

## ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ / ORIGINAL PAPERS

DOI: 10.17073/2500-0632-2020-1-12-24

### Интенсификация сорбции урана из продуктивных растворов на ионообменную смолу ультразвуком

Кононов А. В.<sup>1</sup>, Дуйсебаев Б. О.<sup>2</sup><sup>1</sup>Восточно-Казахстанский государственный технический университет им. Д. Серикбаева, Усть-Каменогорск, Республика Казахстан<sup>2</sup>АО «Волковгеология», Алматы, Республика Казахстан

**Аннотация:** До сегодняшнего дня интенсификация процессов ионного обмена (сорбция, десорбция, отмывка ионита) была насущной проблемой при получении товарных десорбатов. В настоящей статье представлены материалы исследования влияния наложенного ультразвукового (УЗ) воздействия на процесс сорбции урана из продуктивных растворов на ионообменную смолу действующего рудника подземного скважинного выщелачивания (ПСВ) при производстве урана методом подземного скважинного выщелачивания. Для исследования и оценки эффективности интенсификации процессов ионного обмена наложением ультразвука в цехе переработки продуктивных растворов на одном из рудников АО «НАК «Казатомпром» были проведены работы по интенсификации процесса сорбции урана из продуктивных растворов ультразвуком. Периодически создаваемые УЗ-излучателями импульсы воздействуют на весь рабочий внутренний объем массообменного аппарата. Таким образом, вся масса реагентов находится в движении, и вся поверхность зерен анионита непрерывно очищается в процессе работы УЗ-оборудования. В результате проведенного исследования удалось установить, что УЗ-интенсификация процесса сорбции позволяет:

- при содержании урана в маточниках сорбции 0,003 г/м<sup>3</sup> увеличить скорость сорбции в 6,4 раза;
- при содержании урана в маточниках сорбции 0,014 г/м<sup>3</sup> увеличить скорость сорбции в 1,4 раза;
- за счет применения УЗ-воздействия получить средневзвешенное увеличение скорости сорбции в 1,3 раза;
- увеличить полную динамическую обменную емкость ионита по урану в 1,13 раза и при этом не уменьшить величину механической прочности зерен ионита.

**Ключевые слова:** ионный обмен, интенсификация процессов массообмена, ионит, ионообменная смола, сорбция, имплозия, кавитация, диффузия, УЗ-колебания, продуктивный раствор, уран.

**Для цитирования:** Кононов А. В., Дуйсебаев Б. О. Интенсификация сорбции урана из продуктивных растворов на ионообменную смолу ультразвуком. *Горные науки и технологии*. 2020;5(1):12-24. DOI: 10.17073/2500-0632-2020-1-12-24.

### Ultrasonic Intensification of Uranium Sorption from Pregnant Solutions by Ion-Exchange Resin

A. V. Kononov<sup>1</sup>, B. O. Duisebayev<sup>2</sup><sup>1</sup>D. Serikbayev East Kazakhstan State Technical University, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan<sup>2</sup>JSC "Volkovgeologia", Almaty, Republic of Kazakhstan

**Abstract:** Until now, the intensification of ion exchange processes (sorption, desorption, washing of ion exchanger) remains an urgent problem in obtaining commercial strippants. This paper presents the study of ultrasonic (US) effects on the process of uranium sorption from pregnant solutions by ion-exchange resin at operating in-situ leach recovery ("ISR") uranium production. The study and evaluation of effectiveness of ultrasonic intensifying the ion exchange processes was implemented at one of the mines of NAC Kazatomprom JSC. Ultrasonic pulses periodically generated by emitters produced effects on the whole working space of the mass transfer apparatus. Thus, the whole mass of reagents is kept in continuous motion, and the whole surface of the anion exchanger grains is permanently purified during the ultrasonic device operation. The study findings showed that the ultrasonic intensification of the sorption process allows:

- increasing the sorption rate by 6.4 times at uranium concentration in the pregnant solutions of 0.003 g/m<sup>3</sup>;
- increasing the sorption rate by 1.4 times at uranium concentration in the pregnant solutions of 0.014 g/m<sup>3</sup>;



- achieving weighted average increasing the sorption rate by 1.3 times through applying the ultrasonic treatment;
- increasing full dynamic exchange capacity of the ion exchange resin for uranium in 1.13 times at keeping mechanical strength of the ion exchanger grains.

**Keywords:** uranium, ion exchange, intensification of mass transfer processes, ion exchanger, ion exchange resin, sorption, implosion, cavitation, diffusion, ultrasonic vibrations, pregnant solution.

**For citation:** Kononov A. V., Duisebayev B. O. Ultrasonic intensification of uranium sorption from pregnant solutions by ion-exchange resin. *Gornye nauki i tekhnologii = Mining Science and Technology (Russia)*. 2020;5(1):12-24. (In Russ.). DOI: 10.17073/2500-0632-2020-1-12-24.

### **Определения, используемые в статье**

**Диффузия** – процесс взаимного проникновения молекул или атомов одного вещества между молекулами или атомами другого, приводящий к самопроизвольному выравниванию их концентраций по всему занимаемому объему.

**Интенсификация** – процесс и организация развития производства, в которых применяются наиболее эффективные средства производства, а также расширение производства, увеличение его производительности.

**Ионит** – твердое нерастворимое вещество, способное обменивать свои ионы на ионы из окружающего их раствора. Обычно это синтетические органические смолы, имеющие кислотные или щелочные группы. Иониты подразделяются на катиониты, поглощающие катионы, аниониты, поглощающие анионы, и амфотерные иониты, обладающие обоими этими свойствами.

