

Бескислотный способ повышения окислительно-восстановительного потенциала оборотного раствора при подземном выщелачивании урана

Р. А. Юсубалиев¹, Е. С. Орынгожин^{2,3}, М. К. Джексенов⁴,
Е. Е. Орынгожа^{5✉}, Н. А. Милетенко⁶

¹Национальная инженерная академия Республики Казахстан, г. Алматы, Республика Казахстан

²Институт горного дела имени Д. А. Кунаева, Алматы, Республика Казахстан

³Казахский национальный университет имени Аль-Фараби, г. Алматы, Республика Казахстан

⁴Атырауский университет имени Х. Досмухамедова, г. Атырау, Республика Казахстан

⁵Алматинский университет энергетики и связи имени Г. Даукеева, г. Алматы, Республика Казахстан

⁶ФГБУН «Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Мельникова» Российской академии наук (ИПКОН РАН), г. Москва, Российская Федерация

✉ e24.01@mail.ru

Резюме. Развитие уранодобывающей промышленности Казахстана связано с решением крупных научно-практических задач. Современное уранодобывающее производство характеризуется высокой динамичностью, возникновением в ряде случаев радиационно опасных ситуаций, требующих принятия быстрых и эффективных решений по их устранению. Каждое из месторождений имеет специфические особенности, что обуславливает необходимость выполнения определенных объемов научных исследований не только в процессе разработки новых, но и при применении известных технических решений. Поскольку на полигонах подземного выщелачивания в Казахстане применяется технологическая схема, предусматривающая использование оборотных растворов, содержащих ряд петрогенных элементов Na, Ca, Mg, Al, Fe и, кроме того, ионы Cl⁻ и NO₃⁻, их влияние на изменение окислительно-восстановительного потенциала при взаимодействии с карбонатами минерализованных сернокислых растворов нельзя не учитывать. Взаимодействие сернокислых растворов с карбонатами сопровождается значительным повышением pH. При этом помимо простых ионов металлов и их сульфатных комплексов в растворах появляются известные гидрокомплексы, а также бикарбонатные и карбонатные комплексы. В статье приводится бескислотный способ повышения окислительно-восстановительного потенциала оборотных растворов скважинного выщелачивания урана с использованием ультразвука и результаты лабораторных экспериментов, подтверждающих высокую эффективность разработанного способа.

Ключевые слова: уран, подземное выщелачивание, окислительно-восстановительный потенциал, способ, раствор, эффективность

Для цитирования: Юсубалиев Р.А., Орынгожин Е.С., Джексенов М.К., Орынгожа Е.Е., Милетенко Н.А. Бескислотный способ повышения окислительно-восстановительного потенциала оборотного раствора при подземном выщелачивании урана. *Маркшейдерия и недропользование*. 2026; 26 (3): 27-32. <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-3-27-32>.

An acid-free method for increasing the oxidation-reduction potential of uranium in-situ leaching recycle solution

R. A. Yusubaliev¹, Ye. S. Oryngozhin^{2,3}, M. K. Djexenov⁴,
Ye. Ye. Oryngozha⁵✉, N. A. Miletenko⁶

¹National Engineering Academy of the Republic of Kazakhstan, Almaty, Republic of Kazakhstan

²Institute of mining after D.A. Kunaeva, Almaty, Republic of Kazakhstan

³Al-Farabi Kazakh national university, Almaty, Republic of Kazakhstan

⁴Atyrau university named after H. Dosmukhamedova, Atyrau, Republic of Kazakhstan

⁵Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeyev, Almaty, Republic of Kazakhstan

⁶Academician Melnikov Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources (IPKON), Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

✉ e24.01@mail.ru

Abstract. The development of Kazakhstan's uranium mining industry is linked to addressing major scientific and practical challenges. Modern uranium mining is characterized by high dynamism and the occasional occurrence of radiation-hazardous situations that require rapid and effective solutions. Each deposit has its own specific characteristics, necessitating a certain amount of scientific research not only during the development of new deposits but also during the application of existing technical solutions. Since the process flowsheet used at the in-situ leaching sites in Kazakhstan involves the use of recirculating solutions containing several petrogenic elements (Na, K, Ca, Mg, Al, Fe), as well as Cl^- and NO_3^- ions, their impact on the change in ORP during interaction with carbonates in mineralized sulfuric acid solutions cannot be ignored. The interaction of sulfuric acid solutions with carbonates is accompanied by a significant increase in pH. In addition to simple metal ions and their sulfate complexes, well-known hydrocomplexes, as well as bicarbonate and carbonate complexes, appear in the solutions. This article presents an acid-free method for increasing the redox potential of uranium borehole leaching recycle solutions using ultrasound and describes the results of laboratory experiments confirming the high efficiency of the developed method.

