

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ПРОЦЕССА СОРБЦИИ КРАСИТЕЛЯ ЭОЗИНА Н ХИМИЧЕСКИ АКТИВИРОВАННЫМИ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИМИ СОРБЦИОННЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

И.В. Старостина, Д.О. Половнева

Кафедра экобиотехнологии, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, химико-технологический институт, Костюкова, 46, Белгород, Российская Федерация, 308012
E-mail: starostinairinav@yandex.ru, dasha1021998@mail.ru

В статье приведены результаты исследования механизма процесса сорбции и десорбции кислотного красителя эозина Н на поверхности углеродсодержащих сорбционных материалов, полученных в результате термической модификации кизельгурового шлама - отхода производства рафинированных растительных масел при температуре 500 °С в условиях недостатка кислорода, с условным обозначением ТКШ₅₀₀. Использовали сорбционные материалы – ТКШ₅₀₀ нативный и образцы, модифицированные растворами: 20%-ный NaCl, 1М NaOH, 30%-ный H₂O₂, 10%-ный HNO₃, 30%-ный HNO₃ и концентрированной HNO₃. Процесс сорбции изучали в статических условиях в течение 24 ч методом переменных концентраций с гидравлическим модулем 100. Полученные результаты показали, что изотермы сорбции красителя на исходном и активированных образцах ТКШ₅₀₀ имеют S-образный вид. В области малых концентраций красителя происходит образование монослоя, при увеличении содержания красителя сорбция приобретает полимолекулярный характер. Максимальное активирующее воздействие достигнуто в результате обработки ТКШ₅₀₀ 30%-ным раствором HNO₃ и обеспечивает значение сорбционной способности полученного материала – 0,0047 ммоль/г, что на 88% выше по сравнению с нативным образцом (0,0025 ммоль/г). С целью определения механизма адсорбции красителя эозина Н были построены изотермы в интервале концентраций, соответствующих образованию монослоя, и полученные данные были математически обработаны в рамках моделей сорбции Ленгмюра, Фрейндлиха, Дубинина-Радушкевича и Темкина. Результаты показали, что при извлечении красителя эозина Н нативным и активированными ТКШ₅₀₀ сорбция может быть монокулярной на однородной поверхности и полимолекулярной на неоднородной поверхности, также происходит объемное заполнение микропор сорбентов. В результате десорбции эозина Н с поверхности рассматриваемых сорбционных материалов с использованием дистиллированной воды и 1 Н раствора HCl степень вымывания красителя не превысила 1,3%, следовательно, молекулы эозина Н на поверхности исходного и химически активированных ТКШ₅₀₀ удерживаются за счет преимущественно химических связей.

Ключевые слова: углеродсодержащий сорбционный материал, активация, процесс сорбции, эозин Н, монослой, сорбционная емкость, модели сорбции, десорбция

INVESTIGATION OF THE PROCESS OF SORPTION OF EOSIN H DYE BY CHEMICALLY ACTIVATED CARBON-CONTAINING SORPTION MATERIALS

I.V. Starostina, D.O. Polovneva

Department of Ecobiotechnology, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Institute of Chemical Technology, Kostyukova, 46, Belgorod, Russia, 308012
E-mail: starostinairinav@yandex.ru, dasha1021998@mail.ru

The article presents the results of a study of the mechanism of sorption and desorption of the acid dye eosin H on the surface of carbon-containing sorption materials obtained as a result of thermal modification of kieselguhr sludge – waste from the production of refined vegetable oils at

a temperature of 500 °C under conditions of oxygen deficiency, with the symbol TKS₅₀₀. Sorption materials were used – TKS₅₀₀ native and samples modified with solutions: 20% NaCl, 1M NaOH, 30% H₂O₂, 10% HNO₃, 30% HNO₃ and concentrated HNO₃. The sorption process was studied under static conditions for 24 hours by the method of variable concentrations with a hydraulic module 100. The results obtained showed that the dye sorption isotherms on the initial and activated TKS₅₀₀ samples have an S-shaped appearance. In the area of low concentrations of the dye, a monolayer is formed, with an increase in the dye content, sorption acquires a polymolecular character. The maximum activating effect was achieved as a result of processing TKS₅₀₀ with a 30% HNO₃ solution and provides a value of the sorption capacity of the resulting material – 0.0047 mmol/g, which is 88% higher compared to the native sample (0.0025 mmol/g). In order to determine the mechanism of adsorption of the eosin H dye, isotherms were constructed in the concentration range corresponding to the formation of a monolayer, and the data obtained were mathematically processed within the framework of the Langmuir, Freundlich, Dubinin-Radushkevich and Temkin sorption models. The results showed that when the eosin H dye is extracted with native and activated TKS₅₀₀, sorption can be monocular on a homogeneous surface and polymolecular on an inhomogeneous surface, and volumetric filling of micropores of sorbents also occurs. As a result of the desorption of eosin H from the surface of the sorption materials under consideration using distilled water and 1 N HCl solution, the degree of dye leaching did not exceed 1.3%, therefore, eosin H molecules on the surface of the initial and chemically activated TKS₅₀₀ are retained mainly by chemical bonds.

