

Код МРНТИ 53.37.13

С.С. Коныратбекова<sup>1</sup>, \*Ж. Шопанбек<sup>1</sup>, С.Б. Нуржанова<sup>2</sup>, С.А. Семенов<sup>3</sup><sup>1</sup>Satbayev University (г. Алматы, Казахстан),<sup>2</sup>АО «Институт топлива, катализа и электрохимии им. Д.В. Сокольского» (г. Алматы, Казахстан),<sup>3</sup>РТУ МИРЭА (г. Москва, Россия)

## АДСОРБЦИОННАЯ ОЧИСТКА ПРОМЫШЛЕННЫХ ВОД ОТ КАТИОНОВ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ МОДИФИЦИРОВАННЫМИ ЦЕОЛИТАМИ

**Аннотация.** В статье рассматриваются современные методы адсорбционной очистки промышленных сточных вод металлургических предприятий от ионов тяжелых металлов, включая медь, никель и цинк. Исследуется применение модифицированных цеолитных сорбентов, содержащих наноструктурные соединения ванадия и титана, полученные методом золь-гель технологии. Представлены экспериментальные данные по сорбционной емкости адсорбентов, демонстрирующие значительное повышение эффективности очистки при использовании гибридных наноконструктурированных сорбентов. Оптимизированы условия адсорбции, включая влияние pH, температуры и концентрации металлов в растворе. Разработанная технология направлена на повышение уровня очистки сточных вод металлургического производства, минимизацию негативного воздействия на окружающую среду и возможность вторичной переработки извлеченных металлов для их повторного использования в производственных процессах.

**Ключевые слова:** металлургия, сточные воды, адсорбция, цеолиты, тяжелые металлы, ванадий, титан, очистка воды, сорбция.

### Өнеркәсіптік суларды ауыр металл катиондарынан модификацияланған цеолиттер көмегімен адсорбциялық тазарту

**Андатпа.** Мақалада металлургиялық кәсіпорындардың өндірістік ағынды суларын ауыр металдар иондарынан (мыс, никель, мырыш) адсорбциялық тазартудың заманауи әдістері қарастырылады. Ванадий мен титанның золь-гель технологиясы арқылы алынған нанокұрылымды қосылыстарымен модификацияланған цеолиттік сорбенттердің тиімділігі зерттелді. Эксперименттік зерттеулер көрсеткендей, гибридіті наноконпозициялар ауыр металдарды адсорбциялаудың жоғары тиімділігін қамтамасыз етеді. Адсорбция шарттары оңтайландырылды: pH деңгейі, температура және металдардың ерітіндідегі концентрациясы ескерілді. Дамыған технология металлургиялық өндіріс ағынды суларын тиімді тазартуға, қоршаған ортаға кері әсерді азайтуға және бөлінген металдарды қайта өңдеу арқылы өндірістік процестерде екінші рет пайдалануға мүмкіндік береді.

**Түйінді сөздер:** металлургия, ағынды су, адсорбция, цеолиттер, ауыр металдар, ванадий, титан, су тазарту, сорбция.

### Adsorption treatment of industrial wastewater from heavy metal cations using modified zeolites

**Abstract.** The article examines modern adsorption methods for purifying industrial wastewater from metallurgical enterprises contaminated with heavy metal ions, including copper, nickel, and zinc. The study focuses on the use of modified zeolite sorbents containing nanostructured vanadium and titanium compounds synthesized using sol-gel technology. Experimental data on the sorption capacity of these materials demonstrate a significant increase in purification efficiency when hybrid nanocomposites are applied. The adsorption conditions were optimized, considering pH levels, temperature, and metal concentrations in the solution. The developed technology aims to improve the treatment of metallurgical wastewater, reduce environmental impact, and enable the secondary recovery of extracted metals for reuse in industrial processes.

**Key words:** metallurgy, wastewater, adsorption, zeolites, heavy metals, vanadium, titanium, water purification, sorption.

### Введение

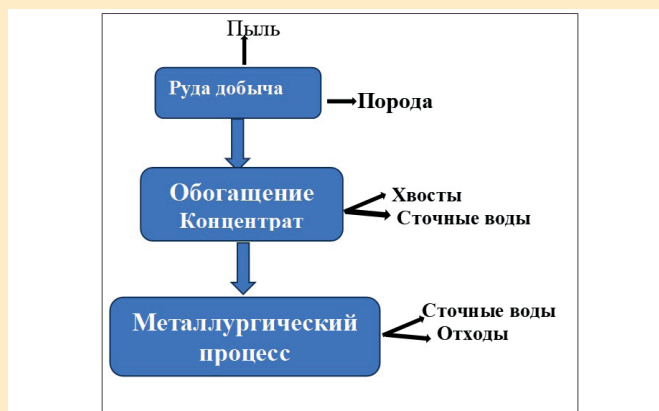
Рост промышленного производства, особенно в металлургии, приводит к значительному загрязнению водоемов тяжелыми металлами. Их накопление в окружающей среде оказывает негативное влияние на экосистемы и здоровье человека. Существующие методы очистки сточных вод не всегда обеспечивают снижение концентрации токсичных веществ до нормативных значений, что делает актуальным поиск эффективных, доступных и экономичных сорбентов.

