

## ПРОЦЕСС БИКАРБОНАТНОГО ПОДЗЕМНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ УРАНА ИЗ ВЫСОКОКАРБОНАТНЫХ РУД

**Шарипов Хасан Туропович**

*д-р. хим. наук, ГУП «Фан ва таракиёт», Ташкентский государственный технический университет,  
100034, Узбекистан, г. Ташкент, ул. Университетская, дом № 2*

**Шарафутдинов Улугбек Зиятович**

*канд. техн. наук, Рудоуправления №5, Навоийский горно-металлургический комбинат,  
210100, Узбекистан, г. Навои, ул. Навои, дом № 27  
E-mail: [u0505@mail.ru](mailto:u0505@mail.ru)*

## THE PROCESS OF BICARBONATE LEACHING OF URANIUM FROM ORES THE HIGHLY

**Khasan Sharipov**

*doctor of Chemical Sciences, SUE "Fan vatarakiet", Tashkent State Technical University,  
100034, Uzbekistan, Tashkent, University Street, 2*

**Ulugbek Sharafutdinov**

*candidate of Technical Sciences, Mining Administration № 5, Navoi Mining and Metallurgical Combine,  
210100, Uzbekistan, Navoi, Navoi Street, 27*

### АННОТАЦИЯ

Долгое время в практике подземного выщелачивания урана высококарбонатные руды были отнесены в технологический забаланс. Поскольку высокая реагентоемкость пород и интенсивная кольтация не позволяли эффективно отрабатывать запасы традиционным сернокислотным способом. Внедрена в производство так называемая безреагентная и слабокислотная схема. Это позволило практически полностью отказаться от серной кислоты, с хорошими показателями доработывать месторождения и начать отработку таких же бедных месторождений. Эффективность такого способа подземного выщелачивания, подтвержденная теоретическими, лабораторными и полевыми исследованиями, обусловлена практически полной имитацией природных условий рудообразования, характеризующимися переносом урана, смытого из гранитных массивов атмосферными водами, по водоносному горизонту бикарбонатными пластовыми водами, содержащими кислород. Исследования по оптимизации процесса выщелачивания урана из высококарбонатных руд проведены на одном из месторождений инфильтрационного типа на керновом материале, отобранном из трех скважин и представляющем верхнее и нижнее крылья уранового ролла. Установлено, что подача бикарбоната натрия снижает проницаемость руды в среднем на 40 % за счет образования кальцита и гипса, о чем свидетельствует изменение концентраций  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{SO}_4^{2-}$  в продуктивных растворах.

### ABSTRACT

For a long time in the practice of underground leaching of uranium ore was highly related to the technological off balance. Since the high reagent consumption rocks and intense mudding is not allowed effectively to work off the reserves of conventional sulfuric acid method. So-called non-chemical and weakly acidic diagram was introduced in the production. This allowed almost completely abandon the sulfuric acid, with good modifying field and start working off the same poor fields. The effectiveness of this method of underground leaching, confirmed the theoretical, laboratory and field studies, due to the almost complete imitation of natural conditions of mineralization, characterized by the transfer of uranium eroded from granite massifs atmospheric waters, aquifer bicarbonate formation waters containing oxygen. Research on the optimization of the process of leaching of uranium ores high carbonate held in one of the fields of infiltration type core material selected from the three wells representing the upper and lower wings of a uranium roll. It is found that the supply of sodium bicarbonate reduces the permeability of the ore in an average of 40% by gypsum and calcite formation, as evidenced by the change in the concentration of  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{SO}_4^{2-}$  in the productive solutions.

**Ключевые слова:** геотехнология, подземное выщелачивание, уран, безреагентная и слабокислотная схема, кислород, бикарбонат натрия.

**Keywords:** geotechnology, underground leaching, uranium, reagent-free and low-acid diagram, oxygen, sodium bicarbonate.

В условиях рыночной экономики рациональные технологии добычи полезных ископаемых, является основным решающим фактором, определяющим экономическую целесообразность проведения горных работ.

Доказывать преимущества подземного выщелачивания (ПВ) сегодня уже нет необходимости. Применение современных технических средств позволяет совершенствовать технологию отработки, эффективность которой во многом зависит от природных условий месторождений, каждое из которых уникально и имеет свои особенности.