**Ионообменная смола** – синтетический органический ионит, высокомолекулярное синтетическое соединение с трехмерной гелевой и макропористой структурой, которое содержит функциональные группы кислотной или основной природы, способные к реакциям ионного обмена.

**Кавитация** – образование в жидкости полостей (кавитационных пузырьков, или каверн), заполненных паром, возникающее в результате внешних физических воздействий.

**Маточник сорбции** – продуктивный раствор после процесса сорбции.

**Продуктивный раствор** – раствор, содержащий полезный компонент.

**Сорбция** – процесс поглощения твердым телом (сорбентом) различных веществ из окружающей среды независимо от механизма поглощения.

**Ультразвуковой излучатель** – устройство, преобразующее электрические колебания, создаваемые генератором высокой частоты, в УЗ-колебания.

### **Введение**

На сегодняшний день урановой промышленности необходимы новые технические решения для увеличения качества выпускаемой продукции и снижения ее себестоимости. Одним из таких решений может стать использование УЗ-технологий при производстве урана методом подземного скважинного выщелачивания.

Применение УЗ-технологий в различных отраслях промышленности и народного хозяйства известно еще с середины прошлого века и получило большое распространение в республиках СССР. Актуальность УЗ-технологий не снизилась и сегодня, они используются в нефтяной, пищевой промышленности, медицине и т.д.

Ультразвуковые технологии в урановой промышленности могут применяться в таких процессах, как выщелачивание, сорбция, десорбция, отмывка зерен ионита от примесей (фосфор, железо, кремний и т.д.), экстракция, реэкстракция и осаждение. Интенсификация ионообменных процессов ультразвуком до-

стигается за счет уменьшения толщины диффузионного слоя. Возникающие в жидкости под влиянием УЗ-колебаний турбулентные потоки, имплозия и кавитация, звуковое давление и некоторые другие эффекты второго порядка изменяют характер диффузионного граничного слоя, непосредственно прилегающего к поверхности зерен ионита, толщиной которого лимитируется скорость процессов ионного обмена, что и приводит к интенсификации.

### **1. Влияние ультразвука на процесс сорбции урана**

В настоящей статье описано исследование влияния наложенного УЗ-воздействия на процесс сорбции урана из продуктивных растворов на ионообменную смолу действующего рудника ПСВ.

Одним из весьма эффективных методов интенсификации сорбционных процессов является обработка ионитов ультразвуком. Эффекты второго порядка, вызываемые ультразвуком определенной частоты и интенсивности, – главным образом имплозия и кавитация, приводят к более полному раскрытию микропор в зернах ионообменной смолы и к полной очистке их поверхности, что неизбежно вызывает заметное увеличение сорбционной емкости смолы. Ультразвук не только действует на поверхностные слои зерен ионита, но и изменяет их капиллярную структуру, а также увеличивает компенсированные молекулярные силы на общей поверхности, включая и поверхность, выстилающую стенки микро- и макро- капилляров.

Кавитационные явления и так называемый ультразвуковой ветер, обуславливающие интенсивное перемешивание жидкости в макро-, а в особенности в микрообъемах, снижают градиенты концентрации растворенных веществ на границе твердой и жидкой фаз, что должно уменьшить время насыщения сорбента извлекаемыми из растворов ценными компонентами, в данном случае ураном.

Скорость химических реакций, протекающих в гетерогенных системах, зависит от

скорости диффузии молекул к границам раздела фаз, химического взаимодействия и диффузии продуктов реакции. В большинстве случаев скорость химического взаимодействия достаточно велика по сравнению со скоростями диффузии, вследствие этого скорость всей реакции в целом при достаточно развитой поверхности контакта фаз определяется скоростью диффузии реагентов и продуктов реакции.

Основное сопротивление процессу массообмена оказывает диффузионный слой, расположенный на границе раздела фаз, в связи с тем, что процесс переноса вещества в нем происходит наиболее медленно – путем молекулярной диффузии. Толщина и свойства диффузионного слоя сильно влияют на скорость протекания гетерогенных процессов. Турбулентные потоки, возникающие при интенсивном перемешивании, уменьшают эффективную толщину слоя, оказывающего сопротивление переносу вещества. С увеличением скорости перемешивания возрастает и скорость всего гетерогенного процесса. При наложении УЗ-поля процесс значительно ускоряется. Имплозия и кавитация, акустическое давление, звуковой ветер вызывают интенсивные турбулентные потоки не только во всей массе обрабатываемого раствора, но и в непосредственной близости к границе раздела фаз, отчего сильно уменьшается граничный диффузионный слой.

Были проведены исследования интенсификации сорбции урана из продуктивных растворов на ионообменную смолу под воздействием ультразвука с частотой колебаний 22 кГц. Показано, что с уменьшением толщины граничного диффузионного слоя процесс может ускориться в несколько раз. Равновесное состояние под действием ультразвука достигалось по времени в 4–5 раз быстрее, чем при идентичных условиях сорбции, но без наложения ультразвука. Для чистоты эксперимента все опыты проводились на двух одинаковых ионообменных аппаратах СНК-640, на

которые под контролем электронных расходомеров подавалось одинаковое количество продуктивных растворов и ионообменной смолы. При этом одна колонна (с ультразвуком) была испытательной, а вторая (без ультразвука) – контрольной.