Цеолиты – природные материалы с высокой удельной поверхностью и селективностью, широко используемые в процессах адсорбции. Однако для повышения их эффективности в очистке сточных вод требуется модификация. В мировой практике [1–10] активно изучаются методы улучшения сорбционных свойств природных сорбентов, включая их химическую и термическую обработку. В данной работе исследованы цеолитные адсорбенты, модифицированные наночастицами титана и ванадия, с целью повышения их сорбционной способности к катионам тяжелых металлов.

На рис. 1 представлен технологический путь поступления отходов в окружающую среду при добыче, обогащении и переработке руд.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- синтез наноструктурных соединений титана и ванадия методом золь-гель технологии и модифицирование цеолитов [11, 12];



**Рис. 1. Технологический путь поступления отходов в окружающую среду при добыче, обогащении и переработке руд.**

**Сурет 1. Кендерді өндіру, байыту және өңдеу кезінде қалдықтардың қоршаған ортаға шығарылуының технологиялық жолы.**

**Figure 1. Technological pathway of waste input into the environment during mining, concentration and processing of ores.**

- изучение физико-химических и адсорбционных характеристик модифицированных цеолитов;
- определение зависимости сорбционной емкости от pH среды и времени контакта с загрязненной водой.

Разработка эффективных и экологически безопасных технологий для снижения концентрации ионов тяжелых металлов в сточных водах до нормативных значений остается актуальной задачей.

### Методы исследования

В рамках научных исследований использовались современные аналитические приборы:

- ИК-Фурье спектрометр Nicolet IR200, работающий в диапазоне 500–4000 см<sup>-1</sup>, применялся для проведения инфракрасной спектроскопии;
- Просвечивающий электронный микроскоп ЭМ-125 с ускоряющим напряжением 75 кВ использовался для детального исследования образцов, которые готовились по стандартной методике;
- Оптический микроскоп МИН-8 применялся для дополнительной характеристики синтезированных материалов;
- Дериватограф Q-1000/D (разработчики: F. Paulik, J. Paulik, L. Erdey, производство – фирма «МOM») использовался для термического анализа. Данный метод позволял фиксировать изменения физических и термохимических свойств образцов в процессе их нагрева.

### Результаты и их обсуждение

В последнее время значительное внимание уделяется исследованию цеолитов, модифицированных металлическими наночастицами, с целью их последующего использования в адсорбционно-каталитических процессах. Высокая поверхностная активность таких материалов открывает перспективы их промышленного применения.

В данной работе использованы цеолиты, модифицированные золь-гель наноструктурами титана и ванадия. Исходными соединениями служили аммиакатные комплексы ванадия  $[(VO_2)_x(OH)_y \cdot nNH_3]$  и титана  $(NH_4)_2TiO(SO_4)_2 \cdot H_2O$ . Для оптимизации процесса синтеза учтены ключевые параметры: pH среды, скорость перемешивания, температура и концентрация реагентов.

Модификация цеолита осуществлялась пропиткой его растворами ксерогеля  $V_2O_5$  (1 г/л и 5 г/л),  $TiO_2$  и их гибридной композицией (1%), с последующей термообработкой при 500 °С.

Адсорбционная способность изучена на модельных растворах меди ( $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ , 100 г/л, pH = 3,07). Наиболее высокая сорбционная емкость (300 мг/г) достигнута у цеолита, модифицированного  $TiO_2$  и  $V_2O_5$ , что объясняется увеличенной удельной поверхностью.

Эффективность устойчивого функционирования адсорбентов анализировалась методом термического анализа с применением дериватографа. Исследование термического поведения образцов в пределах возможностей используемого оборудования позволило определить состав термически активных компонентов, а также отследить динамику их изменения в ходе нагревания.

На основе данных дифференциально-термического анализа (DTA) установлено, что соответствующая реакция, отраженная на DTA-кривой, протекает в температурном диапазоне 20–1000 °С. При динамическом нагревании цеолита, модифицированного гибридной композицией

оксидов ванадия и титана, в интервале температур 200–1000 °С наблюдается последовательное выделение летучих соединений  $H_2O$  и  $CO_{амм}$  в атмосферу (рис. 2). При этом модифицированный цеолит сохраняет свою структурную стабильность.