При разработке химического направления ПВ следует твердо усвоить необходимость безусловного использования окислителей, как гарантий успешного осуществления процесса ПВ, независимо от применяемых реагентов. Из-за дороговизны и дефицита ранее окислители применялись эпизодически. Их отсутствие компенсировалось недопустимо высокой кислотностью рабочих растворов. Это, как правило, всегда приводило к перерасходу кислоты, сопровождалось коагуляционными и другими отрицательными явлениями и в конце концов привело в тупик. Бедные и карбонатные руды, сосредоточенные в мощных многослойных толщах песков, обрабатывать таким способом уже невозможно.

В Навойском горно-металлургическом комбинате (НГМК) была внедрена в производство так называемая безреагентная и слабокислотная схема ПВ пластовой водой, насыщенной кислородом воздуха [1, с. 112]. Это позволило практически полностью отказаться от серной кислоты, с хорошими показателями дорабатывать месторождения и начать отработку таких же бедных месторождений. Эффективность такого способа ПВ, подтвержденная теоретическими, лабораторными и полевыми исследованиями, обусловлена практически полной имитацией природных условий рудообразования, характеризующимися переносом урана, смывом из гранитных массивов атмосферными водами, по водоносному горизонту бикарбонатными пластовыми водами, содержащими кислород. После расходования кислорода уран из воды выпадает в осадок на выклинивании зон пластового окисления, формируя в песчаных горизонтах за десятки и сотни тысяч лет скопления и залежи промышленного значения. Для разрушения таких залежей и извлечения из них урана достаточно насыщения бикарбонатных ( $>100 \dots 200$  мг/л  $\text{HCO}_3^-$ ) подземных вод кислородом до пределов его растворения в пластовых условиях ( $>50 \dots 100$  мг/л).

При уменьшении в воде концентраций  $\text{HCO}_3^-$  ниже 100 мг/л возможны два пути его повышения - ввод бикарбонатных реагентов ( $\text{NaHCO}_3$ ,  $\text{NH}_4\text{HCO}_3$  и др.) и добавка в воду незначительного количества кислоты (до 2..5г/л) или углекислого газа для генерирования  $\text{HCO}_3^-$  за счёт разложения карбонатных минералов. Первый путь не целесообразен из-за снижения проницаемости пласта в результате образования солей жёсткости. К тому же искусственные реагенты в несколько раз пассивнее генерированных (природных) бикарбонат-ионов. Дороговизна сжиженного  $\text{CO}_2$  не позволяет использовать его в промышленных

масштабах. Следовательно, наиболее эффективной и доступной остаётся кислотно-бикарбонатная схема ПВ. Но при отсутствии карбонатов в рудном горизонте и эта схема может оказаться не приемлемой, тогда необходим переход на кислотное выщелачивание. Но в любом случае требуется окисление руд. Таким образом, независимо от конкретных геохимических и гидрогеологических условий рекомендуется для промышленного освоения месторождений следующая схема ПВ:

1. Бикарбонатное выщелачивание пластовой водой, насыщенной кислородом воздуха. Если при этом процесс ПВ осуществляется с достаточной интенсивностью (извлечение не менее 2,0 % в месяц), то он продолжается до полного завершения извлечения урана. В противном случае производится переход к следующему этапу;

2. Кислотно-бикарбонатное выщелачивание слабо подкисленными воздухом насыщенными пластовыми водами. Если и эта схема окажется не эффективной, то процесс переводится на заключительную стадию;

3. Кислотное выщелачивание предварительно окисленных руд.

Как отмечалось выше, осадочные урановые месторождения инфильтрационного эпигениза формируются подземными водами. Идея применения метода ПВ для добычи урана и была выдвинута именно благодаря активной роли пластовых вод в рудообразовании - если пластовые воды формируют рудные тела, то они могут быть использованы для их разрушения. Смущали лишь ничтожно малые скорости массопереноса в природных условиях, хотя и было установлено, что при обнажении рудных тел горными выработками концентрации урана в дренируемых водах резко возрастали на несколько порядков (от п. $10^{-4} \dots$  п. $10^{-6}$  до п. $10^{-2}$  г/л, т.е. до 10 мг/л и выше). Это явление, обусловленное окислением руд кислородом воздуха, и дало основание для проведения первых опытов по ПВ на месторождении Учкудук. Недостаточная интенсивность водного выщелачивания заставила отказаться от этого способа и заменить воду раствором серной кислоты. Спустя года мы начали использовать пласт в качестве природного автоклава для растворения кислорода и за счёт интенсификации окисления руд активизировать процесс водного выщелачивания.

