
ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ
НА МЕЖФАЗНЫХ ГРАНИЦАХ

УДК 661.183.2:544.723.212:544.723.3:547-32:54-438

**ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК АМИНОКИСЛОТ
НА СВОЙСТВА УГЛЕРОДНОГО СОРБЕНТА,
МОДИФИЦИРОВАННОГО САЛИЦИЛОВОЙ КИСЛОТОЙ**

© 2025 г. А. В. Седанова*, Н. В. Корниенко, Л. Г. Пянова,
М. С. Делягина, А. В. Лавренов

*Центр новых химических технологий ИК СО РАН, Институт катализа СО РАН,
ул. Нефтезаводская, 54, Омск – 40, 644040 Россия
e-mail: medugli@ihcp.ru; medugli@mail.ru

Поступила в редакцию 13.03.2024 г.

После доработки 29.11.2024 г.

Принята к публикации 17.02.2025 г.

Исследовано влияние добавки аминокислот (фенилаланина, аргинина) на адсорбцию салициловой кислоты углеродным сорбентом. Изучены физико-химические свойства углеродных сорбентов, модифицированных салициловой кислотой с аминокислотами: текстурные характеристики, количественный состав поверхностных функциональных групп, pH точки нулевого заряда. Определены адсорбционные характеристики углеродного сорбента с салициловой кислотой и аминокислотами в отношении органических красителей: метиленовый голубой, метаниловый желтый.

Ключевые слова: углеродный сорбент, салициловая кислота, аминокислоты, модифицирование, адсорбция, метиленовый голубой, метаниловый желтый

DOI: 10.31857/S0044185625010018 EDN: LEGOGP

ВВЕДЕНИЕ

Салициловая кислота (СК) и ее производные обладают биоспецифическими свойствами (антибактериальные, противовоспалительные, антиоксидантные и др.) [1–3]. Однако использование салициловой кислоты ограничено ее растворимостью в воде и возможными побочными эффектами при высоких концентрациях: повреждающее действие слизистой оболочки желудочно-кишечного тракта, нарушение функции почек, гастро- и нефротоксичность [4, 5]. На сегодняшний день в медицине и ветеринарии применяют наружно 1–2% спиртовые растворы салициловой кислоты и мази на ее основе (содержание СК 2–10%) [6, 7].

Разработка комплексных препаратов на основе матриц (носителей) различной природы, в том числе углеродных сорбентов, с нанесенной

салициловой кислотой позволяет увеличить эффективность действия, пролонгировать биологическую активность СК и снизить токсичность лекарственных препаратов. Известны аппликационные гемостатические импланты, модифицированные салициловой кислотой, препараты для лечения остеопороза на основе полисалициловой кислоты, модифицированные СК пленки хитозана с антиоксидантными и антибактериальными свойствами и др. [8–10].

Изучение закономерностей и механизмов адсорбции салициловой кислоты на углеродных сорбентах представляет большой интерес, особенно в присутствии других веществ (аминокислот, производных СК, фенола и др.). Известны результаты исследований [11], согласно которым адсорбционная емкость сорбентов (модифицированная сверхсшитая поли(стирол-со-дивинилбензолная) смола) в отношении

салициловой кислоты в присутствии фенола возрастает. Наблюдаемый эффект достигается за счет того, что фенол более гидрофильный, чем салициловая кислота, поэтому он в большей степени вступает во взаимодействие с молекулами воды, тем самым повышая адсорбционные взаимодействия салициловой кислоты с поверхностью смол.

Показано, что присутствие аминокислот положительно сказывается на адсорбции салициловой кислоты на минералах. Аминогруппы в составе кислот проявляют повышенное адсорбционное сродство к ароматическим кислотам в результате кислотно-основного взаимодействия [12, 13].

Известно, что присутствие сульфосалициловой кислоты в растворе приводит к увеличению количества салициловой кислоты, адсорбированной на полимерном адсорбенте [14]. За счет присутствия в составе кислоты сульфогруппы ее растворимость лучше, чем у салициловой кислоты. Таким образом, молекулы сульфосалициловой кислоты экранируют взаимодействие между молекулами воды и салициловой кислоты, повышая адсорбцию последней на смоле.

Широкое внимание уделяется и исследованиям совместной адсорбции веществ различной природы на углеродных материалах, преимущественно активных углях. Установлено, что адсорбция Cr (IV) из водных растворов порошковым активированным углем увеличивается при добавлении гуминовых кислот различной концентрации [15]. Адсорбция аминокислот на поверхности углеродных нанотрубок протекает через образование мономеров и кластеров на поверхности сорбента [16]. Результаты исследований на коммерческом активированном угле показали, что присутствие второго компонента способствует адсорбции первого (кофеин, диклофенак) по сравнению с адсорбцией из индивидуальных растворов [17].