Keywords: uranium, underground leaching, oxidation-reduction potential, method, solution, efficiency

For citation: Yusubaliev R.A., Oryngozhin Ye.S., Djexenov M.K., Oryngozha Ye.Ye., Miletenko N.A. An acid-free method for increasing the oxidation-reduction potential of uranium in-situ leaching recycle solution. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2026; 26 (3): 27-32. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-3-27-32>.

Введение

Авторами статьи разработан бескислотный способ повышения окислительно-восстановительного потенциала оборотных растворов подземного скважинного выщелачивания (ПСВ) урана с использованием ультразвука в сложных горно-гидрогеологических условиях, способы интенсификации технологических процессов, принципиально новые методы дифференцированного извлечения урана, а также создания новой технологии улучшения работы в области экологической и производственной безопасности.

Основные преимущества этого способа подземного скважинного выщелачивания урана по сравнению с традиционными горными способами разработки месторождений [1]:

- возможность вовлечения в эксплуатацию бедных и забалансовых руд месторождений со сложными геолого-гидрогеологическими условиями залегания, но имеющими крупные запасы урана;
- сокращение капитальных вложений и сроков ввода месторождений в эксплуатацию;
- улучшение условий труда, сокращение численности горнорабочих, производительность труда повышается в 2,5 раза;
- уменьшение отрицательного воздействия уранодобычи на окружающую среду.

Каждое из месторождений имеет специфические осо-

бенности, что обуславливает необходимость выполнения определенных объемов научных исследований не только в процессе разработки новых, но и при применении известных технических решений. Поскольку на полигонах подземного выщелачивания в Казахстане применяемая технологическая схема предусматривает использование оборотных растворов, содержащих ряд петрогенных элементов Na, K, Ca, Mg, Al, Fe и, кроме того, ионы Cl^- и NO_3^- , их влияние на изменение при взаимодействии с карбонатами минерализованных сернокислых растворов нельзя не учитывать. Проблеме повышения эффективности добычи урана в Казахстане уделяется значительное внимание.

Цель исследования: разработка бескислотного способа повышения окислительно-восстановительного потенциала оборотных растворов подземного скважинного выщелачивания урана с использованием ультразвука в сложных горно-гидрогеологических условиях и способов интенсификации технологических процессов.

Методика исследований

На полигонах подземного выщелачивания (ПВ) уран добывается подземным скважинным выщелачиванием с использованием водных растворов серной кислоты. Теоретически расход серной кислоты на извлечение 1 кг урана составляет 0,8 кг для четырехвалентных и 0,4 кг – для ше-

сшивалентных форм урана. Однако ввиду взаимодействия растворов с элементами, входящими в состав породообразующих минералов, на практике удельный расход кислоты составляет десятки и даже первые сотни килограммов на килограмм урана.

Анализ продуктивных растворов сернокислотного выщелачивания урана по ряду объектов ПВ показал, что в растворе вместе с ураном попадает целый ряд примесей (табл. 1) [2].

Таблица 1 / Table 1

Концентрация компонентов рудовмещающих пород в растворах выщелачивания /
Concentration of ore-bearing rock components in leaching solutions

Реакция растворения	Извлечение в раствор, %	Концентрация компонентов в растворе, г-моль/л
$CaSiO_3 + H_2SO_4 \rightarrow CaSO_4 + (H_2SiO_3)$	1	$(1,65 \cdot 10^{-3} - 8,3 \cdot 10^{-3}) SiO_2$
$Al_2O_3 + 3H_2SO_4 \rightarrow Al_2(SO_4)_3 + 3H_2O$	3–5	$(9,8 \cdot 10^{-3} - 11,7 \cdot 10^{-2}) Al_2O_3$
$Fe_2O_3 + 3H_2SO_4 \rightarrow Fe_2(SO_4)_3 + 3H_2O$	5–8	$(1,88 \cdot 10^{-3} - 4,4 \cdot 10^{-2}) Fe_2O_3$
$FeO + H_2SO_4 \rightarrow FeSO_4 + H_2O$	40–50	$(6,9 \cdot 10^{-3} - 4,2 \cdot 10^{-2}) FeO$
$FeCO_3 + H_2SO_4 \rightarrow FeSO_4 + H_2O + CO_2$	80–90	$(2,75 \cdot 10^{-3} - 9,7 \cdot 10^{-3}) FeO$
$CaCO_3 + H_2SO_4 \rightarrow CaSO_4 + H_2O + CO_2$	80–90	$(1,51 \cdot 10^{-2} - 2,02 \cdot 10^{-2}) CaO$
$MgCO_3 + H_2SO_4 \rightarrow MgSO_4 + H_2O + CO_2$	80–90	$(5,9 \cdot 10^{-3} - 3,57 \cdot 10^{-2}) MgO$
$MoO_3 + H_2O \xrightarrow{H_2SO_4} H_2MoO_4$	60–90	$(5,2 \cdot 10^{-3} - 3,12 \cdot 10^{-2}) Mo$
$CuO + H_2SO_4 \rightarrow CuSO_4 + H_2O$	30–70	$(1,25 \cdot 10^{-3} - 1,25 \cdot 10^{-2}) CuO$
$Ca(PO_3)_4 + 3H_2SO_4 \rightarrow 3CaSO_4 + 3H_2PO_4$	70–90	$(0,71 \cdot 10^{-3} - 1,0 \cdot 10^{-2}) P_2O_5$

