

АДСОРБЦИЯ РОДАМИНА Ж ИЗ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ ЧАСТИЦАМИ МАЛОСЛОЙНОГО ГРАФЕНА, ПОЛУЧАЕМОГО МЕТОДОМ САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗА

© Н. Д. Подложнюк¹, А. А. Возняковский¹, А. П. Возняковский², С. В. Кидалов¹,
Е. А. Богачёва¹

¹ Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН,
194064, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26

² Научно-исследовательский институт синтетического каучука им. академика С. В. Лебедева,
198035, г. Санкт-Петербург, ул. Гапсальская, д. 1
E-mail: nikigod.1@gmail.com

Поступила в Редакцию 28 июня 2023 г.

После доработки 11 августа 2023 г.

Принята к публикации 4 сентября 2023 г.

В работе исследована адсорбционная способность малослойного графена, полученного методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, по отношению к родамину Ж. Показаны зависимости сорбционной емкости частиц малослойного графена от концентрации родамин Ж в водном растворе, температуры раствора и времени адсорбции. Обнаружено, что адсорбция родамин Ж на поверхности малослойного графена удовлетворительно описывается моделью Ленгмюра и Фрейндлиха. Данный процесс протекает в смешанно-диффузионном режиме и может быть описан кинетическим уравнением псевдотортого порядка.

Ключевые слова: малослойный графен; графен; самораспространяющийся высокотемпературный синтез; адсорбция; родамин Ж

DOI: 10.31857/S0044461823020093; EDN: OURRFK

Красители, используемые в различных отраслях промышленности, являются высокотоксичными соединениями и представляют серьезную опасность для окружающей среды и человека даже в крайне низких концентрациях [1]. Наиболее часто используемым методом очистки вод от органических красителей является адсорбция вследствие достаточно простого и относительно дешевого способа исполнения. В качестве сорбентов могут выступать различные углеродные материалы, такие как активированный уголь [2], технический углерод [3], высокодисперсный графит [4], углеродные нанотрубки [5], природные материалы (древесные опилки) [6] и др. Тем не менее

развитие современной промышленности требует повышения эффективности процессов очистки, вследствие чего ведутся поисковые исследования новых материалов для сорбции токсинов. Перспективными материалами для использования в качестве сорбентов могут служить графен и графеновые наноструктуры. Сорбционная емкость по отношению к органическим красителям у данных наноматериалов выше, чем у классических адсорбентов [7].

Графен — это углеродный наноматериал, структура которого состоит из атомов углерода, образующих плоскость из шестичленных циклов с sp^2 -гибридизованными атомными орбиталями. Негибридизованные

электроны образуют одну общую π -систему, за счет которой возможна адсорбция молекул органического красителя в результате π - π -взаимодействия. Была показана возможность использования графена при сорбции газов [8, 9], ароматических растворителей [10], ионов металлов [11]. Показано, что сорбционные свойства графеновых наноструктур зависят от методики их получения [12].

Следует, однако, отметить, что широкое использование графеновых материалов ограничивается высокой стоимостью их синтеза [13]. Для снижения себестоимости графена может быть использован метод самораспространяющегося высокотемпературного синтеза [14].

Цель работы — исследование сорбционных свойств малослойного графена, полученного методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, по отношению к роданину Ж.

Экспериментальная часть

Малослойный графен был синтезирован методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза из целлюлозы (99.9%, Sigma-Aldrich, № 9004-34-6), по методике [14]. Изображения образца получены методом сканирующей электронной спектроскопии (СЭМ) с использованием сканирующего электронного микроскопа Mira-3M (TESCAN). Для получения СЭМ-изображений образец малослойного графена в виде порошка наносили на двухсторонний электропроводящий углеродный скотч шириной 8 мм Carbon conductive tape (TED PELLA, INC.). Рентгенофазовый анализ был проведен на рентгеновском дифрактометре Rigaku SmartLab 3 ($\text{CuK}\alpha$, длина волны $\lambda = 0.154051$ нм). Дисперсность порошков малослойного графена оценивали методом лазерной дифракции с использованием прибора Mastersizer 2000 (Malvern Panalytical). Путем ультразвукового воздействия в течение 1 мин приготовлена водная суспензия частиц малослойного графена (концентрация частиц составляла 0.05 мас%) с помощью прибора Vilitek VBS-3H. ИК-спектры малослойного графена были получены с использованием спектрометра Инфралюм ФТ-08 (ООО «Люмэкс-маркетинг»).