Выщелачивание урана из высококарбонатных руд ( $\text{CO}_2 > 5\%$ ) имеющих проницаемость 1,0-1,5 м/сут, по сернокислотной технологии с достаточной экономической эффективностью невозможно в связи с большим расходом кислоты, газовой и гипсовой коагуляцией пласта, низкими дебитами откачных скважин. Вместе с тем, учитывая, что комбинат располагает значительными запасами именно таких руд, разработка экономически эффективной и технически реализуемой технологии в сочетании с решением вопроса увеличения приемистости закачных скважин и дебитов откачных позволит расширить сырьевую базу комбината.

Исследования по оптимизации процесса выщелачивания урана из высококарбонатных руд проведены

на одном из месторождений инфильтрационного типа на керновом материале, отобранном из трех скважин и представляющем верхнее и нижнее крылья уранового ролла. Для технологических исследований были сформированы четыре пробы руды в зависимости от их карбонатности и литологии и одна валовая (усредненная) проба, составленная из материала всех четырех типов руд:

проба № 1 - песок с карбонатностью по  $\text{CO}_2$  до 0,2 %;

проба № 2 - песок с карбонатностью по  $\text{CO}_2$  до 2 %;  
 проба № 3 - песчаник на карбонатном цементе с карбонатностью по  $\text{CO}_2$  до 10 %;

проба № 4 - песок карбонатизированный с редкими прослоями глини и песчаников с карбонатностью по  $\text{CO}_2$  до 7 %;

Химический состав руды и пластовой воды представлен в таблицах 1 и 2.

Таблица 1.

## Химический состав проб руд (%)

№ пробы	$\text{SiO}_2$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$S_{\text{общ.}}$	$\text{CO}_2$	U
1	77,41	1,75	11,42	0,14	0,81	1,11	<0,2	0,342
2	76,19	1,26	8,57	2,38	0,91	0,59	1,7	0,261
3	58,07	1,14	6,98	14,38	0,86	0,34	9,9	0,060
4	67,69	1,09	7,93	8,44	1,46	0,56	6,4	0,155
В*	67,07	1,94	7,93	8,27	1,06	0,51	6,3	0,174

\*- проба валовая (В) пески и песчаники мелкозернистые с примесью среднезернистого (1 - 5 %) и алевритового (5 - 10 %) материала.

Таблица 2.

## Химический состав пластовой воды (ОВП=350 мВ; pH=8,4)

Соединения	$\text{Na}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{CO}_3^{2-}$	$\text{HCO}_3^-$	U	Сухой остаток
Содержание, мг/л	520	132	61	1000	12	256	2	2168

Пробы сложены в основном обломочными минералами (кварц, полевые шпаты, обломки пород), устойчивыми к воздействию выщелачивающих растворов. Количество карбонатов в песках колеблется от 0,45 до 23,5 %, в песчаниках от 17 до 40 %. Высокое содержание карбонатов в песках обусловлено присутствием обломков крепких карбонатных песчаников и карбонатных стяжений, в которых обломочные зерна сцементированы карбонатным материалом. В основной массе песка карбонаты представлены отдельными зёрнами и реже их сростками. В песчаниках карбонаты слагают цемент обломочных зёрен контактного, контактно-порового и порово-базального типов.

Урановая минерализация в песках и песчаниках представлена в основном настураном и очень редко коффинитом в виде черных сажистых плёнок, налётов на поверхности обломочных зёрен и реже на выделениях пирита. Часть урана в сорбированном состоянии присутствует в глинистом материале, фосфорите, лейкоксене и других минералах.

Испытания по выщелачиванию проб руды проводили в статических и динамических условиях. В качестве выщелачивающего реагента применяли бикарбонат натрия в присутствии окислителя - кислорода.

Таблица 3.

## Результаты статистического выщелачивания урана из руды валовой пробы

Ж : Т	Концентрация урана, мг/л			Содержание урана в кеке, %	Извлечение урана, %
	5 сут	7 сут	10 сут		
10	140	150	170	0,0177	90,2
5	260	270	240	0,0183	89,5
3	320	290	250	0,0250	85,6
2	440	366	340	0,0400	77,0

Для проведения опытов использовали автоклавы, в которые после загрузки пробы руды и определенного количества растворителя закачивали сжатый кислород под давлением  $10^3$  кПа. Некоторые результаты опытов по выщелачиванию урана раствором карбоната натрия (1 г/л) при различных значениях Ж : Т приведены в табл. 3. Полученные результаты свидетельствуют о высокой эффективности процесса.