Основными кислотоёмкими минералами являются карбонаты: кальций, доломит, магнезит и некоторые виды глинистых минералов. В значительной степени продуктивные растворы ПВ обогащаются ионами железа и алюминия. Обогащение растворов примесями приводит к понижению кислотности рабочих растворов, возникновению кальмомации пластов и снижению сорбционной емкости ионообменных смол по урану.

Известно, что достаточно высокая степень окисления четырехвалентного урана UO_2 , присутствующего в рудах, достигается при окислительно-восстановительном потенциале (ОВП) 500–600 мВ [3]. Поддержание такого потенциала на практике достигается за счет повышенного расхода серной кислоты для окисления двухвалентного железа в трехвалентное, обеспечивающего поддержание ОВП на требуемом уровне. При этом в Казахстане на полигонах ПВ расходуются десятки и даже сотни тысяч тонн серной кислоты.

С целью существенного сокращения расхода серной кислоты для добычи урана Национальной атомной компанией «Казатомпром» при участии авторов данной статьи разработан бескислотный способ повышения ОВП оборотного раствора ПВ (патент РК № 34456). Сущность способа заключается в ультразвуковом повышении ОВП раствора выщелачивания.

В процессе разработки способа было установлено, что ОВП раствора ПВ зависит, главным образом, от соотношения концентрации ионов Fe^{2+}/Fe^{3+} в растворе и при соотношении $Fe^{2+}/Fe^{3+} \leq 1$ достигается хорошая растворимость четырехвалентного урана. Установлено, что при $Eh < +300$ мВ все железо находится в двухвалентной форме $Fe(II)$,

при $Eh = 450–500$ мВ около 50 % железа окисляется до трехвалентного состояния $Fe(III)$, и при Eh более 500–550 мВ все железо практически переходит в трехвалентную форму. Установлено также, что наращивание концентрации H_2SO_4 в растворе ПВ от 0,5 до 10N реальный потенциал системы меняется весьма незначительно, а расход кислоты существенно возрастает [4–7].

На ОВП раствора влияют и другие присутствующие в нем катионы переменной валентности, однако их роль в установлении потенциала по сравнению с ионами железа незначительна. Концентрация ионов Fe^{2+} в оборотных растворах колеблется в широких пределах и может достигать значительных величин, при этом Eh раствора снижается до 150 мВ.

В связи с тем что Fe^{3+} являются непосредственными окислителями $U(IV)$: $UO_{2(mo)} + 2Fe_{(e)}^{3+} \rightarrow UO_{2(e)}^{2+} + 2Fe_{(e)}^{2+}$, повышение концентрации трехвалентного железа в растворах ПВ является актуальной задачей.

К бескислотному направлению повышения ОВП растворов ПВ, с переводом $Fe(II)$ в $Fe(III)$, относится ультразвуковая обработка оборотных растворов.

С целью определения параметров ультразвуковой обработки оборотных растворов ПВ был проведен цикл лабораторных экспериментов. Взятый на исследования раствор был протестирован на валовую концентрацию элементов (моль/л): $K - 1,7 \cdot 10^{-3}$, $Na - 3,45 \cdot 10^{-2}$, $Ca - 13 \cdot 10^{-2}$, $Mg - 2,61 \cdot 10^{-2}$, $Al - 6,49 \cdot 10^{-3}$, $Fe(II) - 3,98 \cdot 10^{-3}$, $Fe(III) - 4,21 \cdot 10^{-4}$, $U - 1,8 \cdot 10^{-3}$ г/л, $S_{сульф} - 7,9 \cdot 10^{-2}$, $Cl - 2,35 \cdot 10^{-2}$, $NO_3^- - 7,13 \cdot 10^{-3}$, $pH = 2,3$.

