

ЗАКОНОМЕРНОСТИ СОРБЦИИ КРАСИТЕЛЕЙ ТЕКСТИЛЬНЫХ ПРОИЗВОДСТВ НА АКТИВИРОВАННОМ УГЛЕ

М.Ю. Бабкин, Д.В. Филиппов, О.В. Захаров, А.А. Агеева

Михаил Юрьевич Бабкин (ORCID 0009-0007-4732-6058), Дмитрий Вячеславович Филиппов (ORCID 0000-0001-5296-2883)*, Анастасия Александровна Агеева (ORCID 0009-0006-0000-2649)

Кафедра неорганической химии, Ивановский государственный химико-технологический университет, пр. Шереметевский, 10, Иваново, Российская Федерация, 153000

E-mail: babkin@ekopromtekh.ru, filippov@isuct.ru*, ageevanasty2@yandex.ru

Олег Владимирович Захаров (ORCID 0009-0002-4281-5198)

ООО «Технолайн», Егорьевский проезд, д.2А, стр.1А, Москва, Российская Федерация, 109382

E-mail: zakharov@ekopromtekh.ru

В работе представлены результаты исследования процессов сорбции модельных красителей, применявшихся на текстильных предприятиях Ивановской области, активированным углем. Установлено, что экспериментальные зависимости величин сорбции красителей от их концентрации принадлежат к изотермам Лэнгмюра (L-типа). Для установления механизма сорбции и определения максимальной сорбционной емкости активированного угля по отношению к исследуемым красителям полученные данные были обработаны в рамках сорбционных моделей Ленгмюра, Фрейндлиха и Дубинина-Радушкевича. На основе экспериментальных данных рассчитаны термодинамические характеристики процесса сорбции, включая изменение энергии Гиббса, а также константы равновесий в рамках различных моделей. Показано, что адсорбция красителей во всех случаях является самопроизвольным процессом, что подтверждается значениями изменения энергии Гиббса. Наиболее интенсивно протекает сорбция NOVACRON Navy S-G, хотя при этом для данного красителя не наблюдается полного заполнения поверхностного слоя адсорбента. Максимальная степень заполнения поверхности составляет лишь 0,58 для NOVACRON Yellow EC-2R. Значения констант Генри также подтверждают, что наиболее легко сорбция протекает при низких концентрациях красителя. Характеристическая энергия и постоянные модели Фрейндлиха косвенно подтверждают факт благоприятного течения адсорбции. Результаты формальной обработки изотерм в координатах уравнения теории объемного заполнения микропор показали, что наиболее хорошо экспериментальные данные линеаризуются при допущении, что адсорбция протекает в объеме энергетически однородного микропористого адсорбента. Проведена оценка возможности применения активированного угля для обесцвечивания растворов красителей. Рассчитаны степени обесцвечивания, демонстрирующие эффективность угольного сорбента, несмотря на невысокие значения заполнения поверхности. Результаты исследования подтвердили перспективность использования активированного угля для удаления красителей из сточных вод текстильных предприятий Ивановской области.

Ключевые слова: красители, текстильные производства, сорбция, активированный уголь АРД

Для цитирования:

Бабкин М.Ю., Филиппов Д.В., Захаров О.В., Агеева А.А. Закономерности сорбции красителей текстильных производств на активированном угле. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2026. Т. 69. Вып. 2. С. 64–71. DOI: 10.6060/ivkkt.20266902.6801.

For citation:

Babkin M.Yu., Filippov D.V., Zakharov O.V., Ageeva A.A. The sorption regularities of textile production dyes on activated coal. *ChemChemTech* [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]. 2026. V. 69. N 2. P. 64–71. DOI: 10.6060/ivkkt.20266902.6801.

THE SORPTION REGULARITIES OF TEXTILE PRODUCTION DYES ON ACTIVATED COAL

M.Yu. Babkin, D.V. Filippov, O.V. Zakharov, A.A. Ageeva

Mikhail Yu. Babkin (ORCID 0009-0007-4732-6058), Dmitry V. Filippov (ORCID 0000-0001-5296-2883)*, Anastasia A. Ageeva (ORCID 0009-0006-0000-2649)

Inorganic Chemistry Department, Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Sheremetevskiy ave., 10, Ivanovo, 153000, Russia

E-mail: babkin@ekopromtekh.ru, filippov@isuct.ru*, ageevanasty2@yandex.ru

Oleg V. Zakharov (ORCID 0009-0002-4281-5198)

Deputy General Director of Technoline LLC, Egoryevsky proezd, 2A, bld. 1A, Moscow, 109382, Russia
E-mail: zakharov@ekopromtekh.ru

