

СОВМЕСТНАЯ АДсорбция КРАСИТЕЛЕЙ МЕТИЛЕНОВОГО СИНЕГО И МЕТАНИЛОВОГО ЖЕЛТОГО НА УГЛЕРОДНЫХ СОРБЕНТАХ

© А. В. Седанова, Н. В. Корниенко, М. С. Делягина*, Л. Г. Пьянова,
В. А. Дроздов, А. В. Лавренев

Центр новых химических технологий ИК СО РАН, Институт катализа СО РАН,
644040, г. Омск, ул. Нефтезаводская, д. 54
* E-mail: medugli@ihcp.ru; medugli@mail.ru

Поступила в Редакцию 2 октября 2023 г.
После доработки 9 февраля 2024 г.
Принята к публикации 16 февраля 2024 г.

Исследована совместная адсорбция красителей метиленового синего и метанилового желтого на углеродном сорбенте типа Сибунит и этом же сорбенте, модифицированном салициловой кислотой. Присутствие модификатора в составе модифицированного образца влияет на его физико-химические свойства: текстурные характеристики, количественный состав поверхностных функциональных групп, рН точки нулевого заряда, адсорбционную емкость. Установлено, что из смеси красителей метиленовый синий адсорбируется сорбентами лучше, чем из индивидуального раствора. В присутствии метиленового синего на модифицированном образце величина адсорбции метанилового желтого также возрастает. Показано, что экспериментальные изотермы адсорбции метанилового желтого на образцах углеродных сорбентов в области исследуемых концентраций описываются уравнением Фрейндлиха.

Ключевые слова: углеродный сорбент; совместная адсорбция; салициловая кислота; метиленовый синий; метаниловый желтый

DOI: 10.31857/S0044461824010092; EDN: XZGPXT

Для прогнозирования эффективности сорбентов различной природы, как правило, изучают их адсорбционную способность (емкость) по отношению к модельным веществам или модельным системам, состоящим из нескольких компонентов [1]. Данный подход используют в том случае, когда есть ограничения или сложности при проведении исследования для индивидуальных веществ (токсичность, канцерогенность, высокая стоимость и др.), а также при моделировании и изучении процессов в сложных по составу биологических средах [2]. В качестве модельных подбираются органические вещества по молекулярной массе, размеру молекул, полярности, заряду,

кислотно-основным характеристикам, изоэлектрической точке и другим свойствам, сопоставимым с исследуемыми реальными системами [3, 4].

Исследование адсорбции из многокомпонентных растворов характеризуется сложным сочетанием эффектов взаимодействия между адсорбтивами и адсорбатом. Считается, что при низких концентрациях веществ в растворе конкурентные взаимодействия компонентов не будут играть существенной роли в процессе адсорбции в отличие от высококонцентрированных [5, 6]. При изучении совместной адсорбции красителей на углеродных материалах в литературе встречаются различные их сочетания: бинарные сме-

си кислотного-синего и закатно-желтого [7]; метиленового синего и метилового оранжевого [8]; бинарные и тройные смеси метиленового синего, метанилового желтого и родамина 6Ж [9]. При этом до сих пор взаимодействия в системе адсорбент/многокомпонентный водный раствор недостаточно изучены.

В качестве адсорбтивов выбраны красители метиленовый синий и метаниловый желтый. Они являются устойчивыми интенсивными красителями катионного и анионного типа соответственно, которые трудно окисляются в биологических средах. Кроме того, они широко используются для определения сорбционной активности пористых материалов (активных углей, силико- и алюмогелей и др.). Физико-химические характеристики и поведение в индивидуальных водных растворах выбранных красителей хорошо изучены [10–12]. Известно, что при спектрофотометрическом определении данных красителей длины волн, соответствующие максимуму поглощения вещества, имеют значения 440 и 660 нм, и при совместном присутствии в водных растворах не происходит слияния областей спектра [11–13].

В растворах метиленовый синий и метаниловый желтый образуют агрегаты, состоящие из димеров. При адсорбции и фильтровании их молекулы ориентируются параллельно поверхности пористого материала и образуют монослои. Площадь, занимаемая одной молекулой метиленового синего, составляет 0.69 nm^2 , метанилового желтого — 0.64 nm^2 [13, 14].

Цель работы — установление физико-химических закономерностей совместной адсорбции красителей метиленового синего и метанилового желтого на исследуемых углеродных сорбентах.