Анализ кеков показал, что карбонаты разрушаются реагентом незначительно, окислитель взаимодействовал преимущественно с ураном, о чем свидетельствуют практически неизменившиеся содержания  $\text{Fe}^{2+}$  и S. Исследования в динамических условиях осуществлялись в 8 фильтрационных колонках, в которых окислительная обстановка создавалась кислородом, выделяемым при

разложении перекиси водорода, вводимой в состав выщелачивающего реагента (табл. 4). Установлена различная кинетика выщелачивания урана: наиболее низкая - для пробы руды 1-го типа, характеризующейся высоким исходным содержанием урана и низким - карбонатов, и высокая - для пробы руды 3-го типа с содержанием урана в 6 раз ниже, чем в руде 1-го типа, и самым большим содержанием карбонатов.

При сравнительном анализе результатов выщелачивания урана в статическом и динамическом режимах четко прослеживается положительная роль давления (табл. 5).

**Таблица 4.**

**Обобщенные данные по результатам фильтрационного выщелачивания урана из технологических проб руды**

№ пробы	Расход $\text{NaHCO}_3 + \text{H}_2\text{O}_2$ , г/л	Ж : Т	Содержание урана в кеке, %	Извлечение урана, %
1	1,0 + 1,2	14,4	0,043	87,4
2	0,5 + 1,2	9,1	0,033	87,4
3	0,5 + 1,2	10,8	0,007	88,8
4	1,0 + 1,2	14,6	0,029	81,2
В	1,0 + 1,2	12,5	0,021	87,9

**Таблица 5.**

**Сравнительные результаты извлечения урана в автоклавах и в режиме фильтрационного выщелачивания (концентрация  $\text{NaHCO}_3$  – 1 г/л; Ж : Т = 10)**

№ пробы	Извлечение урана, %	
	Автоклав	Колонка ( $\text{H}_2\text{O}_2$ 1,2 г/л)
1	87,3	65,0
2	90,3	72,0
3	90,2	100,0
4	87,9	95,0
В	90,2	80,0

Изучено влияние бикарбоната натрия на извлечение урана при фиксированной концентрации окислителя (1,2 г/л  $\text{H}_2\text{O}_2$ , или 200 мг/л в кислородном эквиваленте). Установлено положительное влияние роста концентрации бикарбоната натрия на процесс выщелачивания урана из различных типов руд (табл. 6).

Как следует из данных таблиц 5 и 6, влияние фактора давления на прирост извлечения урана может быть более эффективным, чем увеличение вдвое концентрации бикарбоната натрия.

**Таблица 6.**

**Извлечение урана (%) в автоклаве и фильтрационных колонках (Ж : Т = 5)**

№ пробы	Автоклав	Колонки ( $\text{H}_2\text{O}_2$ 1,2 г/л)		
	Расход $\text{NaHCO}_3$ , г/л			
	1,0	0,5	1,0	2,0
2	89,6	55,0	53,0	-
3	84,7	80,0	100,0	-
4	84,8	53,0	70,0	-
В	89,5	53,0	59,0	70,0

В процессе работы колонок было установлено, что подача бикарбоната натрия снижает проницаемость руды в среднем на 40 % за счет образования кальцита и гипса, о чем свидетельствует изменение концентраций  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{SO}_4^{2-}$  в продуктивных растворах.

Отмечен также вынос радия, содержание которого в продуктивных растворах возросло в 3 раза по сравнению с содержанием в пластовой воде и находится в прямой зависимости от содержания урана и радия в исследуемом материале.

**Список литературы:**

1. Толстов Е.А., Толстов Д.Е. Физико-химические геотехнологии освоения месторождений урана и золота в Кызылкумском регионе. М. Геоинформцентр. 2002. -284 с.

**References:**

1. Tolstov E.A., Tolstov D.E. Physical and chemical geotechnology development of uranium and gold deposits in Kyzylkum region. Moscow, Geoinformtsentr Publ., 2002. 284 p. (In Russian).