подошвы залежи, м	Положение по отношению к нижнему водоупору, в % к площади залежи		Доля запасов от общего по месторождению, в %
	от	до		от	до		менее 10м	более 10м	
8	288	212	8,8	50	1300	305-345	82	18	9,2
10	212	48/1	26,4	50	800	340-365	84	16	27,1
18	48/1	620	1,1	50	320	300-315	65	35	0,3
Итого по участку			36,3				77	23	36,6

Содержания урана и мощности рудных тел варьируют в широких пределах: от 0,015 до 0,177% и от 0,90 до 16,80 м соответственно.

По состоянию на 01.10.2018 года на участке «Центральный» месторождения «Мынкудук» на этапе активного выщелачивания работают 70 технологических блоков из них 58 технологических блоков (данные без учёта объединения технологических блоков) вскрыты гексагональной схемой, а 12 технологических блоков вскрыты рядной схемой.

Основываясь на морфологические параметры рудных тел, принятой сети размещения скважин, вещественного состава руд и вмещающих пород, водно-физических свойств продуктивного горизонта, закисление будет проводиться выщелачивающими растворами с концентрацией серной

кислоты до 25 г / л с продолжительностью от 1,3 до 4,7 мес для получения продуктивных растворов с промышленной концентрацией урана (40 – 50 мг / л) и  $pH < 3$ .

По результатам опытно-экспериментальных работ на месторождении дебит откачных скважин варьирует от 5,8 до 7,2 м<sup>3</sup>/час; при этом приемистость закачки составляет 2 – 4 м<sup>3</sup>/час.

Стадия активного выщелачивания отмечается интенсивностью перехода урана в продуктивный раствор и его переносом в откачные скважины.

Концентрацию рабочих растворов серной кислоты на данном этапе, в условиях месторождения, необходимо поддерживать на уровне 6 – 8 г/л. При этом, варьируя содержание серной кислоты в указанных пределах, нужно обеспечивать поддержание  $pH$  в продуктивных растворах на уровне 2,0 – 2,2 ед.

Анализ технологии выщелачивания на данном месторождении показал, что при повышении концентрации серной кислоты до 25 – 26 г/л наблюдается повышение содержания урана в продуктивном растворе до 220 мг/л. После снижения кислотности выщелачивающего раствора до уровня 8 – 10 г/л, наблюдается снижение содержания урана в продуктивном растворе.

Как известно, для выщелачивания урана применяются серная, азотная и соляная кислоты, сода, бикарбонат натрия (двууглекислые соли) и карбонат (соли и эфиры угольной кислоты) аммония. Поскольку выщелачивание сопряжено с переработкой больших количеств сырья, стоимость выщелачивающих реагентов в значительной мере определяет себестоимость конечного продукта. В добывающих предприятиях для того чтобы снизить расход на кислоту, проводят много опытов, так как затраты на реагенты составляет 27 – 45% от эксплуатационных затрат на выщелачивание.

### **Исследовательская часть**

Для снижения расхода реагента применяются различные технологические решения, которые отличаются дороговизной и технологическими сложностями их применения. Поэтому, предложена технология механической активации рабочего раствора, позволяющая повысить ее химическую активность и отличающиеся низкими капитальными и эксплуатационными затратами.

В процессе исследования влияния активации на активность выщелачивающего раствора возник вопрос, что именно является основной причиной изменения активности реагента, необходимо ли активировать весь выщелачивающий раствор, так как активировать весь выщелачивающий раствор требует значительных материальных затрат. Особенно остро этот вопрос возник после явного разложения под действием активации серной кислоты.

С целью определения реального действия активации был проведен эксперимент, когда по обычной технологии из воды и серной кислоты

готовили выщелачивающий раствор и проверяли по обычной методике его активность. Второй раствор готовили с предварительно активированной водой в течении 5 минут. Исследования были проведены на растворах с содержанием кислоты 10г/л.

Для получения эффекта активации нами была изготовлена активационная установка (рисунок 1). Лабораторная установка состоит из замкнутого контура, в который входят центробежный насос (НС) с электроприводом, проточного активатора (R), трубопровода, емкости (V), сливного крана (Ki).



Рисунок 1 – Лабораторная активационная установка

При выщелачивании с базовым раствором с течением времени выщелачивания содержание урана повышается с 4,27 мг/л до 4,58 мг/л, то при активации только воды, вначале наблюдается снижение содержание урана по сравнению с базовым раствором с 4,27 мг/л до 4,16 мг/л. Затем после выдержки раствора в течение 2 часов его активность восстанавливается, приближаясь по значениям к свойствам исходного раствора.