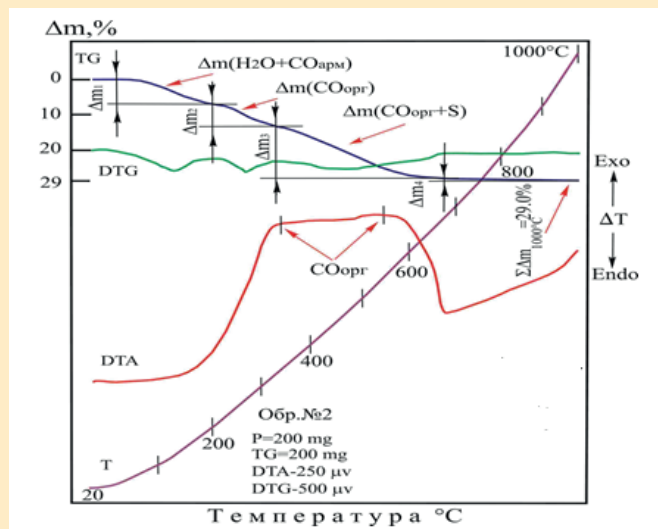


Рис. 2. Дериватограмма цеолита, модифицированного гибридной композицией оксидов ванадия и титана.

Сурет 2. Ванадий мен титан оксидтерінің гибриді құрамы бойынша модификацияланған цеолит дериватограммасы.

Figure 2. Derivatogram of zeolite modified by hybrid composition of vanadium and titanium oxides.

При дальнейшем градиентном нагреве образца в системе не наблюдается значительных термических эффектов. В диапазоне температур 200–1000 °С термогравиметрическая (TG) кривая демонстрирует лишь незначительное снижение массы, составившее всего 3%. Основной вклад в эту потерю массы вносит слабовыраженное испарение гидроксильной воды, доля которой составляет около 1,5%.

По данным дифференциальной термогравиметрии (DTG) интенсивность разложения и дегазации образца остается на низком уровне (таблица 1), что свидетельствует о высокой стабильности модифицированного цеолита в данном температурном диапазоне.

В отличие от термогравиметрических характеристик исследуемых образцов, DTA-кривая модифицированного цеолита в диапазоне температур ~200–680 °С демонстрирует выраженный экзотермический эффект. Его интенсивность настолько высока, что он затеняет прочие термические процессы, происходящие в данном интервале.

Несмотря на это, структура композиции модифицированного адсорбента остается стабильной, не подвергаясь существенным изменениям в ходе нагрева. Данный факт свидетельствует о высокой термической устойчивости материала и его потенциале для применения в условиях высоких температур.

В таблице 2 приведены сравнительные данные текстурных характеристик немодифицированного и модифицированных адсорбентов на основе цеолита с использованием метода Брунера-Эммета-Теллера (БЭТ).

Таблица 1

Термогравиметрические показатели модифицированного композицией оксидов ванадия и титана

Кесте 1

Модификацияланған ванадий және титан оксиді құрамының термогравиметриялық қасиеттері

Table 1

Thermogravimetric indices of vanadium and titanium oxides modified by composite composition

Последовательность потери веса	Летучие компоненты	Количество потери веса, в %	Интервал температур разложения, °С
$\Delta m_1$	$H_2O + CO_{атм}$	7,0	20–200
$\Delta m_2$	$OH + CO_{атм}$	6,5	200–325
$\Delta m_3$	$CO_{орг}$	15,0	325–680
$\Delta m_4$	$H_2O + CO_{орг}$	9,0	680–1000
$\Sigma \Delta m_{1000^\circ C}$		37,5	20–1000

Таблица 2

Текстурные характеристики модифицированного и немодифицированного адсорбентов

Кесте 2

Модификацияланған және модификацияланбаған адсорбенттердің текстуралық сипаттамалары

Table 2

Texture characteristics of modified and unmodified adsorbents

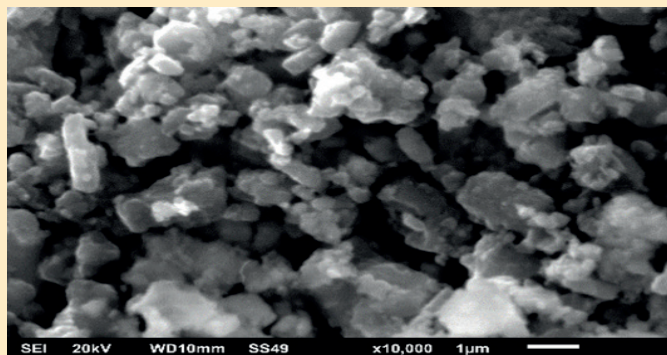
Адсорбенты	Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /г	Удельный объем пор, см <sup>3</sup> /г	Средний размер пор, нм
Сорбент 1 немодифицированный	312,6	0,164	1,713
Сорбент 2 модифицированный ксерогелью $V_2O_5$ (1г/л)	319,0	0,161	1,714
Сорбент 3, модифицированный ксерогелью $V_2O_5$ (5 г/л)	371,2	0,161	1,714
Сорбент 4 модифицированный ксерогелью $TiO_2$	366,2	0,154	1,712
Сорбент 5 модифицированный композицией $TiO_2$ и $V_2O_5$	376,5	0,173	1,714