В данной работе в качестве добавок выбраны аминокислоты различной природы: фенилаланин (ароматическая альфа-аминокислота) и аргинин (алифатическая основная альфа-аминокислота) [18, 19]. Фенилаланин и аргинин широко применяются для модифицирования различных видов материалов [20–26].

Известны исследования модифицирования диоксида титана (IV) салициловой кислотой и аргинином [27]. Данные об адсорбции салициловой кислоты на углеродных материалах в присутствии аминокислот в литературе отсутствуют.

Цель данной работы — совместная адсорбция салициловой кислоты с аминокислотой (фенилаланин, аргинин) из водных растворов образцами углеродного сорбента. Рассматриваемые задачи: установление влияния добавки аминокислоты на адсорбционные характеристики углеродного сорбента в отношении салициловой кислоты; изучение физико-химических и адсорбционных свойств углеродных образцов до и после контакта с салициловой кислотой (с добавками аминокислот и без них).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Объект исследования — гранулированный углеродный сорбент (УС, ЦНХТ ИК СО РАН, Омск, Россия). В качестве адсорбтивов (модификаторов) применяли салициловую кислоту (СК, 99%, Sigma-Aldrich, Германия), фенилаланин (Фен, о.с.ч., “Омскреактив”, Россия), аргинин (Арг, 99%, Panreac, Испания), в качестве веществ, моделирующих токсичные органические соединения, — красители метиленовый голубой (МГ, ч.д.а., “Омскреактив”, Россия) и метаниловый желтый (МЖ, 98%, Merk Schuchardt OHG, Германия).

Удельную поверхность образцов исследовали методом низкотемпературной адсорбции азота (анализатор Gemini 2380, Micromeritics, США). Титриметрическим методом Н.Р. Boehm определяли количественное содержание функциональных групп на поверхности исследуемых образцов. Адсорбцию исследовали спектрофотометрическим методом (спектрофотометр CECIL-1021, Cecil Instruments Limited, Англия). Для проведения адсорбции при встряхивании использовали шейкер Edmund Buehler SM 30 B (Buehler, Германия). pH растворов определяли на pH-метре Sartorius PP-20 (Sartorius AG, Германия). pH точки нулевого заряда исследуемых сорбентов определяли методом “дрейфа pH” [28].

Физико-химические характеристики адсорбтивов представлены в табл. 1.

Адсорбцию салициловой кислоты с аминокислотой на углеродном сорбенте проводили при условиях, аналогичных для адсорбции салициловой кислоты из индивидуального раствора. Красители сорбировали при условиях, идентичных для их адсорбции на углеродном сорбенте с салициловой кислотой [34].

Каждый эксперимент по адсорбции повторяли дважды и определяли среднее значение.

Таблица 1. Физико-химические характеристики адсорбтивов [29–33]

Физико-химические характеристики	СК	Фен	Арг	МГ	МЖ
Структура					
Молекулярная масса, г/моль	138.1	165.2	174.2	319.9	375.4
Размер молекул, нм	0.70×0.60	0.70×0.50	0.80×0.60	0.61×1.45	0.59×1.45
pKa/pI	pKa = 2.97	pKa = 2.20 pI = 5.48	pKa = 12.48 pI = 10.76	pKa = 3.80	pKa = 1.30

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование адсорбционных свойств углеродного сорбента

На углеродном сорбенте исследована адсорбция фенилаланина из водного раствора в интервале концентраций 100–2500 мг/л при условиях: объемное соотношение “сорбент–раствор аминокислоты” 1/50, статические условия, температура 25°C, pH = 4–6, продолжительность процесса 24 ч (рис. 1).

