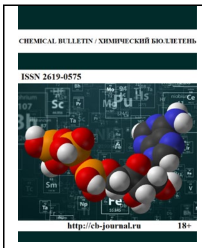

Научно-исследовательский журнал ***«Chemical Bulletin»***
https://cb-journal.ru
2024, Том 7, № 2 / 2024, Vol. 7, Iss. 2 *https://cb-journal.ru/archives/category/publications*
Научная статья / Original article
УДК 544.723.212
DOI: 10.58224/2619-0575-2024-7-2-26-42

Исследование сорбционных свойств диоксида кремния на основе вскрышных пород для извлечения красителей из сточных вод

[1] Турянский В.А.,
[1] Севастопольский государственный университет,
** Ответственный автор E-mail: morsavinv@bk.ru*

Аннотация: *статья представляет результаты исследования сорбционных свойств диоксида кремния, полученного из вскрышных пород, для применения при удалении метиленового синего – органического катионового тизианового красителя – из водных растворов. Целью исследования было оценить сорбционные свойства диоксида кремния и его эффективность при извлечении метиленового синего из водных растворов. Экспериментальные данные показали, что эффективность сорбции зависит от температуры, рН и скорости перемешивания. Установлено, что повышение рН и скорости перемешивания способствует увеличению сорбции, в то время как повышение температуры снижает эффективность сорбции. Кроме того, исследована возможность регенерации диоксида кремния после сорбции и показано, что его сорбционные свойства практически не изменяются после нескольких циклов использования. Максимальная сорбционная емкость составила 515,9 мкмоль/г. В ранее опубликованной статье при стандартных условиях максимум сорбционной емкости составил 438,22 мкмоль/г. Полученные результаты подчеркивают потенциал диоксида кремния как эффективного и устойчивого сорбента для удаления органических красителей из сточных вод. Таким образом, диоксид кремния может быть рекомендован для многократного использования в процессах очистки сточных вод благодаря его высокой термической стабильности и долговечности.*

Ключевые слова: *диоксид кремния, карьерные отвалы, субмикронный порошок, агломерат*

Для цитирования: Турянский В.А. Исследование сорбционных свойств диоксида кремния на основе вскрышных пород для извлечения красителей из сточных вод // Chemical Bulletin. 2024. Том 7. № 2. С. 26 – 42. DOI: 10.58224/2619-0575-2024-7-2-26-42

Поступила в редакцию: 16 марта 2024 г.; Одобрена после рецензирования: 14 мая 2024 г.; Принята к публикации: 20 июня 2024 г.

Study of sorption properties of silicon dioxide based on overburden rocks for the extraction of dyes from wastewaters

[1] Turyanskiy V.A.,
[1] Sevastopol State University,
** Corresponding author E-mail: morsavinv@bk.ru*

Abstract: *the article presents the results of a study of the sorption properties of silicon dioxide obtained from overburden rocks for use in the removal of methylene blue, an organic cationic thizian dye, from aqueous solutions. The aim of the study was to evaluate the sorption properties of silica and its efficiency in the removal of methylene blue from aqueous solutions. Experimental data showed that the sorption efficiency depends on temperature, pH and stirring speed. It was found that increasing pH and stirring speed promotes sorption enhancement, while increasing temperature decreases sorption efficiency. In addition, the possibility of regeneration of silica after sorption was investigated and it was shown that its sorption properties are practically unchanged after several cycles of use. The maximum sorption capacity was 515.9 μmol/g. In a previously published paper, under standard conditions, the maximum sorption capacity was 438.22 μmol/g. The results emphasize the potential of silica as an effective and sustainable sorbent for the removal of organic dyes from wastewater. Thus, silica can be recommended for multiple use in wastewater treatment processes due to its high thermal stability and durability.*

Keywords: *silica, quarry dumps, submicron powder, agglomerate*

For citation: Turyanskiy V.A. Study of sorption properties of silicon dioxide based on overburden rocks for the extraction of dyes from wastewaters. Chemical Bulletin. 2024. 7 (2). P. 26 – 42. DOI: 10.58224/2619-0575-2024-7-2-26-42

The article was submitted: March 16, 2023; Approved after reviewing: May 14, 2024; Accepted for publication: June 20, 2024.

Введение

Сегодня красители используются практически везде. Они представляют собой химические вещества, который применяются для придания цвета различным материалам, таким как текстиль, бумага, пластик, кожа и многие другие. Красители можно условно разделить на несколько основных типов: кислотные, основные, дисперсные, прямые, реактивные и т.д. [7, с. 181; 11, 16]. Каждый тип обладает различными химическими свойствами и способами применения. Например, кислотные красители применяются для окрашивания шерсти и не подходят для хлопчатобумажных тканей, тогда как дисперсные подходя для искусственных и синтетических волокон. Некоторые из них могут использоваться в качестве ингибиторов коррозии [1, с. 163; 18, 20].

Красители находят широкое применение в текстильной, кожевенной, бумажной и пищевой промышленностях, а также в производстве косметики и фармацевтических препаратов [8, с. 122]. Процессы окрашивания и отделки материалов зачастую сопровождаются образованием значительных объемов сточных вод, содержащих примеси красителей. Такие сточные воды образуются в результате промывки, окрашивания, фиксирования цвета и отделки материалов текстильной и кожевенной промышленности [3, с. 75].

Концентрации красителей в сточных водах могут значительно варьироваться в зависимости от типа производства и используемых технологий. Концентрация красителей в сточных водах может достигать до нескольких сотен миллиграммов на литр, а суточные объемы сточных вод крупных предприятий могут исчисляться тысячами кубометров. Такие стоки обладают высокой температурой, цветностью, pH, содержат значительное количество взвешенных веществ, ХПК и БПК [4, с. 248].

Попадание красителей в водные среды представляет серьезную опасность. Многие красители обладают высокой стойкостью к биологическому разложению, что затрудняет их естественную деградацию в окружающей среде [6, с. 86; 12, 13]. Кроме того, многие красители являются токсичными для водных организмов и могут вызывать мутагенные и канцерогенные эффекты. Загрязнение водоемов красителями приводит к нарушению экосистем, их способности к самоочищению, ухудшению качества воды и негативному влиянию на здоровье человека [5, с. 21; 17].

В связи с этим, важной задачей является разработка эффективных методов очистки сточных вод от красителей. Для очистки сточных вод как от красителей, так и от пигментов, могут применяться различные химические, физические и биологические методы [2, с. 56; 15]. Одним из перспективных методов является использование сорбционных материалов способных эффективно удалять красители из водных растворов [10, с. 38; 19]. Например, диоксида кремния, полученного из вскрышных пород. В данной работе представлены результаты исследования сорбционных свойств диоксида кремния на основе вскрышных пород и его эффективности при извлечении метиленового синего. В предыдущей работе была исследована кинетика сорбции полученного диоксида кремния в нормальных условиях [9, с. 108; 14, 18].