Деионизованная вода, используемая в работе, была получена с помощью системы водоподготовки Arim advance (Sartorius). Для исследования сорбционной способности малослойного графена по отношению к роданину Ж готовили раствор роданина Ж (ч.д.а., АО «Ленреактив») концентрацией $100 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$ в деионизованной воде, из которого методом разбавления были

получены все остальные растворы. Исследование сорбции проводили в плоскодонных колбах емкостью 250 мл. В колбу добавляли раствор роданина Ж известной концентрации и порошок малослойного графена, после чего смесь выдерживали в исследуемых условиях на автовстряхивателе S-3.02 20M (ELMI). Малослойный графен отделяли методом центрифугирования при $4000 \text{ об} \cdot \text{мин}^{-1}$ в течение 10 мин. Равновесную концентрацию раствора роданина Ж определяли по оптической плотности при 520 нм с помощью спектрофотометра УФ-1800 ECOVIEW (Shanghai Mapada Instruments Co., Ltd). Удельную сорбционную емкость q_e рассчитывали по формуле

$$q_e = \frac{c_0 - c_e}{m} V, \quad (1)$$

где c_0 — концентрация раствора роданина Ж до сорбции ($\text{мг} \cdot \text{л}^{-1}$), c_e — концентрация раствора роданина Ж после сорбции ($\text{мг} \cdot \text{л}^{-1}$), m — масса малослойного графена (г), V — объем раствора (л).

Влияние pH раствора на адсорбцию роданина Ж изучали в диапазоне pH 3–11 в 100 мл раствора, содержащего роданин Ж ($5 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$) и навеску малослойного графена, равную 50 мг. Для варьирования pH в исследуемую суспензию добавляли HNO_3 (70%, Sigma-Aldrich, № 7697-37-2), разбавленную деионизованной водой до 1%, NaOH (98%, Sigma-Aldrich, № 1310-73-2) в виде 1%-ного раствора в деионизованной воде.

Влияние количества малослойного графена на удельную сорбционную емкость исследовали в растворе роданина Ж концентрацией $5 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$ объемом 100 мл, навески малослойного графена составляли 12, 25, 50, 100, 200 мг.

Изучение влияния времени адсорбции на удельную сорбционную емкость проводили с использованием раствора роданина Ж концентрацией 5 и $10 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$ и навески малослойного графена, равной 50 мг. Смеси раствора роданина Ж и малослойного графена выдерживали в интервале 5–240 мин на автовстряхивателе S-3.02 20M (ELMI).

Для изучения термодинамических закономерностей адсорбции использовали навеску малослойного графена 50 мг, внесенную в 100 мл раствора роданина Ж с исходными концентрациями от 1 до $20 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$, при температурах 293, 313 и 333 К. Контроль температуры проводили с помощью водных термостатов.

Обсуждение результатов

Частицы малослойного графена имеют микрометровые латеральные размеры (рис. 1, а), методом ла-

зерной дифракции было обнаружено, что наибольшее количество частиц имеет размеры от 1 до 3 мкм. Для оценки количества слоев используемого малослойного графена были проведены исследования методом рентгеновской дифракции (рис. 1, б). С использованием данных о ширине пика 002 на полувысоте по формуле Шеррера был определен размер кристаллита (18.86 \AA). Это в совокупности с данными о межплоскостном расстоянии (4.07 \AA) позволило установить, что количество слоев в используемом образце малослойного графена не превышает 5 [15].

На ИК-спектре малослойного графена (рис. 1, в) присутствуют три высокоинтенсивные полосы — 1360 , 1610 и 3350 см^{-1} , наличие которых свидетельствует о наличии адсорбированной воды на поверхности малослойного графена [16]. Для удаления воды был проведен отжиг при 300°C в муфельной печи на воздухе в течение 30 мин. После отжига интенсивность полос при 1360 и 3350 см^{-1} значительно умень-

шилась (рис. 1, з), что свидетельствует о снижении количества адсорбированной воды, при этом никаких новых полос функциональных групп обнаружить не удалось.