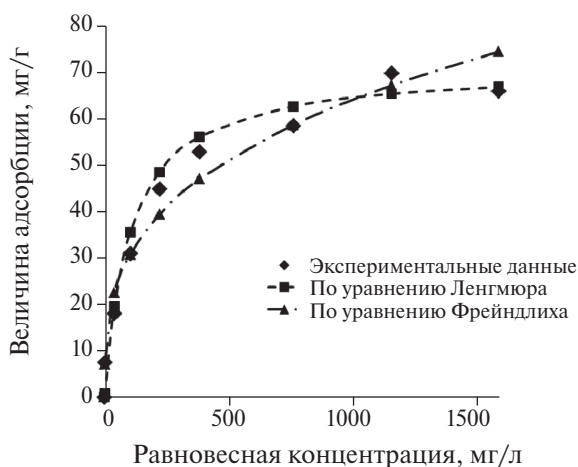
С ростом концентрации фенилаланина увеличивается количество адсорбированной на углеродном сорбенте аминокислоты. Для концентраций фенилаланина 2000 и 2500 мг/л не наблюдается изменение величины адсорбции, что свидетельствует о наступлении относительного равновесия в системе между процессами

адсорбция–десорбция и образовании монослоя. Максимальное количество адсорбированного фенилаланина за 24 ч составило 69.6 мг/г при концентрации исходного раствора фенилаланина 2000 мг/л.

Адсорбционные характеристики углеродного сорбента в отношении фенилаланина определяли по уравнению мономолекулярной адсорбции Ленгмюра и уравнению Фрейндлиха (табл. 2).

Показано, что в интервале равновесных концентраций 1.1–1585.6 мг/л изотерма адсорбции фенилаланина на углеродном сорбенте описывается уравнением Ленгмюра.

Проведен эксперимент по адсорбции салициловой кислоты на углеродном сорбенте. Условия: водные растворы, состоящие из смеси салициловой кислоты с заданной концентрацией (100–1500 мг/л) и постоянной концентрации фенилаланина (2000 мг/л), объемное

**Рис. 1.** Зависимость адсорбции фенилаланина от его концентрации на углеродном сорбенте.**Таблица 2.** Параметры уравнений Ленгмюра, Фрейндлиха для адсорбции фенилаланина углеродным сорбентом

Параметры	Углеродный сорбент
Уравнение Ленгмюра	
$a_{\text{теор}}$, мг/г	70.9
K_L , л/мг	0.01
r^2	0.991
Уравнение Фрейндлиха	
$a_{\text{теор}}$, мг/г	74.1
K_f	6.82
$1/n$	0.324
r^2	0.976

Примечание: $a_{\text{теор}}$ — максимальная теоретическая величина адсорбции; r^2 — коэффициент корреляции; K_L — константа уравнения Ленгмюра; K_f , n — постоянные уравнения Фрейндлиха.

соотношение “сорбент–раствор кислот” 1/50, статические условия (постоянное встряхивание), температура 25°C, pH = 2, время контакта 24 ч. В аналогичных условиях исследована адсорбция салициловой кислоты с заданной концентрацией (100–1500 мг/л) на углеродном сорбенте из водного раствора в присутствии аргинина (2000 мг/л) (рис. 2)

Установлено, что салициловая кислота без добавления в систему аминокислот на образце УС адсорбируется за 4 ч, в присутствии аминокислот – 24 ч. Но по количеству СК адсорбируется больше в присутствии аминокислот: из индивидуального раствора СК – 90.0 ± 1.8 мг/г; в присутствии фенилаланина – 98.7 ± 2.0 мг/г, в присутствии аргинина – 95.2 ± 1.9 мг/г.

Экспериментальная кривая адсорбции салициловой кислоты из индивидуального раствора углеродным сорбентом в интервале равновесных концентраций 1.0–210.0 мг/л описывается уравнением Фрейндлиха: $r^2 = 0.990$, $K_f = 18.65$, $1/n = 0.31$. Экспериментальные адсорбционные кривые при совместной адсорбции салициловой кислоты и аминокислот описать уравнением Ленгмюра или Фрейндлиха не удалось (коэффициенты корреляции ниже 0.8).

При повышении равновесной концентрации салициловой кислоты до 143 мг/л ее адсорбция из индивидуального раствора выше, чем в присутствии аминокислот. Это можно объяснить тем, что протекает конкурентная сорбция за счет дисперсионного взаимодействия между адсорбентом и адсорбтивами за свободные

активные центры на углеродном сорбенте, так как по своим молекулярным размерам салициловая кислота, фенилаланин и аргинин сопоставимы (табл. 1) и не превышают средний размер пор углеродного сорбента (4 нм) [13].

В области высоких равновесных концентраций (более 143 мг/л) величина адсорбции салициловой кислоты на углеродном сорбенте выше в присутствии аминокислот, чем из индивидуального раствора, что обусловлено образованием водородной связи между карбоксильными группами салициловой кислоты и аминогруппами аргинина и фенилаланина [35, 36].