Key words: sorption process, eosin H, chemical activator, monolayer, sorption models, desorption

Для цитирования:

Старостина И.В., Половнева Д.О. Исследование механизма процесса сорбции красителя эозина Н химически активированными углеродсодержащими сорбционными материалами. *Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва)*. 2024. Т. LXVIII. № 2. С. 45–52. DOI: 10.6060/R CJ.2024682.6.

For citation:

Starostina I.V., Polovneva D.O. Investigation of the process of sorption of eosin H dye by chemically activated carbon-containing sorption materials. *Ros. Khim. Zh.* 2024. V. 68. N 2. P. 45–52. DOI: 10.6060/R CJ.2024682.6.

ВВЕДЕНИЕ

Загрязнение поверхностных водоемов и грунтовых вод – одна из современных мировых экологических проблем. Одним из главных показателей, характеризующих степень загрязненности

водоемов России, является объем сброса сточных вод. Это крупнейший по своим масштабам и сильнейший по интенсивности фактор антропогенного воздействия. Основные показатели сброса сточных вод по Российской Федерации за период 2019-2021 годы представлены в табл. 1 [1–3].

Таблица 1

Динамика основных показателей использования воды (сброс сточных вод) в целом по Российской Федерации за 2019-2021 годы, млн. м³

| Год | Сброс сточных вод в поверхностные водные объекты | | | |
|------|--|----------------------|--------------------------|-------------|
| | Всего | нормативно-очищенных | в том числе загрязненных | |
| | | | всего | без очистки |
| 2019 | 37666,6 | 2187,1 | 12599,9 | 2313,7 |
| 2020 | 34232,6 | 2690,9 | 11678,4 | 1912,9 |
| 2021 | 35539,8 | 2959,8 | 11579,8 | 1986,4 |

Объем сточных вод, сбрасываемых в природные поверхностные водоемы Российской Федерации, за трехлетний период сократился на 2126,8 млн. м³, или на 5,6%. При этом отмечается увеличение нормативно очищенных вод в 2021 году

на 772,7 млн. м³, что составило 35,3%. Количество загрязненных вод, сбрасываемых без очистки, хотя и уменьшилось на 1020.1 млн. м³, однако осталось на достаточно высоком уровне [3].

Основными загрязнителями промышленных стоков являются нефть и нефтепродукты, соединения тяжелых металлов и сложные органические вещества, включая синтетические красители [1–3].

Из большого разнообразия красителей синтетические органические относятся к наиболее токсичным и опасным загрязняющим веществам, поскольку характеризуются интенсивной окраской и высокой устойчивостью к процессам окисления и разрушения [4, 5]. Такие красители применяются в различных отраслях промышленного производства – текстильной, кожаной, лакокрасочной, а также в производстве бумаги, пластмассы, косметики, строительных материалов и др. [5]. Известно, что текстильное производство потребляет большое количество воды питьевого качества – до 100–200 дм³ воды на 1 кг окрашиваемой ткани, в некоторых случаях водопотребление может составить до 3000 м³ в 1 сут. [6]. Необходимо отметить, что более 10–15% общего количества красителей, используемых в процессе окрашивания изделий, поступают в окружающую среду в составе сточных вод [6]. При этом в составе производственных стоков помимо основного загрязнителя – красителя, присутствуют соединения тяжелых металлов, поверхностно-активные и взвешенные вещества, другие органические загрязнители. Образующиеся промышленные стоки имеют широкий диапазон значений pH, температуры, высокие показатели мутности и содержания солей, таких как сульфаты, хлориды, карбонаты [7, 8]. Так, сточные воды от промывки технологического оборудования и мойки полов имеют интенсивную окраску, содержат 0.3–2.5 г/дм³ органических веществ, основную часть которых составляют полупродукты и красители, и до 4 г/дм³ неорганических солей [9].