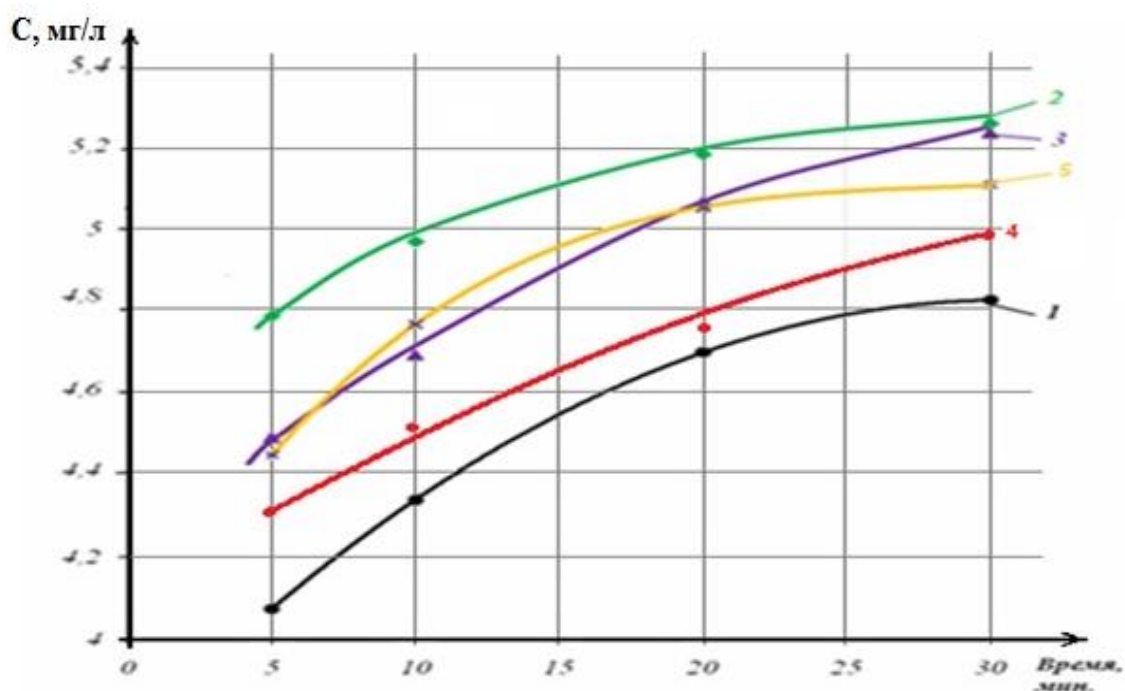
В установку залили около 1,5 литров кислоты и провели обработку в течение 5 минут. Затем из активированной кислоты приготовили раствор с содержанием 10 г/л и проверили его активность при выщелачивании. Результаты сравнили с таким же экспериментом, но без предварительной активации кислоты.

При выщелачивании с базовым раствором и с увеличением времени выщелачивания до 30 минут, наблюдается повышение содержания урана в растворе с 4,08 мг/л до 4,70 мг/л, а при выщелачивании активированным раствором сразу после активации соответственно наблюдается повышение содержания с 4,78 мг/л до 5,23 мг/л. Проведенная активация раствора привела к первичному увеличению выщелачивания за 5 минут на 17%.

Сравнение результатов измерений содержания урана в растворах при активации только воды и только серной кислоты показал, что активность увеличилась на 14%. Следовательно, в промышленных условиях нет необходимости проводить механическую активацию всего

выщелачивающего раствора, следует ограничиться только активацией доукрепляющей концентрированной серной кислоты. Это резко снижает энергетические затраты.

Далее, лабораторные исследования были проведены для установления влияния степени активации выщелачивающего раствора, времени реакции и выдержки раствора во времени после обработки на содержания урана в продуктивном растворе. При этом степень активации выщелачивающего раствора изменяли 3, 5 и 10 минут, время реакции 5, 10, 20 и 30 минут, а время выдержки раствора после активации сразу, через 2 часа, через 24 часа и через 30 дней. Изменение содержания урана в продуктивном растворе в зависимости от времени реакции и выдержки раствора во времени после обработки в течение 3, 5 и 10 минуты активатором приведены на рисунках 2,3,4.