Экспериментальная часть

В качестве объектов исследования выбраны синтетический пористый углеродный сорбент типа Сибунит и этот же углеродный сорбент, модифицированный салициловой кислотой, полученные в Центре новых химических технологий ИК СО РАН (ЦНХТ ИК СО РАН). Сырьем для получения сорбента являются тяжелые фракции ароматических углеводородов нефтяного и каменноугольного происхождения, природный газ. Технология получения исходного сорбента основана на использовании двух структурных модификаций графитоподобных материалов: нанодисперсного углерода и низкотемпературного пироуглерода — с последующей активацией углерод-углеродного композита водяным паром. Исходная углеродная матрица получена в отделе технологий углеродных материалов ЦНХТ ИК СО РАН.

Исходный углеродный сорбент характеризуется мезопористой структурой и удельной площадью поверхности $300\text{--}400 \text{ m}^2 \cdot \text{г}^{-1}$ с преимущественным размером гранул $0.5\text{--}0.8 \text{ мм}$, содержанием углерода не менее 98 мас%. Гранулы сорбента сферической формы и обладают гладким рельефом поверхности.

Модифицированный образец представляет собой исходный углеродный сорбент после адсорбции салициловой кислоты в статических условиях [водный раствор салициловой кислоты $1500 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$ (ч.д.а., ООО «Омскреактив»), объемное соотношение сорбент/раствор кислоты 1/50, температура 25°C , pH 2, продолжительность адсорбции 4 ч] и сушки в сушильном шкафу при 150°C в течение 1 ч.

В качестве адсорбтивов применяли красители метиленовый синий (ч.д.а., ООО «Омскреактив») и метаниловый желтый (98%, Merk Schuchardt OHG).

Удельную поверхность образцов определяли методом низкотемпературной адсорбции азота (анализатор Gemini 2380, Micromeritics). Титриметрическим методом Н. Р. Boehm [15] оценивали количественное содержание функциональных групп на поверхности исследуемых образцов. Адсорбцию красителей исследовали спектрофотометрическим методом (спектрофотометр UNICO 1201, UNITED PRODUCTS & INSTRUMENTS). pH точки нулевого заряда определяли методом «дрейфа» на pH-метре Sartorius PP-20 (Sartorius AG) [16].

Исследование совместной адсорбции метиленового синего и метанилового желтого изучали в интервале концентраций $0.10\text{--}2.00 \text{ г} \cdot \text{л}^{-1}$ на углеродных сорбентах из водного раствора при статических условиях: объемное соотношение сорбент/раствор красителей 1/10, соотношение концентраций красителей — 1/1, температура 25°C , время равновесия 24 ч. По уравнениям Фрейндлиха и Ленгмюра рассчитывали адсорбционные характеристики исследуемых углеродных сорбентов в отношении красителей из индивидуальных растворов и при их совместном присутствии.

Для построения градуировочных графиков готовили серию исходных растворов красителей метиленового синего ($0.0007\text{--}0.0100 \text{ г} \cdot \text{л}^{-1}$) и метанилового желтого ($0.0063\text{--}0.0500 \text{ г} \cdot \text{л}^{-1}$). Концентрацию веществ в индивидуальных растворах определяли спектрофотометрическим методом, используя кювету с толщиной поглощающего слоя 10 мм, измеряя оптическую плотность в максимуме поглощения при длине волны 660 нм для метиленового синего и при 440 нм для метанилового желтого. При определении концентрации красителей в смеси измерения проводили аналогичным образом, последовательно определяя для раствора сначала оптическую плотность

при 440 нм, а затем — при 660 нм. Концентрацию веществ в растворах оценивали до и после проведения адсорбции, используя градуировочные графики. По полученным результатам рассчитывали величину адсорбции a ($\text{мг} \cdot \text{г}^{-1}$) и степень извлечения R (%). За результат испытания принимали среднее арифметическое результатов трех параллельных определений, полученных одним исполнителем, абсолютное расхождение между которыми не превышает $1.0 \text{ мг} \cdot \text{г}^{-1}$ (относительная погрешность измерений 3–5%).

Обсуждение результатов

Исследуемые образцы углеродного сорбента характеризуются мезопористой структурой (средний диаметр пор составил 4–5 нм). Удельная площадь поверхности модифицированного образца в 1.9 раза ниже, чем у исходного сорбента, что обусловлено адсорбцией молекул салициловой кислоты на углеродной поверхности.