Материалы и методы исследований

Использованный в данной работе сорбент был получен на основе сырья из карьерных отвалов Псилерахского месторождения. Элементный состав пробы проводился на аналитическом комплексе на базе вакуумного рентгенофлуоресцентного кристалл-дифракционного сканирующего спектрометра ООО «НПО «СПЕКТРОН» Россия. Состав проб представлен в табл. 1.

Таблица 1

Состав исходной пробы.

Table 1

Composition of the original sample.

Аналит	Единица измерения	Значение	Аналит	Единица измерения	Значение
MgO	%	1,953	MnO	мг/кг	1344,814
Al_2O_3	%	3,775	V	мг/кг	140,637
SiO_2	%	52,286	Co	мг/кг	18,891
P_2O_5	%	0,081	Ni	мг/кг	73,858
K_2O	%	2,852	Cu	мг/кг	58,984
CaO	%	6,972	Zn	мг/кг	134,052
TiO_2	%	0,800	As	мг/кг	2,347
Fe_2O_3	%	3,069	Sr	мг/кг	231,693

Технология получения порошка диоксида кремния из карьерных отвалов включает нескольких основных этапов (рис. 1).

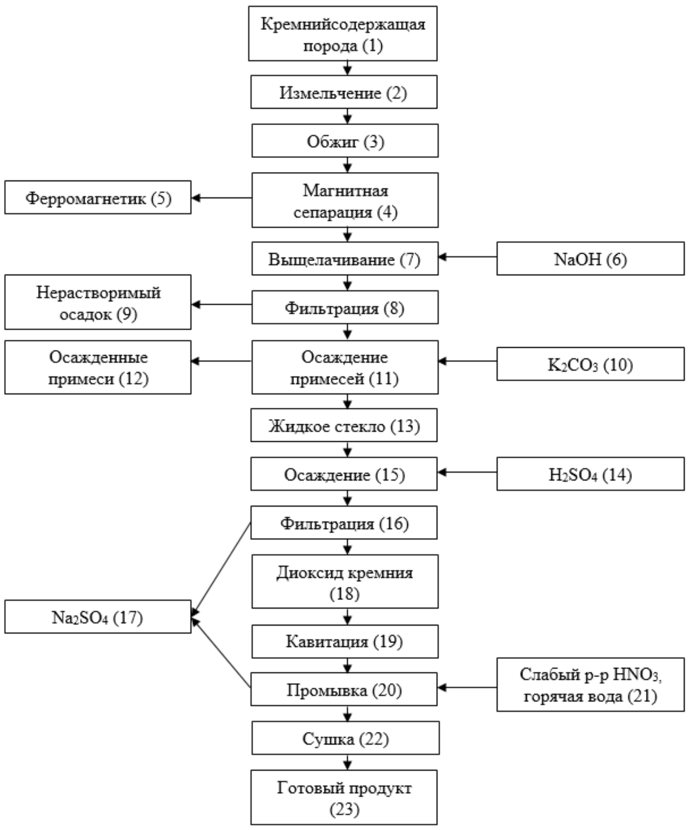

Рис. 1. Основные этапы производства диоксида кремния из карьерных отвалов.

Fig. 1. The main stages of the production of silicon dioxide from quarry dumps.

В предыдущих исследованиях был использован этот же диоксид кремния для оценки сорбционных свойств диоксида кремния в стандартных условиях [9].

Размер частиц полученного диоксида кремния определялся на сканирующем электронном микроскопе PHENOM proX фирмы: Phenom-World B.V. (Нидерланды) с интегрированной системой энергодисперсионного анализа. Максимальное увеличение 150000, разрешение 10 нм, ускоряющее напряжение 5, 10, 15 кВ.

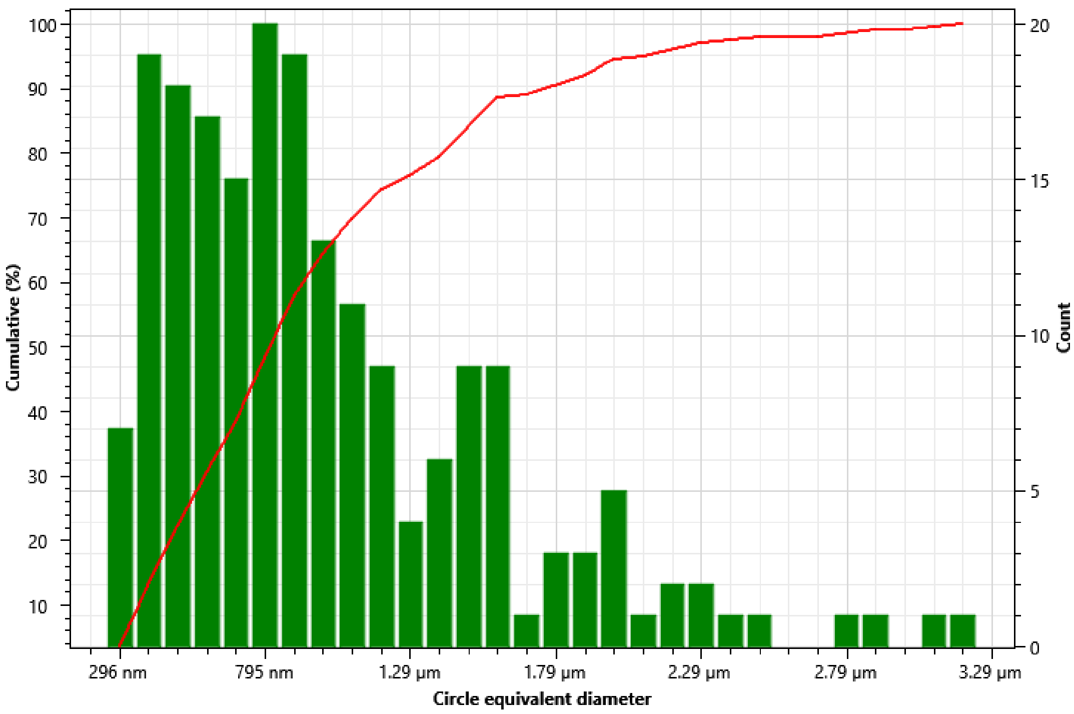

Рис. 2. Распределение частиц порошка SiO_2 по размерам.

Fig. 2. Size distribution of SiO_2 powder particles.

Элементный анализ исследуемых порошков получен с применением программы Element Identification компании Phenom, позволяющей использовать электронный микроскоп Phenom ProX для анализа образцов методом энергодисперсионного спектроскопии (рис. 3).