Для лабораторных экспериментов использовалась установка с погружным магнитострикционным излучателем. Диаметр торца излучателя составлял 32 мм. Питание преобразователя осуществлялось от ультразвукового генератора УЗГ-10-22. Интенсивность ультразвука поддерживалась постоянной ($2,5 \pm 0,1$ Вт/см²) для всех серий опытов. Частота ультразвука изменялась от 10 до 30 кГц. Диапазон ультразвуковой обработки оборотного раствора ПВ изменялся от 5 до 20 мин. На каждом режиме наложения ультразвука контролировалось изменение состава раствора по Fe^{2+} , Fe^{3+} , Eh и pH . Для определения ионов железа использовался стандартный метод титриметрического анализа, замеры Eh осуществлялись потенциометрическим методом с использованием платинового электрода, применялся также иономер И-115 [3, 8–10].

Результаты экспериментов приведены в таблицах 2 и 3.

Таблица 2 / Table 2

Результаты определения Fe^{3+} /
Results of Fe^{3+} determination

Режим	Время ультразвуковой обработки, мин.			
	5	10	15	20
	Время Fe^{3+} , моль/г			
R_1	$6,16 \cdot 10^{-4}$	$1,16 \cdot 10^{-3}$	$1,87 \cdot 10^{-3}$	$2,04 \cdot 10^{-3}$
	$6,29 \cdot 10^{-4}$	$1,17 \cdot 10^{-3}$	$1,79 \cdot 10^{-3}$	$2,15 \cdot 10^{-3}$
	$6,18 \cdot 10^{-4}$	$1,12 \cdot 10^{-3}$	$1,80 \cdot 10^{-3}$	$2,17 \cdot 10^{-3}$
Среднее	$6,21 \cdot 10^{-4}$	$1,15 \cdot 10^{-3}$	$1,82 \cdot 10^{-3}$	$2,12 \cdot 10^{-3}$
R_2	$1,43 \cdot 10^{-3}$	$2,85 \cdot 10^{-3}$	$4,08 \cdot 10^{-3}$	$4,67 \cdot 10^{-3}$
	$1,51 \cdot 10^{-3}$	$2,76 \cdot 10^{-3}$	$4,29 \cdot 10^{-3}$	$4,70 \cdot 10^{-3}$
	$1,41 \cdot 10^{-3}$	$2,88 \cdot 10^{-3}$	$4,19 \cdot 10^{-3}$	$4,61 \cdot 10^{-3}$
Среднее	$1,45 \cdot 10^{-3}$	$2,83 \cdot 10^{-3}$	$4,22 \cdot 10^{-3}$	$4,66 \cdot 10^{-3}$

Продолжение таблицы / Continuation of the table

Режим	Время ультразвуковой обработки, мин.			
	5	10	15	20
	Время Fe^{3+} , моль/г			
R_3	$2,78 \cdot 10^{-3}$	$5,67 \cdot 10^{-3}$	$6,68 \cdot 10^{-3}$	$7,04 \cdot 10^{-3}$
	$2,71 \cdot 10^{-3}$	$5,71 \cdot 10^{-3}$	$6,62 \cdot 10^{-3}$	$7,12 \cdot 10^{-3}$
	$2,76 \cdot 10^{-3}$	$5,75 \cdot 10^{-3}$	$6,68 \cdot 10^{-3}$	$6,99 \cdot 10^{-3}$
Среднее	$2,75 \cdot 10^{-3}$	$5,71 \cdot 10^{-3}$	$6,66 \cdot 10^{-3}$	$7,05 \cdot 10^{-3}$
R_4	$4,99 \cdot 10^{-3}$	$8,73 \cdot 10^{-3}$	$9,44 \cdot 10^{-3}$	$9,75 \cdot 10^{-3}$
	$4,31 \cdot 10^{-3}$	$8,83 \cdot 10^{-3}$	$9,44 \cdot 10^{-3}$	$9,72 \cdot 10^{-3}$
	$4,40 \cdot 10^{-3}$	$8,87 \cdot 10^{-3}$	$9,47 \cdot 10^{-3}$	$9,69 \cdot 10^{-3}$
Среднее	$4,39 \cdot 10^{-3}$	$8,81 \cdot 10^{-3}$	$9,45 \cdot 10^{-3}$	$9,71 \cdot 10^{-3}$
R_5	$7,15 \cdot 10^{-3}$	$3,43 \cdot 10^{-2}$	$3,91 \cdot 10^{-2}$	$4,25 \cdot 10^{-2}$
	$7,10 \cdot 10^{-3}$	$3,59 \cdot 10^{-2}$	$3,94 \cdot 10^{-2}$	$4,19 \cdot 10^{-2}$
	$7,11 \cdot 10^{-3}$	$3,51 \cdot 10^{-2}$	$3,91 \cdot 10^{-2}$	$4,19 \cdot 10^{-2}$
Среднее	$7,12 \cdot 10^{-3}$	$3,51 \cdot 10^{-2}$	$3,92 \cdot 10^{-2}$	$4,21 \cdot 10^{-2}$

Таблица 3 / Table 3

Результаты изменения e^{2+} , Fe^{3+} и Eh /
Results of changes in Fe^{2+} , Fe^{3+} and Eh