Присутствие модификатора в составе модифицированного образца влияет на его кислотно-основные свойства: точка нулевого заряда поверхности ($\text{pH}_{\text{ТНЗ}}$) данного материала смещается в кислую область pH 2.3, а общее количество кислородсодержащих групп на поверхности в 1.4 раза выше по сравнению с исходным образцом. При этом в составе модифицированного образца преобладают кислые группы — карбоксильные и фенольные (табл. 1).

Величина адсорбции красителей на твердых адсорбентах зависит от ее удельной площади поверхности и химического состава — природы и содержания функциональных групп [13, 17]. Метиленовый синий из индивидуальных растворов лучше адсорбируется на модифицированном образце, чем на исходном (рис. 1, табл. 2). По-видимому, в данном случае на поверхности сорбента, модифицированного салициловой кислотой, протекает физическая адсорбция

метиленового синего в виде катиона по донорно-акцепторному механизму [13, 16, 18]. Это обусловлено отрицательным зарядом поверхности модифицированного сорбента [$\text{pH}_{\text{ТНЗ}}$ сорбента (2.3) ниже pH раствора красителя (3.4)].

Из смеси красителей метиленовый синий лучше адсорбируется, чем из индивидуального раствора. Закономерность наблюдается как для исходного сорбента, так и для модифицированного образца: значения адсорбции красителя закономерно возрастают (рис. 1). Это согласуется с литературными данными: на углеродных материалах скорость и теплота адсорбции метанилового желтого выше, чем метиленового синего [17]. Адсорбционное взаимодействие молекул метанилового желтого с поверхностью сорбентов энергетически выгодно и протекает с более высокой скоростью по сравнению с адсорбцией метиленового синего, обусловленной взаимодействием сульфогрупп молекул метанилового желтого с поверхностными активными центрами основных групп [17]. В результате метиленовый синий адсорбируется на углеродной поверхности как за счет физической молекулярной адсорбции, так и благодаря нековалентным межмолекулярным взаимодействиям на адсорбционных центрах, образованных молекулами метанилового желтого и основными группами самих сорбентов.

Метаниловый желтый из индивидуальных растворов на углеродном сорбенте УС адсорбируется в большей степени, чем на модифицированном образце УС-СК, так как количество основных групп на поверхности исходного сорбента в 2.6 раза выше по сравнению с модифицированным сорбентом (рис. 1). Присутствие в водном растворе метиленового синего не оказывает влияния на величину адсорбции красителя на исходном образце, так как $\text{pH}_{\text{ТНЗ}}$ сорбента совпадает с pH смеси красителей (7.0 и 6.6 соответственно) и дополнительных межмолекулярных взаи-

Таблица 1
Физико-химические характеристики углеродных сорбентов

Образец	Удельная поверхность $S_{\text{БЭТ}}$, $\text{м}^2 \cdot \text{г}^{-1}$	Суммарный объем пор, $\text{см}^3 \cdot \text{г}^{-1}$	Объем мезопор, $\text{см}^3 \cdot \text{г}^{-1}$	Точка нулевого заряда поверхности, $\text{pH}_{\text{ТНЗ}}$	Количество кислородсодержащих групп, $\text{мэкв} \cdot \text{г}^{-1}$		
					карбоксильных	фенольных	основных
Исходный сорбент	311 ± 5	0.294 ± 0.012	0.253 ± 0.008	7.0 ± 0.2	0.032 ± 0.004	0.033 ± 0.003	0.042 ± 0.004
Модифицированный образец*	160 ± 2	0.234 ± 0.008	0.234 ± 0.008	2.3 ± 0.2	0.082 ± 0.006	0.048 ± 0.004	0.016 ± 0.002

* Модифицированный образец — образец углеродного сорбента, модифицированный водным раствором салициловой кислоты концентрацией $1500 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$.

