

**ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ****НЕОРГАНИЧЕСКАЯ ХИМИЯ**

DOI: 10.32743/UniChem.2022.98.8.14099

**ИЗУЧЕНИЕ СОРБЦИИ ИОНОВ ЦИНКА (II) С ТВЕРДЫМИ ЭКСТРАГЕНТАМИ  
НА ОСНОВЕ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ****Абдуллаева Гулчехра Абдухалиловна**

преподаватель кафедры Неорганическая химия  
Национального университета Узбекистана им. М. Улугбека,  
Республика Узбекистан, г. Ташкент  
E-mail: [abdullayevag615@gmail.com](mailto:abdullayevag615@gmail.com)

**Даминова Шахло Шариповна**

д-р хим. наук, и/о профессора кафедры Неорганическая химия  
Национального университета Узбекистана им. М. Улугбека,  
заведующий лабораторией Химия и нефтехимия ГУ Узбекско-японский  
молодежный центр инноваций,  
Республика Узбекистан, г. Ташкент  
E-mail: [daminova\\_sh@mail.ru](mailto:daminova_sh@mail.ru)

**Кадирова Зухра Чингизовна**

д-р хим. наук, зам. директора по науке  
ГУ Узбекско-японский молодежный центр инноваций  
Республика Узбекистан, г. Ташкент  
E-mail: [zuhre\\_kadirova@mail.ru](mailto:zuhre_kadirova@mail.ru)

**STUDYING THE SORPTION OF ZINC(II) IONS WITH SOLID EXTRAGENTS BASED  
ON ALUMINUM OXIDE****Gulchekhra Abdullayeva**

Lecturer of the Chemistry Department,  
the National University of Uzbekistan named after M. Ulugbek  
Republic of Uzbekistan, Tashkent

**Shahlo Daminova**

Doctor of Chemical Sciences, Professor of the Department  
of Inorganic Chemistry of the National University of Uzbekistan  
named after M. Ulugbek, Head of the laboratory Chemistry  
and petrochemistry SE "Uzbekistan-Japan innovation center of youth"  
Republic of Uzbekistan, Tashkent

**Zukhra Kadirova**

Doctor of Chemical Sciences, Deputy director  
SE "Uzbekistan-Japan innovation center of youth"  
Uzbekistan, Tashkent

## АННОТАЦИЯ

Изучены сорбционные свойства импрегнированных сорбентов на основе отработанного катализатора Шуртанского газохимического комплекса по отношению к ионам цинка. Определены параметры сорбционного извлечения ионов цинка. Экспериментальные изотермы сорбции ионов Zn(II) обработаны в рамках моделей сорбции Ленгмюра и Фрейндлиха. Установлено, что лучшими сорбционными свойствами по отношению к ионам Zn(II) обладают сорбенты, импрегнированные с 2-меркаптобензотиазолом (МБТ).

## ABSTRACT

The sorption properties of impregnated sorbents based on the spent catalyst of the Shurtan gas chemical complex with respect to zinc ions have been studied. The parameters of the sorption extraction of zinc ions were determined. The experimental isotherms of the sorption of Zn(II) were processed within the framework of the Langmuir and Freundlich sorption models. It was found that sorbents impregnated with MBT have the best sorption properties with respect to Zn(II) ions.

**Ключевые слова:** отработанный катализатор, цинк, сорбция, изотерма, импрегнат, твердые экстрагенты, дифенилтиокарбазон, 1-(2-пиридилазо)-2-нафтол, 2-меркаптобензотиазол.

**Keywords:** spent catalyst, zinc, sorption, isotherm, impregnate, solid extractants, diphenylthiocarbazone, 1-(2-pyridylazo)-2-naphthol, 2-mercaptobenzothiazole.

**Введение.** Быстрое развитие промышленного использования тяжелых металлов, например, в металлургии, горнодобывающей промышленности, кожевенных заводах, производстве аккумуляторов, удобрений и т.д., неизбежно привело к увеличению выбросов металлов в водную среду и почву, особенно в развивающихся странах [1]. В отличие от многих органических загрязнителей, которые легко разлагаются, тяжелые металлы (кадмий, свинец, хром, медь, цинк, никель и т. д.) не поддаются биологическому разложению и имеют тенденцию накапливаться в окружающей среде [2]. При этом ионы многих тяжелых металлов обладают токсичными или канцерогенными свойствами. В связи с этим загрязнение тяжелыми металлами подземных и поверхностных водоемов в настоящее время рассматривается как одна из основных экологических угроз для живых организмов [3,4].