Согласно данным таблицы 2, модификация цеолита ксерогелем оксида ванадия увеличивает удельную поверхность с 319,0 до 371,2 м<sup>2</sup>/г, а ксерогелем титана (1%) – с 312,6 до 366,2 м<sup>2</sup>/г. При этом удельный объем пор незначительно уменьшается, а средний размер пор остается практически неизменным. Цеолит, обработанный композицией  $TiO_2$  и  $V_2O_5$ , демонстрирует наибольшие значения удельной поверхности и объема пор, что способствует повышению его сорбционной активности.

Поровая структура адсорбента играет важную роль в процессе сорбции тяжелых металлов: их избыточное накопление может блокировать поры, снижая эффективность материала. Для оптимальной очистки воды средний диаметр пор должен быть небольшим, а сорбент – устойчивым к накоплению металлов.

Электронно-микроскопический анализ (рис. 3) выявил сложную многоуровневую структуру модифицированного цеолита, включающую сферические сегменты (20–100 нм), объединенные в кластерные агрегаты. Наночастицы заключены в инертную матрицу из оксида кремния ( $SiO_2$ ). Гибридный сорбент представляет собой смесь аллотропных форм ванадия и титана с  $SiO_2$ , сочетая кристаллическую и аморфную фазы высокой дисперсности, что усиливает его адсорбционные свойства.

На рисунке 4 представлены изотермы адсорбции катионов меди для базового немодифицированного сорбента (сорбент 1) и модифицированных цеолитов (сорбенты 2–5). Из данных графиков видно, что максимальная сорбционная емкость увеличивается при



**Рис. 3. Микрофотография адсорбента на основе цеолита, модифицированного ксерогелью оксида ванадия и титана.**

**Сурет 3. Ванадий титан оксиді ксерогельмен модификацияланған цеолит негізіндегі адсорбенттің микросуреті.**

**Figure 3. Microphotograph of the adsorbent based on zeolite modified with vanadium and titanium oxide xerogel.**

переходе от исходного материала к модифицированным образцам.

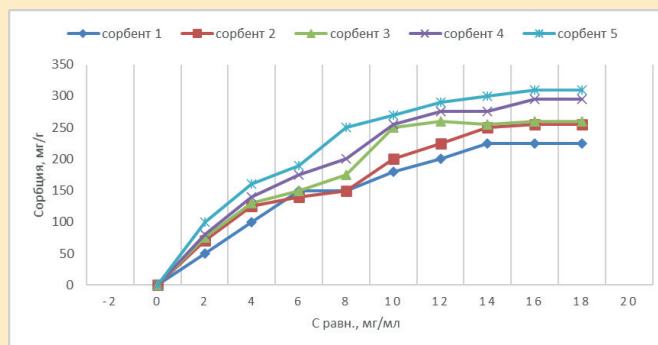
Так, для базового цеолита (сорбент 1) максимальная сорбционная емкость составляет примерно 220 мг/г. В то же время, наибольшее значение (~300 мг/г) наблюдается у цеолита, модифицированного композицией  $TiO_2$  и  $V_2O_5$  (сорбент 5).

Сравнительный анализ сорбционной способности цеолитов, модифицированных наносоединениями ванадия, титана и их гибридной композицией, показывает, что наибольшее количество ионов меди из раствора поглощается сорбентом, содержащим  $TiO_2$  и  $V_2O_5$ . Это связано с увеличением удельной поверхности данного материала по сравнению с образцами, модифицированными только ванадием или титаном (таблица 2). Таким образом, модификация цеолита гибридной композицией  $TiO_2$  и  $V_2O_5$  обеспечивает более высокую сорбционную активность по отношению к катионам меди.

Изотермы сорбции, полученные в результате исследования модельного раствора меди, на различных сорбентах отличаются друг от друга. То есть более высокие данные для процесса сорбции катионов меди из модельного раствора по степени очистки получены на цеолите модифицированного в виде ксерогеля ванадия и титана, а максимальная адсорбция – на модифицированном цеолите в виде гибридной композиции (таблица 3).

Из этих данных следует, что модифицированный цеолит в виде гибридной композиции титана и ванадия практически не снижает сорбционную емкость по отношению к меди (по сравнению с изучаемыми образцами смесей металлов).