The paper presents the results of a study of sorption processes of model dyes used in textile enterprises of the Ivanovo region with activated carbon. To establish the sorption mechanism and determine the maximum sorption capacity of activated carbon relative to the dyes under study, the data obtained were processed using the Langmuir, Frendlich, and Dubinin-Radadkevich sorption models. Based on experimental data, the thermodynamic characteristics of the sorption process are calculated, including the change in Gibbs energy, as well as equilibrium constants within the framework of various models. It is shown that the adsorption of dyes in all cases is a spontaneous process, which is confirmed by the values of the Gibbs energy change. The sorption of NOVACRON Navy S-G proceeds most intensively, although for this dye there is no complete filling of the surface layer of the adsorbent. The maximum surface filling level is only 0.58 for NOVACRON Yellow EC-2R. The values of the Henry constants also confirm that sorption proceeds most easily at low dye concentrations. The characteristic energy and constants of the Frendlich model indirectly confirm the fact of a positive adsorption flow. The results of the formal processing of isotherms in the coordinates of the equation of the theory of volumetric filling of micropores have shown that the experimental data are linearized most well under the assumption that adsorption takes place in the volume of an energetically homogeneous microporous adsorbent. The possibility of using activated carbon for discoloration of dye solutions has been evaluated. The degrees of discoloration are calculated, demonstrating the effectiveness of the carbon sorbent, despite the low values of surface filling. The results of the study confirmed the prospects of using activated carbon to remove dyes from wastewater from textile enterprises in the Ivanovo region.

Keywords: dyes, textile production, sorption, activated carbon ARD

ВВЕДЕНИЕ

Предприятия текстильной промышленности потребляют значительное количество водных ресурсов, которые становятся непригодными для дальнейшего использования в результате их загрязнения красящими веществами [1-6]. Красители имеют сложную структуры [7-12] и способны оказывать токсическое воздействие на окружающую среду [13-17]. В настоящее время реагентная очистка представляет собой наиболее распространенный способ перевода поллютантов из растворов в нерастворимый осадок. Однако значительная часть используемых коагулянтов и флокулянтов не позволяет достичь высокой степени очистки и, прежде всего, обесцвечивания стока [18-20]. Кроме того, синтетические красители зачастую обладают

высокой устойчивостью к биоразложению, что затрудняет их удаление традиционными методами очистки.

В ряде работ [21-23] была доказана эффективность использования активированного угля в процессах сорбции красителей из растворов.

С целью повышения эффективности применения активированных углей для доочистки стоков после химической обработки представляется интересным исследовать особенности сорбции ряда красителей на угольном сорбенте.

Цель данного исследования – изучить закономерности сорбции модельных красителей на активированном угле АРД, определить характеристики сорбционных равновесий и термодинамические параметры процессов, протекающих в поверхностных слоях сорбента.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Выбор красителей обусловлен их применением в реальных технологических процессах крашения тканей, реализуемых на текстильных предприятиях Ивановской области. В работе применяли коммерческие азокрасители – NOVACRON Deep Cherry S-D, NOVACRON Navy S-G, NOVACRON Ocean S-R, NOVACRON Ruby S-3B, NOVACRON Yellow EC-RG.

Для сорбции использовали активированный уголь АРД. Выбор данного сорбента для исследования обусловлен его высокой доступностью. Кроме того, он обладает развитой пористой структурой (суммарный объем пор по воде составляет не менее 0,8 см³/г) и большой удельной поверхностью (не менее 750 м²/г), что обеспечивает высокую адсорбционную способность.

Сорбционные эксперименты осуществляли при температуре 298,15 К. Растворы красителей готовили с концентрациями: 0,005; 0,01; 0,02; 0,03; 0,04 г/л. По 10 мл раствора каждого красителя помещали в пробирки с известным количеством сорбента 0,005 - 0,01 г. Сорбционные процессы реализовывали на орбитальном шейкере IKA HS 260 control NOL с постоянной скоростью перемешивания (600 об/мин), в течение 45-60 мин при комнатной температуре. Затем растворы отстаивали в течение 1 сут. Для определения концентрации красителей до и после сорбции использовали спектрофотометрический метод.

Величины избыточных адсорбций Γ_i (г/г), рассчитывались по равновесным концентрациям красителя по уравнению (1):

$$\Gamma_i = \frac{c_{\text{нач}} - c_{\text{ост}}}{m} \cdot V_0 \quad (1)$$

где $c_{\text{нач}}$ – начальная концентрация красителя, г/л; $c_{\text{ост}}$ – остаточная концентрация после сорбции, г/л; V_0 – объем пробы модельного раствора красителя, пропущенный через сорбент, л; m – масса образца сорбента, г.

Необходимо отметить, что в теории адсорбции сорбционная емкость имеет физический смысл величин избыточной адсорбции Γ_i , которые соответствуют количеству молей адсорбата, определяемому избыточной концентрацией вещества в поверхностном слое по сравнению с объемной фазой. Для корректного определения термодинамических параметров равновесия необходим переход к полным величинам адсорбции A_i . Поскольку процессы адсорбции изучались при относительно низких концентрациях красителя, в данном случае величины избыточных адсорбций не будут существенно отличаться от полных адсорбций.