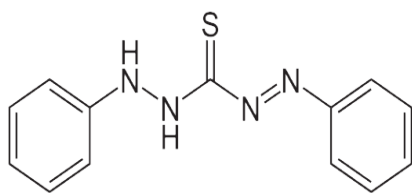
Для удаления тяжелых металлов применяются различные альтернативные методы очистки, такие как удаление из водной фазы и адсорбция на активном иле, химическое осаждение, экстракция растворителем, ионный обмен, мембранные технологии (микро-, ультра- и нанофильтрация), а также как электролиз [5-10]. Однако, несмотря на широкое использование упомянутых методов, их применение на практике ограничено из-за различных помех, затрат на разработку и контроль, проблем сопровождения и технологических ограничений. При этом описанные методы малоэффективны при очистке сточных вод, содержащих низкие концентрации ионов тяжелых металлов, а порой становятся экономически нецелесообразными в применении. В результате, становится невозможным осуществить глубокую очистку сточных вод и их кондиционирование до требуемых стандартов. В то же время в ряде случаев доизвлечение благородных и драгоценных металлов из «хвостов» технологических растворов и сточных вод с применением сорбционных технологий и эффективных методов разделения становится экономически оправданным и весьма привлекательным.

В этой связи особый интерес представляют твердофазные экстрагенты, полученные методом импрегнирования твердой матрицы адсорбента различными лигандами [11,12]. Этот способ отличается простотой и позволяет использовать экстрагенты в сравнительно небольших количествах. Сочетание избирательности жидкостной экстракции и достоинств сорбционных методов, возможность элюирования и использования в проточных системах обуславливают широкое применение твердофазных экстрагентов для различных целей. На основе использования импрегнированных твердофазных экстрагентов разработаны многочисленные комбинированные методы определения органических соединений и микроэлементов в растворах разного состава [13-16].

**Целью данной работы** является получение твердофазных экстрагентов путем импрегнирования твердых носителей органическими лигандами, такими как дифенилтиокарбазон (Dtz), 1-(2-пиридилазо)-2-нафтол (PAN), 2-меркаптобензотиазол (МБТ) и изучение их сорбционных свойств на примере ионов цинка (II).

**Объекты и методы исследования.** Для приготовления растворов использовали  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ . Все реактивы – квалификации х.ч. растворы готовились на дистиллированной воде. В качестве твердых носителей использовали отработанный катализатор Шуртанского газохимического комплекса, в виде  $\gamma-Al_2O_3$ , представляющий собой гранулы серого цвета. Полученные материалы первоначально измельчали, используя ступку, а затем в планетарной мельнице (Pulverezette, Fritsch GmbH, Германия), в качестве основной примеси был оксид алюминия. Средние размеры частиц катализатора были 28 мкм, 500 мл контейнер, 500 шаров ( $d=5$  мм), 300 об/мин, 12 ч. Полученные порошки прокачивали при различных температурах в интервале 500 - 1000 °С в течение 2 ч при скорости нагрева 10 °С мин<sup>-1</sup>.

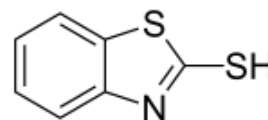
В качестве импрегнирующих соединений использовали следующие органические вещества, выступающих в качестве лигандов:



Дифенилтиокарбазон (Dtz)



1-(2-пиридилазо)-2-нафтол (PAN)



2-меркаптобензтиазол (MBT)

Импregnированные сорбенты были получены по методу, описанному в работах [17, 18]. Полученные сорбенты отмечены следующим образом:  $Al_2O_3$ -Dtz,  $Al_2O_3$ -PAN и  $Al_2O_3$ -MBT.

О характере взаимодействия матричной основы катализатора с указанными органическими лигандами судили по данным ИК-спектроскопии. ИК спектры поглощения соединений регистрировали в области  $400-4000\text{ см}^{-1}$  на спектрометре Spectrum-GX фирмы «SHIMADZU» (Япония), используя образцы в виде таблеток с KBr диаметром 13 мм с разрешением  $4\text{ см}^{-1}$ .