Ре- жим	Компо- нент	Ед. изм.	Продолжительность ультразвуковой обработки, мин.			
			5	10	15	20
R_1	Fe^{2+}	моль/г	$3,78 \cdot 10^{-3}$	$3,25 \cdot 10^{-3}$	$2,58 \cdot 10^{-3}$	$2,28 \cdot 10^{-3}$
	Fe^{3+}		$2,61 \cdot 10^{-4}$	$1,15 \cdot 10^{-3}$	$1,82 \cdot 10^{-3}$	$2,12 \cdot 10^{-3}$
	$Fe^{2+}: Fe^{3+}$	ед.	6,1	2,83	1,42	1,07
	Eh	мВ	+335	+358	+379	+392
R_2	Fe^{2+}	моль/г	$2,95 \cdot 10^{-3}$	$1,57 \cdot 10^{-3}$	$1,81 \cdot 10^{-4}$	0
	Fe^{3+}		$1,45 \cdot 10^{-3}$	$2,83 \cdot 10^{-3}$	$4,22 \cdot 10^{-3}$	$4,66 \cdot 10^{-3}$
	$Fe^{2+}: Fe^{3+}$	ед.	2,03	0,55	0,043	0
	Eh	мВ	+364	+417	+452	+462
R_3	Fe^{2+}	моль/г	$1,64 \cdot 10^{-3}$	10^{-10}	10^{-10}	10^{-10}
	Fe^{3+}		$2,75 \cdot 10^{-3}$	$5,71 \cdot 10^{-3}$	$6,66 \cdot 10^{-3}$	$7,05 \cdot 10^{-3}$
	$Fe^{2+}: Fe^{3+}$	ед.	0,60	0	0	0
	Eh	мВ	+398	+486	+508	+518
R_4	Fe^{2+}	моль/г	$1,1 \cdot 10^{-5}$	10^{-10}	10^{-10}	10^{-10}
	Fe^{3+}		$4,39 \cdot 10^{-3}$	$8,81 \cdot 10^{-3}$	$9,45 \cdot 10^{-3}$	$9,71 \cdot 10^{-3}$
	$Fe^{2+}: Fe^{3+}$	ед.	0,0025	0	0	0
	Eh	мВ	+468	+522	+550	+556
R_5	Fe^{2+}	моль/г	10^{-10}	10^{-10}	10^{-10}	10^{-10}
	Fe^{3+}		$7,12 \cdot 10^{-3}$	$3,51 \cdot 10^{-2}$	$3,92 \cdot 10^{-2}$	$4,21 \cdot 10^{-2}$
	$Fe^{2+}: Fe^{3+}$	ед.	0	0	0	0
	Eh	мВ	+525	+574	+583	+589

Всего было проведено 60 опытов. На каждом режиме проводилось три дублирующих опыта и выводилось среднее значение по трем опытам. Изучалось пять режимов ультразвуковой обработки оборотного раствора ПВ. Режимы обработки были приняты исходя из предварительной теоретической оценки действия ультразвука на жидкие среды.

Принятые режимы:

R_1 – 10 кГц, 2,5 Вт/см², R_2 – 15 кГц, 2,5 Вт/см², R_3 – 20 кГц, 2,5 Вт/см², R_4 – 25 кГц, 2,5 Вт/см², R_5 – 30 кГц, 2,5 Вт/см².

Результаты исследований

Как показали результаты экспериментов, ультразвуковая обработка оборотного раствора ПВ свидетельствует о достаточно высокой эффективности звукохимической реакции окисления двухвалентного железа. Окисление двухвалент-

ного железа до трехвалентного состояния происходит достаточно интенсивно на частотах свыше 20 кГц уже в первые 7–10 мин.

Количественно $Fe(II)$ переходит в $Fe(III)$ наиболее интенсивно на 3–5-м режимах обработки раствора ультразвуком, причем на 5-м режиме (30 кГц, 2,5 Вт/см²) эта трансформация происходит в первые 5 мин. Видимо, в данном режиме порог кавитации интенсивно возникает и действует в растворе в первые 5–10 мин. Этот момент наблюдается и на частотах 20–25 кГц. На частотах ниже 20 кГц образование Fe^{3+} замедляется, и в исследуемых интервалах времени скорость окисления двухвалентного железа снижается. Окислительно-восстановительный потенциал оборотного раствора ПВ с увеличением времени озвучивания повышается довольно интенсивно в первые 15–17 мин. При этом наиболее интенсивно изменение Eh происходит на частоте акустических колебаний 30 кГц, достигая в интервале 7 мин +550 мВ. На частоте 25 кГц Eh +550 мВ достигается на 15-й мин. работы установки [1, 11–15].