Таблица 2
Величина адсорбции красителей на исследуемых образцах углеродного сорбента

Образец	Величина адсорбции красителей, мг·г ⁻¹				Литературный источник
	метиленовый синий		метаниловый желтый		
	из индивидуального раствора	совместная адсорбция	из индивидуального раствора	совместная адсорбция	
Исходный сорбент типа Сибунит	18.1	32.4	33.7	33.8	Данная работа
Сорбент типа Сибунит, модифицированный салициловой кислотой	23.5	29.5	24.7	30.2	Данная работа
Сорбент марки ПЭЛ на основе нефтяного кокса	15.3*	Не изучалось	7.8*	Не изучалось	[17]
Ультрадисперсный алмаз, ООО «Алит»	1.7**	Не изучалось	Не изучалось	Не изучалось	[13]
Графитированная термическая сажа	4.4**	Не изучалось	Не изучалось	Не изучалось	[13]

* Диапазон исходных концентраций метиленового синего 3–32 мг·л⁻¹, метанилового желтого 4–38 мг·л⁻¹.

** Диапазон равновесных концентраций метиленового синего 1–40 мг·л⁻¹.

модействий с незаряженной поверхностью сорбента не наблюдается.

В присутствии метиленового синего на модифицированном образце величина адсорбции метанилового желтого также возрастает. Можно предположить, что между отрицательно заряженной поверхностью сорбента [$pH_{ТНЗ}$ сорбента (2.3) ниже pH смеси водных растворов красителей (6.6)] и молекулами красителей проявляются дополнительные нековалентные кулоновские взаимодействия.

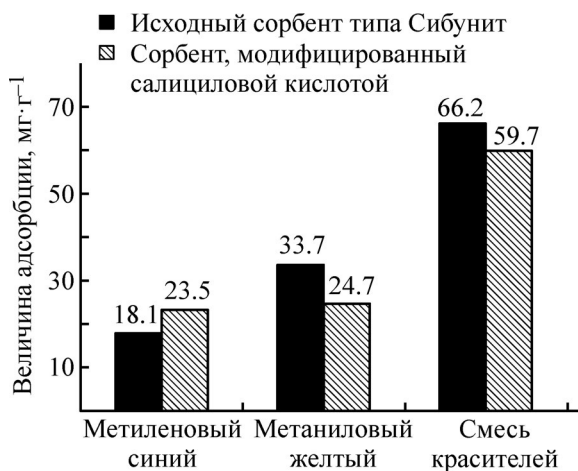


Рис. 1. Сопоставление результатов адсорбции красителей метиленового синего и метанилового желтого из индивидуальных растворов и их смеси на образцах исходного и модифицированного салициловой кислотой углеродного сорбента типа Сибунит.

Исследуемые образцы превосходят по адсорбционной активности выбранных красителей сорбент марки ПЭЛ на основе нефтяного кокса [17] в 1.5–4.3 раза, другие углеродные материалы (ультрадисперсный алмаз, графитированная термическая сажа) по отношению к метиленовому синему [13] — в 5.3–13.8 раза.

Таким образом, установлено, что совместная адсорбция метиленового синего и метанилового желтого (при концентрационном соотношении 1/1) эффективнее, чем из индивидуальных растворов.

При сопоставлении зависимостей адсорбции красителей от их остаточной концентрации как из индивидуального раствора, так и из смеси красителей на исследуемых образцах влияние модифицирования сильно не выражено. В большей степени на характер и вид адсорбционных кривых влияет добавление второго компонента в раствор (адсорбция из смеси красителей) (рис. 2).

В случае метиленового синего добавление второго красителя (метанилового желтого) приводит к тому, что уже в области концентраций 0.05–0.10 г·л⁻¹ величина адсорбции достигает максимальных значений (рис. 2, в). При адсорбции метанилового желтого из индивидуальных растворов уже при достижении равновесных концентраций 0.005–0.0075 г·л⁻¹ величина адсорбции имеет максимальное значение, но при добавлении метиленового синего процесс адсорбции метанилового желтого протекает более равномерно (рис. 2, г). Можно предположить, что в рассматри-