Сорбционные свойства полученного адсорбента по отношению к ионам цинка (II) изучали в статическом режиме. Для этого в серию пробирок помещали навески сорбента массой по 0,10 г, заливали в них  $30\text{ см}^3$  водного раствора  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$  с концентрациями в интервале  $- 5,0 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-1}$  моль/л и выдерживали при перемешивании до установления состояния равновесия (время достижения сорбционного равновесия определяли при исследовании кинетики сорбции). Затем раствор отделяли от сорбента фильтрованием и определяли в нем текущую концентрацию иона цинка (II) в ICP-OES спектрометре (Thermo Scientific iCAP7400 DuoView). Экспериментальные результаты по изучению сорбции выражали в виде величины сорбируемости данного иона ( $q_e$ , ммоль/г) и степени сорбции ( $R$ , %), соответственно, по формулам (1) и (2):

$$q_e = \frac{(C_i - C_e) \cdot V}{C_i \cdot m} \quad (1)$$

$$R_{\%} = \frac{(C_i - C_e)}{C_i} \cdot 100\% \quad (2)$$

где  $q_e$  - количество сорбированного цинка на грамм сорбента, ммоль/г;  $C_i$ ,  $C_e$  - исходная и равновесная концентрация ионов меди в растворе соответственно, ммоль/дм<sup>3</sup>;  $V$ -объем раствора, л;  $m$ -масса сорбента, г.

Коэффициент распределения ( $K_D$ , мл/г) рассчитывали по формуле:

$$K_D = \frac{C_{\text{равн. Zn в твердой фазе}}}{C_{\text{равн. Zn в растворе}}} \quad (3)$$

По полученным данным строили изотермы адсорбции, с последующим преобразованием (метаморфозам) в координатах моделей Ленгмюра и Фрейндлиха.

**Результаты и обсуждение.** Отработанный алюминийоксидный катализатор Шуртанского НХК состоит, в основном, из  $\gamma$ -оксида алюминия (табл.1) и характеризуется высоким содержанием летучих соединений, которые остаются в его составе за счет воды и органических соединений, адсорбирующихся на поверхности катализатора в процессе его применения в нефтегазовой промышленности.

Таблица 1.

Химический состав (% по массе) и свойства исходных веществ

Химический состав и свойства	Отработанный катализатор
SiO <sub>2</sub>	0.11
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	70.90
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	–
TiO <sub>2</sub>	–
CaO	0.15
MgO	–
Na <sub>2</sub> O	1.33
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	–
SO <sub>3</sub>	–
MnO	–
Cl	2.08
Летучая часть (Л.о.И.)	25.43
Плотность (г см <sup>-3</sup> )	2.67
Средний размер частиц (μм)	27.52

Основным фактором, влияющим на эффективность сорбции является фазовый состав соединений

в исходной золе. Экспериментальные дифрактограммы исходных материалов и полученных сорбентов приведены на рис. 1 и табл. 2 и показывают

наличие в и материалах аморфной фазы (характерные размытые пики) и многочисленных кристаллических фаз. В табл. 2 приведены данные РФА для образцов серий сорбентов.

