

Влияние pH среды на сорбцию прямых светопрочных красителей древесными опилками из водных растворов

А. В. Лысенко¹ ✉, К. А. Левина¹, Е. А. Фатьянова¹, Д. А. Дурнев¹,
А. Ефремова²

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

² Университет Сегеда
площадь Дугоникс 13, Сегеди 6720, Венгрия

✉ e-mail: ginger313@mail.ru

Резюме

Целью настоящей работы являлось исследование процесса сорбции прямых красителей древесными опилками в зависимости от pH среды.

Методы. В качестве сорбента использовались отходы деревообрабатывающей промышленности – древесные опилки берёзы размером частиц менее 2 мм. В качестве сорбатов предварительными испытаниями выбрано два прямых светопрочных красителя: бирюзовый СВ, красный 2С. Представлены 3D-макеты строения данных прямых красителей, построенные с помощью ChemOffice.

Результаты. Выбраны максимумы поглощения света для прямых светопрочных красителей: красный 2С 520 нм и бирюзовый СВ 610 нм. В статье изучено влияние массы опилок на степень сорбции прямых светопрочных красителей (бирюзового СВ и красного 2С) из водных растворов. Исследованы закономерности кинетики сорбции из водных растворов прямых светопрочных красителей древесными опилками берёзы в зависимости от pH среды. Проанализированы кинетические кривые процесса сорбции прямых красителей древесными опилками.

Представление экспериментальных данных как зависимость степени достижения равновесной сорбции (F) от времени (t) позволило определить критерии стадии, лимитирующей скорость поглощения вещества. С целью подтверждения влияния внешних диффузионных и внутренних диффузионных процессов на скорость сорбции, была проведена соответствующая обработка кинетических кривых в координатах $-\ln(1-F)$ от t и G от $t^{0.5}$. Получены величины достоверности аппроксимации кинетической прямой.

Заключение. Полученные результаты показали, что древесные опилки сорбируют краситель прямой бирюзовый в кислой среде и практически не сорбируют в нейтральной среде. Воздействие pH среды на процесс сорбции красителя прямого светопрочного красного имеет менее ярко выраженный характер: практически на всем промежутке времени контакта фаз степень сорбции не превышает 50%.

Показано, что древесные опилки берёзы можно использовать для очистки сточных вод от прямых светопрочных красителей.

Ключевые слова: сорбция; кинетика сорбции; pH среды; прямой красный 2С; прямой бирюзовый СВ; древесные опилки.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Влияние pH среды на сорбцию прямых светопрочных красителей древесными опилками из водных растворов / А. В. Лысенко, К. А. Левина, Е. А. Фатьянова, Д. А. Дурнев, А. Ефремова // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2022. Т. 12, № 3. С. 201–225. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2022-12-3-201-225>

Поступила в редакцию 18.06.2022

Подписана в печать 17.08.2022

Опубликована 28.09.2022

Effects of the pH of the Medium of Sorption of Direct Light-Strong Dyes with Sawdust from Aqueous Solutions

Anna V. Lysenko¹ ✉, Kristina A. Levina¹, Elena A. Fatyanova¹, Denis A. Durnev¹, Anastasia Efremova²

¹ Southwest State University
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

² University of Szeged
13 Dugonics square, Szeged 6720, Hungary

✉ e-mail: ginger313@mail.ru

Abstract

Purpose of research. The purpose of this work was to study the sorption process of direct dyes with sawdust depending on the pH of the medium.

Methods. Waste from the woodworking industry was used as a sorbent – birch sawdust with a particle size of less than 2 mm. Two direct light-resistant dyes were selected as adsorbates by preliminary tests: turquoise CB, red 2C. 3D models of the structure of these direct dyes, constructed using ChemOffice, are presented.

Results. The light absorption maxima for direct light-resistant dyes were selected: red 2C - 520 nm, and turquoise CB - 610 nm. The article studies the effect of sawdust mass on the degree of sorption of direct light-strong dyes (turquoise CB and red 2C) from aqueous solutions.

The regularities of the kinetics of sorption from aqueous solutions of direct light-resistant dyes with birch sawdust depending on the pH of the medium are investigated. Kinetic curves of the sorption process of direct dyes with sawdust are analyzed. The presentation of experimental data as a dependence of the degree of achieving the equilibrium of sorption (F) on time (t) allowed us to determine the criteria for the stage limiting the rate of absorption of the substance. In order to confirm the influence of external and intradiffusion processes on the sorption rate, the corresponding processing of kinetic curves in the corresponding coordinates $-\ln(1-F)$ from t and G_t from $t^{0.5}$ was carried out.

Kinetic values of approximation reliability are obtained.

Conclusion. The results obtained showed that, depending on the pH of the medium, sawdust has the best sorption properties in relation to the direct turquoise dye in an acidic medium, and is practically not sorbed in a neutral medium. The effect of the pH of the medium on the sorption process of the direct light-strong red dye has a less pronounced character: the degree of sorption does not exceed 50% for almost the entire period of phase contact. It is proved that birch sawdust can be used for wastewater treatment from direct light-resistant dyes.

Keywords: sorption; sorption kinetics; pH of the medium; straight red 2C; straight turquoise CB; sawdust.

Conflict of interest: The authors declares the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Lysenko A. V., Levina K. A., Fatyanova E. A., Durnev D. A., Efremova A. Effects of the ph of the Medium of Sorption of Direct Light-Strong Dyes with Sawdust from Aqueous Solutions. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2022; 12(3): 201–225. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2022-12-3-201-225>.

Received 18.06.2022

Accepted 17.08.2022

Published 28.09.2022

Введение

Загрязнение окружающей среды является одной из главных проблем современного развития цивилизации. Нехватка местных водных ресурсов требует бережного использования природной воды в производстве [1; 2].

Большая часть воды, которая используется в промышленных отраслях, приходится на красильные установки. По типу красителя, способу окрашивания материала и другим параметрам в сточные воды поступает 5–50% от первоначального количества красителя в технологическом растворе, а объем сточных вод, необходимый для получения одной тонны окрашенной продукции, может достигать от 50 до 430 м³ [3; 4].

Диапазон цветов, который используется для крашения текстильных материалов, варьирующихся от светло-желтого до черного [5; 6]. После завершения процесса крашения образуются сточные воды, содержащие, помимо растворимых красителей, различные загрязняющие вещества, не полностью удаляются на очистных сооружениях [3; 7].

В то же время именно растворимые красители представляют собой большую проблему, поскольку существует мало высокоэффективных и технологий очистки, а растворимые красители достаточно плохо удаляются из сточных вод.

Флотация под давлением, метод окисления хлорной известью, озоном, коагуляция реагентами, электрохимический метод, сорбция на активированном угле – методы очистки воды, которые можно использовать для извлечения органических красителей [8–12].

Но большинство из существующих способов относятся к недоступным из-за высокой стоимости, сложным в эксплуатации или имеющим плохой эффект после очистки [13].

Хорошо контролируемым процессом, позволяющим удалять практически любые загрязняющие вещества из воды, является сорбционная очистка. При этом отсутствует вторичное загрязнение.

Возможность использовать сорбцию для сложных многокомпонентных сточных вод, даже с низкой концентрацией красителей, делает данный метод более перспективным [14; 15].

Основные качества, из-за которых прямые красители обладают спросом, это распространенность, дешевизна и светоустойчивость. Минусом является относительная блеклость по сравнению с основными красителями [16].

Минимальные концентрации прямых красителей в промышленности для покраски санитарно-бытовых видов бумаги в слабые пастельные цвета составляет до 0,2% к массе волокон; в средние и интенсивные тона – от 0,2 до 1% [17].

Многие красители обладают свойством индикаторов и способны менять свою окраску в зависимости от pH среды. Стандартные значения pH среды для крашения в производстве при крашении прямыми красителями составляет 6,0–7,5. Также pH среды влияет на степень удержания красителей. Для удержания большинства красителей стандартные значения pH среды заключаются в пределах 4,5–5,5. Степень удержания сильно влияет на удержание кислотных красителей: при pH более 5 удержание резко уменьшается [18–20].

Поскольку при отделке и крашении различных материалов образуются сточные воды с широким диапазоном значений pH среды, является актуальным изучение воздействия на сорбцию древесными опилками прямых красителей их водных растворов pH среды.

По результатам исследования [21] были установлены компоненты березовых опилок, а именно: целлюлоза 40,76–44,15; лигнин (нерастворимый в кислоте с растворимым в кислоте) 20,67–25,20; пентозаны 23,67–25,81; минеральные вещества (зола) 0,03–0,29; вещества, растворимые в холодной воде 0,13–1,82; вещества, растворимые в горячей воде, 0,84–2,77; вещества, растворимые в этаноле 1,07–2,61; вещества, растворимые в 1% NaOH, 12,81–17,62; pH 4,19–4,89.