На представленном рисунке видны характерные для кремния и кислорода пики. Пиков, характерных другим элементам не наблюдается, что свидетельствует об отсутствии примесей.

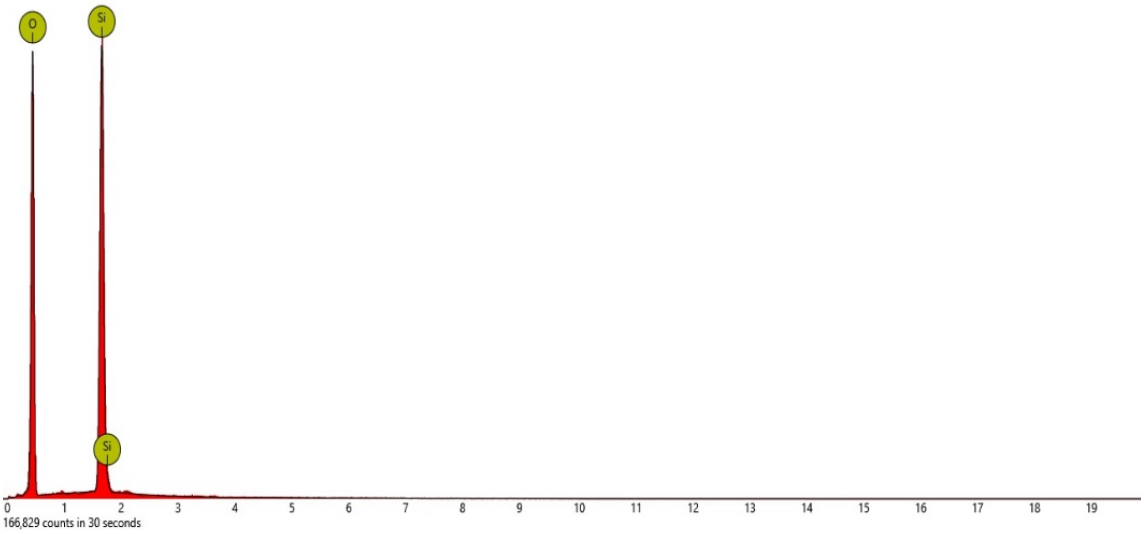

Рис. 3. Элементный анализ диоксида кремния.

Fig. 3. Elemental analysis of silicon dioxide.

Для анализа размера, формы и морфологии частиц использовали программное обеспечение Particle Metric, позволяющее анализировать изображения частиц (рис. 4).

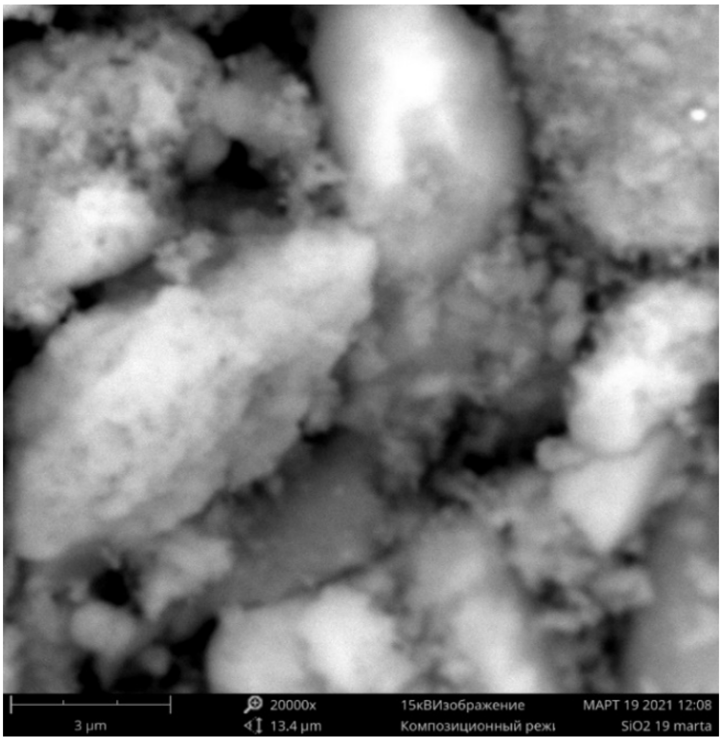

Рис. 4. Изображение частиц используемого диоксида кремния.

Fig. 4. Image of the silica particles used.

Насыпная плотность диоксида кремния определялась согласно ГОСТ 8735-88 (табл. 2).

Таблица 2

Определение насыпной плотности диоксида кремния.

Table 2

Determination of bulk density of silicon dioxide.

Масса образца с емкостью, г	Масса емкости, г	Масса образца, г	Объем емкости, $см^3$	Насыпная плотность, $г/см^3$	Средняя, $кг/м^3$
44, 85	25,44	7,612	40	0,1903	191,1
44,96		7,655		0,1914	
45,01		7,662		0,1916	

Дифракционная картина рассеяния рентгеновского излучения в широких углах на кристаллических полимерных объектах определяется наличием в них в первом приближении двух фаз, кристаллической и аморфной, что проявляется на рентгенограмме в виде суперпозиции дискретных рефлексов и аморфного гало.

Для определения степени аморфности использовался рентгенодифракционный анализ поликристаллических веществ (рис. 5). Дифрактограмма представлена одним пиком. Наблюдается ярко выраженное аморфное гало 4,013 Å при угле Брэгга 21-22 °.