Ультразвук вводили в емкость с ионитом и продуктивным раствором при помощи металлического УЗ-излучателя погружного типа. При таком способе введения ультразвука раствор дополнительно еще и немного нагревался. С повышением температуры время, необходимое для установления равновесия, еще более уменьшалось. В результате повышения температуры время установления равновесия уменьшается в среднем вдвое, а под влиянием УЗ-волн – еще приблизительно в 3 раза. Наибольшее ускорение процесса ионного обмена было достигнуто при УЗ-обработке смолы и раствора при 40 °С.

## 2. Описание оборудования, используемого в опытах

В проведенных экспериментах основным оборудованием являлись два одинаковых ионообменных аппарата типа СНК-640 и УЗ-агрегат.

Каждая сорбционная колонна (рис. 1) выполняет функцию емкости со смолой, через которую пропускается продуктивный раствор. Технические характеристики колонны приведены в табл. 1.

Ультразвуковой агрегат (рис. 2) используется как основное оборудование, вызывающее интенсификацию процесса сорбции, его параметры приведены в табл. 2.

## 3. Определение влияния ультразвука на сорбцию урана

Опыты по определению влияния ультразвука на процесс сорбции урана проводились в сопоставимых условиях на двух сорбционных колоннах типа СНК-640 (рис. 3).

При проведении опытов определялось влияние ультразвука на скорость сорбции и полную динамическую обменную емкость ионита при сорбции урана из продуктивных растворов действующего рудника ПСВ урана. Опыты проводились на двух однотипных сорбционных колоннах, на одну из которых был установлен УЗ-агрегат. Продуктивный раствор подавался на обе колонны одновременно с идентичными параметрами подачи. Место установки УЗ-агрегата на колонне приведено на рис. 3. Для проведения эксперимента в каждую колонну было загружено по 0,297 м<sup>3</sup> ионита, взятого из процесса и прошедшего десорбцию, денитрацию и хвостовую отмывку.

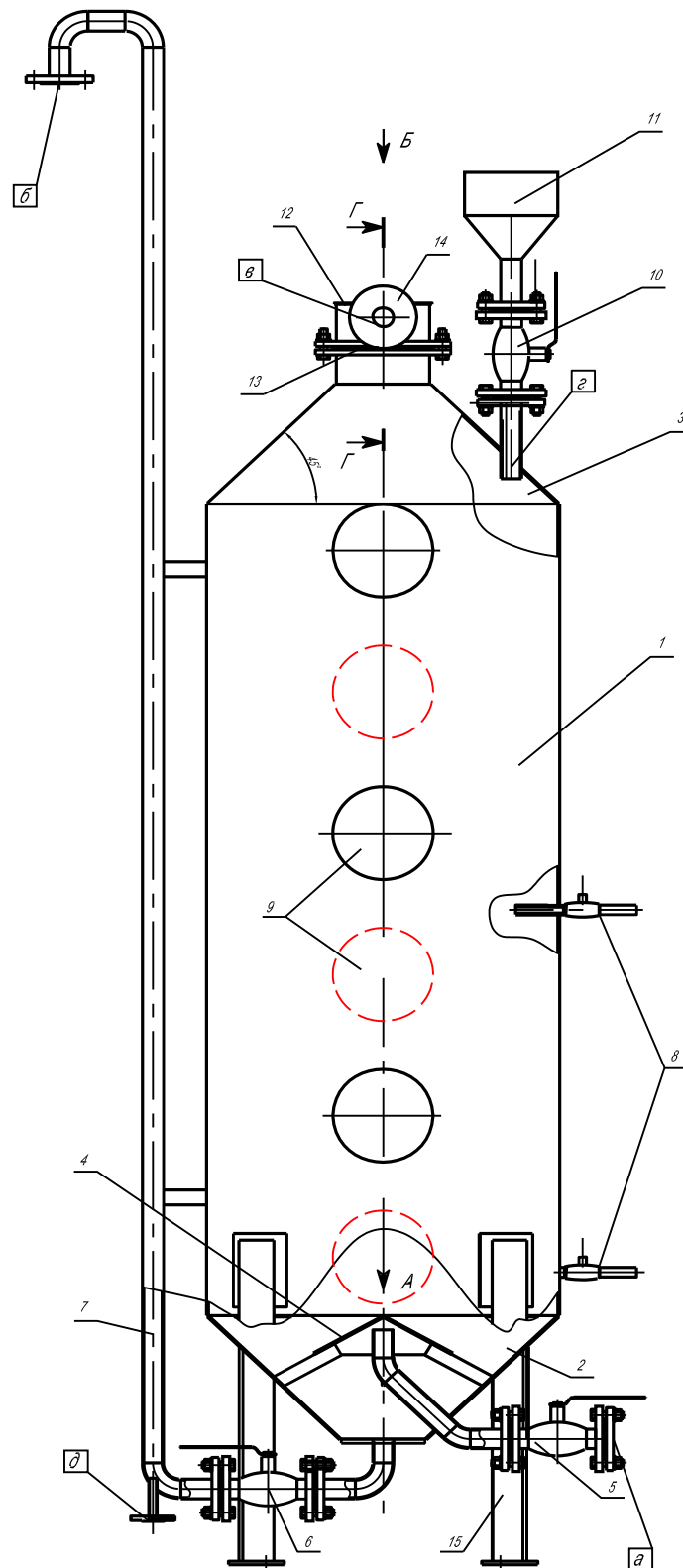
Содержание урана на исходном ионите составило 2,68 кг/м<sup>3</sup>.