Для получения сорбционных характеристик процесса изотермы адсорбции красителя обрабатывали в линейных координатах моделей Лэнгмюра (2), Фрейндлиха (3) и Дубинина-Радушкиевича (4):

$$\frac{C}{A} = \frac{1}{A_m} \cdot C + \frac{1}{A_m b} \quad (2)$$

$$\ln A = \ln K_F + \frac{1}{n} \cdot \ln C \quad (3)$$

$$\ln A = \ln A_m + \frac{RT}{B} \left(\ln \frac{C_s}{C_\tau} \right)^2, \quad (4)$$

где: C и C_τ – равновесная и текущая концентрация красителя соответственно, моль/л; A и A_m – равновесная и предельная величина сорбции, мг/г; R – газовая постоянная, Дж/моль·К; T – абсолютная температура, К; B = βE – константа уравнения Дубинина-Радушкиевича; E – характеристическая энергия адсорбента, кДж/моль; $1/n$ – характеристическая константа, определяющая благоприятное течение адсорбции; b – адсорбционный коэффициент Лэнгмюра, л/моль; K_F – константа Фрейндлиха.

Статистическое исследование показало, что средние погрешности избыточных адсорбций составляют от 5 до 9% от измеряемых значений [24].

Кроме того, были определены значения констант Генри H_i , которые с точки зрения физического смысла совпадают с термодинамическими коэффициентами распределения адсорбата при низких концентрациях растворенного вещества [25].

Значения констант Генри H_i рассчитывали по формуле (5):

$$H_i = A_m \cdot b \quad (5)$$

Дополнительно, с использованием известных термодинамических соотношений, были определены изменения энергии Гиббса в процессе адсорбции в условиях эксперимента [25].

Для расчета величин изменения энергии Гиббса (ΔG_a^0 , кДж/моль) использовали уравнение:

$$\Delta G_a^0 = -RT \cdot \ln(b) \quad (6)$$

В рамках формальной обработки данных величины A_i и определенная предельная адсорбция A_m были использованы для расчета степеней заполнения поверхности θ для каждого сорбента.

Значения степени заполнения поверхности определяли по формуле:

$$\theta = \frac{A_i}{A_m} \quad (7)$$

Расчет степени обесцвечивания вели по формуле (8):

$$\alpha = \left(1 - \frac{C_{\text{ост}}}{C_{\text{нач}}} \right) \cdot 100\%, \quad (8)$$

где $C_{\text{ост}}$ – остаточная концентрация после полного

осаждения частиц, г/л; $C_{\text{нач}}$ – начальная концентрация до осаждения, г/л.

Следует отметить, что численные значения всех параметров, а также термодинамических величин рассчитывались как среднее из 5-7 измерений. Погрешность определяли с учетом критерия Стьюдента для доверительного интервала 0,95.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты экспериментов по влиянию концентрации красителя на величины адсорбции приведены на рис. 1.

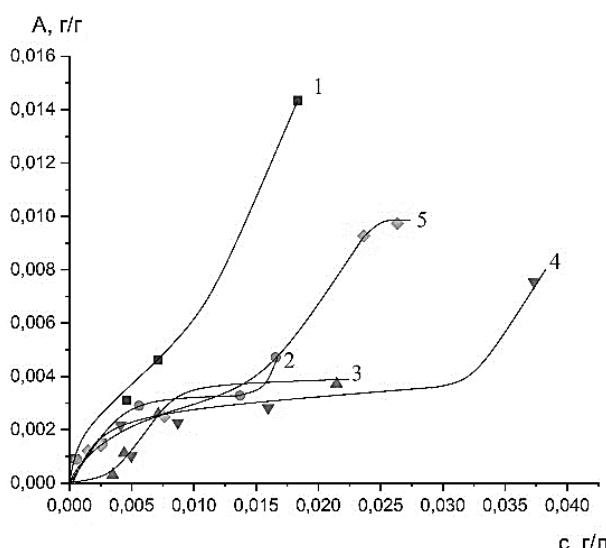


Рис. 1. Изотермы адсорбции красителей: NOVACRON Ruby S-3B - 1, NOVACRON Deep Cherry S-D - 2, NOVACRON Ocean S-R - 3, NOVACRON Navy S-G - 4, NOVACRON Yellow FN-2R - 5

Fig. 1. Isotherms of dye adsorption: NOVACRON Ruby S-3B - 1, NOVACRON Deep Cherry S-D - 2, NOVACRON Ocean S-R - 3, NOVACRON Navy S-G - 4, NOVACRON Yellow FN-2R - 5

Полученные изотермы адсорбции красителей по классификации Гильса принадлежат к изотермам Лэнгмюра (L-типа) [25, 26]. Изотермы класса L на начальном участке вогнуты относительно оси концентраций, по мере увеличения концентрации адсорбция достигает насыщения и приводит к образованию плато, перегиб на изотерме может быть связан с изменением ориентации молекул адсорбируемого растворенного вещества. Адсорбция быстро увеличивается с ростом концентрации.