Изучение адсорбции СК из более концентрированных растворов затруднено ввиду ее ограниченной растворимости в воде.

Физико-химические свойства исследуемых образцов

Исследованы физико-химические свойства образцов углеродных сорбентов после адсорбции салициловой кислоты: в присутствии фенилаланина (образец УС-СК-Фен), аргинина (образец УС-СК-Арг) в сравнении с исходным углеродным сорбентом (образец УС) и сорбентом, модифицированным салициловой кислотой (образец УС-СК).

Для всех образцов характерна мезопористая структура с размером пор 4–6 нм (табл. 3). В процессе модифицирования наблюдается снижение удельной поверхности в сравнении с исходным образцом УС в 1.9 раза для образца УС-СК, в 2 раза для образца УС-СК-Фен и в 2.3 раза для образца УС-СК-Арг (табл. 3).

Титриметрическим методом Н.Р.Boehm определено количество кислородсодержащих групп на поверхности исследуемых углеродных сорбентов (табл. 4, рис. 3).

Для модифицированных углеродных сорбентов после адсорбции наблюдается увеличение количества кислородсодержащих групп по сравнению с исходным сорбентом. Адсорбция салициловой кислоты из индивидуального раствора и в присутствии фенилаланина приводит к увеличению доли кислых групп с 61% отн. для исходного сорбента до 89% отн. для образца УС-СК и до 83% для образца УС-СК-Фен. Для образца УС-СК-Арг, наоборот, наблюдается снижение доли кислых групп до 38% отн. и увеличение доли основных групп с 39 до 62% отн., что обусловлено основным характером аргинина, адсорбированного на поверхности углеродного сорбента совместно с салициловой кислотой.

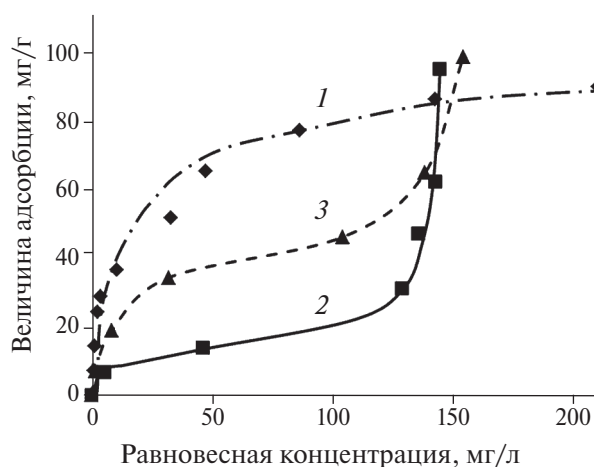


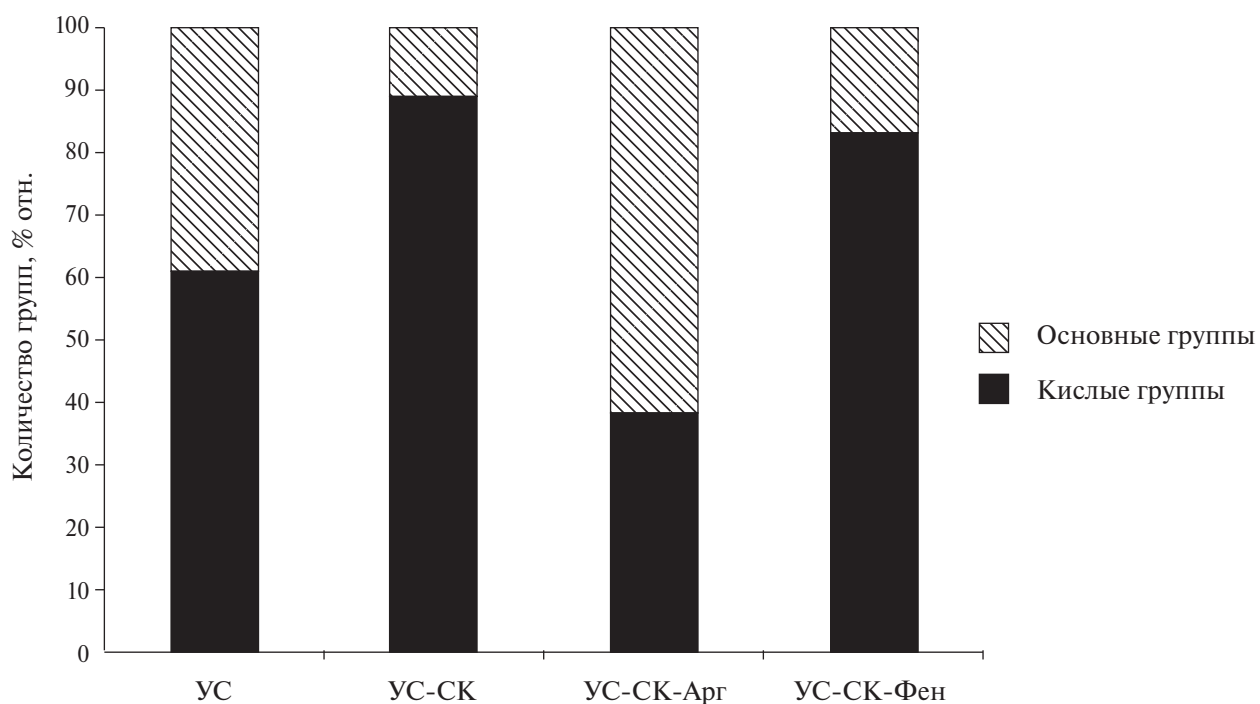
Рис. 2. Зависимость адсорбции салициловой кислоты от ее концентрации на углеродном сорбенте из индивидуального раствора салициловой кислоты (1), в присутствии аргинина (2) и фенилаланина (3).