Количество подаваемых на колонны продуктивных растворов регулировалось по показаниям электронных расходомеров, предварительно прошедших тарировку.

Таблица 1

**Технические характеристики колонны СНК-640**  
**Technical characteristics of SNK-640 ion exchange column**

Параметр	Значение
Габариты колонны в сборе, мм	1160×1160×3700
Диаметр колонны, мм	640
Объем сорбента, м <sup>3</sup>	0,7
Высота рабочего слоя сорбента, м	2,2
Объем перерабатываемых растворов, м <sup>3</sup> /ч	0,2–5,0
Линейная скорость движения растворов, м/ч	0,6–16,0
Объем перегружаемого сорбента, дм <sup>3</sup> /ч	75–225



**Рис. 1. Сорбционная напорная колонна СНК-640:**

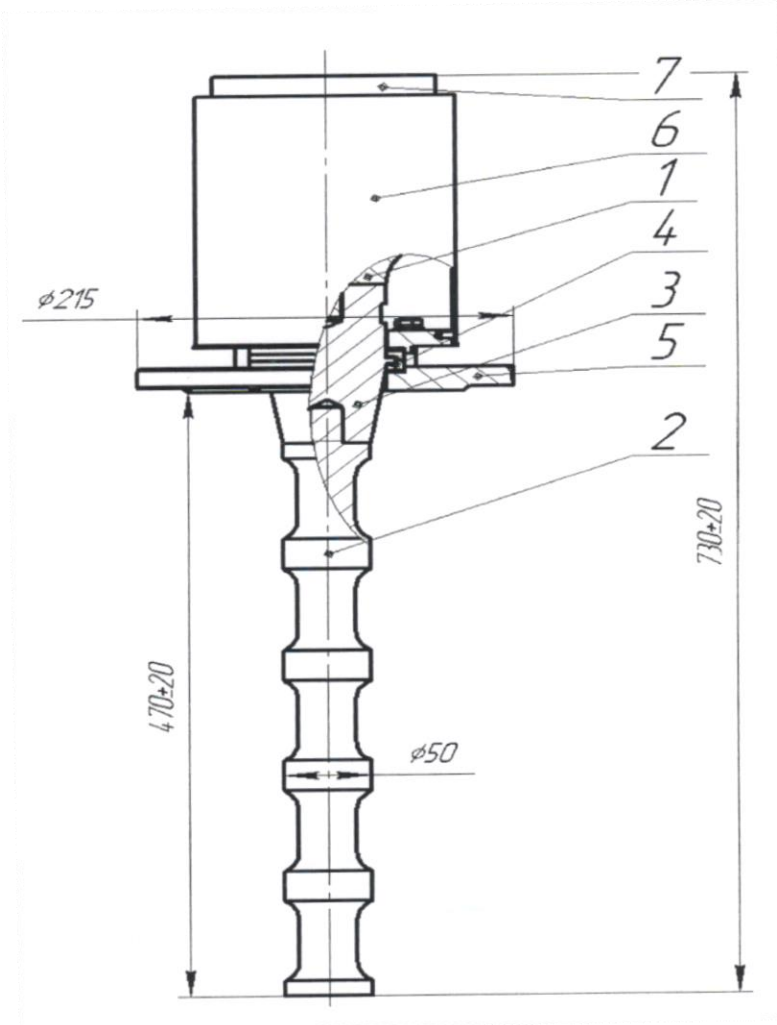
1 – корпус; 2 – нижний конус; 3 – верхний конус; 4 – расщепитель раствора; 5 – кран подачи смеси раствора; 6 – кран выгрузки насыщенного сорбента; 7 – эрлифт (airlift); 8 – пробоотборники; 9 – смотровые окна; 10 – кран загрузки ионита; 11 – приемный бункер ионита; 12 – оголовок; 13 – дренажный узел; 14 – вывод маточников сорбции; 15 – опора

**Fig. 1. SNK-640 ion exchange pressure column:**

1 – body; 2 – lower cone; 3 – upper cone; 4 – solution divider; 5 – solution supply tap; 6 – saturated sorbent discharge tap; 7 – airlift; 8 – samplers; 9 – viewing windows; 10 – ion exchanger loading tap; 11 – ion exchanger receiving hopper; 12 – tip; 13 – drainage unit; 14 – sorption mother liquor outlet; 15 – support

**Параметры ультразвукового агрегата**  
**Parameters of the ultrasonic unit**

Параметр	Значение
Габаритные размеры ультразвуковой колебательной системы, мм	Ø215×750
Интенсивность ультразвукового воздействия, Вт/см <sup>2</sup>	>10
Длина силового кабеля, м	25
Питание от сети переменного тока напряжением, В	220±22
Максимальная потребляемая мощность, ВА	<3000
Диапазон регулирования мощности, %	40–100
Время непрерывной работы, ч	8
Габаритные размеры электронного блока, мм	640×450×250



**Рис. 2. Ультразвуковая колебательная система (агрегат) погружного типа:**

1 – ультразвуковая колебательная система (набор пьезокристаллов); 2 – рабочий излучающий инструмент; 3 – бустерное звено; 4 – герметичное уплотнение; 5 – фланец ультразвуковой колебательной системы; 6 – корпус; 7 – вентилятор

**Fig. 2. Immersion ultrasonic oscillatory system (unit):**

1 – ultrasonic oscillatory system (a set of piezocrystals); 2 – working emitting tool; 3 – booster link; 4 – tight seal; 5 – flange of the ultrasonic oscillatory system; 6 – body; 7 – fan