Материалы и методы

Исходная концентрация модельных водных растворов прямых светопрочных красителей составляла 0,1 г/дм³. Для приготовления данных растворов применяли прямые светопрочные красители квалификации «ч.д.а.» без дополнительной очистки, широко используемых в промышленности: бирюзовый СВ и красный 2С. 3D-макеты строения данных прямых красителей, построенные с помощью ChemOffice, представлены на рисунке 1.

Красный 2С имеет разветвленную структуру молекулы. Имея большие размеры и объемные функциональные группы, молекулы данных красителей «цепляются» за сорбент, проявляя высокие показатели степени сорбции.

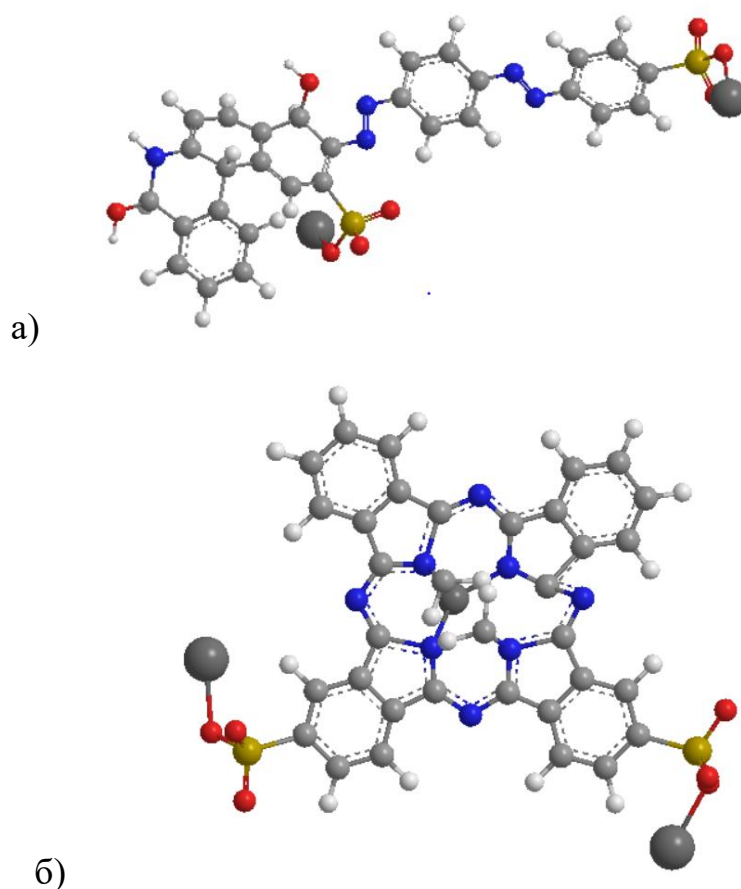


Рис. 1. 3D-макеты строения прямых красителей: а – прямой красный 2С; б – прямой бирюзовый СВ

Fig. 1. 3D layouts of the structure of direct dyes: а – direct red 2C; б – direct turquoise CB

Бирюзовый СВ имеет более симметричное строение молекулы с большим количеством водородных связей. Наличие большого количества водородных связей способствует более плотной группировке молекул, что повышает степень сорбции. Также присутствие крупных функциональных групп, выходящих за ароматические кольца молекулы и способные к обмену с гидроксильными группами сорбента, повышает вероятность сорбции молекулы на поверхности древесных опилок.

Максимальное значение поглощения света для фотометрического опреде-

ления концентраций прямых светопрочных красителей в водном растворе находили на приборе Promescolab PE-5400UF. Спектры поглощения прямых светостойких красителей представлены на рисунке 2.

По рисунку 2 выбираются максимальные значения поглощения света для прямых светопрочных красителей: красный 2С 520 нм, бирюзовый СВ 610 нм.

Чтобы установить взаимосвязь между оптической плотностью и концентрацией прямых светопрочных красителей, были созданы калибровочные графики, представленные на рисунке 3.

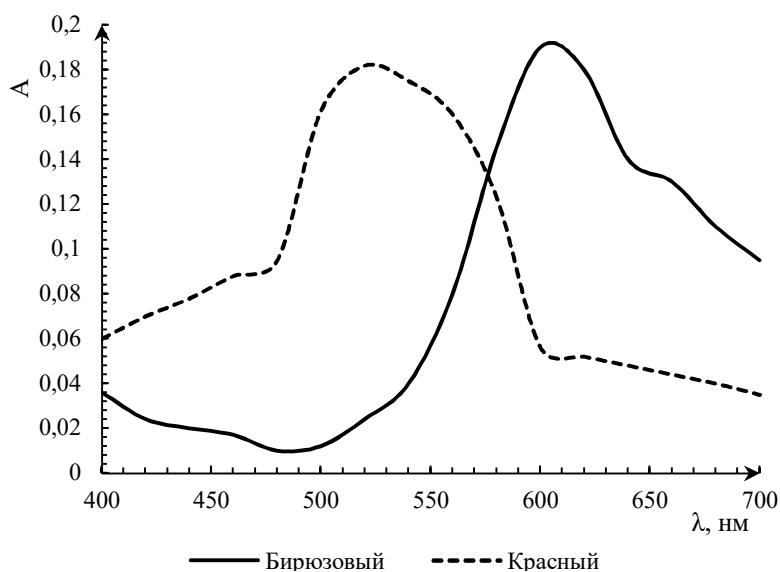


Рис. 2. Спектры поглощения прямых светопрочных красителей

Fig. 2. Absorption spectra of direct light-strong dyes

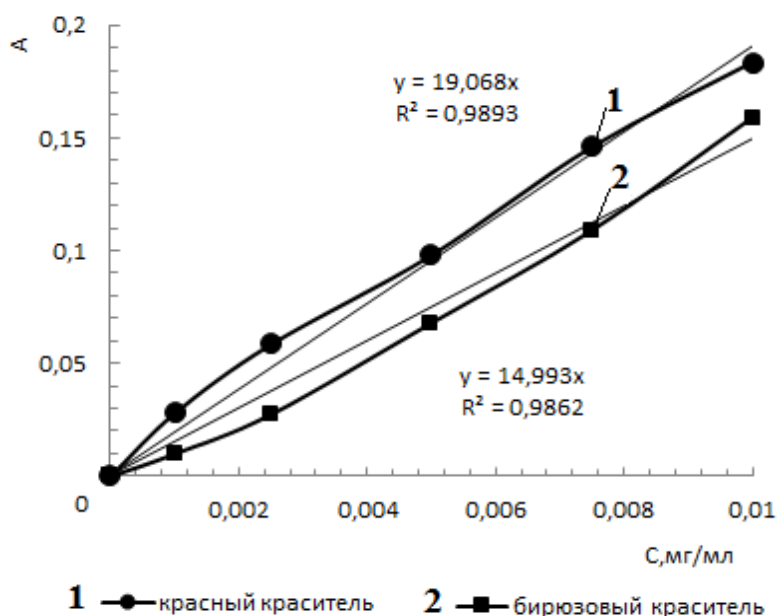


Рис. 3. Калибровочные графики определения концентраций прямых светопрочных красителей

Fig. 3. Calibration graphs for determining the concentrations of direct light-resistant dyes

По полученным калибровочным графикам определяли остаточные концентрации прямых светопрочных красителей в водных растворах [22] после их

сорбции. Далее в работе используется одностадийный метод статической сорбции при комнатной температуре при следующих соотношениях: начальная

концентрация водного раствора прямого светопрочного красителя $0,01 \text{ г/дм}^3$, объём водного раствора прямого светопрочного красителя $0,02 \text{ дм}^3$.

В качестве сорбента использовали древесные отходы – опилки берёзы размером частиц менее 2 мм.

Определение оптимальных условий сорбции прямых красителей проводили добавлением к водным растворам прямых светопрочных красителей навески сорбента определенной массы при постоянном перемешивании в течение 60 мин. Масса навесок сорбента менялась от 0,1 до 2,0 г.

Для изучения кинетики сорбции прямых красителей древесными опилками при разном количестве времени (от 1 до 60 мин) использовали массу 1,0 г.

Степень сорбции (%) рассчитывали по формуле [23]

$$S = \frac{(C_0 - C_k) \cdot 100\%}{C_0}, \quad (1)$$

где C_0 и C_k – начальная и конечная концентрация прямого светопрочного красителя в водном растворе, г/дм^3 .

