Статья поступила в редакцию: 10.10.2026
Статья принята к публикации: 16.10.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 544.723.2:546.79

DOI: 10.32743/UniTech.2026.151.10.23572

Влияние суммы примесей на сорбцию урана анионитом АМП

Ражаббоев Ибодулла Муродуллаевич
д-р. техн. наук, доц.
Навоийский государственный горно-технологический университет
Республика Узбекистан, г. Навои
E-mail: jahon.gir2015@mail.ru

Influence of impurity sums on uranium sorption by the AMP anion exchanger

Razhabboev Ibodulla Murodullaevich
doctor of since, Navoi state university of mines and tecnologies
Republic of Uzbekistan, Navoi

Аннотация

В данной статье представлены исследования по сорбции урана анионитом АМП при совместном присутствии урана и изучаемых примесей. При сорбционном извлечении урана из растворов используют в основном аниониты. Сопутствующие примеси в продуктивных растворах ведут себя неодинаково. Катионы щелочных и щелочноземельных элементов, ионы меди, железа, кобальта, марганца практически не сорбируются. Сульфат-, нитрат-, хлорид-, фторид- и фосфат-ионы хорошо сорбируются и являются депрессорами. Расширение числа вовлекаемых в отработку месторождений различными минералами составом уранового оруденения обуславливает появление в продуктивных растворах подземного выщелачивания наряду с ураном других элементов, в том числе и нежелательных, ранее не встречавшихся в практике обработки месторождений. В работе исследовано влияния суммы примесей на сорбцию урана анионитом АМП.

Сорбция урана и депрессирующих ионов (сульфат, нитрат, хлорид, фосфат, силикат, железо, марганец, алюминий и кальций) на смоле АМП проводилась в условиях статической серии.

Концентрация изучаемых компонентов в системах составляла по 0,15; 0,3; 0,6; 2 г/л каждого элемента. В состав систем вводили хлор, фосфат, железо трехвалентное, железо двухвалентное, алюминий, марганец, кремний в виде солей.

Библиографическое описание: Ражаббоев И.М. Влияние суммы примесей на сорбцию урана анионитом АМП // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23572

Abstract

This article presents research on uranium sorption by the AMP anion exchanger in the presence of uranium and the studied impurities. When extracting uranium from solutions via sorption, anion exchangers are primarily used. Accompanying impurities in productive solutions behave differently. Cations of alkaline and alkaline-earth elements, as well as ions of copper, iron, cobalt, and manganese, are practically not absorbed. Sulfate, nitrate, chloride, fluoride, and phosphate ions are well-sorbed and are depressants. The expansion of the number of deposits involving various minerals in the composition of uranium mineralization leads to the appearance of other elements in productive solutions of underground leaching alongside uranium, including undesirable ones that were not previously encountered in the practice of deposit processing. The study investigated the influence of impurity sums on uranium sorption by the AMP anion exchanger.

Sorption of uranium and depressant ions (sulfate, nitrate, chloride, phosphate, silicate, iron, manganese, aluminum, and calcium) onto the AMP resin was carried out under static series conditions.

The concentrations of the studied components in the systems were 0.15; 0.3; 0.6; 2 g/l of each element. Chlorine, phosphate, trivalent iron, divalent iron, aluminum, manganese, and silicon in the form of soda were added to the systems.

Ключевые слова: уран, подземное выщелачивание, депрессанты, примеси, сорбция, анионит, емкость.

Keywords: uranium, underground leaching, depressants, influences, sorption, anion exchanger, capacity.

Введение

Уран продолжает играть значительную роль в мировой экономике и энергетике, несмотря на происходящие перемены в источниках энергии [1, с. 115]. Мировая добыча урана в 2024 г. составила около 60 тыс. т, что на 27 % больше, чем в 2021 г. По данным ведущих мировых аналитиков по урану прогнозирует, что с 2028 года спрос на уран будет превышать предложение из известных источников [2, с. 277].

В настоящее время одним из самых эффективных и экологически безопасных методов добычи урана является метод скважинного подземного выщелачивания (СПВ) [3, с. 47, 4, с. 10]. Более половины урана добывается методом скважинного подземного выщелачивания [5, с. 4]. Этот метод в настоящее время широко применяется при добыче урана [6, с. 1394]. Метод подразумевает закачку раствора реагентов непосредственно в рудный пласт и выщелачивание урана на месте, без подъема руды на поверхность [7, с. 34].