Рис. 3. Установка УЗ-агрегата на сорбционную колонну СНК-640

Fig. 3. Installation of the ultrasonic unit on the SNK-640 ion exchange column

Таблица 3

Результаты опыта 1

Test 1 Results

Колонна	Время процесса, мин	Показания расходомера, м <sup>3</sup> /ч	Наименование раствора	Содержание U, кг/м <sup>3</sup>
Без использования ультразвука (контрольная)	120	2,4	Продуктивный раствор	0,048
			Маточник сорбции	0,002
С использованием ультразвука (испытательная)	120	2,4	Продуктивный раствор	0,048
			Маточник сорбции	0,001

На начальном этапе испытаний количество подаваемого продуктивного раствора (ПР) на колонны по показаниям расходомеров составило:

- без УЗ-агрегата – 2,4 м<sup>3</sup>/ч;
- с УЗ-агрегатом – 2,4 м<sup>3</sup>/ч.

Общее время сорбции на начальном этапе составило 2 ч. Результаты опыта приведены в табл. 3.

Повышенное содержание урана в маточнике сорбции на колонне без использования

ультразвука по сравнению с маточником сорбции, выходящим из колонны с установленным УЗ-агрегатом в первые 2 ч, указывает на очень большое количество подаваемого на сорбцию продуктивного раствора. Так, отношение объема подаваемого ПР к объему ионита составило 8,08  $V_p/V_c$  в час.

Следующий опыт проводился с уменьшением объема подачи ПР на колонну без УЗ-агрегата, равным 5,86  $V_p/V_c$  в час. Результаты опыта приведены в табл. 4.

Таблица 4

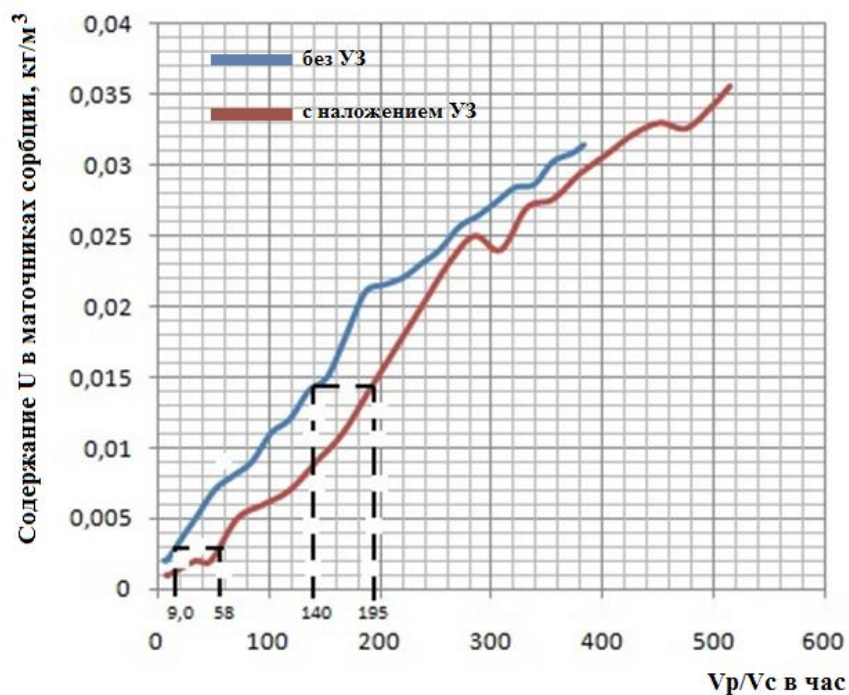
Результаты опыта 2

Test 2 Results

Опыт	Время процесса, мин	Показания расходомера, м <sup>3</sup> /ч	Наименование раствора	Содержание U, кг/м <sup>3</sup>
Без использования ультразвука (контрольная)	60	1,74	Продуктивный раствор	0,050
			Маточник сорбции	0,001
С использованием ультразвука (испытательная)	60	2,40	Продуктивный раствор	0,050
			Маточник сорбции	0,001

**Результаты опыта по определению ПДОЕ при сорбции урана из ПР**  
**The results of the experiment on determining full dynamic exchange capacity**  
**at uranium sorption from pregnant solutions**