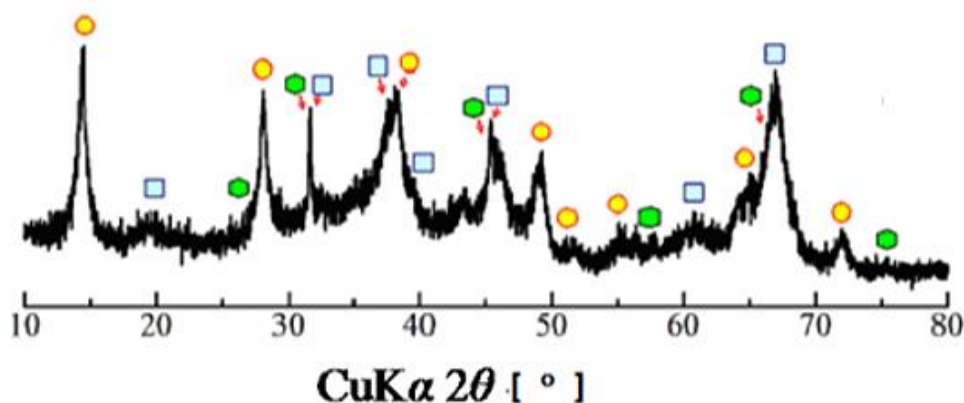


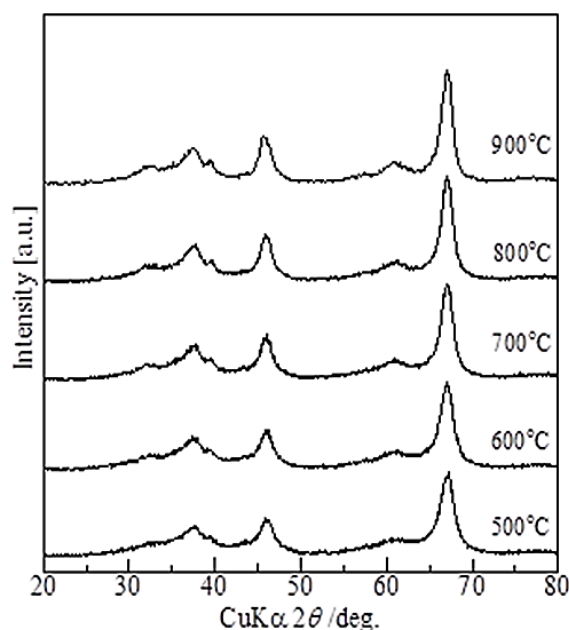
Рисунок 1. - Рентгенограммы отработанного катализатора (б) из оксида алюминия. Обозначения: - браунмиллерит; - гибсит; - ларнит; - вюстит (плюстит);  $\square$  -  $\gamma$ -оксид алюминия;  $\circ$  - беомит;  $\hexagon$  - галит

Таблица 2.

Фазовый состав образцов по данным РФА

Температура	PDF	Вещество	Формула
500	00-050-0741	Оксид алюминия	$Al_2O_3$
600	98-000-0059	$\gamma$ -оксид алюминия	$Al_2O_3$
700	98-000-0059	$\gamma$ -оксид алюминия	$Al_2O_3$
	00-050-1496	Оксид алюминия	$Al_2O_3$
800	98-000-0059	$\gamma$ -оксид алюминия	$Al_2O_3$
	04-005-4213	Корунд	$Al_2O_3$
900	98-000-0059	$\gamma$ -оксид алюминия	$Al_2O_3$
	01-074-1081	Корунд	$Al_2O_3$
	00-004-0877	Оксид алюминия	$Al_2O_3$
1000	00-004-0877	Оксид алюминия	$Al_2O_3$
	01-070-5679	Корунд	$Al_2O_3$

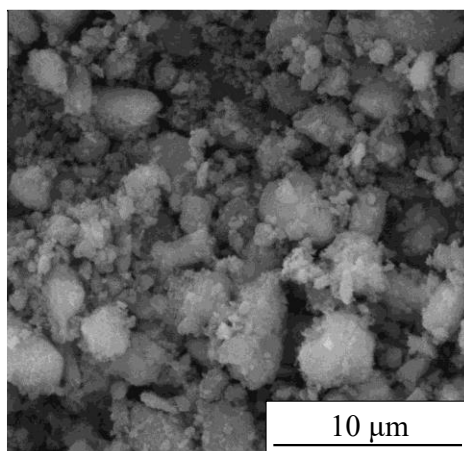
На рис. 2 приведены экспериментально найденные дифрактограммы приготовленных сорбентов при различных температурах.



**Рисунок 2. Дифрактограммы приготовленных сорбентов на основе отработанного катализатора Шуртанского ГХК**

Приведенная на рис.3 микрофотография образца отработанного катализатора Шуртанского ГХК подтверждает аморфную поверхность частиц измельченного катализатора. Однако по микрофотографии

трудно отличить мелкие кристаллы  $\gamma$ -оксида алюминия, беомиита и галита в этом образце.



**Рисунок 3. Электронные микрофотографии отработанного катализатора из оксида алюминия Шуртанского ГХК**

Строение полученных сорбентов до и после сорбции изучались методом ИК-спектроскопии. Было подтверждено участие реагентов функциональных групп при образовании комплексных соединений. По сдвигам характерных полос в спектре, было установлено наличие взаимодействия между пропитанными органическими лигандами и ионами цинка с образованием стабильных комплексов металла.