Сорбцию прямых светопрочных красителей из водных растворов в зависимости от pH среды проводили при следующих значениях:

- нейтральная среда $\text{pH} = 6,7$ (исходная концентрация красителей $0,01 \text{ г/дм}^3$);
- кислая среда $\text{pH} = 3,7$ (добавление HNO_3 конц.);
- щелочная среда $\text{pH} = 9,7$ (добавление KOH).

Измерение pH среды водных растворов прямых красителей осуществлялось pH-метр-иономером Мультитест ИПЛ-101-1.

Используя метод аппроксимации в Microsoft Excel, полученные экспериментальные данные сглаживали путем их расположения в виде линейного тренда [24]. Приблизительное значение надежности (R^2) показывает степень соответствия модели тренда и полученных данных [25].

Результаты и их обсуждение

Количество древесных опилок и pH как факторы, влияющие на степень сорбции прямых красителей из водных растворов

На рисунке 4 представлены данные, полученные при изучении влияния количества древесных опилок на степень сорбции прямых красителей из водного раствора в зависимости от значения pH среды.

Кривые сорбции красителей прямого красного 1 и прямого бирюзового 4 в нейтральной среде имеют ступенчатый вид: величина достоверности аппроксимации кривой (1) до 1,5 г составляет $R^2 = 0,8992$, после 1,5 г – $R^2 = 1$. Величина достоверности аппроксимации кривой (4) до 1,5 г составляет $R^2 = 0,9284$, после 1,5 г – $R^2 = 1$. Степень сорбции монотонно возрастает до увеличения массы древесных опилок до 1,5 г, затем наблюдается резкое возрастание степени сорбции при увеличении массы сорбента: для кривой 1 при этом сорбция

увеличивается в 2,5 раза (с 34 до 87%); для кривой 4 – в 4 раза (с 19 до 76%). Кривые сорбции имеют сходный характер, при этом краситель прямой красный

в нейтральной среде на 10–20% лучше извлекается древесными опилками из водных растворов, чем краситель прямой бирюзовый.

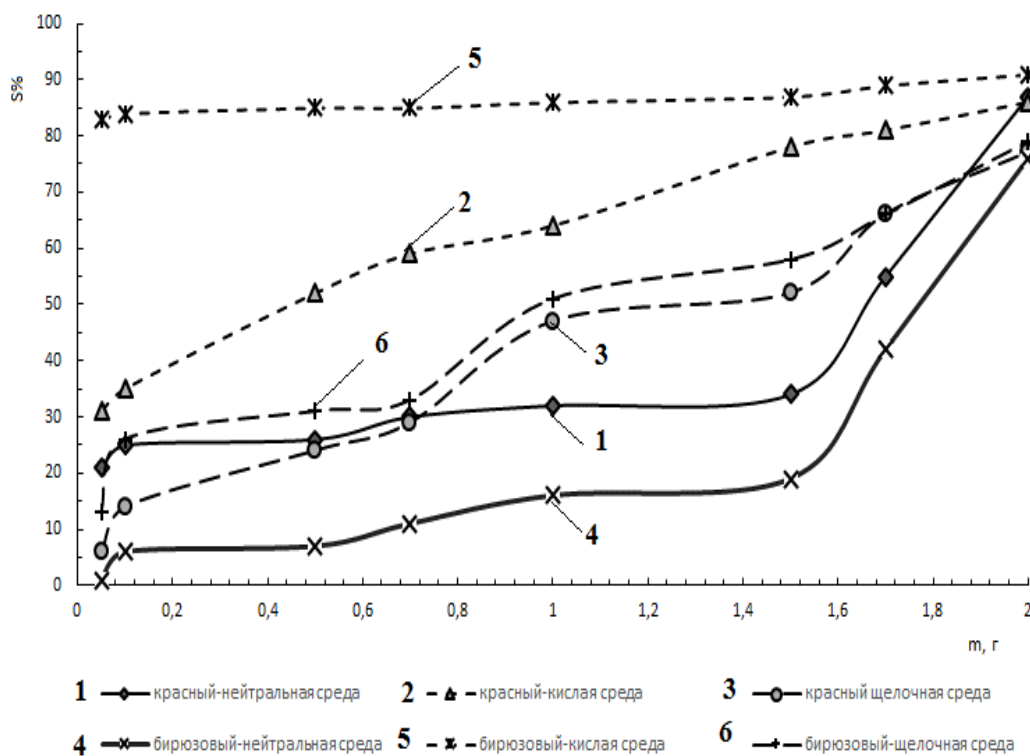


Рис. 4. Влияние количества древесных опилок на степень сорбции прямых красителей из водных растворов в зависимости от pH среды

Fig. 4. The effect of the sawdust mass on the degree of sorption of direct dyes from aqueous solutions, depending on the pH of the medium

Сорбционные кривые прямых светопрочных красителей красного 2 и бирюзового 5 имеют более линейный вид в кислой среде: величина достоверности аппроксимации прямого красного на всем участке массы составляет $R^2 = 0,9695$, для прямого бирюзового – $R^2 = 0,9293$. Степень сорбции монотонна по мере увеличения массы древесных опилок. Кривые 2 и 5 не имеют сильно выраженных скачков степени сорбции.

Процесс сорбции у прямого красного зависит от массы сорбента: сорбция увеличилась в 2,8 раза (с 31% до 86%). Процесс сорбции прямого бирюзового почти независим от количества сорбента: сорбция увеличилась всего в 1,1 раза (с 83% до 91%). Кривые (2) и (5) сходны по характеру, краситель прямой светопрочный бирюзовый сорбируется древесными опилками на 10–15% лучше в кислой среде, чем прямой светопрочный красный.

Кривые сорбции красителей прямого красного 3 и прямого бирюзового 6 в щелочной среде имеют ступенчатый вид, с несколькими точками скачков: величина достоверности аппроксимации кривой 3 с 0,05 г до 0,7 г массы сорбента составляет $R^2 = 0,9322$, с 0,7 до 1,5 г – $R^2 = 0,8039$, с 1,5 г до 2 г – $R^2 = 0,9665$. Величина достоверности аппроксимации кривой 6 с 0,05 г до 0,7 г массы составляет $R^2 = 0,697$, с 0,7 до 1,5 г – $R^2 = 0,8523$, с 1,5 г до 2 г – $R^2 = 0,8718$. Первый скачок сорбции зафиксирован при массе древесных опилок равной 0,7 г. По мере увеличения массы сорбента до первой ступени сорбция практически неизменна, после скачка для кривой 6 сорбция увеличилась в 1,6 раза (с 31% до 51%); для кривой 3 – в 2,08 раза (с 24% до 52%). Далее наблюдается монотонное возрастание степени сорбции прямого красного и прямого бирюзового, и при массе сорбента 1,5 г отмечается резкое возрастание степени сорбции – второй скачок: для кривой 3 степень сорбции увеличилась в 1,5 раза (с 52% до 77%); для кривой 6 – в 1,6 раза (с 51% до 79%). Кривые сорбции имеют аналогичный характер, красители прямой красный и прямой бирюзовый практически в равной степени извлекаются древесными опилками в щелочной среде.

Процесс сорбции красителей прямого красного и прямого бирюзового зависит от массы сорбента и показателя pH среды. Наивысшую точку степени сорбции краситель прямой красный показал в нейтральной (кривая 1 – 87%) и кислой (кривая 2 – 86%) средах. Для красителя прямой бирюзовый наилучший результат зафиксирован в кислой среде (кривая 5 – 91%).

Кинетические кривые сорбции прямых светопрочных красителей древесными опилками в зависимости от pH среды из водных растворов

Результаты изучения процесса извлечения прямых красителей древесными опилками в зависимости от времени контакта фаз из водных растворов представлены на рисунке 5.

Кинетические кривые сорбции в нейтральной среде красителей прямого красного 1 и прямого бирюзового 4 имеет практически линейный вид: величина достоверности аппроксимации для кривой 1 составляет $R^2 = 0,9838$ с 5-й по 60-ю минуты, для кривой 4 $R^2 = 0,9914$ на всем промежутке времени. За 60 минут сорбируется 23% красителя прямого бирюзового (кривая 4). В начальный момент времени степень сорбции красителя прямого светопрочного красного (кривая 1) резко возрастает и составляет 17%, потому что в исходном сорбенте изначально присутствует больше сорбционных центров.