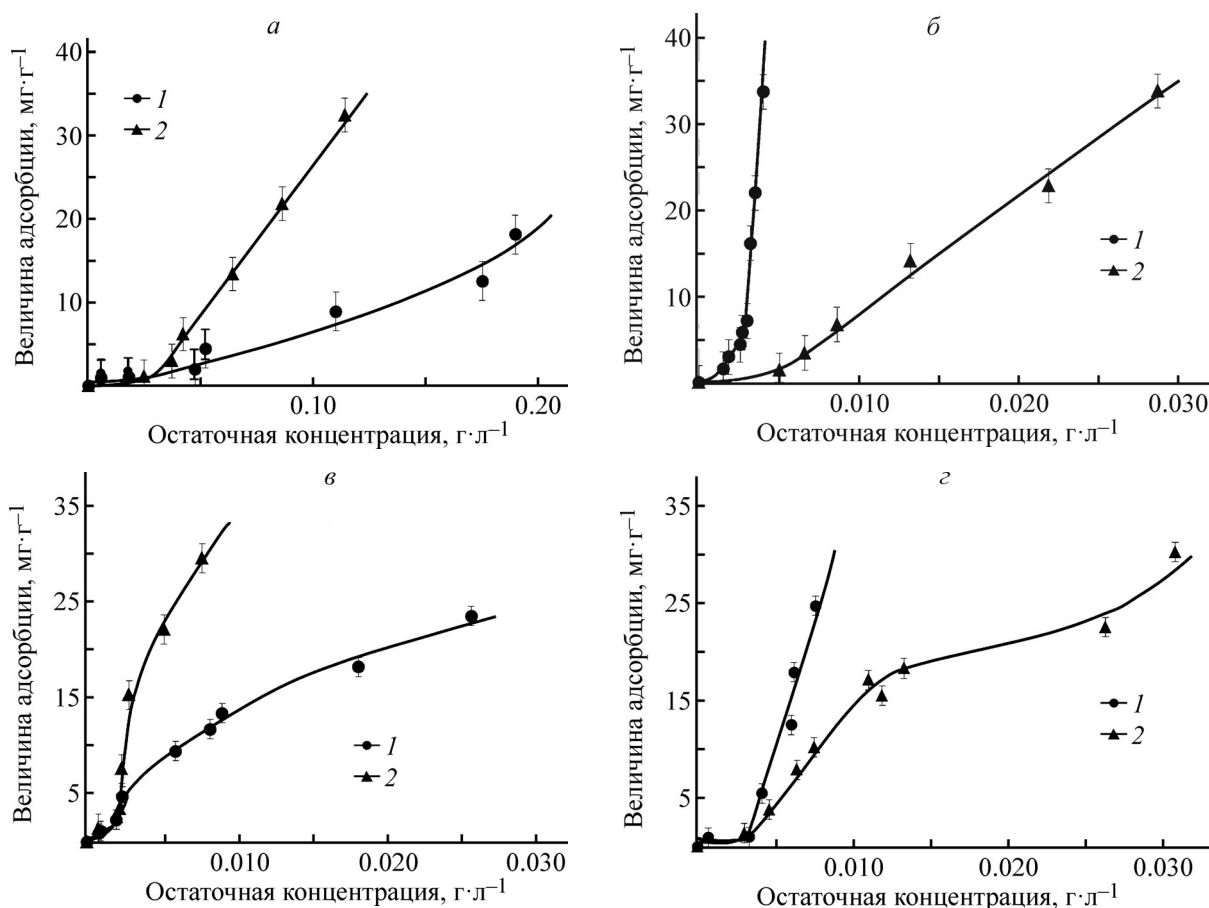


Рис. 2. Кривые адсорбции красителей на углеродном сорбенте типа Сибунит (а, б) и этом же сорбенте, модифицированном салициловой кислотой (в, г).

а, в — метиленовый синий из индивидуального раствора (1) и в присутствии метанилового желтого (2); б, г — метаниловый желтый из индивидуального раствора (1) и в присутствии метиленового синего (2).

ваемом случае протекает одновременно несколько процессов: физическая адсорбция веществ на углеродном сорбенте, а также переориентация молекул двух разных по своим кислотно-основным свойствам красителей относительно поверхности адсорбата и их межмолекулярные взаимодействия.

Установлено, что экспериментальные изотермы адсорбции метанилового желтого из индивидуального раствора и в присутствии метиленового синего для исследуемых образцов в интервале равновесных концентраций $0.003\text{--}0.030\text{ г}\cdot\text{л}^{-1}$ лучше описываются уравнением Фрейндлиха (уровень корреляции 0.97) (рис. 2, б, г).

Выводы

В результате проведенных исследований показано, что изменение текстурных характеристик и кислотно-основных свойств поверхности углеродного сорбента в процессе модифицирования салицило-

вой кислотой оказывает влияние на адсорбционные свойства полученных образцов в отношении красителей.