Изотермы адсорбции обрабатывали с помощью линейных координат уравнения Лэнгмюра. Примеры линеаризации экспериментальных изотерм в рамках модели Лэнгмюра представлены на рис. 2.

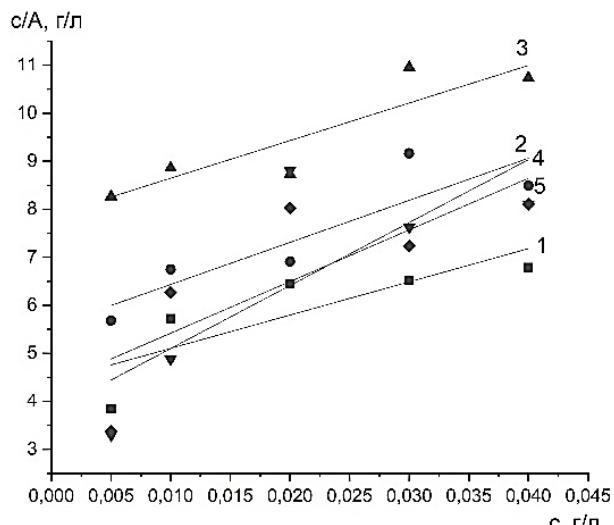


Рис. 2. Линеаризация изотерм адсорбции красителей в координатах модели Лэнгмюра: NOVACRON Ruby S-3B - 1, NOVACRON Deep Cherry S-D - 2, NOVACRON Ocean S-R - 3, NOVACRON Navy S-G - 4, NOVACRON Yellow FN-2R - 5
Fig. 2. Linearization of dye adsorption isotherms in Langmuir model coordinates: NOVACRON Ruby S-3B - 1, NOVACRON Deep Cherry S-D - 2, NOVACRON Ocean S-R - 3, NOVACRON Navy S-G - 4, NOVACRON Yellow FN-2R - 5

Рассчитанные значения постоянных уравнения Лэнгмюра, констант Генри, изменения энергии Гиббса и максимальной степени заполнения поверхности приведены в табл. 1.

Таблица 1

Постоянные уравнения Лэнгмюра, рассчитанные константы Генри, изменения энергии Гиббса и максимальной степени заполнения для сорбции различных красителей

Table 1. Langmuir equation constants, calculated Henry constants, changes in Gibbs energy, and maximum degree of filling for the sorption of various dyes

Краситель	$A_m \cdot 10^3$, г/г	b	R^2	h_i	$-\Delta G_a^0$, Дж/моль	θ
NOVACRON Yellow EC-2R	9,8	16,71	0,62	0,16	6977,81	0,58
NOVACRON Ruby S-3B	14,44	15,69	0,68	0,22	6821,05	0,40
NOVACRON Deep Cherry S-D	11,41	15,76	0,79	0,17	6832,56	0,31
NOVACRON Ocean S-R	12,77	9,95	0,81	0,12	5693,24	0,34
NOVACRON Navy S-G	7,76	34,61	0,63	0,26	8781,57	0,48

Примечание: * Погрешности величин в таблице не указаны, они не превышают 7%

Note: * Errors in the values in the table are not indicated. They do not exceed 7%

Можно отметить, что линеаризация экспериментальных данных в рамках модели Лэнгмюра достигается с достаточной точностью ($R^2 > 0,6$).

В целом, адсорбция красителей во всех случаях является самопроизвольным процессом, что подтверждается значениями изменения энергии Гиббса. Наиболее интенсивно протекает сорбция NOVACRON Navy S-G, хотя при этом для данного красителя не наблюдается полного заполнения поверхностного слоя адсорбента. Максимальная степень заполнения поверхности составляет лишь 0,58 для NOVACRON Yellow EC-2R. При достижении предельных величин сорбции, которые соответствуют высоким концентрациям красителя в растворе, наблюдается снижение эффективности процесса сорбции. Значения констант Генри также подтверждают, что наиболее легко сорбция протекает при низких концентрациях красителя.

Сорбция красителей проходит на активных центрах поверхности, которые могут быть заняты молекулами растворителя. Вероятно, процесс реализуется по конкурентному механизму, где компоненты растворителя, адсорбированные на активных центрах, вытесняются красителями [27]. Важно отметить, что межфазная поверхность является инертной и не вступает в химическое взаимодействие с красителями. Величина удельной поверхности твердого сорбента в процессе адсорбции не изменяется, поэтому адсорбция преимущественно происходит в мономолекулярном адсорбционном слое, а емкость монослоя остается постоянной.

Обработку изотерм адсорбции красителей проводили также в линейных координатах модели Фрейндлиха, которая может быть использована наиболее успешно для характеристики свойств различных типов углеродных сорбентов с пористой структурой. Она описывает процессы адсорбции на поверхности с экспоненциальной неоднородностью. Рассчитанные значения постоянных уравнения Фрейндлиха приведены в табл. 2.