При сорбционном извлечении урана на анионитах сопутствующие ему примеси ведут себя неодинаково. Так, катионы щелочных и щелочноземельных металлов, а также ионы двухвалентной меди, железа, кобальта и марганца не сорбируются и являются балластными примесями. Ряд анионов, напротив, хорошо сорбируется на анионитах, составляя конкуренцию извлекаемым ионам урана. К ним относятся анионы сульфата, нитрата, хлорида, фторида и фосфата. Эти анионы относят к разряду депрессирующих примесей. И,

наконец, существуют ионы с повышенным сродством к сильноосновным анионитам, которые, накапливаясь со временем в анионитах, отравляют их, т. е. лишают их способности поглощать полезные компоненты, в частности уран [8, с. 6].

Материалы и методы

Сорбция урана и депрессирующих ионов (сульфат, нитрат, хлорид, фосфат, силикат, железо, марганец, алюминий и кальций) на смоле АМП проводилась в условиях статической серии. Сернокислые растворы исследуемых компонентов контактировали с товарной анионообменной смолой (АМП) в пачуковых реакторах с воздушным перемешиванием при pH=1,2. Время контакта равно 24 часам, соотношение объема смолы к объему раствора составляет 1:400 (5 мл смолы и 2000 мл раствора), а концентрация нейтральных сульфатов равна 7 г/л. Добавление нейтральных сульфатов к исследуемым растворам было использовано для более адекватного моделирования исследуемых растворов к производственным растворам процесса ПВ, содержащим в среднем 10 г/л сульфат-ионов, в том числе 3 г/л свободной серной кислоты.

Концентрация изучаемых компонентов в системах составляла по 0,15; 0,3;0,6; 2 г/л каждого элемента. В состав систем вводили хлор, фосфат, железо трехвалентное, железо двухвалентное, алюминий, марганец, кремний в виде солей (NaCl, NaH_2PO_4, $Fe_2(SO_4)_3$, $FeSO_4$, $Al_2(SO_4)_3$, $MnSO_4$, Na_2SiO_3 и т.д.).

Результаты и обсуждения

Сорбцию урана из многокомпонентной системы проводили в присутствии нитрат-иона и без него, что обуславливалось необходимостью изучения сорбции урана в сернокислой среде и при небольших добавках азотной кислоты, добавляемой в процесс для защиты оборудования от коррозии. Содержание нитрат-иона равнялось концентрации примесей, входящих в состав смеси и составила 0,15; 0,6; 2 г/л.

Содержание каждого компонента в сумме примесей представлен в табл. 1.

Таблица 1. Содержание каждого компонента в сумме примесей

Образец	Содержание компонентов
I	0 г/л
II	0,15 г/л
III	0,5 г/л +0,15 г/л NO_3
IV	0,3 г/л
V	0,6 г/л
VI	0,6 г/л +0,6 г/л NO_3
VII	2 г/л
VIII	2 г/л + 2 г/л NO_3

В растворах содержание нитрат-иона в жидкой фазе меняется от 0,3 – 1 г/л. Результаты опытов приводятся в таблицах 2 – 3 и на рис.1.