Таблица 3. Текстурные характеристики образцов

Образец	Удельная площадь поверхности $S_{БЭТ}$, м ² /г	Суммарный объем пор, см ³ /г	Объем мезопор, см ³ /г	Объем микропор, см ³ /г	Средний размер пор, нм
УС	311	0.294	0.253	0.041	4
УС-СК	160	0.234	0.234	—	5
УС-СК-Фен	155	0.208	0.208	—	5
УС-СК-Арг	136	0.219	0.208	—	6

Таблица 4. Содержание кислородсодержащих групп на поверхности углеродных сорбентов и рН_{тнз}

Образец	Кислые группы, мг-экв/г		Основные группы, мг-экв/г	рН _{тнз}
	карбоксильные группы	фенольные группы		
УС	0.032	0.033	0.042	7.0
УС-СК	0.082	0.048	0.016	2.3
УС-СК-Арг	0.012	0.038	0.082	5.6
УС-СК-Фен	0.058	0.037	0.020	2.1

**Рис. 3.** Соотношение кислородсодержащих групп на поверхности исследуемых сорбентов.

Методом “дрейфа рН” определено рН точки нулевого заряда исследуемых углеродных сорбентов (табл. 4). Из представленных данных видно, что адсорбция салициловой кислоты из индивидуального раствора и в присутствии фенилаланина на углеродном сорбенте приводит к смещению рН в кислую область, что обусловлено кислой природой адсорбтивов. Для образца углеродного сорбента, модифицированного салициловой кислотой в присутствии аргинина, наблюдается смещение рН_{тнз} в щелочную область, что связано с основной природой аргинина.

Адсорбция метиленового голубого на модифицированных углеродных сорбентах

Исследована адсорбция метиленового голубого в интервале концентраций 0.10–2.00 мг/мл на углеродных сорбентах УС-СК-Фен, УС-СК-Арг из водного раствора при условиях: объемное соотношение “сорбент–раствор” 1/10, статические условия (периодическое перемешивание), температура 25°C, естественный рН, время контакта 24 ч.

На рис. 4 представлены адсорбционные кривые МГ на углеродном сорбенте (УС), углеродном сорбенте с салициловой кислотой (УС-СК) [34] и углеродном сорбенте с салициловой кислотой и аминокислотами (УС-СК + Фен, УС-СК-Арг).

В табл. 5 представлены экспериментальные величины адсорбции красителя МГ на исследуемых образцах.

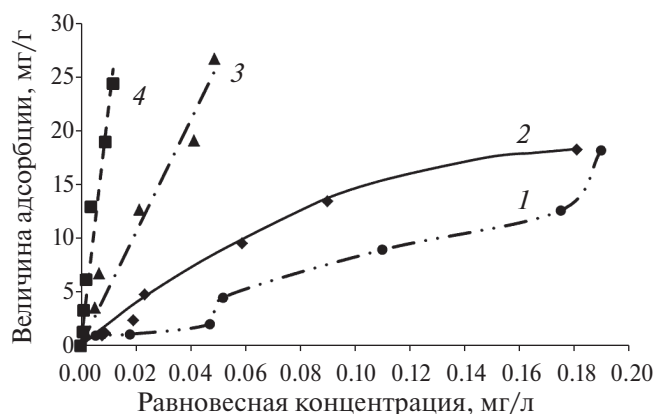


Рис. 4. Зависимость адсорбции МГ от его концентрации на исходном углеродном сорбенте (1), углеродном сорбенте с салициловой кислотой (2), углеродном сорбенте с салициловой кислотой и аргинином (3) и углеродном сорбенте с салициловой кислотой и фенилаланином (4).