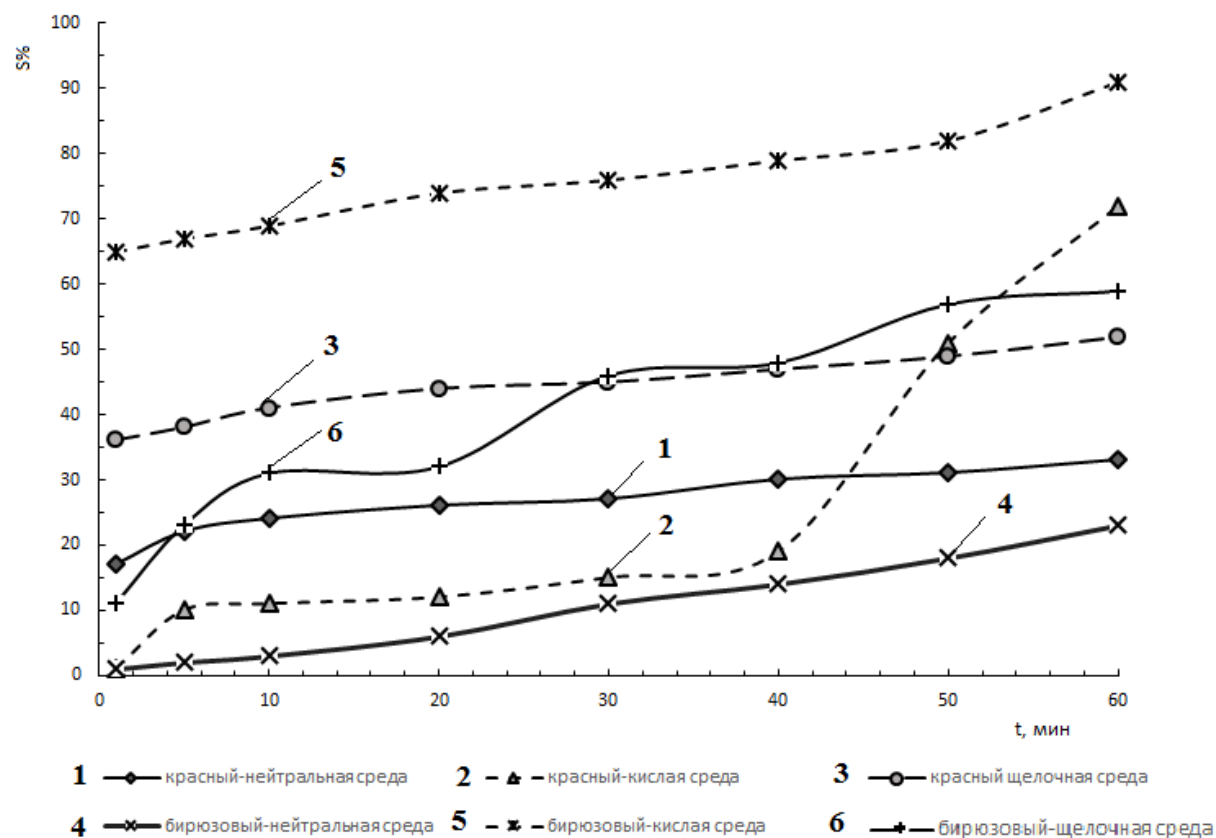


Рис. 5. Кинетические кривые сорбции древесными опилками прямых красителей в зависимости от pH среды из водных растворов

Fig. 5. Kinetic curves of sorption by sawdust of direct dyes depending on the pH of the medium from aqueous solutions

С течением времени количество центров сорбции уменьшается, и через 5 мин опилки насыщаются прямым светопрочным красителем, что приводит к сглаживанию кривой сорбции. С увеличением времени сорбция медленно возрастает и увеличивается в 2 раза. За первые 20 мин краситель прямой красный сорбируется на 20% больше, чем краситель прямой бирюзовый. При дальнейшем увеличении времени контакта фаз сорбция снижается и красителя прямого красного сорбируется только на 10–15%

больше, чем красителя прямого бирюзового.

Таким образом, при нейтральном значении pH среды в водном растворе краситель прямой светопрочный красный извлекается древесными опилками лучше, чем краситель прямой бирюзовый.

Кинетическая кривая сорбции красителя прямого красного (2) в кислой среде имеет ступенчатый вид с несколькими точками скачков: величина достоверности аппроксимации с 5-й по 40-ю минуту составляет $R^2 = 0,9446$, с 40-й по 60-ю минуту – $R^2 = 0,9858$. Напротив,

в кислой среде кривая сорбции прямого светопрочного бирюзового красителя 5 имеет почти линейную форму: величина достоверности аппроксимации на всем промежутке времени составляет $R^2 = 0,9665$. Степень сорбции красителя прямого бирюзового (кривая 5) в начальный момент времени резко увеличивается до 65%, монотонно возрастает на всем промежутке времени на 25% и в конечный момент времени сорбируется 91% красителя прямого светопрочного бирюзового древесными опилками из водных растворов. В начальный момент времени степень сорбции красителя прямого красного (кривая 2) возрастает и составляет 10%, потому что в исходном сорбенте изначально присутствует больше сорбционных центров. Во время сорбции количество центров уменьшается, от 5 до 40 минут опилки насыщаются прямым красителем, что приводит к выравниванию кривой сорбции. Через 40 минут сорбция начинает увеличиваться и резко возрастает практически в 4 раза (с 19% до 72%). За первые 40 минут красителя прямого бирюзового сорбируется на 60% больше, чем красителя прямого красного. При дальнейшем увеличении времени контакта фаз сорбция снижается и красителя прямого бирюзового сорбируется только на 20–30% больше, чем красителя прямого красного.

Таким образом, в кислой среде краситель прямой светопрочный бирюзовый древесными опилками из водных растворов извлекается лучше, чем

краситель прямой светопрочный красный.

Кинетическая кривая сорбции прямого красного 3 в щелочной среде имеет практически линейный вид: величина достоверности аппроксимации на всем промежутке времени составляет $R^2 = 0,9623$. Кинетическая кривая сорбции красителя прямого светопрочного бирюзового 6 имеет более волнистый вид при величине достоверности аппроксимации на всем промежутке времени $R^2 = 0,9295$. Степень сорбции красителя прямого красного (кривая 3) в начальный момент времени резко увеличивается до 36%, монотонно возрастает на всем промежутке времени на 16% и в конечный момент времени сорбируется 52% красителя прямого красного древесными опилками из водных растворов. В начальный момент времени степень сорбции красителя прямого бирюзового (кривая 6) возрастает до 11%, потому что в исходном сорбенте изначально присутствует больше сорбционных центров. Во время сорбции количество центров снижается, вклад мономолекулярной сорбции в общий процесс сорбции уменьшается. Волнистый S-образный характер говорит о сложном механизме сорбции. С увеличением времени контакта фаз сорбция увеличивается более чем в 5 раз. За первые 30 минут краситель прямой бирюзовый сорбируется меньше, чем краситель прямой красный.

При дальнейшем увеличении времени контакта фаз степень сорбции красителя бирюзового, наоборот, увеличивается на 10%.

Таким образом, в щелочной среде древесными опилками из водных растворов краситель прямой светопрочный красный извлекается лучше в течение первых 30 минут, а краситель прямой бирюзовый сорбируется лучше при дальнейшем увеличении времени контакта фаз.

Критерием определения стадии, лимитирующей скорость поглощения вещества, служит соблюдение прямой зависимости $-\ln(1 - F)$ от t и Γ_t от $t^{0.5}$ [26].

Сделать вывод о течение сорбции, а также соотнести относительные скорости сорбции позволило представление экспериментальных данных в виде зависимости степени достижения равновесия сорбции от времени:

$$F = \Gamma_t / \Gamma_e, \quad (2)$$

где Γ_t , Γ_e – количество сорбированного красителя в момент времени t и количество сорбированного красителя в состоянии равновесия, ммоль/г.

Для внешних диффузионных процессов, когда стадией, которая контролирует скорость всего процесса сорбции, является диффузия в неподвижной пленке раствора вокруг сорбента, кинетическая кривая описывается уравнением [26]

$$\ln(1 - F) = -\gamma \cdot t, \quad (3)$$

где t – время, мин; γ – некоторая постоянная для данных условий величина; F – степень достижения равновесия.

Как было указано ранее, критерием определения лимитирующей стадии сорбции служит соблюдение прямой зависимости $-\ln(1 - F)$ от t . С целью подтверждения влияния внешней диффузии на скорость сорбции была проведена соответствующая обработка кинетических кривых.

Данные расчета внешней диффузии сорбции древесными опилками прямых красителей представлены в таблице 1.

Зависимости $-\ln(1 - F) = f(t)$ приведены на рисунке 6.

Как видно из всех представленных нами кинетических параметров внешней диффузии сорбентов, величина $-\ln(1 - F)$ для нейтрального раствора бирюзового СВ и кислого раствора красного 2С мала либо равна 0, следовательно, внешние диффузионные процессы мало влияют на процесс сорбции. А вот для нейтрального раствора красного 2С, кислого раствора бирюзового СВ и щелочных растворов этих красителей величина $-\ln(1 - F)$ больше 2, следовательно, влияние внешней диффузии гораздо сильнее.