Таблица 2

Постоянные уравнения Фрейндлиха
Table 2. Freundlich's constant equations

Краситель	<i>n</i>	<i>K_F</i>	<i>R²</i>
NOVACRON Yellow EC-2R	0,93	0,26	0,80
NOVACRON Ruby S-3B	0,83	0,41	0,90
NOVACRON Deep Cherry S-D	1,26	0,05	0,98
NOVACRON Ocean S-R	0,77	0,34	0,93
NOVACRON Navy S-G	1,73	0,02	0,75

Примечание: * Погрешности величин в таблице не указаны, они не превышают 7%

Note: * Errors in the values in the table are not indicated. They do not exceed 7%

Из линейных координат изотермы Фрейндлиха получены значения характеристических констант *K_F* и *1/n*. Для сорбции всех красителей значение *n* находится в пределах от 0,7 до ~2, что косвенно подтверждает факт благоприятного течения адсорбции. Величины константы *K_F* при этом достаточно невелики.

Обработку изотерм адсорбции красителей проводили также в линейных координатах изотермы теории объемного заполнения пористого пространства ТОЗМ при различных показателях *n*. Результаты формальной обработки показали, что наиболее хорошо экспериментальные данные линеаризуются при *n* = 2 ($R^2 = 0,96-0,98$), что подтверждает протекание адсорбции в объеме энергетически однородного микропористого адсорбента.

Рассчитанные значения постоянных уравнения ТОЗМ при предположении микропористого типа структуры адсорбента приведены в табл. 3.

Таблица 3
Постоянные уравнения ТОЗМ
Table 3. The constant equations of TOSM

Краситель	<i>A_m</i> , г/г	<i>E</i> , Дж/моль	<i>R²</i>
NOVACRON Yellow EC-2R	1,86	8356,64	0,96
NOVACRON Ruby S-3B	0,20	10278,75	0,99
NOVACRON Deep Cherry S-D	0,10	11379,86	0,99
NOVACRON Ocean S-R	0,56	8673,23	0,98
NOVACRON Navy S-G	1,39	8438,64	0,98

Примечание: * Погрешности величин в таблице не указаны, они не превышают 7%

Note: * Errors in the values in the table are not indicated. They do not exceed 7%

Полученные данные свидетельствуют, что характеристическая энергия, определенная по линейным координатам изотермы Дубинина-Радушкича, в пределах погрешности остается величиной постоянной. Следовательно, можно предположить, что сорбция протекает в энергетически однородном пористом пространстве сорбента.

По изменению концентрации модельных красителей до сорбции и после были определены степени обесцвечивания их растворов на угле АРД. Результаты приведены в табл. 4.

ВЫВОДЫ

Таким образом, использование активированного угля АРД для доочистки от красителей является вполне разумным вариантом, сочетающим в себе эффективность, экономичность и экологическую безопасность. Адсорбция любых поллютантов стока зависит от множества факторов, включая тип используемого сорбента, природу красителя,

pH среды, температуру и концентрацию загрязнителя. Однако подбор оптимальных условий на основе полученных термодинамических характеристик позволит достичь максимальных величин степени обесцвечивания и оптимизировать процесс очистки сточных вод текстильных производств.

Для углубленного понимания механизма сорбции необходимо учитывать структуру и свой-

ства активированного угля, такие как удельная поверхность, размер пор и наличие функциональных групп на поверхности. Анализ влияния различных факторов на адсорбционную способность угля позволит разработать более эффективные методы его применения в процессах очистки сточных вод от красителей.

Таблица 4

Степени обесцвечивания для различных красителей по результатам сорбционных исследований
Table 4. Degrees of decolorization for various dyes based on sorption studies

$C_{\text{нач}}$, г/л	$C_{\text{ост}} \cdot 10^3$, г/л	α , %
NOVACRON Yellow EC-2R		
0,005	0,51	89,80
0,01	1,49	85,08
0,02	7,60	61,95
0,03	23,63	21,16
0,04	26,31	34,11
NOVACRON Ruby S-3B		
0,005	0,43	91,34
0,01	2,59	74,03
0,02	4,56	77,16
0,03	7,11	76,28
0,04	18,36	54,08
NOVACRON Deep Cherry S-D		
0,005	0,61	87,64
0,01	2,62	73,74
0,02	5,259	72,00
0,03	13,70	54,31
0,04	16,56	58,59
NOVACRON Ocean S-R		
0,005	3,47	30,59
0,01	4,38	56,16
0,02	7,12	64,38
0,03	4,93	83,56
0,04	21,46	46,34
NOVACRON Navy S-G		
0,005	4,10	17,86
0,01	4,96	50,38
0,02	8,70	56,48
0,03	19,95	46,81
0,04	37,32	6,67

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.

ЛИТЕРАТУРА

1. Iwuozor K.O. Prospects and challenges of using coagulation-flocculation method in the treatment of effluents. *Advan. J. Chem.-Sec. A.* 2019. V. 2. N 2. P. 105-127. DOI: 10.29088/SAMI/AJCA.2019.2.105127.
2. Pandey P., Khan F., Mishra R., Singh S.K. Elucidation of the potential of *Moringa oleifera* leaves extract as a novel alternate to the chemical coagulant in water treatment process.