Таким образом, на основании полученных экспериментальных данных можно заключить, что разработана серия цеолитосодержащих сорбентов, имеющих кристаллическую структуру, подобную структуре природных цеолитов. Синтезированные адсорбенты, модифицированные гибридной композицией ванадия и титана, могут быть



**Рис. 4. Изотермы адсорбции катионов меди из модельных растворов на сорбентах: 1 – базовый (не модифицированный) цеолит; 2 – модифицированный ксерогелем ванадия (1 г/л); 3 – модифицированный ксерогелем ванадия (5 г/л); 4 – модифицированный диоксидом титана; 5 – модифицированный гибридной композицией ванадия и титана.**

**Сурет 4. Сорбенттердегі модельді ерітінділердің мыс катиондарының адсорбциялық изотермалары: 1 – негізгі (модификацияланбаған) цеолит; 2 – ванадий ксерогельмен модификацияланған (1г/л); 3 – ванадий ксерогельмен модификацияланған (5 г/л); 4 – титан диоксидімен модификацияланған; 5 – ванадий мен титанның гибриді құрамымен модификацияланған.**

**Figure 4. Adsorption isotherms of copper cations from the model solutions on sorbents solutions on sorbents: 1 – basic (not modified) zeolite; 2 – modified with vanadium xerogel (1g/l); 3 – modified with vanadium xerogel (5 g/l); 4 – modified with titanium dioxide; 5 – modified with hybrid composition of vanadium and titanium.**

**Таблица 3**

**Результаты определения сорбции модифицированных образцов по отношению к меди**

**Кесте 3**

**Модификацияланған үлгілердің мысқа қатысты сорбциясын анықтау нәтижелері**

**Table 3**

**Results of sorption of modified samples towards copper**

Сорбенты	1	2	3	4	5
Сорбционная емкость к $Cu$ , мг/г	132	164	200	250	300

эффективны при очистке промышленных вод, содержащих в основном цветные металлы.

**Выводы**

1. Проведен научно-информационный анализ приоритетных направлений очистки промышленных сточных вод от тяжелых цветных металлов с использованием различных природных сорбционных материалов. Для повышения эффективности очистки сточных вод предпочтительно использование модифицированных адсорбентов в комбинации двух или более металлов.

2. В качестве матричной основы для получения образцов адсорбентов использовались цеолитные материалы, подвергнутые модификации синтезированными наноструктурными соединениями титана, ванадия, а также их гибридной композицией.

3. Проведен сравнительный анализ сорбционной способности цеолитов, модифицированных различными наносоединениями. Установлено, что цеолит, обработанный гибридной композицией ванадия и титана, обладает наибольшей эффективностью в удалении ионов меди из растворов по сравнению с образцами, содержащими только ванадий или титан.

4. Обоснована целесообразность применения многоступенчатой очистки воды от тяжелых металлов с использованием цеолита, модифицированного гибридной композицией оксидов ванадия и титана, что повышает эффективность очистных процессов.