Окрашивание воды в водоеме, помимо отрицательного воздействия на его кислородный режим, приводит к угнетению процесса самоочищения, что связано со снижением светопропускаемости воды и нарушением процессов фотосинтеза. Это сопровождается не только изменением органолептических свойств воды в водоемах, но и гибелью различных организмов и ухудшением общего состояния поверхностных водоемов. Необходимо отметить также, что многие красители и продукты их распада являются токсичными и обладают мутагенными свойствами [10].

Очистка стоков, содержащих подобные поллютанты, характеризуется высокой сложностью из-за их устойчивости к процессам разложе-

ния [4], а прямой их сброс в канализационную систему может привести к нарушению процессов биологической очистки. Поэтому для обезвреживания стоков, содержащих органические синтетические красители, и снижения их антропогенного воздействия на окружающую среду применяются различные методы, которые условно можно разделить на механические, химические, физико-химические и биологические. Выбор того или метода будет зависеть от различных условий системы водоотведения промышленного предприятия – состава и концентрации загрязнителей, объема сточных вод и требований, предъявляемым к очищенным стокам.

Наиболее эффективным и распространенным методом удаления красителей из сточных вод является адсорбционный с использованием в качестве сорбционных материалов отходов производства или продуктов их переработки [11, 12]. Такое использование вторичного сырья способствует уменьшению загрязнения окружающей природной среды, снижению затрат не только на производство новых сорбционных материалов, но и на технологические затраты процессов водоотведения с их использованием [13, 14].

В настоящее время из большого разнообразия адсорбентов широкое применение получили углеродные и углеродсодержащие сорбционные материалы, что обусловлено наличием беспорядочной слоистой структуры углеродного слоя, в которой отсутствует строгая периодичность элементарных слоев и различное расстояние между ними. Всё это обеспечивает высокую эффективность удаления различных загрязнителей из сточных вод [15].

С целью увеличения сорбционной активности, повышения ионнообменных и окислительно-восстановительных свойств поверхность сорбционных материалов подвергают дополнительному воздействию – модификации или активации. В качестве химических активаторов используют различные реагенты – органические и неорганические соединения, простые и сложные оксиды, соли, кислоты, щелочи [16–20].

Цель научной работы: изучение механизма процесса адсорбции ксантенового красителя эозина Н (ЭО) на поверхности нативного и химически модифицированных образцов углеродсодержащего сорбционного материала, полученного из шламового отхода маслоэкстракционного производства.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве объектов исследования использовали синтетический флуоресцентный кислотный краситель эозин Н (динатриевая соль 2,4,5,7 - тетрабромфлуоресцеина) (рис. 1), который является имитатором ядовитых веществ – диоксинов. Поэтому с экологической точки зрения перед предприятиями лакокрасочной промышленности стоит задача максимально эффективно очистить образующиеся сточные воды, содержащие подобные красители [21].

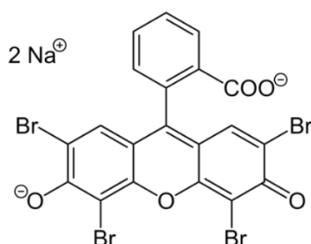


Рис. 1. Структурная формула синтетического флуоресцентного кислотного красителя эозин Н (динатриевая соль 2,4,5,7 - тетрабромфлуоресцеина)

В качестве углеродсодержащего сорбционного материала использовали отработанный кизельгуровый шлам (ОКШ) намывных фильтров маслоэкстракционного производства, образующийся на стадии винтеризации процесса рафинирования растительных масел ГК «ЭФКО», г. Алексеевка, Белгородская обл. [9, 14], термически модифицированный при температуре 500 °С в условиях недостатка кислорода, с условным обозначением ТКШ₅₀₀ [22]. Использовали материал фракцией менее 0.315 мм – нативный и активированный различными химическими реагентами.

На основе ранее проведенных исследований [17-20] для химической модификации рассматриваемого углеродсодержащего материала (ТКШ₅₀₀) были выбраны растворы: 20%-ный NaCl, 1М NaOH, 30%-ный H₂O₂, 10%-ный HNO₃, 30%-ный HNO₃ и концентрированная HNO₃.

Химическую активацию поверхности ТКШ₅₀₀ осуществляли в статических условиях 24 ч при температуре 25 °С при соотношении фаз: тв (г) : ж (мл) – 1:10. После модификации сорбционные материалы отмывали дистиллированной водой до нейтральных значений pH и высушивали при температуре 105 °С [23].