REFERENCES

1. Iwuozor K.O. Prospects and challenges of using coagulation-flocculation method in the treatment of effluents. *Advan. J. Chem.-Sec. A.* 2019. V. 2. N 2. P. 105-127. DOI: 10.29088/SAMI/AJCA.2019.2.105127.
2. Pandey P., Khan F., Mishra R., Singh S.K. Elucidation of the potential of *Moringa oleifera* leaves extract as a novel alternate to the chemical coagulant in water treatment process.

- Water Environ. Res.* 2020. V. 92. N 7. P.1051-1056. DOI: 10.1002/wer.1300.
3. **Khan M. D., Singh A., Khan M.Z., Tabraiz S., Sheikh J.** Current perspectives, recent advancements, and efficiencies of various dye-containing wastewater treatment technologies. *J. Water Proc. Eng.* 2023. V. 53. P. 103579. DOI: 10.1016/j.jwpe.2023.103579.
 4. **Beard J.C., Swager T.M.** An organic chemist's guide to N-nitrosamines: their structure, reactivity, and role as contaminants. *J. Org. Chem.* 2021. V. 86. N 3. P. 2037-2057. DOI: 10.1021/acs.joc.0c02774.
 5. **Mcyotto F., Wei Q., Macharia D.K., Huang M.** Effect of dye structure on color removal efficiency by coagulation. *Chem. Eng. J.* 2021. V. 405. P. 126674. DOI: 10.1016/j.cej.2020.126674.
 6. Кулентсан А.Л., Марчук Н.А., Легошин Д.А., Ширяев М.Ю., Пузанов А.М., Манукян Л.Т. Анализ сброса загрязненных сточных вод в регионах Центрального федерального округа. *Рос. хим. ж.* 2025. Т. 69. № 2. С. 83-90. DOI: 10.6060/rcj.2025692.10.
 7. **Islam T., Repon Md.R., Tarikul Islam T., Sarwar Z., Rahman M.M.** Impact of textile dyes on health and ecosystem: a review of structure, causes, and potential solutions. *Envir. Sci. Pol. Res.* 2023. V. 30. P. 9207-9242. DOI: 10.1007/s11356-022-24398-3.
 8. **Samsami S., Mohamadi M., Sarrafzadeh M.H., Rene E.R.** Recent advances in the treatment of dye-containing wastewater from textile industries: Overview and perspectives. *Proc. Saf. Environ. Protec.* 2020. V. 143. P. 138-163. DOI: 10.1016/j.psep.2020.05.034.
 9. **Jorge A. M.S., Athira K K, Alves M.B.N., Gardas R.L.** Textile dyes effluents: A current scenario and the use of aqueous biphasic systems for the recovery of dyes. *J. Water Proc. Eng.* 2023. V. 55. P. 104125. DOI: 10.1016/j.jwpe.2023.104125.
 10. **Alsukaibi A. K.D.** Various approaches for the detoxification of toxic dyes in wastewater. *Processes.* 2022. V. 10. N 10. P. 1968. DOI: 10.3390/pr10101968.
 11. **Benkhaya S., Souad M., Ahmed E.H.** Classifications, properties, recent synthesis and applications of azo dyes. *Heliyon.* 2020. V. 6. N 1. P. 3271. DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e03271.
 12. **Repon Md.R., Dev B., Rahman Md. A., Jurkoniene S.** Textile dyeing using natural mordants and dyes: a review. *Environ. Chem. Lett.* 2024. V. 22. N 3. P. 1473-1520. DOI: 10.1007/s10311-024-01716-4.
 13. **Akter T., Protity A.T., Shaha M., Al- Mamun M., Ha-shem A.** The impact of textile dyes on the environment. Nanohybrid materials for treatment of textiles dyes. Singapore: Sprin. Nature Singapore. 2023. P. 401-431. DOI: 10.4018/978-1-7998-0311-9.ch008.
 14. **Бабкин М.Ю., Филиппов Д.В., Захаров О.В., Гущин А.А., Агеева А.А.** Разработка метода синтеза полимерного коагулянта на основе дициандиамида. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2023. Т. 66. Вып. 8. С. 129-134. DOI: 10.6060/ivkkt.20236608.6779.
 15. **Любушкин Т.Г., Кузин Е.Н., Иванцова Н.А., Конькова Т.В.** Оценка возможности использования пероксидсерной кислоты в процессах очистки сточных вод, содержащих синтетические красители. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2025. Т. 68. Вып. 1. С. 120-126. DOI: 10.6060/ivkkt.20256801.7124.