Таблица 1. Данные расчета внешней диффузии сорбции древесными опилками прямых красителей в различных значениях pH**Table 1.** Data for calculating the external diffusion of sorption by sawdust of direct dyes in various pH values

Время, мин	Красный 2С			Бирюзовый СВ		
	F	$-\ln(1 - F)$	R^2	F	$-\ln(1 - F)$	R^2
Нейтральная среда						
1	0,515	0,723	0,9084	0,043	0,044	0,9914
5	0,667	1,099		0,087	0,091	
10	0,727	1,298		0,130	0,139	
20	0,788	1,551		0,261	0,302	
30	0,818	1,704		0,478	0,652	
40	0,909	2,397		0,609	0,939	
50	0,939	2,797		0,782	1,523	
60	1,00	—		1,00	—	
Кислая среда						
1	0,020	0,020	0,8031	0,714	1,252	0,9665
5	0,196	0,218		0,736	1,332	
10	0,218	0,246		0,758	1,419	
20	0,235	0,268		0,813	1,677	
30	0,294	0,348		0,835	1,802	
40	0,373	0,467		0,868	2,025	
50	1,00	—		0,901	2,313	
60	1,412	—		1,00	—	
Щелочная среда						
1	0,692	1,178	0,9623	0,344	0,422	0,9295
5	0,731	1,313		0,715	0,724	
10	0,788	1,551		0,969	3,474	
20	0,846	1,871		1,00	—	
30	0,865	2,002		1,0438	—	
40	0,904	2,343		1,500	—	
50	0,942	2,847		1,781	—	
60	1,00	—		1,844	—	

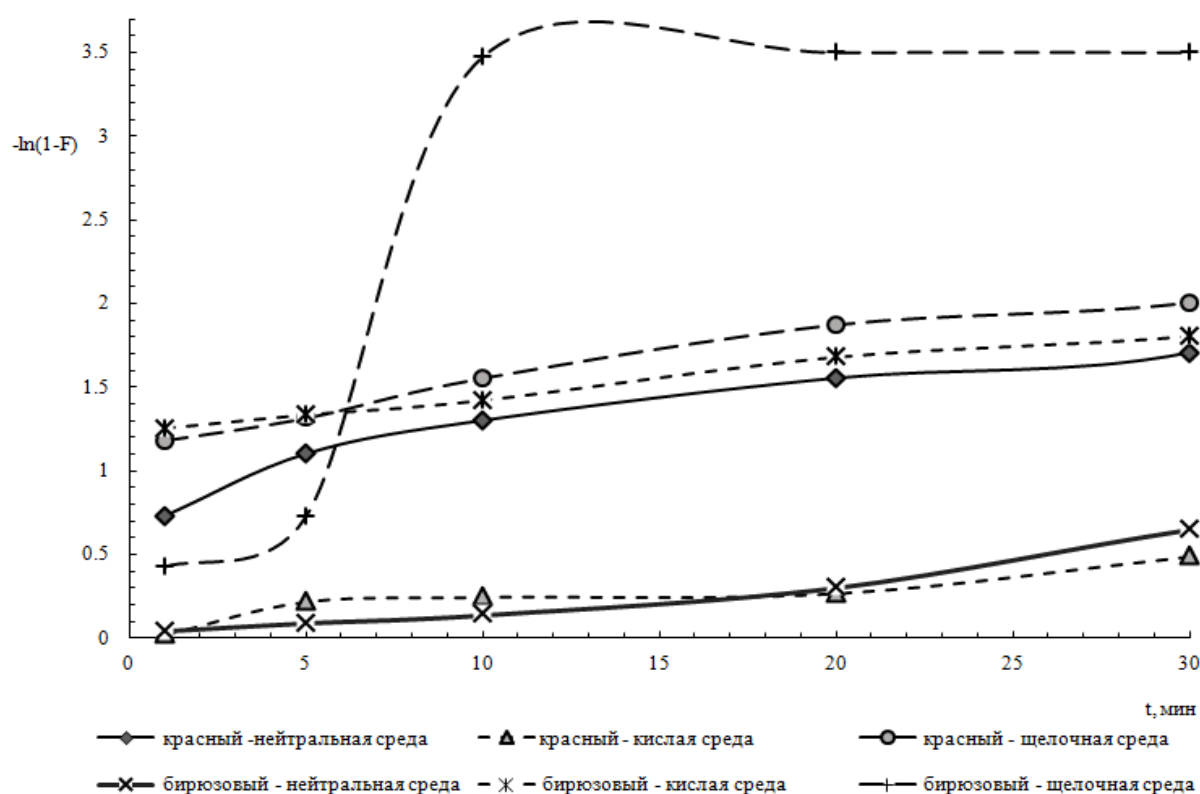


Рис. 6. Зависимость $-\ln(1 - F)$ от t сорбции прямых красителей древесными опилками

Fig. 6. Dependence $-\ln(1 - F)$ on t sorption of direct dyes with sawdust

Влияние внешней диффузии при сорбции опилками прямого красного 2С из водных растворов различных сред увеличивается в ряду сорбентов следующим образом: кислая, нейтральная, щелочная.

При сорбции красителя прямого бирюзового СВ влияние внешней диффузии увеличивается в ряду следующим образом: нейтральная, кислая, щелочная.

Если зависимость $\Gamma_t - t^{0.5}$ представляет собой прямую, которая не выходит из начала координат, она описывается не уравнением (2), а уравнением

$$\Gamma_t = K_d \cdot t^{0.5} + A, \quad (4)$$

где A – отрезок, отсекаемый прямой зависимости $\Gamma_t = f(t)$ на оси ординат.

Константы скорости внутренней диффузии K_d определяют по тангенсу угла наклона зависимости $\Gamma_t - t^{0.5}$ к оси абсцисс.

Доказательством того, что стадией, лимитирующей сорбционный процесс, является внутренняя диффузия, служит соблюдение прямолинейной зависимости в координатах $\Gamma_t - t^{0.5}$, т. к. количество сорбированных веществ при диффузионном контролируемом процессе как функция от времени может быть выражена уравнением прямой.

Прямые зависимости $\Gamma_t - t^{0,5}$ имеют достаточно высокую величину доверительной аппроксимации $R^2 = 0,800-0,999$.

Кинетические кривые сорбции прямых красителей в координатах $\Gamma_t - t^{0,5}$ представляют собой прямые. Кривые описываются уравнением, которые позволяют найти параметры, определяющие влияние внутренней диффузии на процесс сорбции.

Таким образом, в результате обработки кинетических кривых сорбции были определены параметры, характеризующие внутреннюю диффузию процесса сорбции прямых красителей древесными опилками, которые представлены в таблице 2.

На рисунке 7 изображена зависимость Γ_t от $t^{0,5}$ сорбции древесными опилками прямых красителей.

Таблица 2. Данные расчета внутренней диффузии сорбции древесными опилками прямых красителей в различных значениях pH

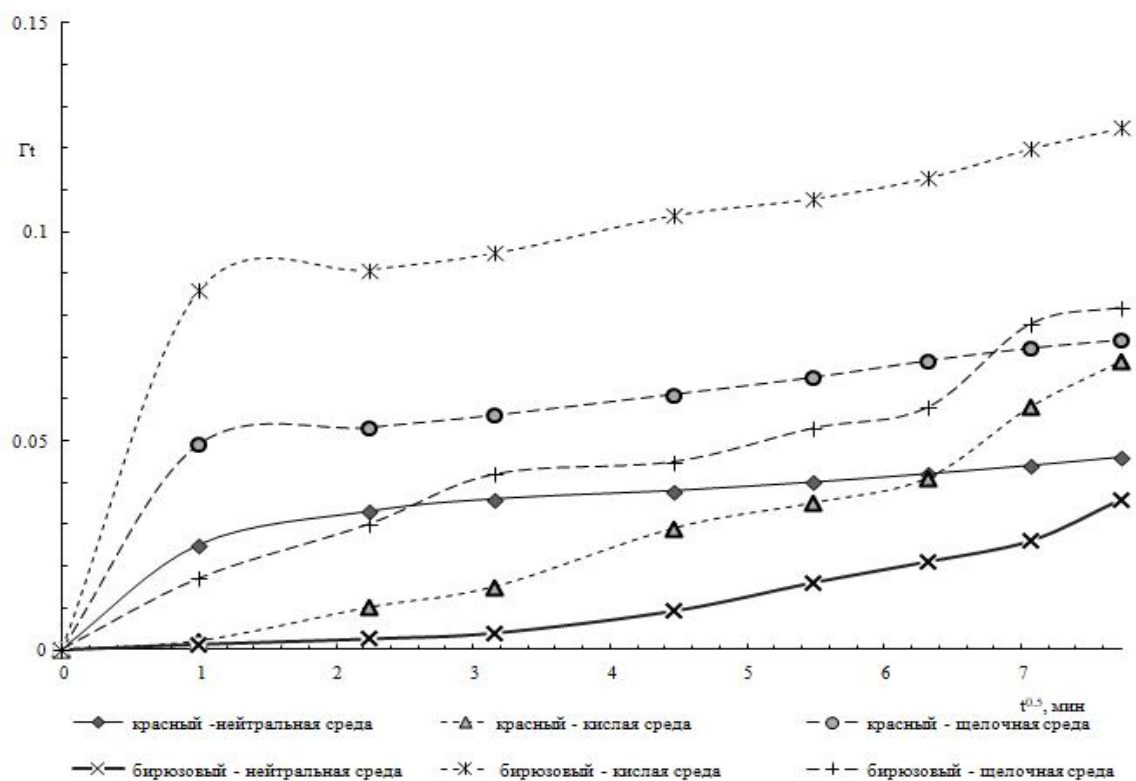
Table 2. Data for calculating the internal diffusion of sorption by sawdust of direct dyes in various pH values