Процесс сорбции осуществляли в статических условиях в течение 24 ч методом переменных концентраций с гидравлическим модулем 100, после перемешивания фазы разделяли центрифугированием. Начальную концентрацию красителя

изменяли в интервале от 0,174 ммоль/дм³ до 0,660 ммоль/дм³ (от 120,5 мг/дм³ до 456,6 мг/дм³, соответственно). Содержание красителя эозина Н в модельных растворах до и после сорбции определяли методом фотометрии при длине волны 510 нм с использованием фотоэлектроколориметра Арел AP-101 [24].

Сорбционную способность исследуемых материалов, ммоль/г, определяли по формуле (1):

$$A = \frac{(C_n - C_k) \cdot V}{m_a}, \quad (1)$$

где C_н, C_к – соответственно начальная и конечная концентрации ЭО, ммоль/г; V – объем раствора, дм³; m_а – масса адсорбционного материала, г.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты исследования показали, что изотермы сорбции ЭО на исследуемых углеродсодержащих сорбционных материалах – ТКШ₅₀₀ исходном и химически модифицированных образцах, имеют S-образный вид и характеризуют полимолекулярную адсорбцию (рис. 2). В области малых концентраций раствора красителя происходит образование монослоя молекул ЭО на поверхности углеродсодержащих сорбционных материалов. Далее при увеличении содержания красителя происходит достраивание молекул ЭО до димера, что отражается на резком увеличении сорбционной емкости рассматриваемых сорбционных материалов, и сорбция приобретает полимолекулярный характер.

Согласно полученным результатам (рис. 1) наибольшая сорбционная емкость (0.0047 ммоль/г) наблюдается у ТКШ₅₀₀, активированного 30%-ным раствором HNO₃.

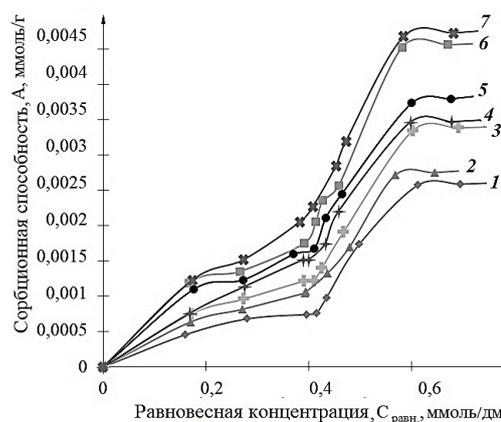


Рис. 2. Изотермы адсорбции красителя эозина Н нативным и химически активированными сорбционными материалами: 1 – ТКШ₅₀₀ исх., 2 – ТКШ₅₀₀+HNO₃ (10%), 3 – ТКШ₅₀₀+NaOH (1М), 4 – ТКШ₅₀₀+HNO₃ (конц.), 5 – ТКШ₅₀₀+H₂O₂ (30%), 6 – ТКШ₅₀₀+NaCl (20%), 7 – ТКШ₅₀₀+HNO₃ (30%)

Для исследования механизмов процессов адсорбции красителя ЭО с использованием ТКШ₅₀₀ были построены изотермы в интервале концентраций 0,150-0,361 ммоль/дм³ (103,9-249,8 мг/дм³), соответствующих образованию монослоя (рис. 3).

Сорбционная емкость монослоя для нативного ТКШ₅₀₀ составляет 0,0025 ммоль/г. Химическая модификация ТКШ₅₀₀ способствует увеличению сорбционной емкости по красителю ЭО. Максимальная сорбционная емкость монослоя характерна для ТКШ₅₀₀, обработанного 30%-ным раствором азотной кислоты, которая составила 0,0047 ммоль/г и соответствует увеличению емкости по сравнению с исходным ТКШ₅₀₀ на 88%. Наименьшее увеличение сорбционной способности по сравнению с нативным ТКШ₅₀₀ (на 6.5%) получено при модифицировании 10%-ным раствором HNO₃.

Затем полученные изотермы математически были обработаны в рамках моделей сорбции Ленгмюра, Фрейндлиха, Дубинина-Радушкевича и Тёмкина. Результаты представлены в табл. 1 в виде

уравнений регрессии и коэффициентов аппроксимации.