 16. **Бабкин М.Ю., Захаров О.В., Агеева А.А., Филиппов Д.В.** Особенности кинетики осаждения загрязнителей в сточных водах текстильных производств при использовании коагулянтов различной природы. *Вестн. науч.-*
- Water Environ. Res.* 2020. V. 92. N 7. P.1051-1056. DOI: 10.1002/wer.1300.
3. **Khan M. D., Singh A., Khan M.Z., Tabraiz S., Sheikh J.** Current perspectives, recent advancements, and efficiencies of various dye-containing wastewater treatment technologies. *J. Water Proc. Eng.* 2023. V. 53. P. 103579. DOI: 10.1016/j.jwpe.2023.103579.
 4. **Beard J.C., Swager T.M.** An organic chemist's guide to N-nitrosamines: their structure, reactivity, and role as contaminants. *J. Org. Chem.* 2021. V. 86. N 3. P. 2037-2057. DOI: 10.1021/acs.joc.0c02774.
 5. **Mcyotto F., Wei Q., Macharia D.K., Huang M.** Effect of dye structure on color removal efficiency by coagulation. *Chem. Eng. J.* 2021. V. 405. P. 126674. DOI: 10.1016/j.cej.2020.126674.
 6. **Kulentsan A.L., Marchuk N.A., Legoshin D.A., Shiryaev M.Yu., Puzanov A.M., Manukyan L.T.** Analysis of polluted wastewater discharge in the regions of the Central Federal District. Russian Chemical Engineering region). *Ross. Khim. Zhurn.* 2025. V. 69. N 2. P. 83-90 (in Russian). DOI: 10.6060/rcj.2025692.10.
 7. **Islam T., Repon Md.R., Tarikul Islam T., Sarwar Z., Rahman M.M.** Impact of textile dyes on health and ecosystem: a review of structure, causes, and potential solutions. *Envir. Sci. Pol. Res.* 2023. V. 30. P. 9207-9242. DOI: 10.1007/s11356-022-24398-3.
 8. **Samsami S., Mohamadi M., Sarrafzadeh M.H., Rene E.R.** Recent advances in the treatment of dye-containing wastewater from textile industries: Overview and perspectives. *Proc. Saf. Environ. Protec.* 2020. V. 143. P. 138-163. DOI: 10.1016/j.psep.2020.05.034.
 9. **Jorge A. M.S., Athira K K, Alves M.B.N., Gardas R.L.** Textile dyes effluents: A current scenario and the use of aqueous biphasic systems for the recovery of dyes. *J. Water Proc. Eng.* 2023. V. 55. P. 104125. DOI: 10.1016/j.jwpe.2023.104125.
 10. **Alsukaibi A. K.D.** Various approaches for the detoxification of toxic dyes in wastewater. *Processes.* 2022. V. 10. N 10. P. 1968. DOI: 10.3390/pr10101968.
 11. **Benkhaya S., Souad M., Ahmed E.H.** Classifications, properties, recent synthesis and applications of azo dyes. *Heliyon.* 2020. V. 6. N 1. P. 3271. DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e03271.
 12. **Repon Md.R., Dev B., Rahman Md. A., Jurkoniene S.** Textile dyeing using natural mordants and dyes: a review. *Environ. Chem. Lett.* 2024. V. 22. N 3. P. 1473-1520. DOI: 10.1007/s10311-024-01716-4.
 13. **Akter T., Protity A.T., Shaha M., Al- Mamun M., Ha-shem A.** The impact of textile dyes on the environment. Nanohybrid materials for treatment of textiles dyes. Singapore: Sprin. Nature Singapore. 2023. P. 401-431. DOI: 10.4018/978-1-7998-0311-9.ch008.
 14. **Babkin M.Yu., Filippov D.V., Zakharov O.V., Gushchin A.A., Ageeva A.A.** The synthesis method development of poly-meric coagulant based on dicyandiamide. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]* 2023. V. 66. N 8. P. 129-134 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20236608.6779.
 15. **Liubushkin T.G., Kuzin E.N., Ivantsova N.A., Konkova T.V.** Assessment of the possibility of using peroxodisulfuric acid in the treatment processes of wastewater containing synthetic dyes. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]* 2025. V. 68. N 1. P. 120-126 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20256801.7124.
 16. **Babkin M.Yu., Zakharov O.V., Ageeva A.A., Filippov D.V.** Features of the kinetics of pollutant sedimentation in