$t^{0,5}$, мин	Красный 2С			Бирюзовый СВ		
	Γ_t	K_d	A	Γ_t	K_d	A
Нейтральная среда						
1,00	0,025	0,2198	2,045	0,0013	0,3719	0,291
2,24	0,033			0,0026		
3,16	0,036			0,004		
4,47	0,038			0,0093		
5,48	0,04			0,016		
6,32	0,042			0,021		
7,07	0,044			0,026		
7,75	0,046			0,036		
Кислая среда						
1,00	0,002	1,009	3,371	0,086	0,3913	4,809
2,24	0,01			0,091		
3,16	0,015			0,095		
4,47	0,029			0,104		
5,48	0,035			0,108		
6,32	0,041			0,113		
7,07	0,058			0,12		
7,75	0,069			0,125		

Окончание табл. 2

End of Table 2

$t^{0,5}$, мин	Красный 2С			Бирюзовый СВ		
	Γ_t	K_d	A	Γ_t	K_d	A
Щелочная среда						
1,00	0,049	0,2465	3,734	0,017	0,752	1,807
2,24	0,053			0,03		
3,16	0,056			0,042		
4,47	0,061			0,045		
5,48	0,065			0,053		
6,32	0,069			0,058		
7,07	0,072			0,078		

Рис. 7. Зависимость G_t от $t^{0,5}$ сорбции прямых красителей древесными опилкамиFig. 7. Dependence of G_t on $t^{0,5}$ sorption of direct dyes with sawdust

Из полученных расчетных данных внутренней диффузии можно сделать заключение, что величина A пропорциональна толщине пленки, окружающей зерно сорбента: чем она больше, тем

больше влияние внешней диффузии на сорбцию красителей. Скорость внутренней диффузии возрастает при уменьшении толщины пленки.

Влияние внутренней диффузии при сорбции опилками прямого красного 2С из водных растворов различных сред увеличивается в ряду сорбентов следующим образом: нейтральная, кислая, щелочная.

При сорбции прямого красителя бирюзового СВ влияние внутренней диффузии имеет следующий ряд сред: нейтральная, щелочная, кислая.

Константа скорости внутренней диффузии, как и влияние пленочной диффузии на сорбцию красителей из водных растворов, увеличивается аналогично внешним диффузионным процессам.

Установлено, что процесс сорбции идет в смешанном диффузионном режиме. Поэтому для описания сорбции можно использовать традиционные методы кинетического анализа, которые учитывают в качестве лимитирующей стадии только внутреннюю или внешнюю диффузию. Вероятнее всего, наблюдается суммарный эффект действия этих двух стадий. Разделить вклад диффузионных процессов и химической стадии на основе формальной кинетики не представляется возможным.

Заключение

В данной работе установлено, что сорбция красителей прямого красного и прямого бирюзового древесными опилками зависит от массы сорбента и показателя pH среды. Прямой красный краситель показал самую высокую степень сорбции в нейтральной и кислой средах

(87% и 86% соответственно). Для прямого бирюзового наилучший результат был зафиксирован в кислой среде (91%).

В ходе эксперимента установлено, что наилучшими сорбционными свойствами древесные опилки обладают по отношению к красителю прямому бирюзовому в кислой среде. При этом данный краситель практически не сорбируется в нейтральной среде. Воздействие pH среды на сорбцию красителя прямого светопрочного красного имеет менее ярко выраженный характер: практически на всем промежутке времени контакта фаз степень сорбции не превышает 50%.

Большинство кинетических кривых сорбции имеют линейную корреляцию, которая показывает, что длительность времени контакта фаз существенно не влияет на степень извлечения прямых светопрочных красителей отходами деревообрабатывающей промышленности из водных растворов: краситель прямой светопрочный красный имеет большую степень извлечения при нейтральном значении pH среды; прямой светопрочный бирюзовый в кислой среде. Сорбция данных красителей в щелочной среде зависит от времени контакта фаз: для эффективного извлечения красителя прямого светопрочного бирюзового требуется более длительный период времени.

В результате анализа кинетических параметров внутренней и внешней диффузии отмечен суммарный эффект действия этих двух стадий. Для нейтрального раствора бирюзового СВ и кислого

раствора красного 2С внешние диффузионные процессы мало влияют на процесс сорбции. А вот для нейтрального раствора красного 2С, кислого раствора бирюзового СВ и щелочных растворов этих красителей влияние внешней диффузии гораздо сильнее. Влияние внешней диффузии на сорбцию красителей имеет следующие ряды: для прямого красного – нейтральная, кислая, щелочная, для прямого бирюзового - нейтральная, щелочная, кислая.

Поскольку приблизительное значение надежности имеет высокое значение (R^2 больше 0,9), следовательно, оно приемлемо, и мы можем считать, что описали объект достаточно точно, а погрешность измерения считается допустимой и крайне малой.

Проделанная работа позволяет говорить о том, что березовые опилки можно использовать для очистки сточных вод от прямых светопрочных красителей.

Список литературы

1. Мальцева В. С., Бурыкина О. В., Сазонова А. В. Кинетика сорбции кислотных красителей из водных растворов карбонатными породами и отходами кожевенного производства // Безопасность жизнедеятельности. 2014. № 6 (162). С. 16–22.
2. Кинетика сорбции ионов меди меловыми породами / Ф. Ф. Ниязи, В. С. Мальцева, О. В. Бурыкина, А. В. Сазонова // Известия Курского государственного технического университета. 2010. № 4 (33). С. 28–33.
3. Левина К. А., Лысенко А. В. Изучение кинетики сорбции древесными опилками сточных вод на основе красителя прямого красного 2С в различных условиях рН среды // Инновационные технологии защиты окружающей среды в современном мире: материалы Всероссийской научной конференции с международным участием молодых ученых и специалистов. Казань: Изд-во КНИТУ, 2021. С. 285–289.
4. Котова А. К., Сазонова А. В., Ниязи Ф. Ф. Использование отходов дробильно-обоганительного комплекса для очистки сточных вод от красителя катионный синий О // Фундаментальные и прикладные исследования в области химии и экологии: материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Курск: Университетская книга, 2015. С. 182–184.
5. Котова А. К., Лысенко А. В. Применение отходов дробильно-обоганительного комплекса для очистки сточных вод от катионных красителей // Химия и химическое образование: материалы III Международной научно-практической конференции. Благовещенск: Изд-во БГПУ, 2015. С. 77–79.
6. Будыкина Д. В., Разиньков Д. Ю., Бурыкина О. В. Исследование сорбционных способностей модифицированной глины для очистки сточных вод от промышленного красителя // Актуальные проблемы современной науки в 21 веке: сборник материалов

4-й Международной научно-практической конференции. Махачкала: Апробация, 2014. С. 13–14.

7. Исследование сорбционной способности карбонатных минералов Курской области на примере сорбции ионов меди / Н. В. Фролова, О. О. Пыхова, А. В. Сазонова, В. С. Мальцева, О. В. Бурыкина // Молодежь и XXI век – 2012: материалы IV Международной молодежной научной конференции. Курск: Университетская книга, 2012. С. 231–233.

8. Сазонова А. В., Лямцев С. Е. Перспективы использования природных сорбентов для очистки сточных вод от техногенных загрязнений // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2015. № 3 (16). С. 80–85.