Поскольку характеристические полосы Dtz, PAN и MBT перекрываются с сильной и широкой полосой  $\text{Al}_2\text{O}_3$  от  $3500\text{--}3000\text{ см}^{-1}$ , характеристические полосы Dtz, PAN, MBT,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Dtz}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-PAN}$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MBT}$  до и после сорбции ионами цинка регистрировали отдельно в диапазоне  $1800\text{--}$

$1000\text{ см}^{-1}$  для оценки эффективности пропитки при сорбции ионов тяжелых металлов и образования металлокомплексов. В ИК-спектрах  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Dtz}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-PAN}$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MBT}$  помимо перекрывающихся характеристических полос  $\text{Al}_2\text{O}_3$  видны более заметные пики иммобилизованных молекул Dtz, PAN и MBT. Сдвиг частот валентных колебаний  $\text{C}=\text{N}$  и уширение пиков указывают на координацию молекул Dtz и PAN с ионами  $\text{Zn}^{2+}$ . Смещение двух пиков, а именно  $-\text{OH}$  и  $-\text{N}=\text{N}-$ , на  $15\text{--}20\text{ см}^{-1}$  для насыщенной металлом твердого экстрагента  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-PAN}$  также указывает на участие обеих групп в удержании ионов цинка за счет хелатирования.

Влияние pH на сорбцию  $\text{Zn}^{2+}$  на сорбентах  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Dtz}$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-PAN}$  изучали в интервале pH  $1,5\text{--}11,5$ .

Избыток иона металла (30 мл, 50 мкг/мл) встряхивали с 100 мг смолы в течение 120 мин.

Влияние pH на сорбцию ионов цинка показано на рис. 4. Из полученных данных видно, что в твердом экстрагенте  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Dtz}$  величина pH сорбции ионов цинка смещается в более кислую область.

Максимальная сорбция наблюдается при pH 4. При pH=8–10 сорбция  $\text{Zn}^{2+}$  из их водных сульфатных растворов несколько возрастает по мере увеличения pH раствора за счет образования малорастворимых гидроксильных форм, например,  $\text{Me}(\text{OH})^+$ ,  $\text{Me}(\text{OH})^{3-}$ ,  $\text{Me}(\text{OH})_4^{2-}$ ,  $\text{Me}(\text{OH})_2$ .

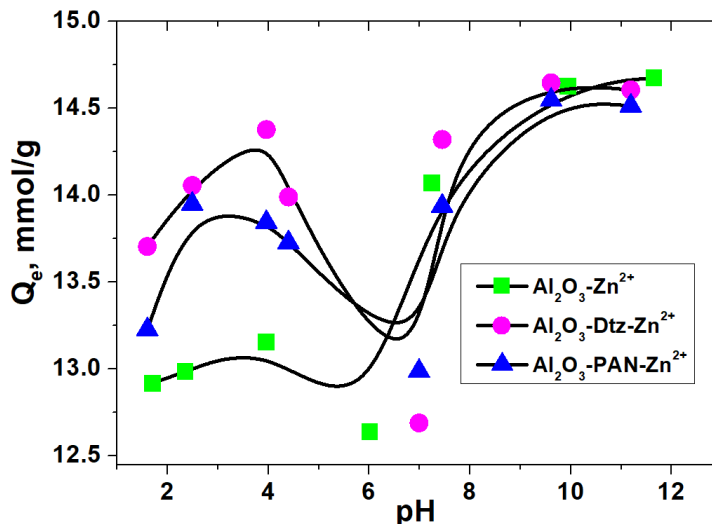


Рисунок 4. Зависимость количества сорбированных ионов цинка на твёрдых экстрагентах от кислотности среды ( $C_{\text{Zn}}=50$  мкг/мл,  $m_{\text{сорб}}=10$  мг,  $t=2$  ч,  $V=30$  мл)

Азот гетероциклического кольца PAN протонируется при более низком pH, в то время как фенольная OH-группа диссоциирует в щелочной области. Благодаря этому реагент обладает достаточной растворимостью как в кислой, так и в щелочной среде и реагирует с ионами металлов в слабощелочной среде с образованием устойчивого комплекса. Все исследованные сорбенты проявляли более высокую сорбционную емкость в диапазоне pH 8,5–9,5. Следовательно, во всех дальнейших экспериментах доводили pH до 9,2.

Для оценки сорбционных характеристик и подтверждения механизма сорбции ионов цинка были получены изотермы сорбции. На рис. 5 приведены

зависимости равновесного количества сорбированного вещества от равновесной концентрации ионов цинка (II). Как видно из рисунка, с ростом концентрации раствора сорбционная способность сорбентов по иону цинка (II) возрастает. Вид изотерм сорбции для импрегнированных сорбентов показывает, что кривая изотермы сорбции ионов  $\text{Zn}(\text{II})$  идет выше, чем на не импрегнированном сорбенте  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Из горизонтального участка изотерм определены сорбционные емкости цинка, составляющие 23,08 ммоль/г для  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 27,81 ммоль/г для  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Dtz}$ , 26,29 ммоль/г для  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-PAN}$  и 28,69 ммоль/г для  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MBT}$ .