Низкоинтенсивная полоса при 2230 см^{-1} соответствует колебанию нитрильной связи ($\text{C}\equiv\text{N}$). Следует отметить, что в области $1000\text{--}1800 \text{ см}^{-1}$ могут регистрироваться полосы, отвечающие за колебания связей $\text{C}=\text{N}$ (1610 см^{-1}) и $\text{C}=\text{C}$ ($1535\text{--}1590 \text{ см}^{-1}$), которые не удалось обнаружить.

Методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии в составе малослойного графена было обнаружено наличие кислорода $10 \text{ мас}\%$ и азота $10 \text{ мас}\% \text{ N}$.

Кислотность среды является одним из важнейших факторов, влияющих на процесс адсорбции. Адсорбция родамина Ж лучше всего протекает в кислой и нейтральной среде (рис. 2, а): при уменьшении pH раствора с 6 до 1.5 сорбционная емкость увели-

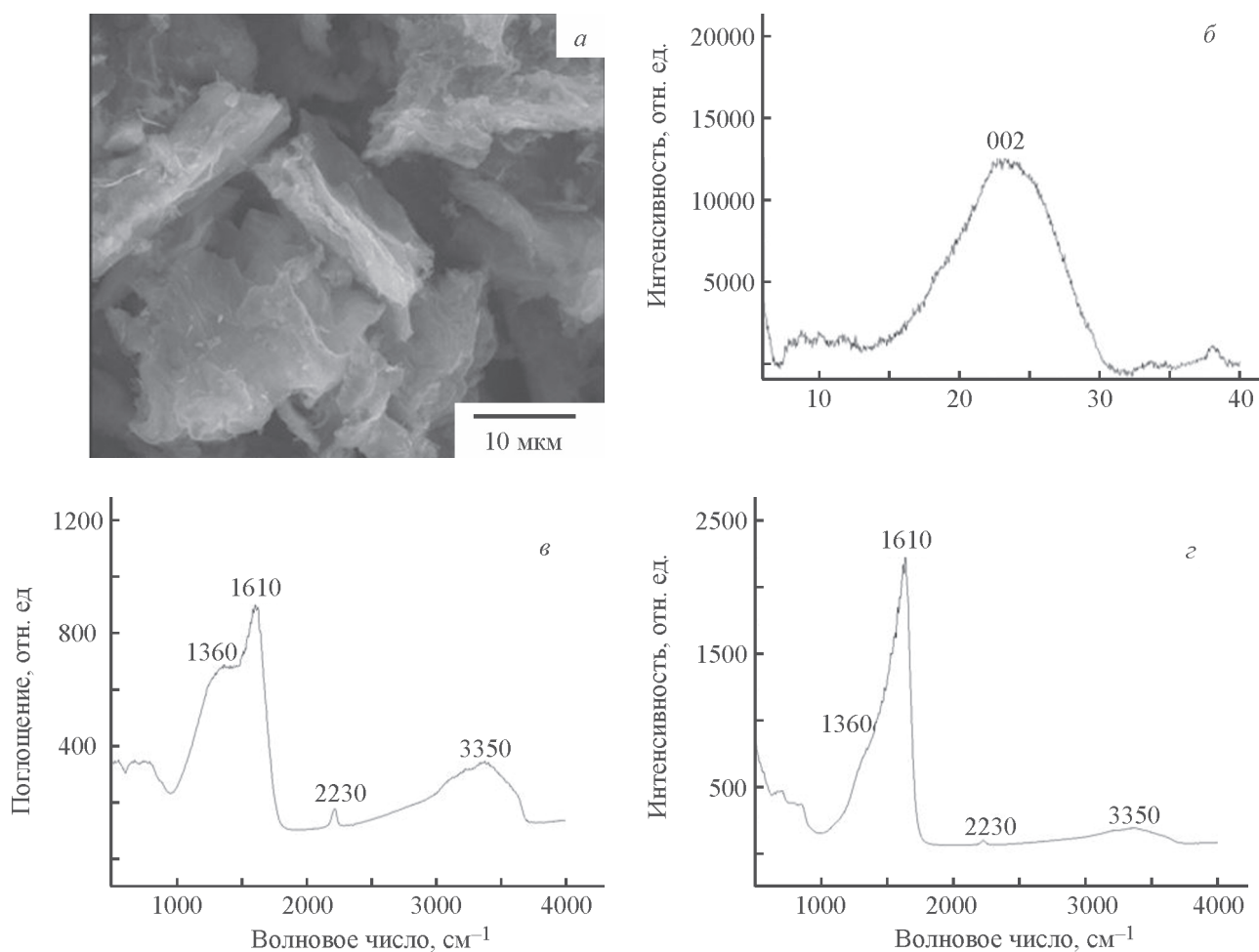


Рис. 1. Электронная микрофотография малослойного графена (а), рентгенограмма малослойного графена (б), инфракрасный спектр малослойного графена до (в) и после отжига при 300°C (з).

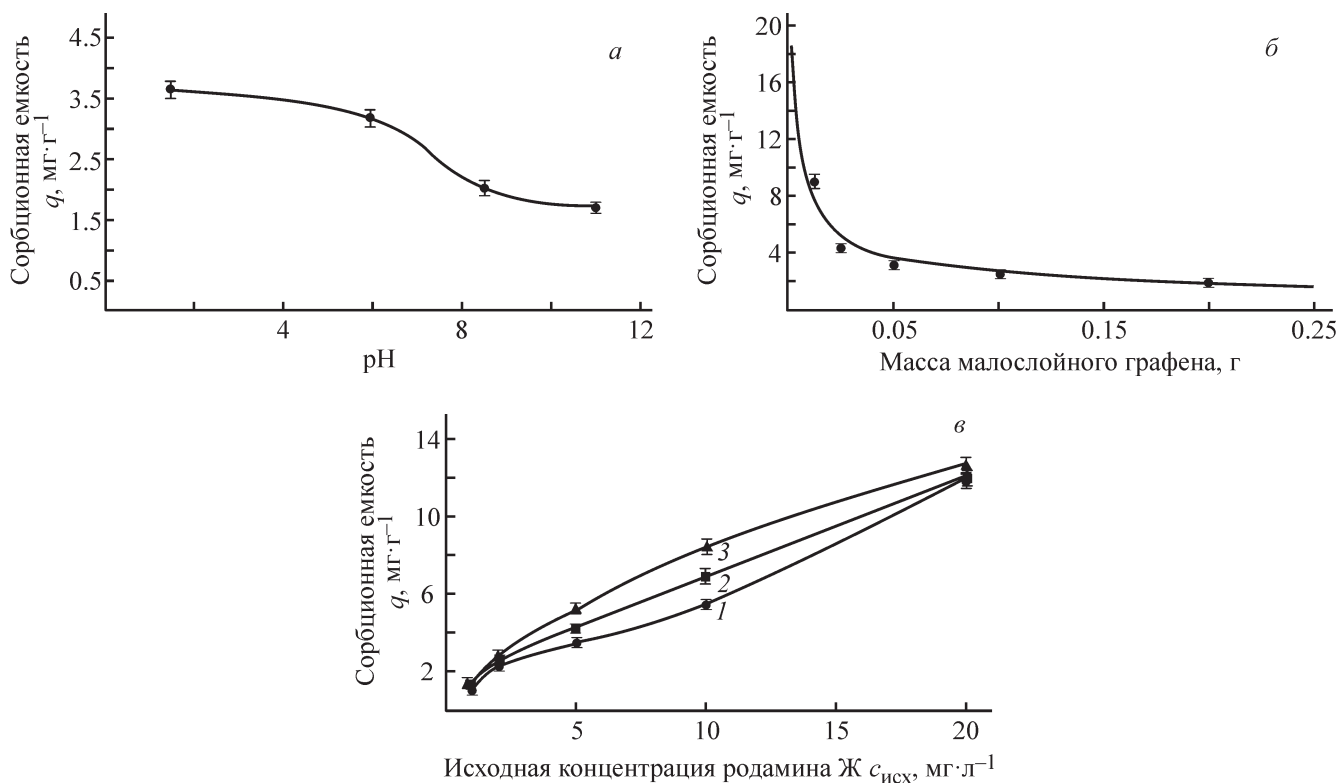


Рис. 2. Зависимость сорбционной емкости малослойного графена по отношению к роданину Ж от pH раствора (а), от массы малослойного графена в растворе (б), от концентрации роданина Ж при температуре 293 (1), 313 (2), 333 К (3) (в).