Анализ результатов экспериментирования показал, что под действием ультразвука образующиеся в режиме кавитации гидропероксидные радикалы повышают ОВП оборотного раствора и окисляют Fe^{2+} до Fe^{3+} .

В растворах уран может находиться в четырех валентных состояниях: U^{3+} , U^{4+} , U^{5+} , U^{6+} . Многовалентность урана связана с различием энергетических связей электронов оболочек урана. Переменная валентность ведет к образованию различных комплексных соединений урана. При выщелачивании в кислой среде уран образует двухзарядные катионы уранила (UO_2^{2+}), в щелочной – анионы уранилов и обладает слабым сродством к сере и сильным к кислороду.

Водные растворы солей трехвалентного урана весьма неустойчивы. Соли четырехвалентного урана образуют более устойчивые растворы. Кислород воздуха окисляет четырехвалентный уран в водных растворах до шестивалентного. Пятивалентный уран образует в водных растворах радикал уранила (UO) в чрезвычайно неустойчивой форме, переходящей в ионы четырех- и шестивалентного урана. Для добычи урана способом сернокислотного выщелачивания практический интерес имеют соединения шестивалентного урана. Для всех таких соединений характерно образование иона уранила U_2^{+} , определяющего свойства водных растворов солей уранила при ПВ.

Ион уранила обладает высоким сродством к воде и в нейтральных растворах гидратирован. Соли уранила сильно гидратированы и обладают выраженной кислой реакцией (рН 0,02 М раствора уранила равен 2,9). Для всех солей характерна неполная диссоциация на ионы. В сульфатной среде ион уранила – сильный комплексообразователь. В слабокислых растворах с рН = 1–2 образуются трисульфатные и дисульфатные комплексные ионы.

Соотношение простых и комплексных ионов урана, формирующихся в сульфатных растворах ПВ, зависит от кислотности раствора, содержания в нем сульфат-иона и концентрации урана.

Повышение рН раствора с 0,5 до 1,5–2,0 приводит к снижению содержания катиона уранила и резкому повышению содержания в растворе ионов уранилсульфатных комплексов. Дальнейший рост рН раствора с 2,0 до 2,5 ведет практически к исчезновению катиона уранила и замещению нейтральных молекул уранилсульфата на анионы уранилдисульфата и ура-

нитрисульфата. Причем в диапазоне pH 2,0–2,5 содержание уранилтрисульфата – практически к исчезновению катиона уранила и замещению нейтральных молекул уранилсульфата и уранилтрисульфата, а в диапазоне pH 2,0–2,5 содержание уранилтрисульфата практически возрастает до 90–100 %.

Дальнейшее повышение pH до 3,0–3,5 ведет к полимеризации ионов с образованием вследствие гидролиза комплексных ионов тридисульфат уранилдимера $[\text{UO}_2\text{O}_5(\text{SO}_4)_3]^{4-}$, $[\text{UO}_2\text{O}_5(\text{SO}_4)_2]^{2-}$. Опыт работы по переработке растворов выщелачивания позволяет заключить, что ведение сорбции в режиме pH = 3,0–3,5 приводит к повышению сорбционной емкости смолы по урану за счет того, что смола сорбирует преимущественно двухзарядные комплексы металла, которые поглощаются сильно-основными анионитами более интенсивно, чем четырехзарядные.

Исходя из этого, процесс ПВ необходимо вести при постоянном контроле pH, Eh раствора, содержания и %-ного соотношения уранилсульфатных комплексов ионов, максимально способствуя образованию в продуктивных растворах комплексных ионов дисульфат уранилдимера $[\text{UO}_2\text{O}_5(\text{SO}_4)_2]^{2-}$.

В сернокислых растворах выщелачивания кроме урановых комплексов формируются и различные примеси, в частности полезные для извлечения 9 (молибден, рений, ванадий, скандий, селен и др.). В слабокислых растворах 9 pH (от 5 до 2,5) формируются анионы молибдена $\text{Mo}_7\text{O}_{24}^{6-}$, $\text{Mo}_4\text{O}_{13}^{2-}$. Как правило, наличие молибдена сопровождается наличием рения. Связь рения с молибденом обусловлена изоморфизмом MoS_2 и ReS_2 (радиус иона Mo^{4+} равен 0,68 Å, рения $\text{ReO} - 0,56 \text{ Å}$). Для технологии извлечения рения представляют интерес лишь соединения с валентными состояниями рения 7, 6, 4, и 3. К важнейшим кислородным соединениям рения относятся рениевый ангидрид HRe_2O_7 , рениевая кислота HReO_4 и ее соли – перенаты NaReO_4 , NaHReO_4 , $\text{Ca}(\text{ReO}_4)_2$ и др.