Таблица 5. Адсорбция красителей на исследуемых углеродных сорбентах

Сорбент	Величина адсорбции МГ, мг/г	Величина адсорбции МЖ, мг/г
УС	18.1 ± 0.4	33.7 ± 0.7
УС-СК	18.2 ± 0.4	24.7 ± 0.5
УС-СК-Фен	24.3 ± 0.5	26.9 ± 0.5
УС-СК-Арг	26.6 ± 0.5	29.7 ± 0.6

В области равновесных концентраций 0.0009–0.0118 мг/мл изотерма адсорбции МГ на сорбенте УС-СК-Фен описывается уравнением Ленгмюра: $r^2 = 0.61$, $K_L = 67.7$ мл/мг, $a_{\max} = 21.9$ мг/г. В области равновесных концентраций 0.0019–0.0488 мг/мл изотерма адсорбции МГ на образце УС-СК-Арг описывается уравнением Фрейндлиха: $r^2 = 0.97$, $K_F = 353$, $1/n = 0.87$.

Установлено, что в интервале концентраций метиленового голубого 0.10–2.00 мг/мл равновесие в системе устанавливается за 24 ч. С ростом концентрации МГ величина адсорбции закономерно увеличивается. Максимальное количество метиленового голубого адсорбируется на модифицированных углеродных сорбентах с салициловой кислотой и аминокислотами.

Основными факторами, определяющими адсорбционную способность углеродных материалов в отношении МГ, являются их удельная поверхность, пористая структура и наличие на поверхности функциональных групп [37, 38]. Увеличение адсорбционной способности модифицированных углеродных сорбентов с салициловой кислотой и аминокислотами в отношении МГ обусловлено взаимодействием кислород- и азотсодержащих функциональных групп с молекулами красителя за счет водородных связей и электростатического притяжения [39–41].

Это так же согласуется с предположением о том, что азотсодержащие поверхностные группы вносят больший вклад в адсорбцию МГ на углеродной поверхности за счет электростатического притяжения неподеленной электронной пары атома азота и катиона красителя [42].

*Адсорбция метанилового желтого
на модифицированных углеродных
сорбентах*

Исследована адсорбция метанилового желтого (МЖ) в интервале концентраций 0.10–2.00 мг/мл на углеродных сорбентах УС-СК-Фен, УС-СК-Арг из водного раствора при условиях: объемное соотношение “сорбент–раствор” 1/10, статические условия (периодическое перемешивание), температура 25°C, естественный pH, время контакта 24 ч.

На рис. 5 представлены адсорбционные кривые МЖ исходным углеродным сорбентом (УС), углеродным сорбентом с салициловой кислотой (УС-СК) [34] и углеродным сорбентом с салициловой кислотой и аминокислотами (УС-СК-Фен, УС-СК-Арг). В табл. 5 представлены экспериментальные величины адсорбции метанилового желтого на исследуемых сорбентах.

В области равновесных концентраций 0.00024–0.00837 мг/мл изотерма адсорбции МЖ на образце УС-СК-Фен описывается уравнение Фрейндлиха: $r^2 = 0.96$, $K_F = 1063$, $1/n = 0.76$. Экспериментальные адсорбционные кривые при адсорбции МЖ на образце УС-СК-Арг описать уравнением Ленгмюра или Фрейндлиха не удалось (коэффициенты корреляции ниже 0.8).

Установлено, что в интервале исходных концентраций метанилового желтого 0.10–2.00 мг/мл продолжительность адсорбции составила 24 ч. С ростом концентрации МЖ величина адсорбции закономерно увеличивается. Максимальной адсорбционной способностью в отношении красителя МЖ обладает исходный углеродный сорбент УС, что обусловлено его большей удельной поверхностью. Образцы, модифицированные салициловой кислотой и аминокислотами, превосходят по данному показателю углеродный сорбент, модифицированный салициловой кислотой. Это может быть обусловлено ионным взаимодействием между сульфогруппой красителя, находящегося в растворе в ионном виде, и аминок группой модификаторов [33, 43, 44].