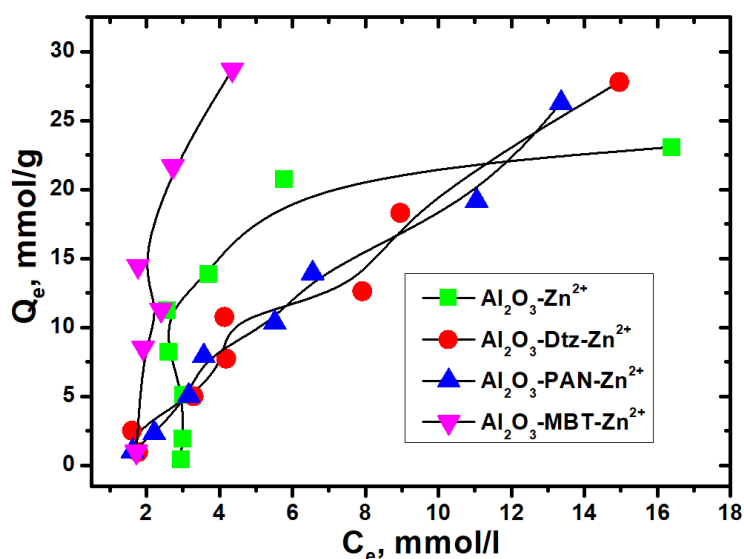


Рисунок 5. Изотерма сорбции ионов  $\text{Zn}(\text{II})$  на импрегнированных сорбентах на основе  $\text{Al}_2\text{O}_3$

Изотерма сорбции ионов цинка были описаны уравнениями Ленгмюра и Фрейндлиха [19, 20]. На рис.6 изотермы сорбции представлены в линейной форме. Полученные константы и коэффициенты корреляции обобщены в табл.3. В таких системах ионы металлов могут адсорбироваться как пористым носителем, так и иммобилизованными органическими лигандами. Полученная изотерма сорбции лучше соответствует модели Фрейндлиха, чем модели Ленгмюра, поскольку сорбция  $Zn^{2+}$  на пористом  $Al_2O_3$  была результатом гетерогенной адсорбции по определению самой изотермы Фрейндлиха [21]. Значения  $Q_e$  и  $K_F$  значительно увеличились для образца  $Al_2O_3$ -MBT, а  $K_F$  несколько уменьшились для

образца  $Al_2O_3$ -Dtz (табл. 3). Кроме того, образцы  $Al_2O_3$ -Dtz,  $Al_2O_3$ -PAN и  $Al_2O_3$ -MBT имеют характерную S-образную форму сорбционной кривой и плато, свидетельствующие о многослойном процессе сорбции  $Zn^{2+}$  на этих сорбентах. Таким образом, механизм сорбции  $Zn^{2+}$  на  $Al_2O_3$ -Dtz,  $Al_2O_3$ -PAN и  $Al_2O_3$ -MBT можно рассматривать как в виде физической сорбции  $Zn^{2+}$  на пористой поверхности  $Al_2O_3$ , так и сильной химической реакции между  $Zn^{2+}$  и органическими лигандами, в результате которой происходит эффективная сорбция  $Zn^{2+}$  на  $Al_2O_3$ -Dtz,  $Al_2O_3$ -PAN и  $Al_2O_3$ -MBT.