Модифицированный углеродный сорбент обладает наибольшей адсорбционной способностью по отношению к метиленовому синему из индивидуальных растворов. При добавлении метанилового желтого величина адсорбции метиленового синего на углеродных сорбентах закономерно возрастает.

Метаниловый желтый из индивидуальных растворов адсорбируется лучше на исходном углеродном сорбенте, так как количество основных групп на его поверхности выше по сравнению с модифицированным образцом. Присутствие в растворе второго красителя (метиленового синего) не оказывает существенного влияния на величину его адсорбции. При этом адсорбционная способность модифицированного образца по отношению к метаниловому желтому возрастает в условиях проведения совместной адсорбции с метиленовым синим.

Показано, что добавление второго компонента в раствор (адсорбция из смеси красителей) в большей степени влияет на характер и вид полученных изотерм адсорбции. Увеличение адсорбции красителей на исследуемых сорбентах при совместном присутствии в растворе объясняется сложным характером процесса, обусловленным донорно-акцепторными, кулоновскими взаимодействиями красителей, зависит от заряда поверхности и состава функциональных групп.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания Института катализа СО РАН (проект FWUR-2024-0039).

Исследования выполнены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Национальный центр исследования катализаторов».

Конфликт интересов

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

Информация о вкладе авторов

А. В. Седанова — синтез модифицированных образцов, исследование адсорбционных свойств образцов по отношению к метиленовому синему из индивидуальных растворов, подготовка иллюстрационного материала; Н. В. Корниенко — синтез модифицированных образцов, изучение их текстурных характеристик, исследование совместной адсорбции красителей, обработка полученных результатов; М. С. Делягина — изучение адсорбционных свойств образцов по отношению к метаниловому желтому из индивидуальных растворов, определение кислородсодержащих групп и pH, обработка полученных результатов; Л. Г. Пьянова — разработка методики исследования адсорбционных свойств образцов из индивидуальных растворов; А. В. Лавренов — постановка задач исследования; В. А. Дроздов — разработка методики исследования совместной адсорбции красителей полученных образцов.

Информация об авторах

Седанова Анна Викторовна, к.х.н.
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1832-253X>

Корниенко Наталья Викторовна
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3962-7049>

Делягина Мария Сергеевна, к.х.н.
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6533-0321>

Пьянова Лидия Георгиевна, д.б.н., доцент
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6207-0878>

Дроздов Владимир Анисимович, 05.11.1953–14.02.2024, к.х.н.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1281-5058>

Лавренов Александр Валентинович, д.х.н., доцент
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9246-7964>

Список литературы

- [1] Azari A., Nabizadeh R., Nasser S., Mahvi A. H., Mesdaghinia A. R. Comprehensive systematic review and meta-analysis of dyes adsorption by carbon-based adsorbent materials: Classification and analysis of last decade studies // *Chemosphere*. 2020. V. 250. ID 126238.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126238>
- [2] Wang Q., Luo C., Lai Z., Chen S., He D., Mu J. Honeycomb-like cork activated carbon with ultra-high adsorption capacity for anionic, cationic and mixed dye: Preparation, performance and mechanism // *Bioresour. Technol.* 2022. V. 357. ID 127363.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127363>
- [3] Sabzehmeidani M. M., Mahnaee S., Ghaedi M., Heidari H., Roy V. A. L. Carbon based materials: A review of adsorbents for inorganic and organic compounds // *Mater. Adv.* 2021. V. 2. P. 598–627.
<https://doi.org/10.1039/d0ma00087f>
- [4] Radovic L. R., Moreno-Castilla C., Rivera-Utrilla J. Carbon materials as adsorbents in aqueous solutions // *Chem. Phys. Carbon*. 2000. V. 27. P. 227–405.
<https://doi.org/10.1201/9781482270129-11>
- [5] Geçer M., Wiśniewska M., Nowicki P. Biochars and activated carbons as adsorbents of inorganic and organic compounds from multicomponent systems — A review // *Adv. Colloid Interface Sci.* 2022. V. 305. ID 102687.
<https://doi.org/10.1016/j.cis.2022.102687>
- [6] Li K., Li X., Li B. Investigation the adsorption behavior of functional carbon-based composites for efficient removing anions/cations in single and multicomponent systems // *Sep. Purif. Technol.* 2022. V. 289. ID 120737.
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.120737>
- [7] Lim A., Chew J. J., Ismadji S., Khaerudini D. S., Darsono N., Sunarso J. Kinetic and equilibrium adsorption study of anionic dyes using oil palm trunk-derived activated carbon // *Mater. Today: Proc.* 2022. V. 64. P. 1627–1638.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.918>
- [8] Martínez R. J., Vela-Carrillo A. Z., Godínez L. A., Pérez-Bueno J., Robles I. Competitive adsorption of anionic and cationic molecules on three activated carbons