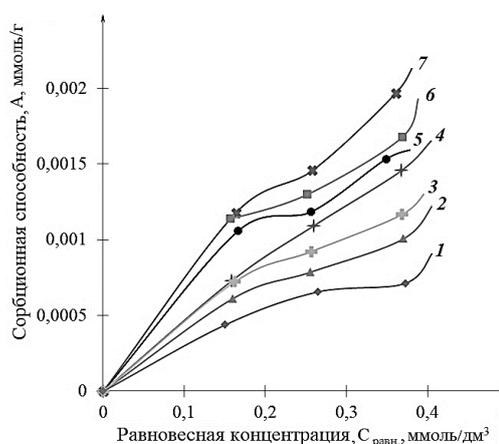


Рис. 3. Изотермы адсорбции ЭО в интервале концентраций, соответствующих образованию монослоя, при использовании в качестве сорбционных материалов:

- 1 – ТКШ₅₀₀ исх., 2 – ТКШ₅₀₀+HNO₃ (10%), 3 – ТКШ₅₀₀+NaOH (1M), 4 – ТКШ₅₀₀+HNO₃ (конц.), 5 – ТКШ₅₀₀+H₂O₂ (30%), 6 – ТКШ₅₀₀+NaCl (20%), 7 – ТКШ₅₀₀+HNO₃ (30%)

Таблица 2

Коэффициенты аппроксимации

| Адсорбционный материал ТКШ ₅₀₀ | Модель сорбции | | | |
|---|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| | Ленгмюра | Фрейндлиха | Дубинина-Радушкевича | Темкина |
| исх. | R² = 0,9801 | R ² = 0,9518 | R ² = 0,9768 | R ² = 0,9666 |
| +NaCl (20%) | R ² = 0,9089 | R ² = 0,9435 | R² = 0,9729 | R ² = 0,9198 |
| +NaOH (1M) | R ² = 0,9896 | R ² = 0,9964 | R² = 0,9988 | R ² = 0,9836 |
| +H ₂ O ₂ (30%) | R ² = 0,8633 | R ² = 0,8987 | R² = 0,9940 | R ² = 0,8729 |
| +HNO ₃ (10%) | R ² = 0,9886 | R² = 0,9959 | R ² = 0,9938 | R ² = 0,9818 |
| +HNO ₃ (30%) | R ² = 0,9523 | R² = 0,9656 | R ² = 0,386 | R ² = 0,9362 |
| +HNO ₃ (конц.) | R ² = 0,9976 | R² = 0,9996 | R ² = 0,8846 | R ² = 0,9899 |

По результатам математической обработки полученных изотерм адсорбции в интервале концентраций, соответствующих образованию монослоя (табл. 1, коэффициент аппроксимации – R²), можно судить о механизме процесса сорбции красителя эозина Н. Для нативного ТКШ₅₀₀ сорбция красителя эозина Н описывается уравнением модели Ленгмюра, что говорит о мономолекулярной адсорбции на однородной поверхности. При химической активации поверхности ТКШ₅₀₀ концентрированной, 10% и 30% растворами HNO₃, сорбция красителя ЭО в интервале концентраций, соответствующих образованию монослоя, с большим значением сходимости описывается уравнениями модели сорбции Фрейндлиха, что характеризует про-

текание полимолекулярной адсорбции на неоднородной поверхности сорбционного материала [25, 26]. Процесс адсорбции эозина Н на поверхности ТКШ₅₀₀, модифицированного растворами: 20% NaCl, 1M NaOH и 30% H₂O₂, описывается уравнениями модели сорбции Дубинина-Радушкевича, которая обусловлена объемным заполнением красителем ЭО микропор сорбентов [27].

Кроме того, для подтверждения механизма процесса сорбции красителя ЭО на поверхности рассматриваемых сорбентов и для определения характера поглощения исследуемого красителя (физическая или химическая адсорбция) была проведена десорбция ЭО различными реагентами – дистиллированной водой и 1 N раствором HCl [28]. Результаты приведены в табл. 2.

Таблица 3
Степень вымывания красителя эозина Н с поверхности углеродсодержащих сорбционных материалов при десорбции, %. Раствор при десорбции: H₂O₂; исходная концентрация р-ров эозина Н: 453,8 мг/дм³ (0,656 ммоль/дм³)

| Адсорбционный материал | Степень вымывания красителя ЭО, % |
|--------------------------------------|-----------------------------------|
| Исходный | 0,22 |
| +NaCl (20%) | 0,51 |
| +NaOH (1М) | 0,27 |
| +H ₂ O ₂ (30%) | 1,22 |
| +HNO ₃ (10%) | 0,54 |
| +HNO ₃ (30%) | 0,30 |
| +HNO ₃ (конц.) | 0,53 |

Результаты десорбции красителя эозина Н с поверхности нативного и химически активированных ТКШ₅₀₀ (табл. 2) показали, что эозин Н полностью не вымывается 1 Н раствором HCl, а при использовании дистиллированной воды в раствор переводится не более 1,22% красителя с поверхности рассматриваемых сорбционных материалов. Следует отметить, что при активации поверхности ТКШ₅₀₀ степень вымывания увеличивается и достигает максимального значения при химической модификации 30% раствором H₂O₂. Таким образом, на поверхности исследуемых углеродсодержащих сорбционных материалов молекулы ЭО удерживаются за счет преимущественно химических связей. Но при обработке ТКШ₅₀₀ химическими реагентами такие связи постепенно ослабевают.