Все исследуемые сорбенты характеризуются высокой адсорбционной способностью по отношению к метаниловому желтому. Этому способствует природа красителя, который находится в растворе в анионной форме и в щелочной среде $pH = 9.6$, при котором происходит адсорбция красителя на углеродных сорбентах [45, 46].

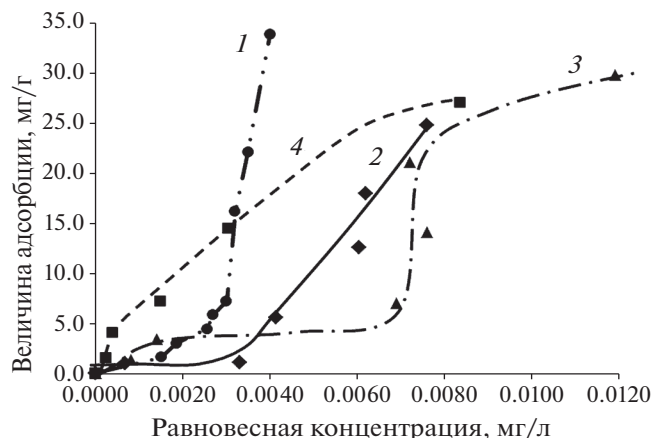


Рис. 5. Зависимость адсорбции МЖ от его концентрации на исходном углеродном сорбенте (1), углеродном сорбенте с салициловой кислотой (2), углеродном сорбенте с салициловой кислотой и аргинином (3) и углеродном сорбенте с салициловой кислотой и фенилаланином (4).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана методика модифицирования углеродного сорбента путем совместной адсорбции салициловой кислоты с аминокислотами из водного раствора (аргинин, фенилаланин). Показано, что присутствие аминокислоты в растворе увеличивает адсорбционную способность углеродного сорбента по отношению к салициловой кислоте за счет образования водородной связи между карбоксильными группами салициловой кислоты и аминок группами аргинина и фенилаланина.