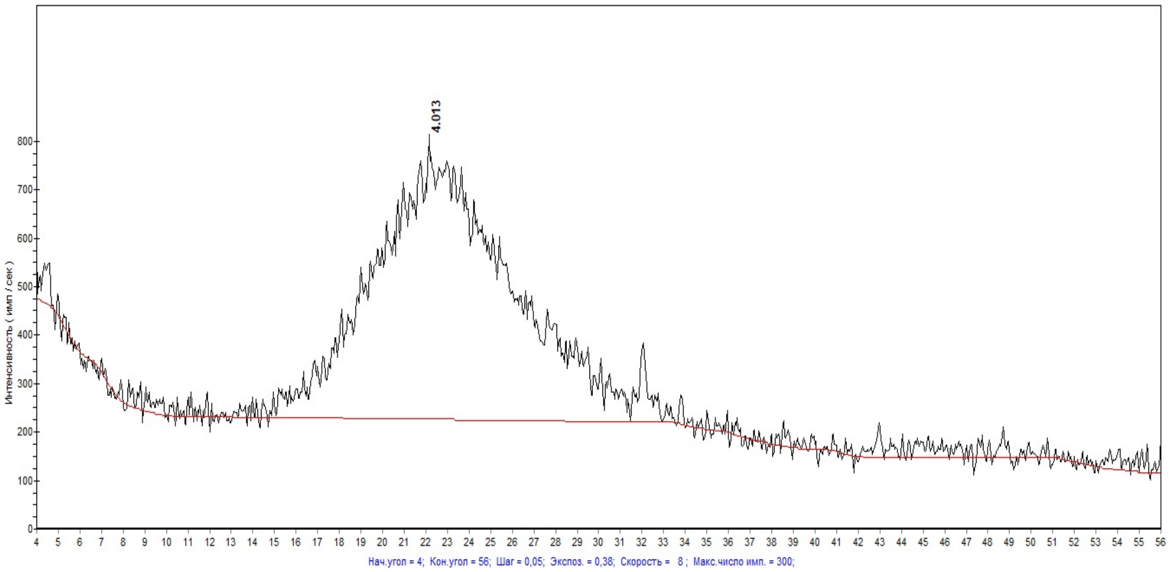

Рис. 5. Дифрактограмма используемого сорбента.

Fig. 5. Diffraction pattern of the sorbent used.

Имеющаяся в картотеке дифрактограмма поликристаллического диоксида кремния имеет иной вид (рис. 6).

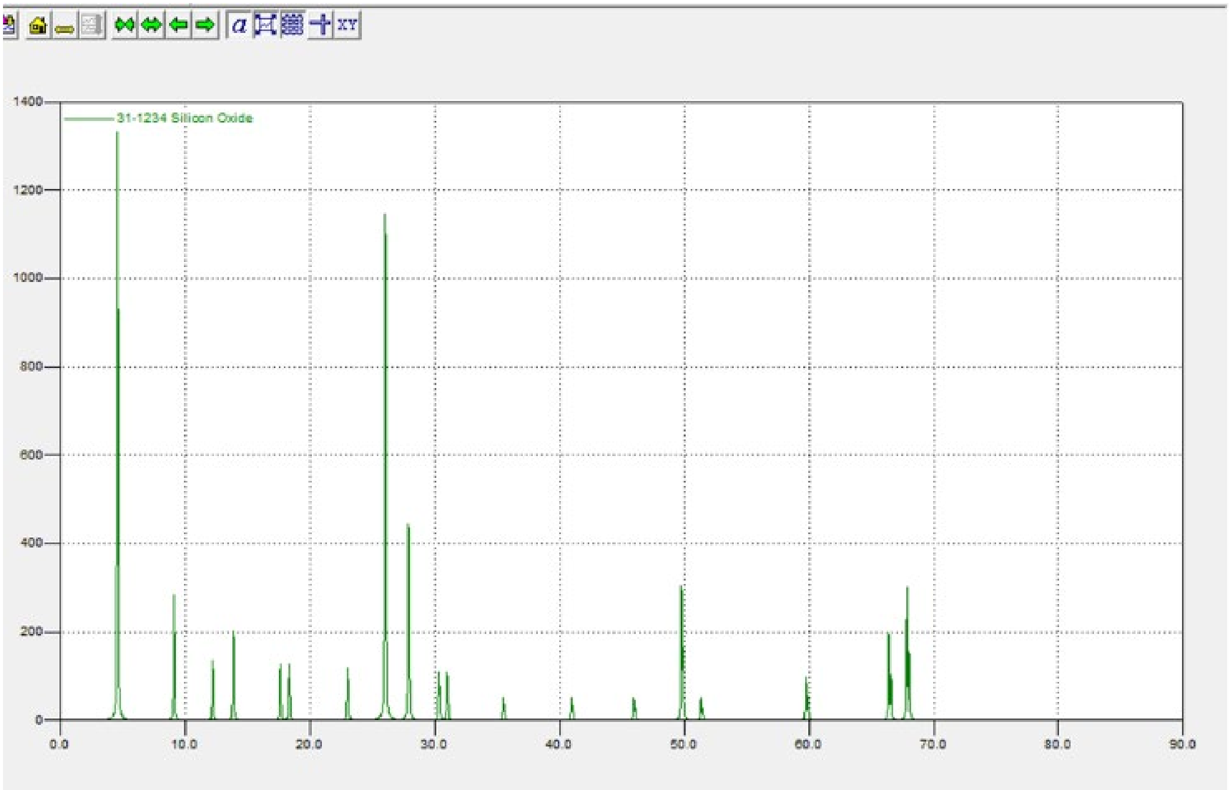

Рис. 6. Дифрактограмма поликристаллического диоксида кремния из картотеки.

Fig. 6. Diffraction pattern of polycrystalline silicon dioxide from a card file.

В работе использовались следующие реактивы:

• Метиленовый синий (C16H18ClN3S), чда

• Вода дистиллированная, ГОСТ 6709-72

• Серная кислота (H2SO4) 95%, ГОСТ 4204-77

• Натр едкий (NaOH) ТР 98,5%, ГОСТ Р 55064-2012

• Диоксид кремния (SiO2), состав в табл. 2.

В работе использовались следующее оборудование:

• Магнитная мешалка Таглер ММ 135

• Весы лабораторные «

• Фотометр «Эксперт – 003»

• Центрифуга «СМ12»

• Электрическая плитка «

• Экстрактор «US-8000E»

• pH-метре-иономере «Эксперт-001-3»

• Муфельная печь «МП-2700»

• Сушильный шкаф

• Таймер

Для начала работы был создан градуировочный график зависимости концентраций МС от оптической плотности Фотометра «Эксперт – 003». Использованные концентрации находились в пределах измерений фотометра и равнялись: 3,13; 7,81; 15,64; 28,15; 46,9 мкмоль/дм3, что соответствует 1; 2,5; 5; 9; 15 мг/дм3. По полученным данным был получен градуировочный график (рис. 7).

Рис. 7. Градуировочный график МС.

Fig. 7. MS calibration graph.

Влияние температуры на кинетику сорбции МС

Одним из факторов, существенно влияющим на большинство химических процессов является температура. Для изучения влияния температуры на процесс сорбции МС, мы использовали электрическую плитку. В опыте изучалось влияние 25; 30; 35; 40 °С. Для данного эксперимента использовался раствор МС концентрацией 938 мкмоль/дм^3. Раствор размещали на электрической плитке с установленной температурой и выдерживался до достижения соответствующей температуры. Температура раствора определялась градусником со шкалой до 150°С с ценой деления в 2°С. Масса навески составляла 0,2 г. После нагрева раствора до необходимой температуры, в колбы всыпалась навеска сорбента, устанавливался экстрактор для перемешивания раствора. Скорость вращения экстрактора составила 700 rpm. Время контакта с сорбентом для всех проб составляло 30 мин, так как максимальная эффективность сорбции в предыдущих экспериментах достигалась к 30 минутам.