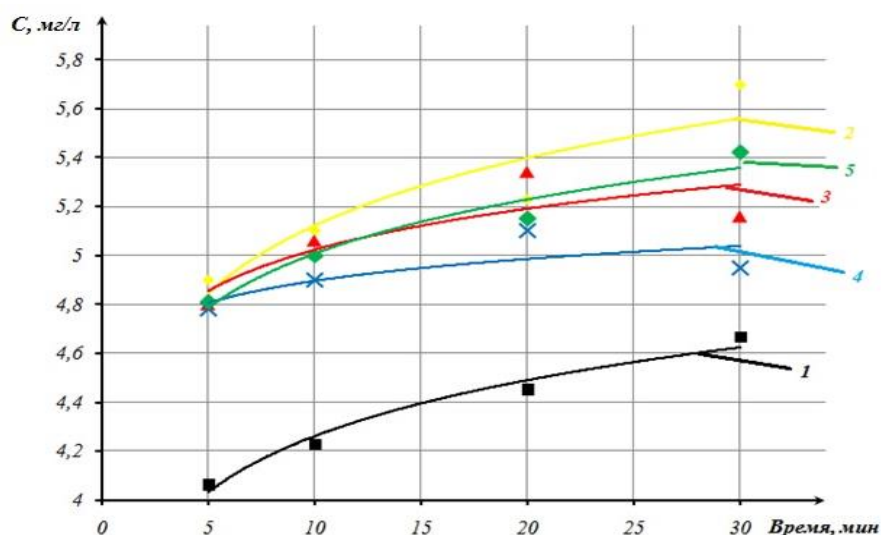


1 – исходное состояние раствора (до обработки); 2 – после обработки;  
3 – через 2 часа после обработки; 4 – через 24 часа; 5- через 30 дней

Рисунок 2 – Изменение содержания урана в продуктивном растворе в зависимости от времени реакции и выдержки раствора во времени после обработки в течение 3 минут активатором

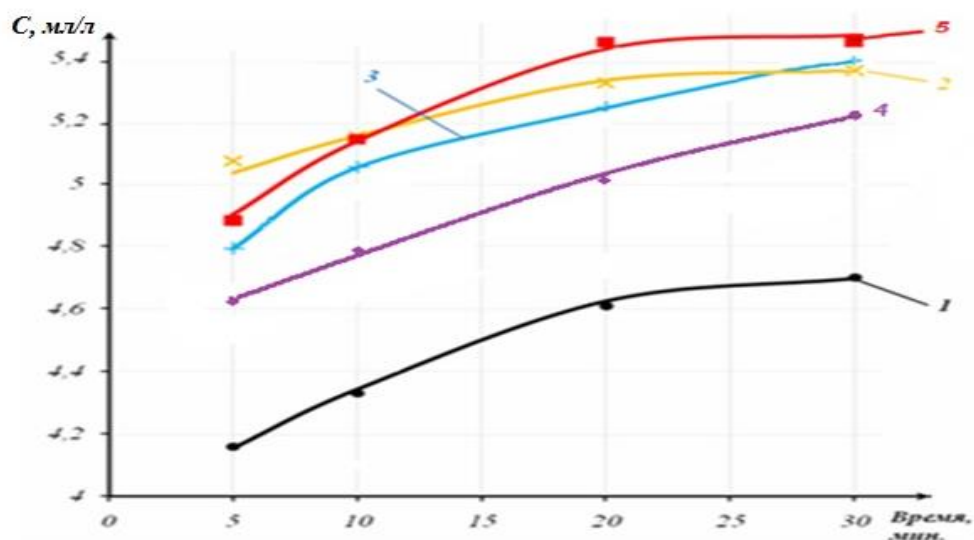
Из анализа следует, что наибольшие изменения в содержании урана в растворе наблюдается при времени выщелачивания 5 минут (на 21%), а затем эта разность снижается. Ожидавшегося значительного уменьшения активности раствора после выдержки его во времени не произошло. С увеличением времени выдержки раствора после активации до 30 дней, содержание урана в продуктивном растворе незначительно снижается, т.е. активность раствора сохраняется.





1 – исходное состояние раствора (до обработки); 2 – после обработки;  
 3 – через 2 часа после обработки; 4 – через 24 часа; 5 – через 30 дней.  
 Рисунок 3 – Изменение содержания урана в продуктивном растворе в зависимости от времени реакции и выдержки раствора во времени после обработки в течение 5 минут активатором

Исследованиями установлено, что первоначально активность раствора за 5 минут выщелачивания выросла на 20,5%, а через 10 минут – на 21%. При этом так же наблюдается незначительное снижение активности раствора после активации с течением времени до 30 суток. В целом можно считать, что первичная активность сразу после обработки раствора активатором и в течение 30 дней остается постоянным.



1 – исходное состояние раствора (до обработки); 2 – после обработки;  
 3 – через 2 часа после обработки; 4 – через 24 часа; 5 – через 30 дней  
 Рисунок 4 – Изменение содержания урана в продуктивном растворе в зависимости от времени реакции и выдержки раствора во времени после обработки в течение 10 минут активатором

Увеличение времени обработки раствора до 10 минут привело к росту активности при 5 минутах проведения реакции выщелачивания на 25%. При обработке раствора имело место заметное выделение сернистого газа. Это объясняется не значительным испарением серной кислоты. В течение 2 часов активность раствора снизилась до 8,0% и удерживалась в таком состоянии длительное время.