чивается с 3.2 до 3.7 мг·г⁻¹, увеличение pH негативно сказывается на адсорбции, при pH 8.5 сорбционная емкость уменьшается до 2 мг·г⁻¹, а при pH 11 — до 1.7 мг·л⁻¹. Можно предположить, что в щелочной среде происходит нейтрализация положительно заряженных молекул роданина гидроксид-ионами, и взаимодействие малослойного графена с роданином Ж становится преимущественно гидрофобным. Однако данный механизм нуждается в дальнейшем исследовании.

Введение большего количества малослойного графена закономерно приводит к возрастанию степени извлечения роданина Ж из водного раствора, что связано с увеличением общей площади поверхности, на которой может сорбироваться краситель. Тем не менее при увеличении массы малослойного графена удельная сорбционная емкость уменьшается (рис. 2, б). Это может быть связано с тем, что при низких концентрациях малослойного графена все активные центры сорбции доступны, а с увеличением массы малослойного графена только часть центров адсорбции доступна для взаимодействия вследствие агрегации частиц. Увеличение температуры раствора с 293 до 333 К приводит к незначительному увеличе-

нию сорбционной емкости (рис. 2, в), что можно объяснить частичной деагрегацией частиц малослойного графена с образованием новых центров адсорбции [17]. Характер изотерм адсорбции свидетельствует о наличии у малослойного графена как микропор, так и макропор.

Для описания изотерм адсорбции роданина Ж на поверхности малослойного графена были использованы модели Ленгмюра и Фрейндлиха. Модель Ленгмюра предполагает, что адсорбция протекает на однородной поверхности, и адсорбированные молекулы не взаимодействуют между собой [18, 19]. Изотерма Ленгмюра представляет собой прямую, описываемую уравнением

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_{\max}} + \frac{1}{q_{\max}k_L c_e}, \quad (2)$$

где c_e — равновесная концентрация раствора после сорбции (мг·л⁻¹); q_{\max} — максимальная сорбционная емкость (мг·г⁻¹); k_L — константа Ленгмюра, характеризующая взаимодействие адсорбата и адсорбента.

Уравнение Фрейндлиха является эмпирическим и описывает адсорбцию на гетерогенной поверхности [19, 20]:

Таблица 1
Значения констант изотерм адсорбции родамина Ж на малослойном графене

Модель	Параметры модели	Значения параметров при температуре, К		
		293	313	333
Модель Ленгмюра	Максимальная сорбционная емкость q_{\max} , мг·г ⁻¹	9.4	8.76	11.85
	Константа Ленгмюра k_L , Л·мг ⁻¹	0.3	0.61	0.49
	Коэффициент детерминации R^2	0.95	0.97	0.98
Модель Фрейндлиха	Константа Фрейндлиха k_F , Л·мг ⁻¹	1.97	2.75	3.25
	Эмпирический параметр $1/n$	0.61	0.53	0.54
	Коэффициент детерминации R^2	0.94	0.98	0.98

$$\lg q_e = \lg k_F + 1/n \lg c_e, \quad (3)$$

где k_F — константа Фрейндлиха, характеризующая сорбционную емкость; $1/n$ — эмпирический параметр, характеризующий интенсивность адсорбции.

Константы q_{\max} и k_F , рассчитанные по моделям Ленгмюра и Фрейндлиха, растут при повышении температуры, что свидетельствует о более эффективном взаимодействии родамина Ж с частицами малослойного графена при высоких температурах (табл. 1). Следует отметить, что рассчитанная максимальная сорбционная емкость сравнима с сорбционной емкостью активированного угля [21]. Однако в отличие от классических адсорбентов, таких как древесные опилки или активированный уголь, сорбционные свойства графеновых наноструктур, в том числе и малослойного графена, можно улучшить путем химической модификации поверхности, как, например, легированием металлами [22] или присоединением к полимерной цепи [23], что может увеличить сорбционную емкость в несколько раз. При этом стоит отметить, что увеличение сорбционной емкости путем химической модификации не всегда требует использования дорогих реагентов или методик. Кроме того, в случае решения опасных экологических проблем стоимость их решения не всегда является решающим фактором.