#### Благодарность

Статья была подготовлена в рамках зарубежной практики в Москве на базе РТУ МИРЭА. Выражаю благодарность университету за предоставленный ценный опыт и профессиональную поддержку.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Курдюмов В.Р. Извлечение ионов никеля из сточных вод и промышленных растворов (обзор). / В.Р. Курдюмов, Г.И. Мальцев, К.Л. Тимофеев. // Цветные металлы. 2022. Т. 30. № 2. С. 123–143 (на русском языке)
2. Высоцкий С.П. Очистка сточных вод от тяжелых металлов. / С.П. Высоцкий, Д.И. Ермакова, Т.И. Степаненко. // Научный вестник НИИГД «Респиратор». 2017. № 2 (54). С. 69–77 (на русском языке)
3. Беликов М.Л. Эффективные и доступные способы очистки различных вод от фторсодержащих неорганических примесей. / М.Л. Беликов, Э.П. Локшин. // Цветные металлы. 2020. № 3. С. 79–85 (на русском языке)
4. Kuzin E.N. Очистка сточных вод в гальваническом производстве с использованием композиционных коагулянтов-восстановителей. / Kuzin E.N., Averina Yu.M., Kurbatov A.Yu., Sakharov P.A. // Цветные металлы. 2019. № 10. С. 91–96 (на английском языке)
5. Пат. № 2394765, Российская Федерация, МПК С01В39/02. Мезоструктурированные цеолитные материалы, способы их получения и применения. / Гарсиа-Мартинес Жави (ES), Йинг Джеки Й. (US); заявитель и патентообладатель Массачусетс Инститют оф Технолоджи (US) – № 2006141360/15; заявл. 22.04.2005; опубл. 20.07.2010. Бюлл. № 20, 2 с. (на русском языке)
6. Шилина А.С. Сорбция катионов стронция из водных растворов синтетическими цеолитоподобными алюмосиликатами. / А.С. Шилина, А.Г. Шилин, С.Б. Бурухин. // Химия воды и водных растворов. 2019. № 3–6. С. 125–132 (на русском языке)
7. Ghadah M. Al-Senani. Синтез PS/RB-Cs и его использование для очистки воды, загрязненной тяжелыми металлами. / Ghadah M. Al-Senani, Mashael Alshabanat, Nada S. Al-Kadhi и др. // Журнал Саудовского химического общества. 2023. № 27. Ст. № 101693 (на английском языке)
8. Liao L. Получение и характеристика полиалюминийтитанового силиката и его эффективность при очистке воды с низкой мутностью. / Liao L., Zhang P. // Процессы. 2018. № 6 (8). С. 125 (на английском языке)
9. Vishnu Manirethan. Кинетические и термодинамические исследования адсорбции тяжелых металлов из водного раствора нанопигментом меланина, полученным из морского источника: *Pseudomonas stutzeri*. / Vishnu Manirethan, Keyur Raval, Reju Rajan, Harsha Thaira, Raj Mohan Balakrishnan. // Журнал экологического менеджмента. 2018. № 214. С. 315–324 (на английском языке)
10. Качалова Г.С. Коагуляционно-сорбционная очистка сточных вод. // Вода и экология: проблемы и решения. 2019. № 2 (78). С. 32–39 (на русском языке)
11. Vaikonurova A.O. Модификация цеолита синтезированным ксерогелем ванадия. / Vaikonurova A.O., Ussoltseva G.A., Markametova M.S., Nurzhanova S.B. // Журнал Балканской трибологической ассоциации. 2021. № 27 (3). С. 445–456 (на английском языке)
12. Ongarbayev Y. Деметаллизация тяжелого вакуумного гудрона титан-ванадиевыми цеолитными адсорбентами. / Ongarbayev Y., Oteuli Sh., Tileuberdi Y., Maldybaev G., Nurzhanova S. // Studia Universitatis Babeş-Bolyai. Химия. 2020. С. 219–231 (на английском языке)

#### ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Курдюмов В.Р. Никель иондарының сарқынды сулар мен өнеркәсіптік ерітінділерден алынуы (шолу). / Курдюмов В.Р., Мальцев Г.И., Тимофеев К.Л. // Түсті металдар. 2022. Т. 30. № 2. Б. 123–143 (орыс тілінде)
2. Высоцкий С.П. Ауыр металдардан сарқынды суларды тазарту. / С.П. Высоцкий, Д.И. Ермакова, Т.И. Степаненко. // НИИГД «Респиратор» ғылыми журналы. 2017. № 2 (54). Б. 69–77 (орыс тілінде)

3. Беликов М.Л. Әртүрлі суларды фтор құрамындағы бейорганикалық қоспалардан тазартудың тиімді және қолжетімді әдістері. / М.Л. Беликов, Э.П. Локшин. // Түсті металдар. 2020. № 3. Б. 79–85 (орыс тілінде)
4. Kuzin E.N. Гальваникалық өндірісте құрама коагулянт-восстановительдерді қолдана отырып, сарқынды суларды тазарту. / Kuzin E.N., Averina Yu.M., Kurbatov A.Yu., Sakharov P.A. // Түсті металдар. 2019. № 10. Б. 91–96 (ағылшын тілінде)
5. Пат. № 2394765. Ресей Федерациясы, ХПК C01B39/02. Мезоқұрылымды цеолиттік материалдар, оларды алу және қолдану әдістері. / Гарсиа-Мартинес Жави (ES), Йинг Джеки Й. (US); өтініш беруші және патент иесі Массачусетс Инститьют оф Технолоджи (US) – № 2006141360/15; бер. 22.04.2005; шығ. 20.07.2010. Бюлл. № 20, 2 б. (орыс тілінде)
6. Шилина А.С. Синтетикалық цеолит тәрізді алюмосиликаттармен суда еріген стронций катиондарын сорбциялау. / А.С. Шилина, А.Г. Шилин, С.Б. Бурухин. // Судың және су ерітінділерінің химиясы. 2019. № 3–6. Б. 125–132 (орыс тілінде)
7. Ghadah M. Al-Senani. PS/RB-Cs синтезі және оның ауыр металдармен ластанған суды тазарту үшін қолданылуы. / Ghadah M. Al-Senani, Mashaal Alshabanat, Nada S. Al-Kadhi және т.б. // Сауд Арабиясының химия қоғамы журналы. 2023. № 27. Мақ. №101693 (ағылшын тілінде)
8. Liao L. Полиалюминийтитан силикатын дайындау, сипаттау және оның төмен лайлылықтағы суды тазартудағы тиімділігі. / Liao L., Zhang P. // Процестер. 2018. № 6 (8). Б. 125 (ағылшын тілінде)
9. Vishnu Manirethan. Pseudomonas stutzeri теңіз көзінен алынған меланин нанопигментімен суда еріген ауыр металдарды адсорбциялау бойынша кинетикалық және термодинамикалық зерттеулер. / Vishnu Manirethan, Keyur Raval, Reju Rajan, Harsha Thaira, Raj Mohan Balakrishnan. // Қоршаған ортаны басқару журналы. 2018. № 214. Б. 315–324 (ағылшын тілінде)
10. Качалова Г.С. Коагуляция-сорбция әдісімен сарқынды суларды тазарту. // Су және экология: мәселелер мен шешімдер. 2019. № 2 (78). Б. 32–39 (орыс тілінде)
11. Ваиконурова А.О. Ванадий ксерогелімен модификацияланған цеолит. / Ваиконурова А.О., Уссолтсева Г.А., Маркаметова М.С., Нуржанова С.В. // Балқан трибология қауымдастығы журналы. 2021. № 27 (3). Б. 445–456 (ағылшын тілінде)
12. Ongarbayev Y. Ауыр вакуумды гудронды титан-ванадий цеолит адсорбенттерімен деметаллизациялау. / Ongarbayev Y., Oteuli Sh., Tileuberdi Y., Maldybaev G., Nurzhanova S. // Studia Universitatis Babes-Bolyai, Chemistry. 2020. Б. 219–231 (ағылшын тілінде)