ВЫВОДЫ

На основе проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Изотермы сорбции ЭО на исследуемых

ЛИТЕРАТУРА

1. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2021 году. Государственный доклад. М.: Минприроды России; МГУ имени М.В. Ломоносова, 2022. 684 с.
2. О состоянии окружающей среды на территории Российской Федерации в 2020 году. Государственный доклад. М.: Минприроды России; МГУ имени М.В. Ломоносова, 2021. 864 с.
3. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2019 году. Государственный доклад. М.: Минприроды России; МГУ имени М.В. Ломоносова, 2020. 1000 с.
4. Гусев Г.И., Гуцин А.А., Извекова Т.В., Шейченко М.В., Шаронов А.В. Актуальные вопросы естествознания. Сб. трудов конференции. Иванов. пожарно-спасат. академии ГПС МЧС России. Иваново. 2019. С. 234–241.

углеродсодержащих сорбционных материалах – ТКШ₅₀₀ исходном и химически модифицированных образцах, имеют S-образный вид и характеризуют полимолекулярную адсорбцию.

Наибольшее значение сорбционной емкости (0,0047 ммоль/г) достигается при использовании ТКШ₅₀₀, активированного 30%-ным раствором азотной кислоты, и соответствует увеличению емкости на 88% по сравнению с исходным образцом (0,0025 ммоль/г).

2. По моделям сорбции можно предположить, что сорбция красителя эозина Н с использованием ТКШ₅₀₀ нативного может быть мономолекулярной на однородной поверхности; при химической активации концентрированной, 10% и 30% растворами HNO₃ – полимолекулярной на неоднородной поверхности; для ТКШ₅₀₀, обработанного NaCl, NaOH и H₂O₂, может происходить объемное заполнение красителем микропор сорбента.

3. При исследовании десорбции ЭО с использованием дистиллированной воды и 1 Н раствора HCl можно сделать вывод, что степень вымывания красителя не превысила 1,3%, следовательно, молекулы эозина Н на поверхности нативного и химически активированных ТКШ₅₀₀ удерживаются за счет преимущественно химических связей.

Работа выполнена в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет 2030» с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В. Г. Шухова.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

REFERENCES

1. On the state and environmental protection of the Russian Federation in 2021. State report. Moscow: Ministry of Natural Resources of Russia; Lomonosov Moscow State University, 2022. 684 p (in Russian).
2. On the state of the environment in the territory of the Russian Federation in 2020. State report. Moscow: Ministry of Natural Resources of Russia; Lomonosov Moscow State University, 2021. 864 p (in Russian).
3. On the state and environmental protection of the Russian Federation in 2019. State report. Moscow: Ministry of Natural Resources of Russia; Lomonosov Moscow State University, 2020. 1000 p (in Russian).
4. Gusev G.I., Gushchin A.A., Izvekova T.V., Sheichenko M.V., Sharonov A.V. Actual issues of natural science. Collection of proceedings of the conference. Ivanov. fire-rescue. the Academy of GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia. Ivanovo. 2019. P. 234–241 (in Russian).