Динамическое равновесие достигается в течение 250 мин. Увеличение концентрации исходного раствора в 2 раза приводит к увеличению удельной сорбционной емкости на 33% (рис. 3).

Адсорбция может описываться кинетическими моделями псевдопервого (4) и псевдвторого (5) порядка [24] (табл. 2).

$$\lg(q_e - q_t) = \lg q_e - \frac{k_1 t}{2.303}, \quad (4)$$

$$\frac{t}{q_e} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (5)$$

где q_t и q_e — соответственно усредненная текущая и равновесная концентрации в сорбенте (мг·г⁻¹), k_1 — константа скорости адсорбции в модели псевдопервого порядка, k_2 — константа скорости адсорбции в модели псевдвторого порядка, t — время сорбции.

Из полученных данных можно сделать вывод о том, что кинетика процесса сорбции лучше описывается кинетическим уравнением псевдвторого порядка, так как коэффициент детерминации R^2 более близок к 1 и расчетное значение равновесной сорбционной емкости близко к экспериментальному.

Для определения лимитирующей стадии процесса адсорбции были использованы модели, описывающие внешнюю и внутреннюю диффузию:

$$\ln(1 - F) = -yt \quad (\text{внешняя диффузия}), \quad (6)$$

$$q_t = k_d \sqrt{t} + A \quad (\text{внутренняя диффузия}), \quad (7)$$

где F — скорость достижения диффузии (q_t/q_e); y — некоторая величина, постоянная при данных

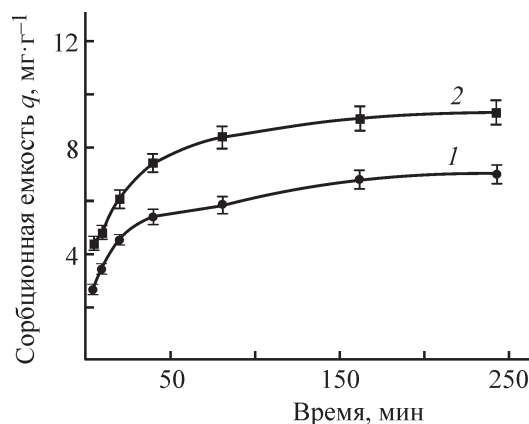


Рис. 3. Зависимость сорбционной емкости малослойного графена от времени сорбции. Концентрация родамина Ж в исходном растворе (мг·л⁻¹): 1 — 5, 2 — 10.

Таблица 2

Параметры адсорбции родамина Ж на поверхности малослойного графена, рассчитанные по кинетическим моделям псевдопервого и псевдвторого порядка

Модель	Параметры модели	Концентрация исходного раствора родамина Ж, мг·л ⁻¹	
		5	10
Кинетическая модель псевдопервого порядка	Экспериментальная равновесная сорбционная емкость q_e , мг·г ⁻¹	7.02	9.34
	Расчетная равновесная сорбционная емкость q_e , мг·г ⁻¹	4.00	4.38
	Константа скорости адсорбции k_1 , 1/мин	0.0136	0.0022
	Коэффициент детерминации R^2	0.8757	0.9276
Кинетическая модель псевдвторого порядка	Экспериментальная равновесная сорбционная емкость q_e , мг·г ⁻¹	7.02	9.34
	Расчетная равновесная сорбционная емкость q_e , мг·г ⁻¹	7.28	9.54
	Константа скорости адсорбции k_2 , г·мг ⁻¹ ·мин ⁻¹	0.0085	0.0090
	Коэффициент детерминации R^2	0.983	0.9962