Влияние pH на эффективность сорбции МС

pH является важным фактором при очистке сточных вод. Поступающие сточные воды могут быть как щелочной среды, так и кислой.

При проведении анализа влияния pH среды на эффективность сорбции был приготовлен раствор МС концентрацией 938 мкмоль/дм3. В эксперименте рассматривались pH растворов, равные: 3,5; 4,5; 5,5; 6,5; 7,5; 8,5; 9,5; 10,5; 11. Для начала проводился замер pH приготовленного ранее раствора МС. Полученные значения находились в пределах 7,5. Для снижения pH использовалась H2SO4 0,1%. Для повышения pH использовался 0,01 н NaOH. В установленные на магнитные мешалки колбы с растворами помещались стеклянные электроды. Далее по каплям добавлялся раствор каустической соды или серной кислоты. Значения постоянно фиксировались и при достижении необходимого pH, раствор изымался. В раствор вносилась навеска диоксида кремния массой 0,2 г, после чего колба с раствором устанавливалась на магнитную мешалку. Время взаимодействия сорбента и МС в каждом опыте составляло 30 минут.

Анализ зависимости сорбционной способности от скорости перемешивания

Также в ходе эксперимента был проведен анализ влияния скорости перемешивания на эффективность сорбции. Для данной серии опытов был приготовлен раствор МС концентрацией 938 мкмоль/дм^3. Навеска сорбента равнялась 0,2 г. Время сорбции составляло 30 минут. Скорости перемешивания для опытов составляли 550, 700, 850, 1000, 1150, 1300 rpm. Выбранные параметры обоснованы техническими характеристиками используемых магнитных мешалок. Также был проведен опыт сорбции без перемешивания.

Оценка возможности регенерации сорбента

Одно из огромных преимуществ диоксида кремния перед многими другими сорбентами – простота его регенерации. Использованный по назначению SiO_2 необходимо термически обработать при температуре 600°С. При этом все красители выгорают с образованием углекислого газа и воды. Однако встает вопрос возможности снижения эффективности сорбции при неоднократном его использовании. Для этого была проведена серия опытов, направленная на оценку эффективности 1-го, 2-го и 3-го цикла использования диоксида кремния.

Для начала был приготовлен раствор МС концентрацией 938 мкмоль/дм^3. Масса навески составила 0,2 г. Сорбция длилась 30 минут. После весь раствор был отцентрифугирован, а осадок отправлен на сушку при 110°С в течении 3 часов. Следующим этапом сорбент взвешивался и отправлялся в муфельную печь для температурной обработки при 600°С в течении 1 часа. Для второго и третьего цикла действия повторялись для уже регенерировавшего сорбента.

Кроме того, было проанализировано изменение массы диоксида кремния до сорбции, после сорбции и после регенерации для каждого цикла. Для этого был приготовлен раствор МС концентрацией 938 мкмоль/дм^3. В колбу с раствором добавлялся 1 г SiO_2. Раствор помещался на магнитную мешалку на 30 мин. Центрифугирование происходило в течении получаса. Осажденный сорбент собирался в фарфоровый тигель и сушился в сушильной камере при температуре 110°С в течении 3 часов. После чего взвешивался. Далее происходил его обжиг в муфельной печи и взвешивание, после чего цикл повторялся.

Результаты и обсуждения

Влияние температуры на кинетику сорбции МС

Полученные данные (Рис.8) свидетельствуют о снижении максимальной сорбционной емкости с повышением температуры во временном промежутке 30 минут. При температуре 20 °С сорбционная емкость 1 г SiO_2 на 30 минуте составляет 437 мкмоль/г. Повышение температуры на 5°С при остальных равных условиях, снижает сорбционную емкость до 419 мкмоль/г то есть на 4,2%. Повышение температуры до 30°С снижает сорбционную емкость 7,1% в сравнении с комнатной температурой. Повышение еще на 5°С снижает сорбционную емкость на 12,1%, а повышение до 40°С снижает сорбционную емкость на 22,8%. Так как процесс физической сорбции – экзотермический, повышение температуры сдвигает равновесие в сторону десорбции, согласно принципу Ле Шателье. Это приводит к уменьшению количества сорбированного вещества на сорбенте при повышенных температурах. Кроме того, снижение эффективности сорбции может быть связана с повышение кинетической энергии молекул метиленового синего, в результате чего увеличивается их подвижность.

2024, Том 7, №2 / 2024, Vol. 7, Iss. 2
https://cb-journal.ru/

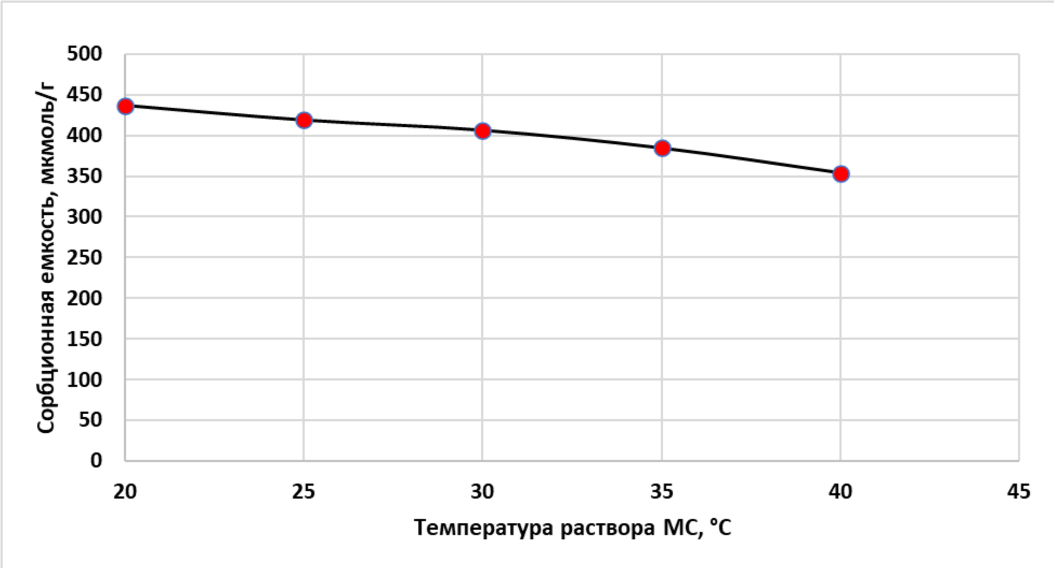

Рис. 8. Зависимость сорбционной способности диоксида кремния от температуры среды.