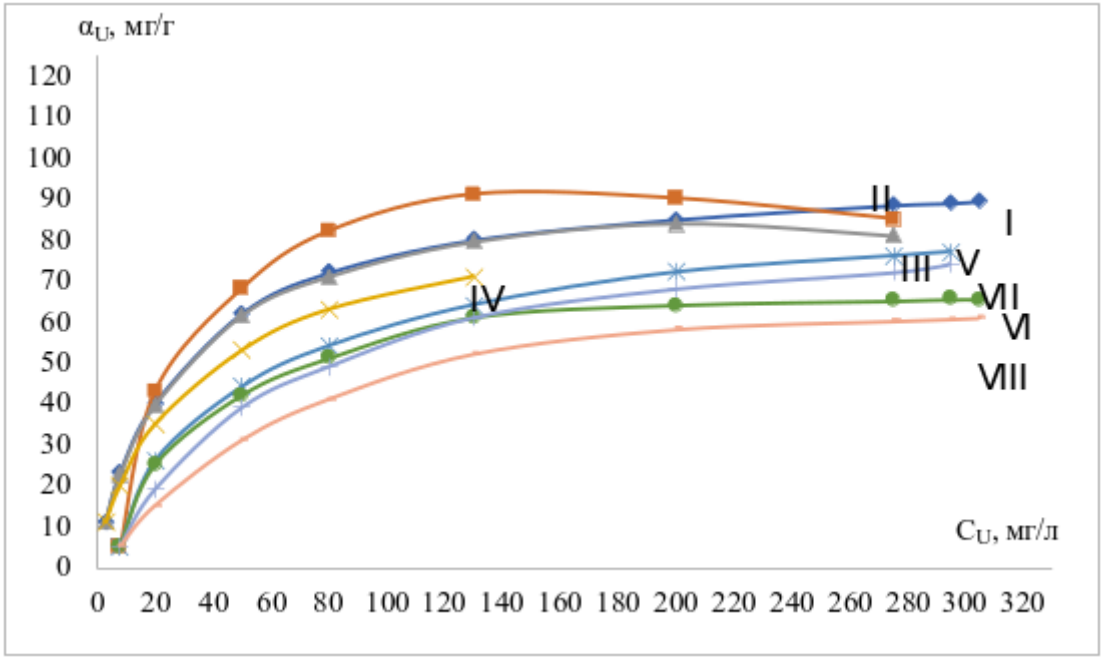

Рисунок 1. Изотермы сорбции урана на анионите АМП при совместном содержании в растворе примесей

Примечание: α_U, мг/г — сорбционная ёмкость по урану. α_U, мг/л — концентрация урана в растворе.

I кривая – изотерма сорбции урана в отсутствии примесей.

II кривая – изотерма сорбции урана в присутствии примесей концентраций 0,15 г/л каждой без нитрат-иона. Как видно из рисунка, смесь примесей таких концентраций оказывает положительное влияние на сорбцию урана анионитом при концентрации урана в продуктивных растворе от 0,020 г/л до 0,260 г/л.

III кривая-изотерма сорбции урана в присутствии суммы примесей концентрацией 0,15 г/л каждой и дополнительно нитрат-иона такой же концентрации. Как видно из рис.1, такой количественный состав примесей не снижает емкости анионита по урану в пределах концентрации урана от 0,006 г/л до 0,200 г/л. При увеличении концентрации урана в растворе более 0,200 г/л емкости анионита по урану в присутствии смеси такого состава начинают снижаться, но незначительно. Присутствие нитрат-иона в смеси с содержанием 0,15 г/л каждого изучаемого компонента понижает емкость анионита по урану. Изотерма сорбции урана в присутствии нитрат-иона для смеси данной концентрации 0,15 г/л практически совпала с кривой I.

Таким образом добавление нитрат-иона в количестве 0,15 г/л в смесь, содержащую по 0,15 г/л хлор-иона, фосфата, кремния, алюминия, железа снижает емкость ионита на столько на сколько сумма этих компонентов без нитрат-иона увеличивает её.

V кривая-изотерма сорбции урана анионитом АМІ из раствора, содержащего примеси в количестве по 0,3 г/л каждого компонентов отсутствии нитрат – иона. Как видно из рис.1 емкости анионита по урану в присутствии смеси выше указанного состава уменьшаются на 4 мг/г при концентрации урана в растворе 0,005 г/л и на 7 мг/г при концентрации урана в растворе 0,150 г/л, что соответствует снижению емкости на 25 % и 8 %.

V кривая-изотерма сорбции урана из смеси, содержащей по 0,6 г/л каждой примеси, в отсутствии нитрат – иона. Как видно из рис.1, емкость анионита по урану из смеси такого состава снижается на 11 – 10 мг/г. Падение емкости составляет 63 – 11 % при изменении концентрации урана с 0,005 г/л до 0,200 г/л.

Добавка нитрат-иона в количестве 0,6 г/л к смеси, содержащей по 0,6 каждого компонента (VI кривая), способствует снижению емкости анионита по урану 5 – 10 %.

С увеличением концентрации элементов до 2 г/л каждого емкость сорбента еще более уменьшается и особенно в присутствии нитрат – иона. (Кривые VII и VII)

Из таблицы 2 видно, что емкость анионита по урану снижается с увеличением солевого состава смеси по концентрации изучаемых компонентов, особенно при низких значениях концентрации урана. Добавление нитрат-иона в систему еще более депрессирует сорбцию урана.

Совместное присутствие примесей в большей степени депреесирует сорбцию урана, чем каждый отдельно взятый компонент. Однако, при равновесной концентрации урана 0,2 – 0,3г/л емкость ионита по урану в самых неблагоприятных системах по изучаемым примесям составляет 65 мг/г.

Селективность смолы по отношению к урану прослеживается и при сорбции урана из продуктивных растворов.