Таким образом, активация раствора приводит к повышению содержания полезного компонента в продуктивном растворе. Однако, в ходе проведенных исследований было установлено, что с повышением времени активации изменяется плотность выщелачивающего раствора, что может оказать влияние на гравитационное и соответственно процессу осаждения продуктивного раствора. Это в свою очередь может привести к изменению извлечения урана. Обработкой данных исследований, получены графики изменения плотности раствора и содержания урана в продуктивном растворе.

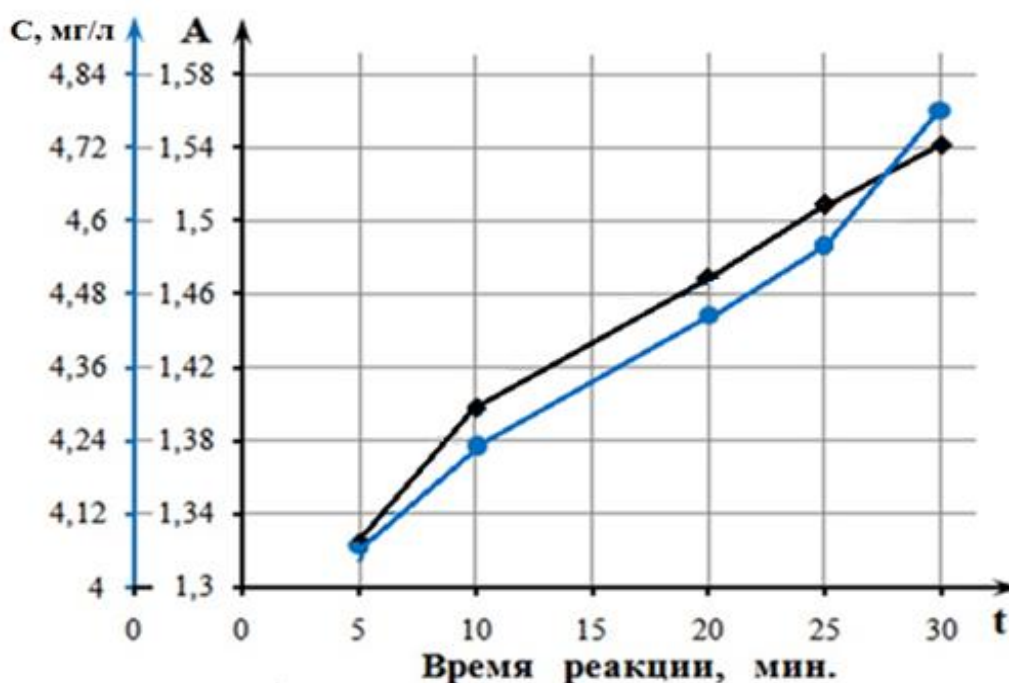


Рисунок 5 – График изменение плотности (А) и содержания урана в продуктивном растворе (С, мг/л) от времени обработки раствора активатором

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Подземное скважинное выщелачивание сопряжено с переработкой больших количеств сырья, стоимость выщелачивающих реагентов в значительной мере определяет себестоимость конечного продукта. Для снижения расхода реагента применяются различные технологические решения, которые отличаются дороговизной и технологическими сложностями их применения.

2. Разработана технология механической активации рабочего раствора, позволяющая повысить ее активность и отличающиеся низкими капитальными и эксплуатационными затратами

3. Для активации выщелачивающего раствора предлагается проводить механическую обработку только серной кислоты перед доукреплением маточного раствора. Сравнение результатов измерений содержания урана в растворах при активации только воды и только серной кислоты показали повышение содержания урана в растворе на 14% при активации только серной кислоты. Следовательно, в промышленных условиях нет необходимости проводить механическую активацию всего выщелачивающего раствора, следует ограничиться только активацией доукрепляющей концентрированной серной кислоты. Таким образом уменьшается объем обрабатываемого раствора и затраты на изготовление и эксплуатацию активатора.

4. Получены зависимости содержания урана в продуктивном растворе от времени активации рабочего раствора и времени после активации, что позволит регулировать время активации раствора в зависимости от расстояния ее транспортировки. Например, активация раствора приводит к повышению содержания урана в продуктивном растворе от 9 до 21%, а его активность сохраняется длительное время (до 30 дней).

5. При проведении исследований с не активированным и активированным раствором плотность выщелачивающего раствора изменяется незначительно, что не оказывает влияния на гравитационное опускание продуктивного раствора.

6. Для применения данной технологии в производственных условиях изготовлен активатор, который установлен в блок 8-9-3 рудника «Центральный Мынкудык, фактическое повышение содержания урана в продуктивном растворе составило 8%.

7. Ожидаемый экономический эффект рассчитан с учетом снижения расхода серной кислоты за счет сокращения срока отработки запасов блока при условиях применения технологии активации выщелачивающего раствора. На один технологический блок с запасом урана 278,7 тонны эффект составит 25 426 192 тенге.