Колонна без ультразвука (контрольная)					Колонна с ультразвуком (испытательная)				
Время, ч	$V_p/V_c$	Содержание U в ПР, г/дм <sup>3</sup>	Содержание U в маточниках сорбции, г/дм <sup>3</sup>	Содержание U на смоле, кг/м <sup>3</sup>	Время, ч	$V_p/V_c$	Содержание U в ПР, г/дм <sup>3</sup>	Содержание U в маточниках сорбции, г/дм <sup>3</sup>	Содержание U на смоле, кг/м <sup>3</sup>
1	5,860	0,050	0,0020		1	8	0,050	0,0010	
2	8,260	0,048	0,0020		2	10	0,048	0,0010	
5	25,400	0,048	0,0040		5	34,01	0,048	0,0020	
8	34,180	0,049	0,0050	3,96	8	47,88	0,049	0,0020	5,70
11	51,180	0,049	0,0070		11	71,72	0,049	0,0050	
14	67,950	0,048	0,0080	6,03	14	95,29	0,048	0,0060	7,54
17	84,810	0,049	0,0090		17	118,92	0,049	0,0070	
20	101,48	0,049	0,0110	7,91	20	142,56	0,049	0,0090	9,98
23	118,69	0,049	0,0120		23	166,23	0,049	0,0110	
26	135,52	0,049	0,0140	9,66	26	189,90	0,049	0,0140	12,42
29	152,39	0,049	0,0150		29	213,70	0,049	0,0170	
32	169,39	0,051	0,0180	11,73	32	237,54	0,051	0,0200	16,33
35	186,33	0,050	0,0210		35	261,31	0,050	0,0230	
38	203,13	0,049	0,0215	13,48	38	284,95	0,049	0,0250	16,87
41	219,93	0,048	0,0220		41	308,48	0,048	0,0240	
44	236,70	0,048	0,0230	14,31	44	332,09	0,048	0,0270	17,34
47	253,40	0,048	0,0240		47	355,62	0,048	0,0276	
50	270,40	0,049	0,0256	15,87	50	379,53	0,049	0,0294	17,56
53	287,74	0,050	0,0264		53	404,24	0,050	0,0308	
56	304,41	0,050	0,0274	16,01	56	427,81	0,050	0,0322	18,26
59	321,01	0,050	0,0284		59	451,52	0,050	0,0330	
62	337,71	0,049	0,0286	17,25	62	475,25	0,049	0,0326	19,55
65	354,38	0,050	0,0302		65	498,72	0,050	0,0342	
68	371,75	0,049	0,0308	18,86	68	514,58	0,049	0,0356	21,62
71	382,32	0,050	0,0314		71	530,44	0,050	0,0370	



**Fig. 4. Graphs of uranium sorption by the ion exchanger with and without ultrasonic action**



Полученные результаты указывают на оптимальное для сорбции без ультразвука отношение объема подаваемого ПР к объему смолы, равное  $5,86 V_p/V_c$  в час.

Полученные в первом опыте скорости сорбции для колонны без ультразвука и с ультразвуком были взяты за основу при проведении последующего эксперимента по определению полной динамической обменной емкости (ПДОЕ) смолы без использования ультразвука и с наложением ультразвука. Результаты опытов по определению ПДОЕ ионита с использованием ультразвука и без использования ультразвука приведены в табл. 5.

Графики сорбции урана в динамических условиях при проведении эксперимента представлены на рис. 4.

Получены следующие результаты экспериментов по интенсификации процесса сорбции урана из продуктивных растворов на ионообменную смолу наложением ультразвука, в частности УЗ-интенсификация позволяет:

– при содержании урана в маточниках сорбции  $0,003 \text{ г/м}^3$  увеличить скорость сорбции в 6,4 раза;

– при содержании урана в маточниках сорбции  $0,014 \text{ г/м}^3$  увеличить скорость сорбции в 1,4 раза;

– за счет применения УЗ-воздействия получить средневзвешенное увеличение скорости сорбции в 1,3 раза;

– увеличить ПДОЕ ионита по урану в 1,13 раза.

Общее время обработки ультразвуком при проведении экспериментов составило 63,3 ч.

В процессе проведения экспериментов была определена максимальная скорость сорбции без применения ультразвука для используемой на руднике ионообменной смолы, равная  $5,86 V_p/V_c$  в час.

#### 4. Испытания по определению влияния ультразвука на механическую прочность ионита

Испытания использованного во всех опытах анионита марки Ambersep 920U SO<sub>4</sub> проводились в емкости из полимерного материала объемом 60 дм<sup>3</sup>, в которую загрузили 40 дм<sup>3</sup> ионообменной смолы. Паспортные характеристики анионита приведены в табл. 6.

Таблица 6

#### Характеристики сильноосновной макропористой анионообменной смолы марки Ambersep 920U SO<sub>4</sub> производства Dow Chemical Company

#### Characteristics of the strongly basic macroporous anion exchange resin of Ambersep 920U SO<sub>4</sub> grade manufactured by Dow Chemical Company

Показатель	Значение
Полимерная матрица	Макропористый сшитый полистирол
Физическая форма	Непрозрачные гранулы
Ионная форма при поставке	Сульфатная (не менее 50 %)
Функциональная группа	-N+(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> OH
Полная ионообменная емкость	≥ 1,0 г-экв./дм <sup>3</sup> (Cl <sup>-</sup> -форма)
Влагосодержание	53–65 % (Cl <sup>-</sup> -форма)
Товарная масса	680–710 г/дм <sup>3</sup>
Гармонический средний диаметр	0,845–1,050 мм
Коэффициент однородности	≤ 1,50
Содержание мелких гранул <0,710 мм	макс. 5,0 %
Содержание крупных гранул >1,180 мм	макс. 4,0 %
Максимальное обратимое набухание Cl <sup>-</sup> → SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	около 5 %
Механическая прочность	≥ 98 %
Завод-изготовитель	Rohm and Haas France S.A.S. (Dow Chemical Company)
Страна-производитель	Франция

На верхнюю часть емкости (крышку) установили УЗ-агрегат и шланг для подачи проточной технической воды. Рабочий орган (УЗ-излучатель) был помещен соосно внутри цилиндрической емкости. Габариты рабочего органа излучателя: длина – 480 мм, диаметр – 50 мм. Высота емкости – 640 мм, диаметр емкости – 360 мм. Ионит располагался между рабочим органом излучателя и стенками емкости. Расстояние от стенок емкости до рабочего органа излучателя составляло 335 мм.