Таблица 2. Изменение емкости анионита АМП по урану из систем, содержащих уран и сумму примесей

Содержание урана в растворе, г/л	**Снижение емкости смолы по урану, %**				
	Раствор, содержащий примесей г/л				
	0,3	**0,6**	**0,6**	**2**	**2**
	без NO_3^-	**без NO_3^-**	**с NO_3^-**	**без NO_3^-**	**с NO_3^-**
0,008	- 14,0	- 63,0	- 68,0	- 70	- 72,0
0,010	- 12,0	- 52,0	- 58,0	- 60	- 68,0
0,020	- 10,0	-32,0	- 37,0	- 48,0	-59,0
0,050	-10,0	- 25,0	- 29,0	-37,0	-38,0
0,100	- 8,0	-21,0	- 25,0	- 27,0	-32,0
0,150	-	-15,0	- 22,0	- 20,0	- 32,0
0,200	-	-12,0	- 23,0	- 17,0	-32,0
0,300	-	-5,0	- 21,0	- 9,0	- 31,0

Примечание: знак «—» указывает на снижение емкости.

Солевой состав производственных сернокислых растворов после предварительного выщелачивания представлен в табл. 3.

Таблица 3. Солевой состав жидкой фазы сернокислых растворов, полученных при поземное выщелачивании урана

№ пп	**Содержание компонентов, г/л**										
	U	**Fe^{3+}**	**Fe^{2+}**	**Si**	**NO^{3-}**	**SO_4^{2-}**	**P**	**Ca**	**Cl^-**	**Mn^{3+}**	**Al^{3+}**
1.	0,319	0,294	0,070	0,272	0,827	-	0,079	0,660	0,300	0,530	0,014
2.	0,312	0,306	0,077	0,110	0,827	-	0,030	0,700	0,298	0,320	0,023

№ пп	Содержание компонентов, г/л										
	U	**Fe^{3+}**	**Fe^{2+}**	**Si**	**NO^{3-}**	**SO_4^{2-}**	**P**	**Ca**	**Cl^-**	**Mn^{3+}**	**Al^{3+}**
3.	0, 10	0,11 2	0,759	0,123	0, 50	-	0,120	0,39	0,390	-	0,121
4.	0,435	0.350	0,602	0,168	0,220	-	0,138	0,460		0,58	0,155
5.	0,750	0,238	0,448	0,180	0,145	-	0,156	0,510	0,834	0,81	0,256
6.	0,395	0,700	0,250	0,338	0,252	-	0,170	0,320	0,150	0,440	0,175
7.	0,500	0,560	0,336	0,290	0,004	13,71	0,200	0,450	0,071	0,510	0,108
8.	0,400	0,420	0,700	0,112	0,400	7,87	0,148	-	0,301	0,99	0,093

Из таблицы 3 видно, что содержание урана в растворе колеблется в пределах 0,1 – 0,5 г/л, железа двухвалентного 0,07 – 0,7 г/л. железа трехвалентного 0,07 – 0,7 г/л, кремния 0,085 – 0,3 г/л. Фосфора 0,08 – 0,2 г/л, хлора 0,3 г/л, алюминия 0,01 – 0,164 г/л, сульфата 4 – 13 г/л, нитрата 0,3 – 1,5 г/л. Основными примесями, превышающими концентрацию урана в растворе являются железо, нитрат-ион, сульфат-ион.

Состав анионита при сорбции урана из таких продуктивных растворов представлен в таблице 4.

Таблица 4. Состав анионита АМП при сорбции урана из продуктивных растворов

№ пп	Содержание компонентов, мг/г									
1.	U	Fe^{3+}	Ca	P	NO_3^-	Mn^+	SO_4^{2-}	Si	Al^{3+}	Cl^-
2.	43,8	2,01	4,45	1,64	12,3	0,014	108	2,48	-	-
3.	55,1	1,54	3,3	1,75	10,4	-	107	2,51	-	-
4.	54	0,61	2,45	2,32	12,7	-	109	1,2	0,011	1,78
5.	52	1,39	1,1	5,6	4,8	-	125	2,1	0,27	3,55
6.	51	0,59	0,4	1,1	13	-	-	-	0,19	2,66
7.	52.8	0,5	-	2,1	5,8	-	138	-	0,13	-
8.	47,5	0,4	-	8	10,4	-	100	-	0,3	1,1

Как видно из таблицы 4 анионит имеет высокую емкость по сульфат-иону. Содержание урана в анионите превышает в 53 раза содержание железа, в 19 раз содержание фосфора, в 5 раз нитрат-иона, в 10 раз содержание кремния, в 326 раз содержание алюминия.