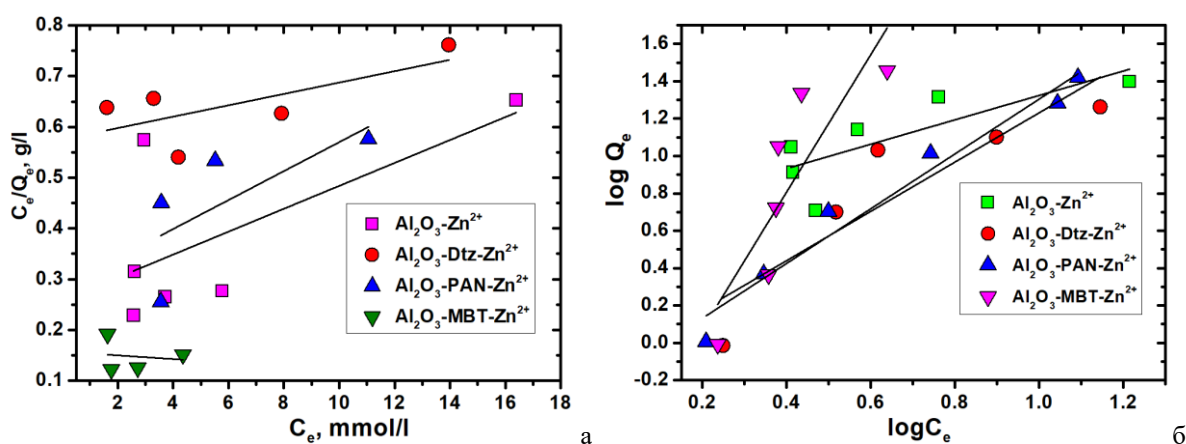


Рисунок 6. Изотерма сорбции  $Zn(II)$ , построенная в координатах линейной формы уравнений Ленгмюра (а) и Фрейндлиха (б)

Таблица 3.

Параметры процессов сорбции ионов  $Zn(II)$  на импрегнированных сорбентах при использовании моделей по Ленгмюру и Фрейндлиху

Сорбенты	Параметры Ленгмюра				$\Delta G = -RT \ln K$ kJ/mol	Параметры Фрейндлиха		
	$q_0$		b	$R^2$		$K_f$	n	$R^2$
	mmol/g	mg/g						
$Al_2O_3$	44.25	2832	0.09	0.4546	-17.50	1.17	1.53	0.628
$Al_2O_3$ -DTZ	89.93	5755	0.02	0.4836	-17.61	1.22	0.76	0.8109
$Al_2O_3$ -PAN	35.09	2246	0.10	0.5034	-18.04	1.45	0.68	0.9646
$Al_2O_3$ -MBT	277.78	17778	0.02	0.3546	-20.90	4.61	0.87	0.7299

**Заключение.** Таким образом, сорбционная емкость  $Zn^{2+}$  на оксиде алюминия была значительно увеличена путем импрегнации различными органическими лигандами –Dtz, PAN и MBT. Образование комплексов  $Zn(II)$  на поверхности образцов после сорбции были подтверждены методами ИК-спектроскопии. Изотермы сорбции ионов  $Zn(II)$  на полученных импрегнированных сорбентах были обработаны моделями изотерм сорбции Ленгмюра и Фрейндлиха. Установлено, что сорбция исследованных

ионов цинка наилучшим образом описывается моделью Фрейндлиха, что соответствует образованию полимолекулярного сорбционного слоя, и активные центры обладают разными величинами энергии сорбции. Из полученных данных следует, что варьируя величиной pH можно регулировать сорбционные характеристики растворимых форм металлов, т.е. добиваться селективной сорбции ионов металлов на импрегнированном сорбенте.

#### Список литературы:

1. Saravanan A., Kumar P.S., Hemavathy R.V., Jeevanantham S., Harikumar P., Priyanka G., Devakirubai D. A comprehensive review on sources, analysis and toxicity of environmental pollutants and its removal methods from water environment //Science of The Total Environment. – 2021. – P. 152456.