Данный режим обработки является жестким, так как звуковая волна не успевает погасить свою мощность в гетерогенной среде (раствор + ионит) и за счет малого расстояния между источником и стенкой емкости

образуется отраженная волна. Наличие отраженных волн приводит к образованию зон кратного увеличения воздействия ультразвука на ионит. При работе в промышленных сорбционных колоннах (и в других ионообменных аппаратах потокового типа) данный эффект будет отсутствовать. Максимальная зона влияния ультразвука для данного типа излучателей составляет 550–600 мм от поверхности излучателя. Объемный расход воды составил 20 дм<sup>3</sup>/ч. Режим работы УЗ-генератора установили как 6 к 25, т.е. 6 ч работы ультразвука и 25 мин остановки. Общее время работы УЗ-излучателя в рамках эксперимента составило 148 ч на частоте 22 кГц. Общий вид установки в сборе показан на рис. 5.



Рис. 5. Установка для исследования воздействия жесткого ультразвука на механическую прочность ионита

Fig. 5. Installation for the study of hard ultrasound on the ion exchanger grain mechanical strength

Перед началом эксперимента были отобраны пробы исходной (новой) смолы и промаркированы соответственно № 3 и № 4 (рис. 6). По окончании эксперимента были отобраны пробы смолы, прошедшей УЗ-обработку, они были промаркированы № 1 и № 2. На рис. 6 видно, что пробы № 3 и № 4 – это новая смола, только что из заводской упаковки, а пробы № 1 и № 2 отличаются более темным цветом с серым оттенком, свидетельствующим об их предварительной эксплуатации.

Все пробы были отправлены на так называемый слепой анализ в независимую

специализированную лабораторию. Результаты анализа данных проб на определение величины механической прочности зерен ионита таковы:

- проба № 1: механическая прочность – 99,0 %;
- проба № 2: механическая прочность – 99,5 %;
- проба № 3: механическая прочность – 98,0 %;
- проба № 4: механическая прочность – 98,0 %.



**Рис. 6. Пробы исходного нового ионита (№ 3 и 4) в сравнении с пробами ионита, бывшего в эксплуатации (№ 1 и 2)**

**Fig. 6. Samples of the initial new ion exchanger (Nos. 3 and 4) in comparison with the samples of the previously used ion exchanger (Nos. 1 and 2)**

Как видно из полученных данных, обработка зерен ионообменной смолы ультразвуком даже в специально смоделированных жестких условиях не только не вызвала ухудшения ее механической прочности, более того, она привела пусть к незначительному, но вполне диагностируемому и заметному их упрочнению. Это произошло за счет полной УЗ-очистки макропористой структуры зерен ионита, а также за счет восстановительного эффекта так называемой УЗ-сшивки (спайки) нитей полистирольной матрицы, поврежденных в ходе эксплуатации ионообменной смолы при ее использовании в технологическом цикле получения урана методом ПСВ.

### **Заключение**

Проведенные эксперименты по интенсификации сорбции урана из продуктивных растворов на ионообменную смолу ультразвуком

показали принципиальную возможность перспективного использования УЗ-воздействия для интенсификации других ионообменных процессов в технологическом цикле получения урана методом ПСВ. Также опытным путем был установлен факт отсутствия негативного влияния даже продолжительного и жесткого УЗ-воздействия на механическую прочность зерен ионообменной смолы. Наблюдался регенеративный эффект.

Описанные в настоящей статье проведенные эксперименты охватывают только процесс сорбции урана из продуктивных растворов. Однако можно предполагать, что исследование УЗ-воздействия является перспективным для других ионообменных процессов, применяемых при производстве урана методом ПСВ.

### **Библиографический список**

1. Агранат Б. А. *Ультразвуковая технология*. М.: Металлургия; 1974, 503 с.
2. Казанцев В. Ф. *Расчет ультразвуковых преобразователей для технологических установок*. М.: Машиностроение; 1980.
3. Кардашов Г. А., Михайлов П. Е. *Тепломассообменные акустические процессы и аппараты*. М.: Машиностроение; 1976.
4. Колесников Г. Е., Карпенко Л. А. *Оптимальное проектирование в задачах химического машиностроения*. М.: МИХМ; 1983.
5. Ламекин Н. С. Математическая модель диспергирования с учетом кавитации. *Теоретические основы химических технологий*; 1987. Т. 21.
6. Маргулис М. А. *Звукохимические реакции и сонолюминесценция*. М.: Химия; 1986.
7. Николаев В. Н., Шевцов В. С., Гогом Т. А. *Исследование влияния ультразвука на процесс разделения иловой смеси*. Сб. науч. тр. М.: МИСИ; 1984.