## REFERENCES

1. Kurdyumov V.R. Izvlechenie ionov nikelya iz stochnykh vod i promyshlennykh rastvorov (obzor). / V.R. Kurdyumov, G.I. Mal'tsev, K.L. Timofeev. // Tsvetnye metally. 2022. T. 30. № 2. S. 123–143 [Kurdyumov V.R. Extraction of nickel ions from wastewater and industrial solutions (review). / Kurdyumov V.R., Maltsev G.I., Timofeev K.L. // Non-ferrous Metals. 2022. V. 30. № 2. P. 123–143] (in Russian)
2. Vysotskii S.P. Ochistka stochnykh vod ot tyazhelykh metallov. / S.P. Vysotskii, D.I. Ermakova, T.I. Stepanenko. // Nauchnyi vestnik NIIGD «Respirator». 2017. № 2 (54). S. 69–77 [Vysotsky S.P. Wastewater treatment from heavy metals. / Vysotsky S.P., Ermakova D.I., Stepanenko T.I. // Scientific Bulletin of NIIGD «Respirator». 2017. № 2 (54). P. 69–77] (in Russian)
3. Belikov M.L. Effektivnyye i dostupnyye sposoby ochistki razlichnykh vod ot ftorsoderzhashchikh neorganicheskikh primesei. / M.L. Belikov, E.P. Lokshin. // Tsvetnye metally. 2020. № 3. S. 79–85 [Belikov M.L. Effective and affordable methods for cleaning various waters from fluoride-containing inorganic impurities. / Belikov M.L., Lokshin E.P. // Non-ferrous Metals. 2020. № 3. P. 79–85] (in Russian)
4. Kuzin E.N. Treatment of wastewater in the electroplating industry using composite coagulants-reducers. / Kuzin E.N., Averina Yu.M., Kurbatov A.Yu., Sakharov P.A. // Non-ferrous Metals. 2019. № 10. P. 91–96 (in English)
5. Pat. № 2394765, Rossiiskaya Federatsiya, MPK S01V39/02. Mezostrukturirovannye tseolitnye materialy, sposoby ikh polucheniya i primeneniya. / Garsia-Martines Zhavi (ES), Ing Dzheki I. (US); zayavitel' i patentoobladatel' Massachusetts Instit'yut of Tekhnolodzhi (US) – № 2006141360/15; zayavl. 22.04.2005; opubl. 20.07.2010. Byull. № 20, 2 s. [Patent № 2394765, Russian Federation, IPC C01B39/02. Mesoporous zeolite materials, methods of obtaining and application. / Garcia-Martinez Javi (ES), Ying Jackie Y. (US) applicant and patent holder Massachusetts Institute of Technology (US) – № 2006141360/15; appl. 22.04.2005; publ. 20.07.2010. Bull. № 20, 2 p.] (in Russian)
6. Shilina A.S. Sorbtsiya kationov strontsiya iz vodnykh rastvorov sinteticheskimi tseolitopodobnymi alyumosilikatami. / A.S. Shilina, A.G. Shilin, S.B. Burukhin. // Khimiya vody i vodnykh rastvorov. 2019.