Выводы

Таким образом анионит АМП довольно селективно сорбирует уран. Совместное присутствие примесей (хлора, фосфора, железа, кремния; алюминия, марганца) отрицательно влияет на сорбцию урану. При равновесной концентрации урана в растворе 0,005 г/л совместное присутствие примесей, в количестве 0,3 г/л каждой снижает емкость ионита по урану на 14 %. Увеличение концентрации каждой примеси до 0,6 г/л приводит к снижению емкости ионита по урану на 63 %. Дальнейшее увеличение концентрации каждой из примесей до 2 г/л вызывает снижение емкости ионита по урану на 70 %.

Список литературы

1. Мирошниченко И.В. Текущие тенденции и будущее мировой урановой промышленности // Известия Уральского государственного горного университета. – 2025. – С. 115–119.
2. Халимов И.У., Каримов Н.М., Муродуллаева М.У. Перспективы отработки остаточных запасов урана из отработанных блоков подземного выщелачивания // Новые идеи в науках о Земле: материалы XI Международной научной конференции. – М.: Издательство МГРИ, 2025. – С. 277–280.
3. Иванов А.Г., Арсентьев Ю.А., Гладышев А.В., Михайлов А.Н., Гурулев Е.А., Иванов Д.А. К вопросу повышения качества скважин скважинного подземного выщелачивания урана в криолитозоне // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2024. – Т. 30, № 2. – С. 47–61. – DOI: 10.21209/2227-9245-2024-30-2-47-61.
4. Хасанов А.С., Эшанкулова Г.Р. История элемента урана и перспективы развития атомной энергетики в Узбекистане // Цифровые технологии в промышленности. 28 июня. – 2026. – Т. 4, № 2. – С. 10–18. – DOI: 10.70769/3030–3214.SRT.4.2.2026.25.
5. Бойцов А.В. Состояние и перспективы развития мировой сырьевой базы и производства урана // Разведка и охрана недр. – 2025. – № 5. – С. 4–11.
6. Ядгаров И., Мирходжаев Б.И. Метод подземного выщелачивания урана в Узбекистане // Экономика и социум. – 2025. – № 2 (129). – С. 1394–1398.
7. Хамидов С.Б., Каримов Н.М., Намозбоева Д.Н., Утаев С.М. Физико-химические и микробиологические методы интенсификации подземного выщелачивания урана из слабопроницаемых руд // Universum: технические науки. – 2025. – № 4 (133). – С. 34–40.
8. Шарафутдинов У.З., Ражаббоев И.М., Эшонова Г.А., Юлдашев Ш.Ш. Исследования влияния фосфат-ионов на процесс получения урана // Universum: технические науки. – 2023. – № 7 (112). – С. 5–9.

References

1. Miroshnichenko I.V. Current trends and the future of the global uranium industry // News of the Ural State Mining University. – 2025. – No. 3 (79). – P. 115–119.
2. Khalimov I.U., Karimov N.M., Murodullaeva M.U. Prospects for the development of residual uranium reserves from depleted blocks of in-situ leaching // New Ideas in Earth Sciences: Proceedings of the XI International Scientific Conference. – Moscow: MGRI Publishing House, 2025. – P. 277–280.
3. Ivanov A.G., Arsentyev Yu. A., Gladyshev A.V., Mikhailov A.N., Gurulev E.A., Ivanov D.A. On the issue of improving the quality of wells for in-situ leaching of uranium in the cryolithozone // Transbaikal State University Journal. – 2024. – Vol. 30, No. 2. – P. 47–61. – DOI: 10.21209/2227-9245-2024-30-2-47-61.
4. Khasanov A.S., Eshankulova G.R. History of the uranium element and prospects for the development of nuclear energy in Uzbekistan // Digital Technologies in Industry. June 28. – 2026. – Vol. 4, No. 2. – P. 10–18. – DOI: 10.70769/3030–3214.SRT.4.2.2026.25.

5. Boytsov A.V. Status and prospects of global uranium resources and production development // Prospecting and Protection of Mineral Resources. – 2025. – No. 5. – P. 4–11.
6. Yadgarov I., Mirkhodjaev B.I. Method of underground leaching of uranium in Uzbekistan // Economy and Society. – 2025. – No. 2 (129). – P. 1394–1398.
7. Khamidov S.B., Karimov N.M., Namozboeva D.N., Utaev S.M. Physicochemical and microbiological methods for intensifying in-situ leaching of uranium from low-permeability ores // Universum: Technical Sciences. – 2025. – No. 4 (133). – P. 34–40.
8. Sharafutdinov U.Z., Rajabboev I.M., Eshonova G.A., Yuldashev Sh. Sh. Studies of the influence of phosphate ions on the uranium production process // Universum: Technical Sciences. – 2023. – No. 7 (112). – P. 5–9.