5. *Egoshina A.V., Savvina N.A., Vanyashin D.A.* Химия и химическая технология в XXI веке. Сб. докладов. Томск. политех. ун-та. Томск. 2017. С. 405.
6. *Sarayu K., Sandhya S.* Applied Biochemistry and Biotechnology. 2012. V. 167. N. 3. P. 645–661.
7. *Джубари М.К., Алексеева Н.В., Базияни Г.И., Таха В.С.* Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332. № 7. С. 54–64. DOI: 10.18799/24131830/2021/7/3263.
8. *Karcher S., Kornmuller A., Jekel M.* Water Research. 2002. V. 36. N 19. P. 4717–4724.
9. *Евлантьев С.С., Войтюк А.А., Сахарова Н.А.* Научный потенциал регионов на службу модернизации. 2012. № 2. С. 3.
10. *Khan S., Malik A.* Environmental deterioration and human health. Dordrecht. Springer. 2014. P. 55–71. DOI: 10.1007/978-94-007-7890-0_4.
11. *Белый В.А., Свергузова С.В., Шайхiev И.Г., Сапронова Ж.А., Воронина Ю.С.* Изв. вузов Химия и хим. технология. 2023. Т. 66. № 5. С. 139–145. DOI: 10.6060/ivkkt.20236605.6757.
12. *Свергузова С.В., Шайхiev И.Г., Сапронова Ж.А., Лупандина Н.С., Воронина Ю.С., Гафаров Р.Р.* Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2023. Т. 66. Вып. 6. С. 76–84. DOI: 10.6060/ivkkt.20236606.6780.
13. *Свергузова С.В., Сапронова Ж.А., Локтионова Е.В., Сыса В.И., Шайхiev И.Г.* Chemical Bulletin. 2021. Т. 4. № 1. С. 44–55.
14. *Свергузова С.В., Сапронова Ж.А., Хунади Л., Спесивцева С.Е.* Вестник Технологического университета. 2020. Т. 23. № 1. С. 79–83.
15. *Работягов К.В., Ратушина А.Д., Бахтин А.С.* Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Биология. Химия. 2022. Т. 8 (74). № 1. С. 224–235.
16. *Сурков А.А., Глушанкова И.С., Балабенко Н.А.* Фундаментальные исследования. 2012. № 9 (часть 1). С. 171–175.
17. *Ливанова А.В., Будаев Ж.Б., Мецерьяков Е.П., Курзина И.А.* Вестник Томского государственного университета. Химия. 2020. № 17. С. 22–33. DOI: 10.17223/24135542/17/2.
18. *Диденко Т.А., Богданова А.О.* Омский научный вестник. 2015. № 3 (143). С. 358–361.
19. *Ren Y., Chen F., Pan K., Zhao Y.* Nanomaterials. 2021. V. 11. 13 p. DOI: 10.3390/nano11071819.
20. *Дьячкова Т.П., Ткачев А.Г.* Методы функционализации и модифицирования углеродных нанотрубок. М.: Спектр. 2013. 151 с.
21. *Нозирзода Ш.С.* Новая наука: стратегии и векторы развития. 2016. № 5–3 (82). С. 243–246.
22. *Старостина И.В., Свергузова С.В., Столяров Д.В., Порожнюк Е.В., Аничина Я.Н., Шайхiev И.Г.* Вестник технологического университета. 2017. Т. 20. № 16. С. 133–136.
23. *Старостина И.В., Половнева Д.О., Макридина Ю.Л., Локтионова Е.В.* Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. 2021. № 4 (82). С. 29–38. DOI: 10.17277/voprosy.2021.04.pp.029-038.
24. *Малюков С.П., Саенко А.В.* Известия ЮФУ. Технические науки. 2011. № 4 (117). С. 98–102.
5. *Egoshina A.V., Savvina N.A., Vanyashin D.A.* Chemistry and chemical technology in the XXI century. Collection of reports. Tomsk. polytech. un-ta. Tomsk. 2017. p. 405 (in Russian).
6. *Sarayu K., Sandhya S.* Applied Biochemistry and Biotechnology. 2012. V. 167. N. 3. P. 645–661.
7. *Dzhubari M.K., Alekseeva N.V., Baziyani G.I., Taha V.S.* Georesource engineering. 2021. V. 332. N 7. P. 54–64. (in Russian). DOI: 10.18799/24131830/2021/7/3263.
8. *Karcher S., Kornmuller A., Jekel M.* Anion exchange resins for removal of reactive dyes from textile wastewaters. *Water Research*. 2002. V. 36. N 19. P. 4717–4724.
9. *Evlantiev S.S., Voityuk A.A., Sakharova N.A.* The scientific potential of the regions for the service of modernization. 2012. N 2. P. 3 (in Russian).
10. *Khan S., Malik A.* Environmental deterioration and human health. Dordrecht. Springer. 2014. P. 55–71. DOI: 10.1007/978-94-007-7890-0_4.
11. *Belyy V.A., Svergzova S.V., Shaikhiev I.G., Sapronova Zh.A., Voronina Yu.S.* ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]. 2023. V. 66. N. 5. P. 139–145 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20236605.6757.
12. *Svergzova S.V., Shaikhiev I.G., Sapronova Zh.A., Lupandina N.S., Voronina Yu.S., Gafarov R.R.* ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]. 2023. V. 66. N 6. P. 76–84. DOI: 10.6060/ivkkt.20236606.6780.
13. *Svergzova S.V., Sapronova Zh.A., Loktionova E.V., Sysa V.I., Shaikhiev I.G.* Chemical Bulletin. 2021. V. 4. N 1. P. 44–55 (in Russian).
14. *Svergzova S.V., Sapronova Zh.A., Hunadi L., Spesivtseva S.E.* Bulletin of the Technological University. 2020. V. 23. N 1. P. 79–83 (in Russian).
15. *Rabotyagov K.V., Ratushnaya A.D., Bakhtin A.S.* Scientific notes of the V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Biology. Chemistry. 2022. V. 8 (74). N 1. P. 224–235 (in Russian).
16. *Surkov A.A., Glushankova I.S., Balabenko N.A.* Fundamental research. 2012. N 9 (Part 1). P. 171–175 (in Russian).
17. *Livanova A.V., Budaev Zh.B., Meshcheryakov E.P., Kurzina I.A.* Bulletin of Tomsk State University. Chemistry. 2020. N 17. P. 22–33 (in Russian). DOI: 10.17223/24135542/17/2.
18. *Didenko T.A., Bogdanova A.O.* Omsk Scientific Bulletin. 2015. N 3 (143). P. 358–361 (in Russian).
19. *Ren Y., Chen F., Pan K., Zhao Y.* Nanomaterials. 2021. V. 11. 13 p. DOI: 10.3390/nano11071819.
20. *Dyachkova T.P., Tkachev A.G.* Methods of functionalization and modification of carbon nanotubes. M.: Spektr. 2013. 151 p. (in Russian).
21. *Nozirzoda Sh.S.* New Science: strategies and vectors of development. 2016. N 5–3 (82). P. 243–246 (in Russian).
22. *Starostina I.V., Svergzova S.V., Stolyarov D.V., Porozhnyuk E.V., Anichina Ya.N., Shaikhiev I.G.* Bulletin of the Technological University. 2017. V. 20. N 16. P. 133–136 (in Russian).
23. *Starostina I.V., Polovneva D.O., Makridina Yu.L., Loktionova E.V.* Issues of modern science and practice. V.I. Vernadsky University. 2021. N 4 (82). P. 29–38 (in Russian). DOI: 10.17277/voprosy.2021.04.pp.029-038.