9. Будыкина Т. А., Мальцева В. С., Сазонова А. В. Использование природного сорбента «Аквамаг» для очистки сточных вод // Актуальные проблемы химической науки, практики и образования: сборник статей Международной научно-практической конференции / Курск. гос. техн. ун-т. Курск, 2009. Т. 2. С. 90–92.

10. Очистка сточных вод от прямых красителей отходами деревообрабатывающей промышленности / К. И. Шабалина, В. С. Мяснянкина, А. В. Лысенко, В. С. Мальцева // Страна живет, пока работают заводы: сборник научных трудов Международной научно-технической конференции. Курск: ИП Пучков И. И., 2015. С. 388–391.

11. Левина К. А., Лысенко А. В. Изучение кинетики внешней диффузии в процессе сорбции прямого красного 2С модифицированными древесными опилками // Фундаментальные и прикладные исследования в области химии и экологии – 2021: сборник научных статей Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Курск: Университетская книга, 2021. С. 128–132.

12. Лысенко А. В., Левина К. А., Кувардин Н. В. Адсорбция прямых светопрочных красителей целлюлозным сырьем из водных растворов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2021. Т. 11, № 1. С. 114–129.

13. Левина К. А., Лысенко А. В. Исследование термодинамики сорбции красителя прямой красный 2С модифицированными целлюлозными сорбентами // Инновационные научные исследования. 2021. № 4 (6), ч. 1. С. 26–33.

14. Шабалина К. И., Мяснянкина В. С., Сазонова А. В. Влияние массы древесных опилок на степень сорбции прямых красителей из водных растворов в зависимости от pH среды // Фундаментальные и прикладные исследования в области химии и экологии: материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Курск: Университетская книга, 2015. С. 232–234.

15. Фрундина Д. А., Ветчинова Д. В., Лысенко А. В. Очистка сточных вод отходом сахарного производства от прямых красителей // Будущее науки-2017: сборник научных статей 5-я Международной молодежной научной конференции. Курск: Университетская книга, 2017. С. 340–343.
16. Кабашова А. Н., Белова Д. И. Современные требования к производству бумаги // Символ науки. 2020. № 12, ч. 1. С. 11–12.
17. Тарасов С. М., Азаров В. И., Ковернинский И. Н. Современные тенденции в развитии технологии производства бумаги и картона // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. 2003. № 5. С. 89–92.
18. Исследование кинетических кривых сорбции древесными опилками прямого синего КУ из водных растворов в зависимости от pH среды / К. А. Левина, А. А. Рухлина, А. В. Лысенко, Н. В. Кувардин // 21 век: фундаментальная наука и технологии: материалы XXV Международной научно-практической конференции. North Charleston: Lulu Press. Ins., 2021. С. 167–171.
19. Лысенко А.В., Янкив К. Ф., Левина К. А. Кинетика и константы скорости диффузии при сорбции прямых красителей древесными опилками // За нами будущее: взгляд молодых ученых на инновационное развитие общества: сборник научных статей Всероссийской молодежной научной конференции: в 4-х т. Курск: Университетская книга, 2020. С. 154–158.
20. Левина К. А., Лысенко А. В. Кинетика процесса адсорбции прямых красителей целлюлозным сырьем из промышленных вод // Инновационный потенциал развития общества: взгляд молодых ученых. сборник научных статей Всероссийской научной конференции перспективных разработок: в 2-х т. Курск: Университетская книга, 2020. С. 367–370.
21. The chemical composition of silver birch (*Betula pendula* Roth.) wood in Poland depending on forest stand location and forest habitat type / H. Lachowicz, H. Wroblewska, M. Sajdak, M. Komorowicz, R. Wojtan // Cellulose. 2019. Vol. 26. P. 3047–3067.
22. Фам Тхань Минь, Лебедева О. Е. Изучение кинетики и термодинамики адсорбции бриллиантового зеленого на магнитном композите // Региональные геосистемы. 2017. Т. 41, № 25 (274). С. 5–11.
23. Сорбция метиленового голубого на пленочных композитах этилцеллюлоза/бентонит / О. В. Алексеева, А. Н. Родионова, Н. А. Багровская, А. В. Носков, А. В. Агафонов // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2020. Т. 56, № 2, С. 126–131.
24. Шайхиев И. Г., Гальблауб О. А., Гречина А. С. Использование отходов от переработки ячменя в качестве сорбционных материалов для удаления поллютантов из водных сред (обзор литературы) // Вестник технологического университета. 2017. Т. 20, № 23. С. 110–117.

25. Петрова О. В., Котецкий В. В., Буринская А. А. Кинетика сорбции кислотных и активных красителей шерстяным волокном в присутствии окислительно-восстановительных систем // Журнал прикладной химии. 2004. № 5. С. 866–867.

26. Сазонова А. В. Термодинамика и кинетика сорбции поллютантов сточных вод нетрадиционными материалами: дис. ... канд. хим. наук. Курск, 2013. 148 с.

References

1. Maltseva V. S., Burykina O. V., Sazonova A. V. Kinetika sorbtsii kislotnykh krasitelei iz vodnykh rastvorov karbonatnymi porodami i otkhodami kozhevennogo proizvodstva [Kinetics of sorption of acid dyes from aqueous solutions by carbonate rocks and leather production waste]. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti = Safety of life*, 2014, no.6 (162), pp. 16–22.

2. Niyazi F. F., Maltseva V. S., Burykina O. V., Sazonova A. V. Kinetika sorbtsii ionov medi melovymi porodami [Kinetics of copper ion sorption by Cretaceous rocks]. *Izvestiya Kurskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings Kursk State Technical University*, 2010, no. 4 (33), pp. 28–33.

3. Levina K. A., Lysenko A. V. [Study of the kinetics of sorption by sawdust of wastewater based on direct red dye 2C in various pH conditions of the medium]. *Innovatsionnye tekhnologii zashchity okruzhayushchei sredy v sovremennom mire. Materialy Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem molodykh uchenykh i spetsialistov* [Innovative technologies of environmental protection in the modern world. Materials of the All-Russian scientific conference with international participation of young scientists and specialists]. Kazan, KNITU Publ., 2021, pp. 285–289. (In Russ.)

4. Kotova A. K., Sazonova A. V., Niyazi F. F. [The use of waste from the crushing and processing complex for wastewater treatment from the dye cationic blue O]. *Fundamental'nye i prikladnye issledovaniya v oblasti khimii i ekologii. Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Fundamental and applied research in the field of chemistry and ecology. Materials of the international scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists]. Kursk, Universitetskaya kniga Publ., 2015, pp. 182–184. (In Russ.)

5. Kotova A. K., Lysenko A. V. [The use of crushing and processing complex waste for wastewater treatment from cationic dyes]. *Khimiya i khimiche-skoe obrazovanie. Materialy III Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Chemistry and chemical education. Materials of the III International Scientific and Practical Conference]. Blagoveshchensk, BGPU Publ., 2015, pp. 77–79. (In Russ.)

6. Budykina D. V., Razinkov D. Y., Burykina O. V. [Investigation of sorption abilities of modified clay for wastewater treatment from industrial dye]. *Aktual'nye problemy sovremennoi nauki v 21 veke. Sbornik materialov 4-i Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Actual problems of modern science in the 21st century. Collection of materials of the 4th international scientific and practical conference]. Machchkala, Aprobatsiya Publ., 2014, pp. 13–14. (In Russ.)

7. Frolova N. V., Pykhova O. O., Sazonova A. V., Maltseva V. S., Burykina O. V. [Investigation of sorption capacity of carbonate minerals of the Kursk region on the example of sorption of copper ions. Youth and XXI century – 2012]. *Molodezh' i XXI vek – 2012. Materialy IV Mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchnoi konferentsii* [Materials of the IV International Youth Scientific Conference]. Kursk, Universitetskaya kniga Publ., 2012, pp. 231–233. (In Russ.)

8. Sazonova A. V., Lyamtsev S. E. Perspektivy ispol'zovaniya prirodnkh sorbentov dlya ochistki stochnykh vod ot tekhnogennykh zagryaznenii [Prospects for the use of natural sorbents for wastewater treatment from technogenic pollution]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2015, no. 3 (16), pp. 80–85.

9. Budykina T. A., Maltseva V. S., Sazonova A. V. [The use of natural sorbent "Aquamag" for wastewater treatment]. *Aktual'nye problemy khimicheskoi nauki, praktiki i obrazovaniya. Sbornik statei Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Actual problems of chemical science, practice and education. Collection of the International scientific and practical conference:]. Kursk, Kursk St. Techn. Univ. Publ., 2009, pp. 90–92. (In Russ.)