Установлено, что добавка аминокислоты в процессе модифицирования углеродного сорбента салициловой кислотой увеличивает адсорбционную способность сорбента по отношению к красителям метиленовому голубому в 1.5 раза и метаниловому желтому в 1.2 раза за счет дополнительных взаимодействий между сульфогруппой МЖ, диметиламиногруппами МГ и атомом азота в аминок группе кислот на поверхности углеродного сорбента.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность ведущему научному сотруднику ЦНХТ ИК СО РАН В.А. Дроздову за обсуждение полученных результатов. Исследования выполнены с использованием оборудования Центра коллективного пользования “Национальный центр исследования катализаторов”.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перевозкина М.Г. // Фундаментальные исследования. 2015. № 2. Т.8. С. 1681–1688.
2. Sorzabal-Bellido I., Diaz-Fernandez Y.A., Susarrey-Arce A. et al. ACS Appl. Bio Mater. V. 2019. P. 4801–4811.
3. Randjelović P., Veljković S., Stojiljković N. et al. // Acta Facultatis Medicae Naissensis. 2015. V. 32. № 4. P. 259–265.
4. Cox P.G., Moons W.M., Russel F.G., van Ginneken C.A. // Pharmacol. Toxicol. 1991. V. 68. № 5. P. 322–328.
5. Kaur B., Singh P. // Bioorg. Chem. 2022. V. 121. P. 105663–105678.
6. Кияшев Д.К. // Вестник КазНМУ. 2014. № 4. С. 293–301.
7. Ерофеева Л.Н., Сучкина Д.А. // Медицина. 2019. Т. 7. № 4. С. 34–42.
8. Лупатов В.А., Лазаренко С.В., Сотников К.А. и др. // Наука молодых. 2020. Т. 8. № 1. С. 45–52.
9. Li Y., Cai B., Zhang Z. et al. // Acta Biomater. 2021. V. 130. P. 435–446.
10. Hu F., Sun T., Xie J. et al. // J. Mol. Struct. 2021. V. 1223. P. 129237–12943.
11. Huang J., Wang G., Huang K. // Chem. Eng. J. 2011. V. 168. № 2. P. 715–721.
12. Zhang W., Chen J., Pan B., Zhang Q. // Adsorpt. Sci. Technol. 2005. V. 23. № 9. P. 751–762.
13. Gao J., Jansen B., Cerli C. et al. // Eur. J. Soil Sci. 2017. V. 68. P. 667–677.
14. Liu F., Chen J., Zhang Q. et al. // Chinese J. Polym. Sci. 2005. V. 23. № 4. P. 373–378.
15. Chen Y., Qian Y., Ma J. et al. // Sci. Total Environ. 2022. V. 817. P. 153081–153089.
16. Butyrskaya E.V., Zapryagaev S. A., Izmailova E. A. // Carbon. 2019. V. 143. P. 276–287.
17. Medina F., Aguiar M.B., Parolo M.E., Avena M.J. // J. Environ. Manage. 2021. V. 278. P. 111523–111532.
18. Anwar R., Koparir P., Qader I., Ahmed L. // Cumhuriyet Science J. 2021. V. 42. P. 576–585.
19. McRae M.P. // J. Chiropr. Med. 2016. V. 15. № 3. P. 184–189.
20. Li S., Yang M., Jin R. et al. // Electrochim. Acta. 2020. V. 364. P. 137290–137299.
21. de Araújo D.T., Ciuffi K.J., Nassar E.J. et al. // Appl. Surf. Sci. 2021. V. 4. P. 100081–100089.
22. Wang Y., Ji W., Xu Y. et al. // Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. 2021. V. 608. P. 125557–1255678.
23. Li M., Li N., Qiu W. et al. // J. Colloid Interface Sci. 2022. V. 607. № 2. P. 1849–1863.
24. Turov V.V., Gun'ko V.M., Krupskaya T.V. et al. // Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. 2021. V. 624. P. 126844–126854.
25. Chai Z., Li C., Zhu Y. et al. // Int. J. Biol. Macromol. 2020. V. 165. P. 506–516.
26. Naushad M., Alqadami A.A., AlOthman Z.A. et al. // J. Mol. Liq. 2019. V. 293. P. 111442–111450.
27. Li L., Zhang Q.L., Fan H.L. et al. // Wuji Cailiao Xuebao J. Inorg. Mater. 2016. V. 31. № 4. P. 413–420.
28. Nouha S., Souad N.S., Abdelmottalab O. // J. Chil. Chem. Soc. 2019. V. 64. № 1. P. 4352–4359.
29. Choi J., Shin W.S. // Minerals. 2020. V. 10. P. 898–914.
30. Alves C.C.O., Franca A.S., Oliveira L.S. // LWT – Food Sci. Technol. 2013. V. 51. № 1. P. 1–8.
31. Shukla D., Trout B.L. // J. Phys. Chem. B. 2010. V. 114. № 42. P. 13426–13438.
32. Sousa H.R., Silva L.S., Sousa P.A.A. et al. // J. Mater. Res. Technol. 2019. V. 8. № 6. P. 5432–5442.
33. Georgin J., da Boit Martinello K., Franco D.S.P. et al. // J. Environ. Chem. Eng. 2022. V. 10. № 1. P. 107006–107017.
34. Sedanova A.V., P'yanova L.G., Kornienko N.V. et al. // J. Mater. Sci. 2023. V. 58. P. 11469–11485.
35. Xiao G.Q., Li H., Xu M.C. // J. Appl. Polym. Sci. 2013. V. 127. P. 3858–3863.
36. Gao J., Jansen B., Cerli C. et al. // Eur. J. Soil Sci. 2017. V. 68. P. 667–677.
37. Li S., Huang L., Zhang H. et al. // Appl. Surf. Sci. 2021. V. 540. P. 148386–148395.
38. Jahan N., Roy H., Reaz A.H. et al. // Case Stud. Chem. Environ. Eng. 2022. V. 6. P. 100239–100249.
39. Hessien M. // Molecules. 2023. V. 28. P. 4526–4542.
40. He Y., Ni L., Gao Q. et al. // Molecules. 2023. V. 28. P. 3410–3425.
41. Liang C., Shi Q., Feng J. et al. // Nanomaterials. 2022. V. 12. № 11. P. 1814–1832.
42. Thang N.H., Khang D.S., Hai T.D. et al. // RSC Adv. 2021. V. 11. № 43. P. 26563–26570.
43. Guo X., Wei Q., Du B. et al. // Appl. Surf. Sci. 2013. V. 284. P. 862–869.
44. Adnan Omer M., Khan B. et al. // Water. 2022. V. 14. P. 4139–4153.
45. Athari M., Fattahi M., Khosravi-Nikou M. et al. // Sci. Rep. 2022. V. 12. P. 20415–20430.
46. Alkhabbas M., Al-Ma'abreh A.M., Edris G. et al. // Int. J. Environ. Res. Public Health. 2023. V. 20. P. 3280–3294.