Наибольшей емкостью по рению отличаются сильноосновные смолы типа АВ-17, АВ-27, АМ и др. Сродство ионов

ReO_4^- к сильноосновным смолам столь велико, что рений не элюируется со смолы даже растворами едкого натра.

Кроме полезных металлов, в сернокислых растворах выщелачивания урана на стадии закисления пластов формируются макропримеси ионов SO_4^{2-} , HSO_4^- , CO_3^{2-} , HCO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , NO_3^- , Al^{3+} , Cu^+ , Mn^{4+} , Ti , Ni , Zr , Bi , Li , Zn и др.

Заключение

1. Необходимо отметить депрессирующее действие некоторых анионов раствора выщелачивания на сорбцию. Такое действие оказывают ионы: SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- , P^- , PO_4^{3-} .

2. Изменение ОВП обратного раствора регулируется частотой ультразвука, его интенсивностью и периодом озвучивания раствора. Что касается изменений pH обратного раствора ПВ, то однозначного ответа на зависимость pH от изменения параметров ультразвуковой обработки раствора получить не удалось. Данный вопрос требует дополнительного углубленного изучения.

3. Необходимо также исследовать возможные изменения ОВП и Fe^{3+} озвученного раствора на момент подачи его в недра.

Выводы

1. В статье приведены результаты исследований бескислотного способа повышения окислительно-восстановительного потенциала обратных растворов скважинного выщелачивания урана с использованием ультразвука и результаты лабораторных экспериментов, подтверждающих высокую эффективность разработанного способа. При этом помимо простых ионов металлов и их сульфатных комплексов в растворах появляются известные гидрокомплексы, а также бикарбонатные и карбонатные комплексы.

2. Положительные результаты опытно-промышленного опробования разработанного способа и промышленное его освоение позволит предприятиям НАК «Казатомпром» значительно (в 2–3 раза) сократить расход серной кислоты и существенно снизить себестоимость добычи урана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Авдохин В.М. Основы обогащения полезных ископаемых: Учебник для вузов: В 2 т. Москва, 2006; 1: 417.
Avdokhin V.M. Fundamentals of Mineral Beneficiation: Textbook for Universities: In 2 Volumes. // Moscow, 2006; 1: 417. (In Russ.).
2. Линч А.Дж. Циклы дробления и измельчения. Моделирование, оптимизация и управление. Москва, 1981: 343.
Lynch A.J. Crushing and Grinding Cycles. Modeling, Optimization, and Control. Moscow, 1981: 343. (In Russ.).
3. Лазарева О.В., Подкаменный Ю.А. Автоматизированный способ управления комплексом измельчения и классификации алмазосодержащих руд. *Вестник ИргТУ*. 2014; 4: 128–133.
Lazareva O.V., Podkamenny Yu.A. Automated Method for Controlling a Complex for Grinding and Classifying Diamond-Bearing Ores. *Vestnik of IrSTU*. 2014; 4: 128–133. (In Russ.).
4. King R.P. Modeling and simulation of mineral processing systems. Butterworth-Heinemann, 2001: 404.
5. Oryngozha Ye.Ye., Aitchanov B.H., Oryngozhin Ye.S., Fedotenko N.A. Radiometric sorting of ore in uranium leaching. *Eurasian Mining*. 2025; 1: 91–94. URL: <https://www.rudmet.ru/journal/2425/article/39738/?language=en>. <https://doi.org/10.17580/em.2025.01.18>.
6. Oryngozha Ye.Ye., Aitchanov B.H., Oryngozhin Ye.S., Miletchenko N.A. Geological aspects of uranium deposits for in-situ leaching application to develop energy potential of Kazakhstan. *Eurasian Mining*. 2024; 2: 19–22. URL: <https://www.rudmet.ru/journal/2364/article/38888>. <https://doi.org/10.17580/em.2024.02.04>.
7. Цой С.В., Жусупбеков С.С. Основы разработки гидрогенных месторождений урана. Алматы, 2016: 320.
Tsoi S.V., Zhusupbekov S.S. Fundamentals of Development of Hydrogenetic Uranium Deposits. Almaty, 2016: 320. (In Russ.).
8. Шемякин С.А., Шишкин Е.А. Физико-математическая модель разрушения горных пород зубом фрезерной установки. *Записки Горного института*. 2021; 251: 639–647. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.5.3>.
Shemyakin S., Shishkin E. Physical and mathematical model of rock destruction by a milling machine cutter. *Journal of Mining Institute*. 2021; 251: 639–647. (In Russ.). <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.5.3>.
9. Орынгожин Е.С., Бишимбаева Г.К., Метакса Г.П. и др. Применение подземного скважинного выщелачивания урана на месторождении Семизбай. *Межд. научно-практ. конф. «Актуальные проблемы урановой промышленности»*. Алматы, 2019: 98–104.
Oryngozhin E.S., Bishimbayeva G.K., Metaksa G.P., et al. Application of in-situ leaching of uranium at the Semizbay deposit. *Int. scientific-practical. conf. "Actual problems of the uranium industry"*. - Almaty, 2019: 98–104. (In Russ.).