- № 3–6. S. 125–132 [Shilina A.S. Sorption of strontium cations from aqueous solutions by synthetic zeolite-like aluminosilicates. / Shilina A.S., Shilin A.G., Burukhin S.B. // *Chemistry of Water and Aqueous Solutions*. 2019. № 3–6. P. 125–132] (in Russian)
7. Ghadah M. Al-Senani. Synthesis of PS/RB-Cs and its use in the treatment of water polluted with heavy metals. / Ghadah M. Al-Senani, Mashaal Alshabanat, Nada S. Al-Kadhi et al. // *Journal of the Saudi Chemical Society*. 2023. № 27. Art. № 101693 (in English)
  8. Liao L. Preparation and characterization of polyaluminum titanium silicate and its performance in the treatment of low-turbidity water. / Liao L., Zhang P. // *Processes*. 2018. № 6 (8). P. 125 (in English)
  9. Vishnu Manirethan. Kinetic and thermodynamic studies on the adsorption of heavy metals from aqueous solution by melanin nanopigment obtained from marine source: *Pseudomonas stutzeri*. / Vishnu Manirethan, Keyur Raval, Reju Rajan, Harsha Thaira, Raj Mohan Balakrishnan. // *Journal of Environmental Management*. 2018. № 214. P. 315–324 (in English)
  10. Kachalova G.S. Koagulyatsionno-sorbtsionnaya ochistka stochnykh vod. // *Voda i ekologiya: problemy i resheniya*. 2019. № 2 (78). S. 32–39 [Kachalova G.S. Coagulation-sorption wastewater treatment. // *Water and Ecology: Problems and Solutions*. 2019. № 2 (78). P. 32–39] (in Russian)
  11. Baikonurova A.O. Zeolite modification by synthesized vanadium xerogel. / Baikonurova A.O., Ussoltseva G.A., Markametova M.S., Nurzhanova S.B. // *Journal of the Balkan Tribological Association*. 2021. № 27 (3). P. 445–456 (in English)
  12. Ongarbayev Y. Demetallization of heavy vacuum residuum by titanium-vanadium zeolite adsorbents. / Ongarbayev Y., Oteuli Sh., Tileuberdi Y., Maldybaev G., Nurzhanova S. // *Studia Universitatis Babeş-Bolyai, Chemistry*. 2020. P. 219–231 (in English)

#### Сведения об авторах:

**Коньратбекова С.С.**, к.т.н, сениор-лектор кафедры «Металлургия и обогащение полезных ископаемых», Горно-металлургический институт, Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), [s.konyratbekova@satbayev.university](mailto:s.konyratbekova@satbayev.university); <https://orcid.org/0000-0003-2148-035X>

**Шопанбек Ж.**, докторант кафедры «Металлургия и обогащение полезных ископаемых», Горно-металлургический институт, Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), [shopanbek@mail.ru](mailto:shopanbek@mail.ru); <https://orcid.org/0009-0008-6845-7185>

**Нуржанова С.Б.**, к.х.н., старший научный сотрудник, АО «Институт топлива, катализа и электрохимии им. Д.В. Сокольского» (г. Алматы, Казахстан), [nurzhanova.s@mail.ru](mailto:nurzhanova.s@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0001-7343-2793>

**Семенов С.А.**, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет» (г. Москва, Россия), [srg.semenov@gmail.com](mailto:srg.semenov@gmail.com); <https://orcid.org/0000-0003-3496-058X>

#### Авторлар туралы мәліметтер:

**Коньратбекова С.С.**, т.ғ.к., «Металлургия және пайдалы қазбаларды байыту» кафедрасының сениор-лекторы, Тау-кен металлургия институты, Сәтбаев Университеті (Алматы қ., Қазақстан)

**Шопанбек Ж.**, «Металлургия және пайдалы қазбаларды байыту» кафедрасының докторанты, Тау-кен металлургия институты, Сәтбаев Университеті (Алматы қ., Қазақстан)

**Нуржанова С.Б.**, х.ғ.к., аға ғылыми қызметкер, «Д.В. Сокольский атындағы жанармай, катализ және электрохимия институты» АҚ (Алматы қ., Қазақстан)

**Семенов С.А.**, профессор, «МИРЭА – Ресей технологиялық университеті» федералды мемлекеттік бюджеттік жоғары оқу орны (Мәскеу қ., Ресей)

#### Information about the authors:

**Konyratbekova S.S.**, candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of the department «Metallurgy and mineral processing», Mining and Metallurgical Institute, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

**Shopanbek Zh.**, doctoral student of the department «Metallurgy and mineral processing», Mining and Metallurgical Institute, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

**Nurzhanova S.B.**, candidate of Chemical Sciences, Senior Researcher, JSC Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry named after D.V. Sokolsky (Almaty, Kazakhstan)

**Semenov S.A.**, Professor, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «MIREA – Russian Technological University» (Moscow, Russia)