10. Shabalina K. I., Myasnyankina V. S., Lysenko A. V., Maltseva V. S. [Wastewater treatment from direct dyes by waste from the woodworking industry]. *Strana zhivet, poka rabotayut zavody. Sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [International Scientific and Technical Conference: The country lives while the factories are working]. Kursk, IP Puchkov I. I. 2015, pp. 388–391. (In Russ.)

11. Levina K. A., Lysenko A. V. [Study of the kinetics of external diffusion in the process of sorption of direct red 2C with modified sawdust]. *Fundamental'nye i prikladnye issledovaniya v oblasti khimii i ekologii – 2021. Sbornik nauchnykh statei Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Fundamental and applied research in chemistry and ecology – 2021. Collection of scientific articles of the International Scientific and Practical Conference of students, postgraduates and young scientists]. Kursk, Universitetskaya kniga Publ., 2021, pp. 128–132. (In Russ.)

12. Lysenko A. V., Levina K. A., Kuvardin N. V. Adsorbtsiya pryamykh svetoprochnykh krasitelei tsellyuloznym syr'em iz vodnykh rastvorov [Adsorption of direct light-strong dyes

with cellulose raw materials from aqueous solutions]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2021, vol. 11, no. 1, pp. 114–129.

13. Levina K. A., Lysenko A. V. Issledovanie termodinamiki sorbtsii krasitelya pryamoi krasnyi 2S modifitsirovannymi tsellyuloznymi sorbentami [Investigation of the thermodynamics of sorption of the dye straight red 2C with modified cellulose sorbents]. *Innovatsionnye nauchnye issledovaniya = Innovative scientific research*, 2021, no. 4 (6), pt. 1, pp. 26–33.

14. Shabalina K. I., Myasnyankina V. S., Sazonova A. V. [Influence of sawdust mass on the degree of sorption of direct dyes from aqueous solutions depending on the pH of the medium]. *Fundamental'nye i prikladnye issledovaniya v oblasti khimii i ekologii. Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Fundamental and applied research in the field of chemistry and ecology. Materials international scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists]. Kursk, Universitetskaya kniga Publ., 2015, pp. 232–234. (In Russ.)

15. Frundina D. A., Vetchinova D. V., Lysenko A. V. [Wastewater treatment by sugar production waste from direct dyes]. *Budushchee nauki-2017. Sbornik nauchnykh statei 5-ya Mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchnoi konferentsii* [The Future of Science-2017. Collection of scientific articles of the 5th International Youth Scientific Conference]. Kursk, Universitetskaya kniga Publ., 2017, pp. 340–343. (In Russ.)

16. Kabashova A. N., Belova D. I. Sovremennye trebovaniya k proizvodstvu bumagi [Modern requirements for paper production]. *Simvol nauki = Symbol of Science*, 2020, no. 12, pt. 1, pp. 11–12.

17. Tarasov S. M., Azarov V. I., Koverninsky I. N. Sovremennye tendentsii v razvitiitekhnologii proizvodstva bumagi i kartona [Modern trends in the development of paper and cardboard production technology]. *Vestnik MGUL – Lesnoi vestnik = Forestry Bulletin*, 2003, no. 5, pp. 89–92.

18. Levina K. A., Rukhlina A. A., Lysenko A. V., Kuvarin N. V. [Investigation of kinetic curves of sorption by sawdust of direct blue CU from aqueous solutions depending on the pH of the medium]. *21 vek: fundamental'naya nauka i tekhnologii. Materialy: XXV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [21st Century: fundamental science and technology. Materials of the XXV International scientific and practical conference]. Nosth Charleston, Lulu Press. Ins., 2021, pp. 167–171. (In Russ.)

19. Lysenko A. V., Yankiv K. F., Levina K. A. [Kinetics and diffusion rate constants during sorption of direct dyes with sawdust]. *Za nami budushchee: vzglyad molodykh*

uchenyykh na innovatsionnoe razvitie obshchestva. Sbornik nauchnykh statei Vserossiiskoi molodezhnoi nauchnoi konferentsii [The future is ours: a view of young scientists on the innovative development of society. Collection of scientific articles of the All-Russian Youth Scientific Conference]. Kursk, Universitetskaya kniga Publ., 2020, pp. 154–158. (In Russ.)

20. Levina K. A., Lysenko A. V. [Kinetics of the process of adsorption of direct dyes with cellulose raw materials from industrial waters]. *Innovatsionnyi potentsial razvitiya obshchestva: vzglyad molodykh uchenyykh. Sbornik nauchnykh statei Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii perspektivnykh razrabotok* [Innovative potential of society development: the view of young scientists. Collection of scientific articles of the All-Russian Scientific Conference of promising developments]. Kursk, Universitetskaya kniga Publ., 2020, pp. 367–370. (In Russ.)

21. Lachowicz H., Wroblewska H., Sajdak M., Komorowicz M., Wojtan R. The chemical composition of silver birch (*Betula pendula* Roth.) wood in Poland depending on forest stand location and forest habitat type. *Cellulose*, 2019, vol. 26, pp. 3047–3067.

22. Pham Thanh Minh, Lebedeva O. E. Izuchenie kinetiki i termodinamiki adsorbtsii brilliantovogo zelenogo na magnitnom kompozite [Study of kinetics and thermodynamics of adsorption of brilliant green on a magnetic composite]. *Regional'nye geosistemy = Regional geosystems*, 2017, vol. 41, no. 25 (274), pp. 5–11.

23. Alekseeva O. V., Rodionova A. N., Bagrovskaya N. A., Noskov A. V., Agafova A. V. Sorbtsiya metilenovogo golubogo na plenochnykh kompozitakh etilsellyuloza/bentonit [Sorption of methylene blue on ethyl cellulose film composites/bentonite]. *Fizikokhimiya poverkhnosti i zashchita materialov = Physicochemistry of the Surface and Protection of Materials*, 2020, vol. 56, no. 2, pp. 126–131.

24. Shaikhiev I. G., Galblaub O. A., Grechina A. S. Ispol'zovanie otkhodov ot pererabotki yachmenya v kachestve sorbtsionnykh materialov dlya udaleniya pollyutantov iz vodnykh sred (obzor literatury) [The use of waste from barley processing as sorption materials for the removal of pollutants from aqueous media (literature review)]. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta = Bulletin of the Technological University*, 2017, vol. 20, no. 23, pp. 110–117.

25. Petrova O. V., Kotetsky V. V., Burinskaya A. A. Kinetika sorbtsii kislotnykh i aktivnykh krasitelei sherstyanykh voloknom v prisutstvii okislitel'no-vosstanovitel'nykh sistem [Kinetics of sorption of acidic and active dyes by wool fiber in the presence of redox systems]. *Zhurnal prikladnoi khimii = Journal of Applied Chemistry*, 2004, no. 5, pp. 866–867.

26. Sazonova A. V., Emanuel N. M. Termodinamika i kinetika sorbtsii pollyutantov stokhnnykh vod netraditsionnymi materialami. Diss. kand. him. nauk [Thermodynamics and kinetics of sorption of wastewater pollutants with unconventional materials. Cand. chem. sci. diss.]. Kursk, 2013. 148 p.

Информация об авторах / Information about the Authors

Лысенко Анна Владимировна, кандидат химических наук, доцент кафедры фундаментальной химии и химической технологии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ginger313@mail.ru

Anna V. Lysenko, Cand. of Sci. (Chemistry), Associate Professor of the Department of Fundamental Chemistry and Chemical Technology, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: ginger313@mail.ru

Левина Кристина Андреевна, магистрант кафедры фундаментальной химии и химической технологии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kris.levina2015@yandex.ru

Kristina A. Levina, Undergraduate of the Department of Fundamental Chemistry and Chemical Technology, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kris.levina2015@yandex.ru

Фатьянова Елена Александровна, кандидат химических наук, доцент, доцент кафедры фундаментальной химии и химической технологии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: fatlen@yandex.ru

Elena A. Fatyanova, Cand. of Sci. (Chemistry), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Fundamental Chemistry and Chemical Technology, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: fatlen@yandex.ru

Дурнев Денис Алексеевич, студент кафедры фундаментальной химии и химической технологии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: denis1028durnev@mail.ru

Denis A. Durnev, Student of the Department of Fundamental Chemistry and Chemical Technology, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: denis1028durnev@mail.ru

Ефремова Анастасия, аспирант кафедры прикладной химии и химии окружающей среды, Университет Сегеды, Сегеди, Венгрия, e-mail: Efrisso@yandex.ru), ORCID: 0000-0002-2519-8987

Anastasia Efremova, Undergraduate of the Department of Applied Chemistry and Environmental Chemistry, University of Szeged, Szeged, Hungary, e-mail: Efrisso@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-2519-8987