- центр ВостНИИ по промыш. и экол. безоп. 2024. Т. 2. С. 78-83. DOI: 10.25558/VOSTNII.2024.89.45.001.
17. **Karri R.R., Ravindran G., Dehghani M.H.** Wastewater – sources, toxicity, and their consequences to human health. Soft comp. techn. in solid waste and wastewater manag. Elsevier. 2021. P. 3-33. DOI: 10.1016/B978-0-12-824463-0.00001-X.
 18. **Belpaire C. Reynolds T., Geeraerts C., Loco J.V.** Toxic textile dyes accumulate in wild European eel *Anguilla*. *Chemosphere*. 2015. V. 138. P. 784-791. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2015.08.007.
 19. **Lin J., Ye W., Xie M., Seo D.H.** Environmental impacts and remediation of dye-containing wastewater. *Nat. Rev. Earth Envir.* 2023. V. 4. N 11. P. 785-803. DOI: 10.1038/s43017-023-00489-8.
 20. **Virginia I.R., Raina M.M.** Aquatic Environments. *Environ. Microbiol.* 2015. V. 4. P. 111-138. DOI: 10.1016/B978-0-12-394626-3.00006-5.
 21. **Краснова Т.А., Беляева О.В., Кирсанов М.П.** Использование активных углей в процессах водоподготовки и водоотведения. *Tex. и техн. пищ. произв.* 2012. Т. 26. № 3. С. 46-56.
 22. **Домрачева В.А., Трусова В.В., Остапчук Д.Е.** Очистка сточных вод от нефтепродуктов с использованием комбинированных сорбентов. *Экол. и промыш. России*. 2020. Т. 24. № 9. С. 11-15. DOI: 10.18412/1816-0395-2020-9-11-15.
 23. Адсорбция из растворов на поверхностях твердых тел. Под ред. Г. Парфита, В.И. Лыгина. М.: Мир. 1986. 488 с.
 24. **Улитин М.В., Филиппов Д.В., Федорова А.А.** Поверхностные явления. Адсорбция. Иваново: ИГХТУ. 2014. 206 с.
 25. **Борисова С.Д.** Биотестирование. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т. 2015. 64 с.
 26. **Воронюк, И.В., Елисеева Т.В., Свиридова Е.С., Селеменев В.Ф., Сушкова А.А., Шолохова А.Ю.** Особенности сорбционного извлечения 4-гидроксибензальдегида из водных растворов активированным углем Norit GAC 1240W. *Сорбц. и хром. процессы*. 2021. Т. 21. № 1. С. 119. DOI: 10.17308/sorpcchrom.2021.21/3227.
 27. **Половнева Д.П., Старостина И.В.** Исследование механизма процесса сорбции красителя эозина на химически активированными углеродсодержащими сорбционными материалами. *Рос. хим. журн.* 2024. Т. 68. № 2. С. 45- 52. DOI: 10.6060/rchj.2024682.6.
 17. **Karri R.R., Ravindran G., Dehghani M.H.** Wastewater – sources, toxicity, and their consequences to human health. Soft comp. techn. in solid waste and wastewater manag. Elsevier. 2021. P. 3-33. DOI: 10.1016/B978-0-12-824463-0.00001-X.
 18. **Belpaire C. Reynolds T., Geeraerts C., Loco J.V.** Toxic textile dyes accumulate in wild European eel *Anguilla*. *Chemosphere*. 2015. V. 138. P. 784-791. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2015.08.007.
 19. **Lin J., Ye W., Xie M., Seo D.H.** Environmental impacts and remediation of dye-containing wastewater. *Nat. Rev. Earth Envir.* 2023. V. 4. N 11. P. 785-803. DOI: 10.1038/s43017-023-00489-8.
 20. **Virginia I.R., Raina M.M.** Aquatic Environments. *Environ. Microbiol.* 2015. V. 4. P. 111-138. DOI: 10.1016/B978-0-12-394626-3.00006-5.
 21. **Krasnova T.A., Belyaeva O.V., Kirsanov M.P.** Use of activated carbons in water treatment and water disposal processes. *Tekh. Tekh. Pisch. Proizv.* 2012. V. 26. N 3. P. 46-56 (in Russian).
 22. **Domracheva V., Trusova V., Ostapchuk D.** Purification of Waste Water from Petroleum Products with the Use of Combined Sorbents. *Ekol. Promysh. Ross.* 2020. V. 24. N 9. P. 11-15 (in Russian). DOI: 10.18412/1816-0395-2020-9-11-15.
 23. Adsorption from solutions on solid surfaces. Ed. by G. Parfit, V.I. Lygin. M.: Mir. 1986. 488 p. (in Russian).
 24. **Ulitin M.V., Filippov D.V., Fedorova A.A.** Surface phenomena. Adsorption. Ivanovo: ISUCT. 2014. 206 p. (in Russian).
 25. **Borisova S.D.** Biotesting. Kazan': Kazan. Gos. Energ. Univ. 2015. 64 p. (in Russian).
 26. **Voronyuk, I.N., Eliseeva T.V., Sviridova E.S., Selemenev V.F., Sushkova A.A., Sholokhova A.Yu.** Features of sorption of 4-hydroxybenzaldehyde from aqueous solutions by Norit GAC 1240W activated carbon. *Sorbs. Khromatogr. Protsessy*. 2021. V. 21. N 1. P. 119 (in Russian). DOI: 10.17308/sorpcchrom.2021.21/3227.
 27. **Polovneva D.P., Starostina I.V.** Study of the Mechanism of the Eosin Dye Sorption Process by Chemically Activated Carbon-Containing Sorption Materials. *Ross. Khim. Zhurn.* 2024. V. 68. N 2. P. 45- 52 (in Russian). DOI: 10.6060/rchj.2024682.6.

Поступила в редакцию 16.10.2025
Принята к опубликованию 21.10.2025

Received 16.10.2025
Accepted 21.10.2025