Fig. 8. Dependence of the sorption capacity of silicon dioxide on the temperature of the environment.

Влияние pH на эффективность сорбции МС

Значения сорбции при разных pH (рис. 9) позволяют наблюдать тенденцию к снижению сорбционной способности при снижении pH ниже 7,5. При pH от 7,5 до 9,5 наблюдается плато с едва заметным повышением сорбционной емкости при росте pH. pH от 9 и выше вызывает резкий скачок сорбционной емкости диоксида кремния. Максимум сорбции наблюдается при pH 11 и составляет 515,9 мкмоль/г, повышая это значение на 18,7% в сравнении с нормальными условиями. Поверхность диоксида кремния содержит силанольные группы (Si-OH). В кислой среде (низкий pH) эти группы могут протонироваться, превращаясь в $Si\text{-}OH_2^+$. Так как при низких значениях pH поверхность диоксида кремния может быть протонирована, это приводит к положительному заряду на поверхности. Метиленовый синий, являясь катионным красителем, будет испытывать электростатическое отталкивание от положительно заряженной поверхности, что снижает эффективность сорбции. При нейтральных значениях pH, поверхность диоксида кремния становится менее протонированной и может иметь слабый отрицательный заряд или быть нейтральной, что улучшает сорбцию катионного метиленового синего за счет благоприятных электростатических взаимодействий. При pH 9,5 и выше поверхность диоксида кремния становится более депротонированной, что приводит к увеличению отрицательного заряда на поверхности. Это способствует более сильному электростатическому притяжению катионного метиленового синего, что увеличивает эффективность сорбции.

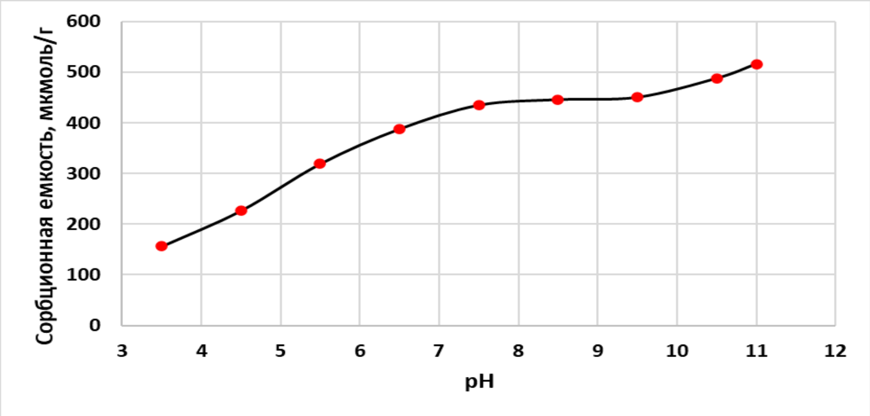

Рис. 9. Зависимость сорбционной способности диоксида кремния от pH среды.

Fig. 9. Dependence of the sorption capacity of silicon dioxide on the pH of the environment.

Анализ зависимости сорбционной способности от скорости перемешивания

Полученный график влияния скорости перемешивания на сорбцию (Рис. 10) подтверждает повышение эффективности сорбции с увеличением скорости перемешивания. Использование скорости в 550 rpm повышает эффективность сорбции в сравнении со статичным режимом (без перемешивания) на 36,3%. Скорость перемешивания в 700 rpm повышает эффективность на 38,7%. При этом использование скорости выше 700 rpm повышает эффективность незначительно, что делает их использование нецелесообразным. На начальных стадиях увеличения скорости перемешивания происходит улучшение массового переноса метиленового синего к поверхности диоксида кремния. Это связано с уменьшением толщины диффузионного слоя вокруг частиц сорбента и увеличением количества столкновений между молекулами красителя и активными центрами сорбента. Кроме того, более высокая скорость перемешивания способствует лучшему и более равномерному распределению частиц сорбента в растворе, что увеличивает доступность активных сорбционных центров для молекул красителя.

При высоких скоростях перемешивания кинетика сорбции может стать лимитирующим фактором. То есть процесс переноса красителя с поверхности сорбента в его поры и дальнейшее взаимодействие с активными центрами сорбента могут происходить с максимальной возможной скоростью, и дальнейшее увеличение перемешивания уже не повышает эффективность сорбции.

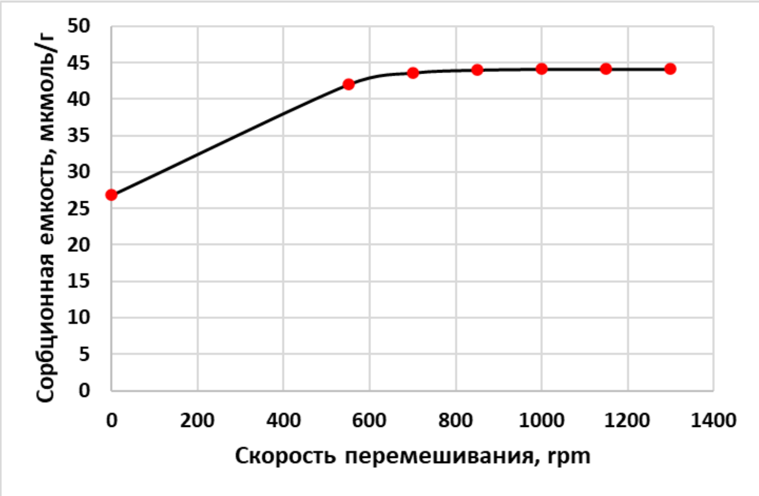

Рис. 10. Зависимость эффективности сорбции от скорости перемешивания.

Fig. 10. Dependence of sorption efficiency on mixing speed.

Оценка возможности регенерации сорбента

На графике (рис. 11) мы можем наблюдать три кривых, которые практически совпадают. Максимум отклонения при этом составляет 5,6%. Таким образом, можно сделать вывод что обжиг при 600°C не вызывает значительных изменений в структуре и свойствах диоксида кремния. Это говорит о высокой термической стабильности материала, что позволяет ему сохранять свои сорбционные свойства после многократного использования и регенерации. Кроме того, данной температуры достаточно для полного освобождения активных центров от сорбированного МС. Поскольку данные кинетики остаются стабильными, можно заключить, что сорбционные характеристики материала остаются постоянными, и эффективность сорбции не снижается с каждым циклом. Это делает диоксид кремния перспективным материалом для многократного использования в процессах сорбции.