- derived from agroindustrial waste // *Biomass Bioenergy*. 2023. V. 168. ID 106660.
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106660>
- [9] Mathew A., Parambadath S., Barnabas M. J., Song H. J., Kim J.-S., Park S. S. Rhodamine 6G assisted adsorption of metanil yellow over succinamic acid functionalized MCM-41 // *Dyes Pigm.* 2016. V. 131. P. 177–185.
<https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2016.04.007>
- [10] Rafatullah M., Sulaiman O., Hashim R., Ahmad A. Adsorption of methylene blue on low-cost adsorbents: A review // *J. Hazard. Mater.* 2010. V. 177. P. 70–80.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.12.047>
- [11] Zhang Z., Xu L., Liu Y., Feng R., Zou T., Zhang Y., Kang Y., Zhou P. Efficient removal of methylene blue using the mesoporous activated carbon obtained from mangosteen peel wastes: Kinetic, equilibrium, and thermodynamic studies // *Micropor. Mesopor. Mater.* 2021. V. 315. ID 110904.
<https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2021.110904>
- [12] Georgin J., Martinello K. da Boit, Franco D. S. P., Netto M. S., Picilli D. G. A., Yilmaz M., Silva L. F. O., Dotto G. L. Residual peel of pitaya fruit (*Hylocereus undatus*) as a precursor to obtaining an efficient carbon-based adsorbent for the removal of metanil yellow dye from water // *J. Environ. Chem. Eng.* 2022. V. 10. ID 107006.
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.107006>
- [13] Хохлова Т. Д., Юнусова Г. Р., Ланин С. Н. Адсорбция красителей в исследовании химии поверхности ультрадисперсного алмаза // *ЖФХ*. 2018. Т. 92. № 5. С. 811–815.
<https://doi.org/10.1134/S0036024418050175>
 [Khokhlova T. D., Yunusova G. R., Lanin S. N. Adsorption of dyes in studying the surface chemistry of ultradispersed diamond // *Russ. J. Phys. Chem. A*. 2018. V. 92. N 5. P. 1006–1010.
<https://doi.org/10.1134/S0036024418050175>
- [14] Sawant S. Y., Pawar R. R., Senthilkumar S., Somani R. S., Cho M. H., Bajaj H. C. Pilot-scale produced super activated carbon with a nanoporous texture as an excellent adsorbent for the efficient removal of metanil yellow // *Powder Technol.* 2018. V. 333. P. 243–251.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.04.024>
- [15] Schönherr J., Buchheim J. R., Scholz P., Adelhelm P. Boehm titration revisited (Part I): Practical aspects for achieving a high precision in quantifying oxygen-containing surface groups on carbon materials // *J. Carbon Res.* 2018. V. 4. N 2. P. 1–13.
<https://doi.org/10.3390/c4020021>
- [16] Bernal V., Giraldo L., Moreno-Piraján J. C. Thermodynamic analysis of acetaminophen and salicylic acid adsorption onto granular activated carbon: Importance of chemical surface and effect of ionic strength // *Thermochim. Acta*. 2020. V. 683. ID 178467. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2019.178467>
- [17] Балыкин В. П., Ефремова О. А., Булатов А. В. Адсорбция метиленового синего и метанилового желтого на углеродной поверхности // *Вестн. Челябин. гос. ун-та*. 2004. Т. 4. № 1. С. 46–54.
<https://www.elibrary.ru/mnvpzl>
- [18] Швиденко И. Г., Вениг С. Б., Чернова Р. К., Селифонова Е. И., Шаповал О. Г., Наумова Г. Н., Сержантов В. Г., Селифонов А. А., Сплюхин В. П. Изучение сорбции метиленового синего глауконитом // *Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Химия. Биология. Экология*. 2018. Т. 18. Вып. 1. С. 91–97.
<https://doi.org/10.18500/1816-9775-2018-18-1-91-97>;
<https://www.elibrary.ru/xosvsh>