10. Щадов М.И., Артемьев В.Б. и др. Природный потенциал ископаемых углей. Рациональное использование их органического вещества. Москва, 2000; 2: 202.
Shchadov M.I., Artemyev V.B., et al. Natural potential of fossil coals. Rational use of their organic matter. Moscow, 2000;2: 202. (In Russ.).
11. Шестаков В.А. Проектирование горных предприятий: Учебник для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. Москва, 2003: 96.
Shestakov V.A. Design of mining enterprises. Textbook for universities. 3rd ed., revised and enlarged. Moscow, 2003: 96. (In Russ.).
12. Суходолов А. П. Мировые запасы урана: перспективы сырьевого обеспечения атомной энергетики. *Известия Иркутской государственной экономической академии*. 2010; 4 (72): 166-169.
Sukhodolov A. P. World uranium reserves: prospects for raw material supply for nuclear energy. *Bulletin of the Irkutsk State University of Economics*. 2010; 4 (72): 166-169. (In Russ.).
13. Aben E., Akhmetkanov D., Aben Kh. Investigation of the solidox idizereffecton the metalgeotechnology efficiency. *Mining of Mineral Deposits*, 2023; 17 (4): 12-17. <https://doi.org/10.33271/mining17.04.012>.
14. Yussupov Kh., Aben E., Myrzakmetov S., et al. Increasing the Efficiency of Underground Block Leaching of Metal. *Civil Engineering Journal (C.E.J)*. 2024; 10 (10): 339-349. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2024-010-10-014>.
15. Поезжаев И.П., Полиновский К.Д., Горбатенко О.А. и др. Геотехнология урана: учебное пособие. Алматы, 2017: 327.
Poezhaev I.P., Polinovskiy K.D., Gorbatenko O.A. et al. Uranium Geotechnology: A Tutorial. - Almaty.2017: 327. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Ренат Асылбекович Юсубалиев -

соискатель, Национальная инженерная академия
Республики Казахстан, г. Алматы, Республика Казахстан;
<https://orcid.org/0000-0001-8993-9986>

Ерназ Советович Орынгожин -

доктор технических наук, КазНУ им. Аль-Фараби, главный
научный сотрудник ИГД им. Д.А. Кунаева, г. Алматы,
Республика Казахстан

Махамбет Кудайбергенович Джексенов -

кандидат географических наук, Атырауский университет
имени Х. Досмухамедова, г. Атырау, Республика
Казахстан; <https://orcid.org/0000-0002-1741-3931>

Ералы Ерназулы Орынгожа -

докторант PhD, Алматинский университет энергетики и
связи им. Г. Даукеева, г. Алматы, Республика Казахстан;
e24.01@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9130-0994>

Наталья Александровна Милетенко -

кандидат технических наук, старший научный сотрудник
Институт проблем комплексного освоения недр им.
академика Н.В. Мельникова РАН, г. Москва, Российская
Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-5594-3036>

Критерии авторства:

Авторы заявляют о равном вкладе каждого в работу над
статьей.

Конфликт интересов:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 03.04.2026

Поступила после рецензирования: 16.05.2026

Принята к публикации: 04.06.2026

ABOUT THE AUTHORS

Renat A. Yusubaliev -

Surveyor, National Engineering Academy of the Republic of
Kazakhstan, Almaty, Republic of Kazakhstan; <https://orcid.org/0000-0001-8993-9986>

Yernaz S. Oryngozhin -

Dr. Sci. (Eng.), Al-Farabi Kazakh National University, Chief
Researcher at the Institute of Mining named after D.A. Kunaev,
Almaty, Republic of Kazakhstan

Makhambet K. Djexenov -

Cand. Sci. (Geography), Atyrau university named after
H. Dosmukhamedova, Atyrau, Republic of Kazakhstan;
<https://orcid.org/0000-0002-1741-3931>

Yeraly Ye. Oryngozha -

PhD doctoral student, Almaty University of Power
Engineering and Telecommunications named after Gumarbek
Daukeyev, Almaty, Republic of Kazakhstan; e24.01@mail.ru;
<https://orcid.org/0000-0002-9130-0994>

Natalya A. Miletenko -

Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Institute of
Comprehensive Exploitation of Mineral Resources named after
academician N.V. Melnikov Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-5594-3036>

Contribution:

The authors declare the equal contribution of everyone to the
work on the article.

Conflict of interest:

The authors declare no conflict of interest.

Article info

Received: 03.04.2026

Revised: 16.05.2026

Accepted: 04.06.2026