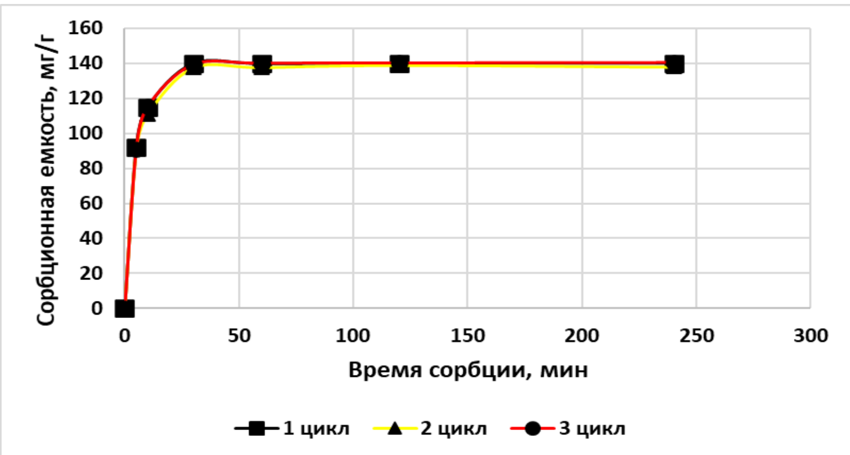

Рис. 11. Повторное использование диоксида кремния после регенерации.

Fig. 11. Reuse of silicon dioxide after regeneration.

Анализ массы диоксида кремния до сорбции, после сорбции, после обжига в течении 3-х циклов

Анализ значений массы диоксида кремния до после сорбции и после обжига представлен в таблице (табл. 3). Данные таблицы указывают на повышение массы после сорбции, что связано с сорбированием МС на поверхности диоксида кремния. После регенерации масса сорбента становилась практически равна массе до начала сорбции, что говорит о полном разложении красителя во время регенерации и восстановлением диоксида кремния до прежнего состояния. Небольшие отклонения по массам до сорбции и после регенерации связаны с потерями в ходе центрифугирования и взвешивания.

Таблица 3

Изменение массы сорбента в ходе 3-х циклов.

Table 3

Change in sorbent mass during 3 cycles.

№ Цикла	Масса навески до сорбции, г	Масса сорбента после сорбции, г	Масса сорбента после регенерации, г
1	1	1,138	0,997
2	0,997	1,136	0,993
3	0,993	1,130	0,987

Выводы

Диоксид кремния, полученный из вскрышных пород, обладает значительной сорбционной способностью по отношению к метиленовому синему, с максимальной сорбционной емкостью 165 мг/г. Это демонстрирует его потенциал как эффективного сорбента для удаления органических красителей из водных растворов.

Повышение температуры негативно влияет на эффективность сорбции метиленового синего диоксидом кремния, что связано с экзотермическим характером сорбционного процесса и увеличением кинетической энергии молекул сорбата, приводящей к их десорбции.

Эффективность сорбции минимальна при низких значениях pH из-за протонирования поверхности диоксида кремния, что вызывает электростатическое отталкивание катионного метиленового синего. По мере увеличения pH до нейтральных значений сорбционная способность возрастает и стабилизируется, а при pH 9,5 и выше вновь увеличивается, что объясняется увеличением отрицательного заряда на поверхности сорбента и усилением электростатического притяжения красителя.

Увеличение скорости перемешивания улучшает сорбцию до определенного предела, после которого дальнейшее увеличение скорости не оказывает значительного влияния на сорбционную емкость. Это связано с улучшением массового переноса и равномерным распределением сорбента при оптимальных скоростях перемешивания, после чего процесс достигает равновесия.

Регенерация диоксида кремния путем обжига при 600°C показала, что сорбционные свойства материала практически не изменяются после трёх циклов сорбции-регенерации. Это указывает на высокую термическую стабильность и долговечность сорбента, а также на эффективность метода регенерации для восстановления сорбционных центров.

Проведенные эксперименты подтверждают, что диоксид кремния, полученный из вскрышных пород, является эффективным, стабильным и многоразовым сорбентом для удаления метиленового синего из водных растворов, что делает его перспективным для применения в системах очистки сточных вод.

Список источников

1. Бурыкина О.В. Промышленные красители как ингибиторы кислотной коррозии стали // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2021. Т. 11. № 2. С. 163 – 175.

2. Джубари М.К., Алексеева Н.В., Базияни Г.И., Таха В.С. Методы удаления пигментов из сточных вод // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332. № 7. С. 54 – 64.

3. Измайлов Б.И., Шарипов Р.М., Валеева Л.Д., Гадельшина Э.А., Вильданова А.И. Ассортимент применяемых красителей для текстильных материалов // Вестник Технологического университета. 2015. Т. 18. № 15. С. 180 – 182.

4. Исаев А.Б., Магомедова А.Г. Новые технологии очистки сточных вод от красителей на основе окислительных процессов // Вестник Московского университета. Серия 2: Химия. 2022. Т. 63. № 4. С. 247 – 268.

5. Мирзалимова С.А., Мухамедиев М.Г., Киршина Е.Ю. Текстильные предприятия как источники токсичности сточных вод // Universum: химия и биология. 2021. № 10-1 (88). С. 20 – 24.

6. Мирзалимова С.А., Киршина Е.Ю., Мухамедиев М.Г. Использование метода электрохимической деструкции для очистки сточных вод от активного красителя Red SPD // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2022. № 4. С. 86 – 99.

7. Мирзахмедова М.Х., Хамидова В.Д., Аъзамжонова С.Ш., Култаев М.С. Совмещение процессов крашения и заключительной отделки текстильных материалов // Вестник науки. 2022. Т. 52. № 7. С. 77 – 87.

8. Самодолова О.А., Ульрих Д.В., Лонзингер Т.М. Использование лузги гречихи (гранулированной) в очистке городских поверхностных сточных вод // Градостроительство и архитектура. 2023. Т. 13. № 1. С. 37 – 44.

9. Турянский В.А. Сорбционные свойства диоксида кремния, полученного на основе вскрышных пород // Энергетические установки и технологии. 2023. Т. 9. № 2. С. 101 – 112.

10. Чечерина А.Ю., Стоянова А.Д., Конькова Т.В. Применение физико-химических методов для очистки сточных вод, содержащих органический краситель и глину Таганского месторождения // Успехи в химии и химической технологии. 2021. Т. 35. № 6. С. 122 – 124.

11. Buntin A., Agliullin V. Transformation of the structure and adsorption properties of bentonite during physical and chemical treatment // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2022. Т. 2373. № 3. С. 032006.

12. Fang J. Sorption and desorption of phenanthrene onto iron, copper, and silicon dioxide nanoparticles // Langmuir. 2008. Т. 24. № 19. С. 10929 – 10935.

13. Grigoryan S.G., Synthesis of Silicon Dioxide Xerogels and Their Sorption – Desorption Properties with Respect to Nicotine and Glycols // Russian Journal of General Chemistry. 2023. Т. 93. № 8. С. 2048 – 2057.