2. Ali H., Khan E., Ilahi I. Environmental chemistry and ecotoxicology of hazardous heavy metals: environmental persistence, toxicity, and bioaccumulation //Journal of chemistry. – 2019. – V.2019. Article ID 6730305, <https://doi.org/10.1155/2019/6730305>
3. Mishra Sandhya, Bharagava R.N., More N., Yadav A., Zainith S., Mani S., Chowdhary P. Heavy metal contamination: an alarming threat to environment and human health// Environmental biotechnology: For sustainable future. - 2019. -P.103-125.
4. Masindi V., Muedi K.L. Environmental contamination by heavy metals //Heavy metals. – 2018. – V. 10. – P. 115-132.
5. Gunatilake S.K. Methods of removing heavy metals from industrial wastewater //Methods. – 2015. – V. 1. – N 1. – P. 14.
6. Khan F.S.A., Mubarak N.M., Khali M., Walveka R., Abdullah E.C., Mazari S.A., Karri R.R. Magnetic nanoadsorbents' potential route for heavy metals removal - a review //Environmental Science and Pollution Research. – 2020. – V. 27. – N19. – P. 24342-24356.
7. Wang Y.H., Lin S.H., Juang R.S. Removal of heavy metal ions from aqueous solutions using various low-cost adsorbents //Journal of hazardous materials. – 2003. – V. 102. – N 2-3. – P. 291-302.
8. Buaisha M., Balku S., Özalp-Yaman S. Heavy metal removal investigation in conventional activated sludge systems // Civil Engineering Journal. – 2020. – V. 6. – N3. –P. 470-477.
9. Zulkefeli N.S. W., Weng S.K., Abdul Halim N.S. Removal of heavy metals by polymer inclusion membranes //Current Pollution Reports. – 2018. – V.4. –N2. – P. 84-92.
10. Zhu Y., Fan W., Zhou T., Li X. Removal of chelated heavy metals from aqueous solution: A review of current methods and mechanisms //Science of the Total Environment. – 2019. – V. 678. – P. 253-266.
11. Tavallali H., Deilamy-Rad G., Peykarimah P. Preconcentration and speciation of Cr (III) and Cr (VI) in water and soil samples by spectrometric detection via use of nanosized alumina-coated magnetite solid phase //Environmental monitoring and assessment. – 2013. – V. 185. – N 9. – P. 7723-7738.
12. Vellaichamy S. Adsorptive separation of copper, nickel, lead, zinc and cadmium from aqueous solution using MWCNTs impregnated with D2EHPA and prior to their determination by FAAS: Kinetic and equilibrium studies // Separation Science and Technology. – 2017. – T. 52. – №. 4. – C. 644-656.
13. Lemos V.A., Teixeira L.S.G., Bezerra M.D.A., Costa A.C.S., Castro J.T., Cardoso L.A.M., Santos L.N. New materials for solid-phase extraction of trace elements //Applied Spectroscopy Reviews. – 2008. – V.43. – N4. – P. 303-334.
14. Wang J., Yang Q., Zhang L., Liu M., Hu N., Zhang W., Wang J. A hybrid monolithic column based on layered double hydroxide-alginate hydrogel for selective solid phase extraction of lead ions in food and water samples //Food chemistry. – 2018. – V. 257. – P. 155-162.
15. Tofan L., Wenkert R. Chelating polymers with valuable sorption potential for development of precious metal recycling technologies //Reviews in Chemical Engineering. – 2022. – V. 38. – N2. – P. 167-183.
16. Tuntrachanida J., Wisawapipat W., Aramrak S., Chittamart N., Klysubun W., Amonpattaratkit P., Wenzel W.W. Combining spectroscopic and flux measurement techniques to determine solid-phase speciation and solubility of phosphorus in agricultural soils //Geoderma. – 2022. – V. 410. – P. 115677.
17. Sharipov K.T., Daminova S.S., Kadirova Z.C., Esbergenova B.Z., Khaltursunov E., Hojamberdiev M. Maximizing the zinc ions removal by organic ligand-stabilized conjugate polystyrene macronet material //Microchemical Journal. – 2020. – V. 153. – P. 104523.
18. Daminova S.S., Kadirova Z.C., Sharipov K.T., Stoyko O.V., Chepulsky S.A., Adewuyi A., Hojamberdiev M. Diisopropylthiophosphoric acid-impregnated macroporous non-ionogenic styrene-divinylbenzene polymeric sorbent (Porolas) for effective copper extraction //Journal of industrial and engineering chemistry. – 2017. – V. 55. – P. 204-214.
19. Agarwal A.K., Kadu M.S., Pandhurnekar C.P., Muthreja I.L. Langmuir, Freundlich and BET adsorption isotherm studies for zinc ions onto coal fly ash //International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management. – 2014. – V. 3. – N1. – P. 64-71.
20. Thakur D.A., Sonar N.L., Shukla R., Valsala T.P., Sathe D.B., Bhatt R.B., Tyagi A.K. Evaluation of cerium–zirconium mixed oxides for separation of <sup>125</sup>Sb from radioactive liquid waste //Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 2022. – P. 1-7.
21. Deng J., Kang X., Chen L., Wang Y., Gu Z., Lu Z. A nanofiber functionalized with dithizone by co-electrospinning for lead(II) adsorption from aqueous media// J. Hazard. Mater. -2011. -V.196. -P. 187–193.