8. Промтов М. А. *Машины и аппараты с импульсными энергетическими воздействиями на обрабатываемые вещества*. М.: Машиностроение; 2004.
9. Пьезокерамические преобразователи. *Методы измерения и расчета параметров*: Справочник. Под ред. С. И. Пугачева. Л.: Судостроение; 1984.
10. Розенберг Л. Д. *Источники мощного ультразвука. Фокусирующие излучатели ультразвука*. М.: Наука; 1967.
11. Тананаев И. Г. *Уран: Учеб. пособие для вузов*. М.: Изд-во НИЯУ «МИФИ»; 2011.
12. Теумин И. И. *Ультразвуковые колебательные системы*. М.: ГНТИ машиностр. лит.; 1959.
13. *Технологический регламент на рабочий процесс переработки растворов подземного выщелачивания с получением готовой продукции в виде оксидов природного урана на руднике ПСВ*. 2015.
14. Фридман В. М. Физико-химическое действие ультразвука на гетерогенные процессы жидкостной обработки материалов. *Применение ультразвука в химико-технологических процессах*. М.; 1960.
15. Цыганков Ф. П., Сенин В. Н. *Циклические процессы в химической технологии. Основы безотходных производств*. М.: Химия; 1988.
16. Datta Subhendu K., Shah Arvind H. *Elastic Waves in Composite Media and Structures: With Applications to Ultrasonic Nondestructive Evaluation*. CRC Press LLC; 2019. 321 p.
17. David J., Cheeke N. *Fundamentals and Applications of Ultrasonic Waves*. CRC Press; 2002. 451 p.
18. Hirao M., Ogi H. *Electromagnetic Acoustic Transducers: Noncontacting Ultrasonic Measurements using EMATs*. Springer Japan; 2017. 382 p.
19. Kundu T. *Nonlinear Ultrasonic and Vibro-Acoustical Techniques for Nondestructive Evaluation*. Springer International Publishing; 2019. 759 p.
20. Seak T., Leong H., Manickam S., Gregory J. O. Martin, Wu Li, Muthupandian A. *Ultrasonic Production of Nano-emulsions for Bioactive Delivery in Drug and Food Applications*. Springer International Publishing; 2018. 446 p.
21. Wayne W. *Ultrasonic welding of lithium (Li) ion batteries*. ASME Press; 2017. 268 p.
22. Wilbur L. Bunch. *The effect of ultrasonic sound frequencies on the viscosity of Wyoming asphalt base petroleum*. Laramie, Wyoming; 1951. UMI Number: EP23601. 47 p.

## References

1. Agranat B. A. *Ultrasonic Technology*. Moscow: Metallurgiya Publ.; 1974. 503 p. (In Russ.).
2. Kazantsev V. F. *Calculation of ultrasonic transducers for technological*. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 1980. (In Russ.).
3. Kardashov G. A., Mikhailov P.E. *Heat and mass transfer acoustic processes and apparatuses*. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 1976. (In Russ.).
4. Kolesnikov G. E., Karpenko L.A. *Optimal design in the problems of chemical engineering*. Moscow: MIHM Publ.; 1983. (In Russ.).
5. Lamekin N. S. Dispergating mathematical model taking into account cavitation. *Theoretical Foundations of Chemical Technologies*; 1987. Vol. 21. (In Russ.).
6. Margulis M. A. Sonochemical reactions and sonoluminescence. Moscow: Khimiya Publ.; 1986 (In Russ.).
7. Nikolaev V. N., Shevtsov B.S., Gogom T.A. *Investigation of ultrasound action on the process of mixed liquor separation*. MISI Proceedings. Moscow: MISI Publ.; 1984. (In Russ.).
8. Promtov M. A. *Equipment and apparatuses with pulsed energy actions on the substances to be treated*. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 2004. (In Russ.).
9. Pugachev S. I. (ed.) Piezoceramic transducers. *Methods of measurement and calculation of parameters: Handbook*. Leningrad: Sudostroenie Publ.; 1984. (In Russ.).
10. Rosenberg L. D. *Sources of hard ultrasound. Focusing ultrasound emitters*. Moscow: Nauka Publ., 1967. (In Russ.).
11. Tananaev I. G. *Uranium: manual for graduate students*. Moscow: Publishing House of NRNU "MIPhI Publ."; 2011. (In Russ.).
12. Teumin I. I. Ultrasonic oscillatory systems. Moscow: GNTI of Machine-Building Literature Publ., 1959. (In Russ.).
13. *The standard operating procedure for processing ISR pregnant solutions to produce finished products in the form of natural uranium oxides at ISR mine*. 2015. (In Russ.).
14. Friedman V. M. Physico-chemical effect of ultrasound on heterogeneous processes of hydronic treatment of materials. *Application of ultrasound in chemical technology processes*. Moscow; 1960. (In Russ.).
15. Tsygankov F. P., Senin V. N. *Cyclic processes in chemical technology. Basics of non-waste production*. Khimiya Publ.; 1988. (In Russ.).
16. Datta Subhendu K., Shah Arvind H. *Elastic Waves in Composite Media and Structures: With Applications to Ultrasonic Nondestructive Evaluation*. CRC Press LLC; 2019. 321 p.

17. David J., Cheeke N. *Fundamentals and Applications of Ultrasonic Waves*. CRC Press; 2002. 451 p.
18. Hirao M., Ogi H. *Electromagnetic Acoustic Transducers: Noncontacting Ultrasonic Measurements using EMATs*. Springer Japan; 2017. 382 p.
19. Kundu T. *Nonlinear Ultrasonic and Vibro-Acoustical Techniques for Nondestructive Evaluation*. Springer International Publishing; 2019. 759 p.
20. Seak T., Leong H., Manickam S., Gregory J. O. Martin, Wu Li, Muthupandian A. *Ultrasonic Production of Nano-emulsions for Bioactive Delivery in Drug and Food Applications*. Springer International Publishing; 2018. 446 p.
21. Wayne W. *Ultrasonic welding of lithium (Li<sup>+</sup>) ion batteries*. ASME Press; 2017. 268 p.
22. Wilbur L. Bunch. *The effect of ultrasonic sound frequencies on the viscosity of Wyoming asphalt base petroleum*. Laramie, Wyoming; 1951. UMI Number: EP23601. 47 p.