14. Lieser K.H., Quandt-Klenk S., Thybusch B. Sorption of uranyl ions on hydrous silicon dioxide // Radiochimica Acta. 1992. Т. 57. № 1. С. 45 – 50.

15. Mustapha L.S. Rapid and effective adsorption of selected heavy metals from battery wastewater using silicon-oxide nanoparticles derived rice husk // Groundwater for Sustainable Development. 2023. Т. 23. С. 101024.

16. Nadzhafova O.Y. Optimization and use of composite coatings based on silicon oxide and polyvinylsulfonic acid for the adsorption-spectrophotometric determination of iron (II) and zinc (II) phenanthrolinates // Journal of Analytical Chemistry. 2007. Т. 62. С. 1136 – 1142.

17. Uzokov J.R., Mukhamadiev N.K. Sorption characteristics of mesoporous composite SiO2·TiO2 // Central Asian Journal of Medical and Natural Science. 2021. Т. 2. № 5. С. 494 – 498.

18. Wang J. Moisture adsorption and desorption properties of colloidal silicon dioxide and its impact on layer adhesion of a bilayer tablet formulation // International Journal of Pharmaceutical Excipients. 2016. Т. 5. № 1.

19. Ying D. Sorption of europium onto diethylenetriaminepentaacetic acid based silica dioxide: kinetics, isotherm, thermodynamics // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2017. Т. 314. № 3. С. 2449 – 2457.

20. Zhou T., Pillar [5, 6] arene-functionalized silicon dioxide: synthesis, characterization, and adsorption of herbicide // Langmuir. 2015. Т. 31. № 4. С. 1454 – 1461.

References

1. Burykina O.V. Industrial dyes as inhibitors of acid corrosion of steel. News of the South-West State University. Series: Equipment and technology. 2021. Vol. 11. No. 2. P. 163 – 175.

2. Dzhubari M.K., Alekseeva N.V., Baziyani G.I., Takha V.S. Methods for removing pigments from wastewater. News of Tomsk Polytechnic University. Georesources Engineering. 2021. Vol. 332. No. 7. P. 54 – 64.

3. Izmailov B.I., Sharipov R.M., Valeeva L.D., Gadelshina E.A., Vildanova A.I. Assortment of dyes used for textile materials. Bulletin of the Technological University. 2015. Vol. 18. No. 15. P. 180 – 182.

4. Isaev A.B., Magomedova A.G. New technologies for treating wastewater from dyes based on oxidative processes. Bulletin of Moscow University. Episode 2: Chemistry. 2022. Vol. 63. No. 4. P. 247 – 268.

5. Mirzalimova S.A., Mukhamediev M.G., Kirshina E.Yu. Textile enterprises as sources of wastewater toxicity. Universum: chemistry and biology. 2021. No. 10-1 (88). P. 20 – 24.

6. Mirzalimova S.A., Kirshina E.Yu., Mukhamediev M.G. Using the method of electrochemical destruction to purify wastewater from the active dye Red SPD. Water management of Russia: problems, technologies, management. 2022. No. 4. P. 86 – 99.

7. Mirzakhmedova M.Kh., Khamidova V.D., Azamzhonova S.Sh., Kultaev M.S. Combination of dyeing processes and final finishing of textile materials. Bulletin of Science. 2022. Vol. 52. No. 7. P. 77 – 87.

8. Samodolova O.A., Ulrich D.V., Lonzinger T.M. The use of buckwheat husks (granulated) in the treatment of urban surface wastewater. Urban planning and architecture. 2023. Vol. 13. No. 1. P. 37 – 44.

9. Turyansky V.A. Sorption properties of silicon dioxide obtained from overburden rocks. Power plants and technologies. 2023. Vol. 9. No. 2. P. 101 – 112.

10. Checherina A.Yu., Stoyanova A.D., Konkova T.V. Application of physical and chemical methods for the treatment of wastewater containing organic dye and clay from the Taganskoe deposit. Advances in chemistry and chemical technology. 2021. Vol. 35. No. 6. P. 122 – 124.

11. Buntin A., Agliullin V. Transformation of the structure and adsorption properties of bentonite during physical and chemical treatment. Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2022. Vol. 2373. No. 3. P. 032006.

12. Fang J. Sorption and desorption of phenanthrene onto iron, copper, and silicon dioxide nanoparticles. Langmuir. 2008. Vol. 24. No. 19. P. 10929 – 10935.

13. Grigoryan S.G., Synthesis of Silicon Dioxide Xerogels and Their Sorption – Desorption Properties with Respect to Nicotine and Glycols. Russian Journal of General Chemistry. 2023. Vol. 93. No. 8. P. 2048 – 2057.

14. Lieser K.H., Quandt-Klenk S., Thybusch B. Sorption of uranyl ions on hydrous silicon dioxide. Radiochimica Acta. 1992. Vol. 57. No. 1. P. 45 – 50.

15. Mustapha L.S. Rapid and effective adsorption of selected heavy metals from battery wastewater using silicon-oxide nanoparticles derived rice husk. Groundwater for Sustainable Development. 2023. Vol. 23. P. 101024.

16. Nadzhafova O.Y. Optimization and use of composite coatings based on silicon oxide and polyvinyl-sulfonic acid for the adsorption-spectrophotometric determination of iron (II) and zinc (II) phenanthrolinates. Journal of Analytical Chemistry. 2007. Vol. 62. P. 1136 – 1142.

17. Uzokov J.R., Mukhamadiev N.K. Sorption characteristics of mesoporous composite SiO2·TiO2. Central Asian Journal of Medical and Natural Science. 2021. Vol. 2. No. 5. P. 494 – 498.

18. Wang J. Moisture adsorption and desorption properties of colloidal silicon dioxide and its impact on layer adhesion of a bilayer tablet formulation. International Journal of Pharmaceutical Excipients. 2016. Vol. 5. No. 1.

19. Ying D. Sorption of europium onto diethylenetriaminepentaacetic acid based silica dioxide: kinetics, isotherm, thermodynamics. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2017. Vol. 314. No. 3. P. 2449 – 2457.

20. Zhou T., Pillar [5, 6] arene-functionalized silicon dioxide: synthesis, characterization, and adsorption of herbicide. Langmuir. 2015. Vol. 31. No. 4. P. 1454 – 1461.

Информация об авторе

Турянский В.А., преподаватель, Севастопольский государственный университет, 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33, morsavinv@bk.ru

Information about the author

Turyansky V.A., Lecturer, Sevastopol State University, 299053, Sevastopol, 33 Universitetskaya St., morsavinv@bk.ru