25. Котова Д.Л., Фам Тхи Гам, Крысанова Т.А., Васильева С.Ю., Тимченко Ю.А., Бекетов Б.Н. Сорбционные и хроматографические процессы. 2014. Т. 14. Вып. 4. С. 572–577.
26. Кривошапкин П.В., Кривошапкина Е.Ф., Назарова Е.А., Сталюгин В.В. Основы коллоидной химии. Поверхностные явления и системы. СПб.: Университет ИТМО. 2019. 138 с.
27. Алмазова Г.А., Шайхiev И.Г., Галимова Р.З., Свергузова С.В. Вестник Белгородского Государственного Технологического Университета им. В.Г. Шухова. 2016. № 10. С. 179–184. DOI: 10.12737/22099.
28. Свергузова С.В., Воронина Ю.С., Сапронова Ж.А., Шайхiev И.Г., Ивлева Е.С. Российский химический журнал. 2023. Т. 67. №2. С.67–73. DOI: 10.6060/rcj.2023672.8.
24. Malyukov S.P., Saenko A.V. News of the SFU. Technical sciences. 2011. N 4 (117). P. 98–102 (in Russian).
25. Kotova D.L., Pham Thi Gam, Krysanova T.A., Vasilyeva S.Yu., Timchenko Yu.A., Beketov B.N. Sorption and chromatographic processes. 2014. V. 14. Issue 4. P. 572–577 (in Russian).
26. Krivoshapkin P.V., Krivoshapkina E.F., Nazarova E.A., Stalyugin V.V. Fundamentals of colloidal chemistry. Surface phenomena and systems. St. Petersburg: ITMO University. 2019. 138 p. (in Russian).
27. Almazova G.A., Shaikhiev I.G., Galimova R.Z., Sverguzova S.V. Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 2016. N 10. P. 179–184 (in Russian). DOI: 10.12737/22099.
28. Sverguzova S.V., Sapronova Zh.A., Shaikhiev I.G., Voronina Yu.S., Ivleva E.S. Ros. Khim. Zh. 2023. V. 67. N.2. P. 67–73 (in Russian). DOI: 10.6060/rcj.2023672.8.

*Поступила в редакцию 22.12.2023
Принята к опубликованию 29.04.2024*

*Received 22.12.2023
Accepted 29.04.2024*