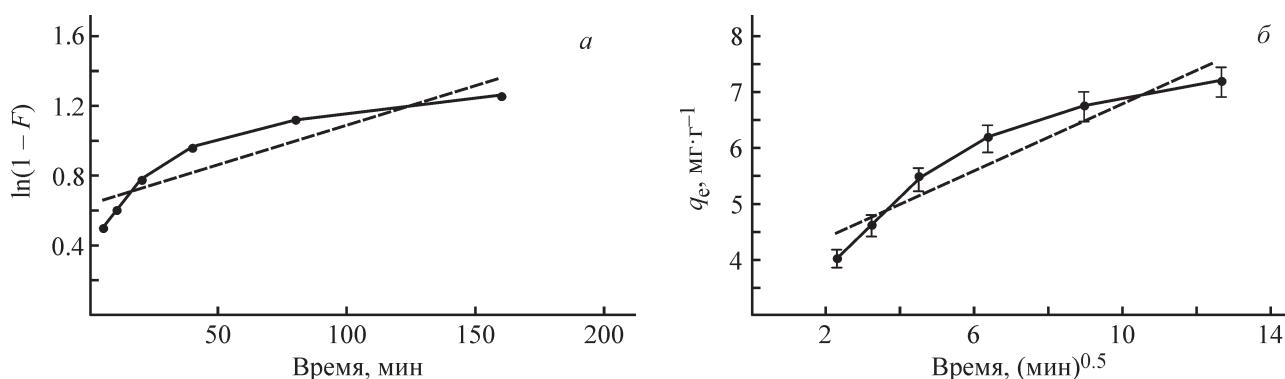


Рис. 4. Адсорбционные кривые, описывающие внешнюю диффузию (а), внутреннюю диффузию (б) родамина Ж к поверхности малослойного графена.

условиях; t — время (мин); k_d — константа скорости диффузии (мг·г⁻¹·мин^{-0.5}); A — коэффициент, пропорциональный толщине пленки, окружающей зерно сорбента.

Кинетические кривые сорбции в первые минуты процесса являются нелинейными. Это свидетельствует о том, что сорбция не может однозначно описываться только внутридиффузионной или только внешнедиффузионной моделью (рис. 4). Экспериментальные данные могут быть адекватно описаны линейной зависимостью в координатах F от \sqrt{t} при малых временах контакта фаз, однако наблюдается отклонение от линейности при степени завершенности процесса $F > 0.8$. Таким образом, полученный вид зависимостей в указанных координатах свидетельствует в пользу смешанно-диффузионной кинетики процесса сорбции и не позволяет однозначно выявить лимитирующую стадию [25].

Выводы

Малослойный графен, получаемый в условиях самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, способен адсорбировать молекулы органических красителей. Выбранные условия синтеза позволяют получить материал, не уступающий по эффективности классическим сорбентам. Термодинамические и кинетические характеристики процесса адсорбции родамина Ж на поверхности малослойного графена присущи большинству нанокуглеродных материалов, а именно характер изменения сорбционной емкости при увеличении температуры и смешанно-диффузионный характер адсорбции. Основываясь на литературных данных, можно ожидать значительного увеличения сорбционной емкости малослойного графена за счет химической модификации поверхности, что будет являться целью дальнейших исследований.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания № FFUG-2024-0019 «Функциональные углеродные наноструктурированные материалы».

Конфликт интересов

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

Информация о вкладе авторов

Н. Д. Подложнюк и Е. И. Богачёва — изучение адсорбции родамина Ж; А. А. Возняковский — синтез малослойного графена; А. П. Возняковский и С. В. Кидалов — исследование структуры малослойного графена.

Информация об авторах

Подложнюк Никита Денисович, м.н.с. ФТИ им. А. Ф. Иоффе

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4414-6066>

Возняковский Алексей Александрович, к.х.н., н.с. ФТИ им. А. Ф. Иоффе

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6482-172X>

Возняковский Александр Петрович, д.х.н., зав. лабораторией Научно-исследовательского института синтетического каучука

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5979-3661>

Кидалов Сергей Викторович, д.ф-м.н., в.н.с. ФТИ им. А. Ф. Иоффе

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5685-9899>

Богачёва Елизавета Ивановна, лаборант ФТИ им. А. Ф. Иоффе

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-3103-5850>

Список литературы

- [1] Zümriye A. Application of biosorption for the removal of organic pollutants: A Review // Proc. Biochem. 2005. V. 40 N 3. P. 997–1026. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2004.04.008>
- [2] Hameed B. H., Din A. T. M., Ahmad A. L. Adsorption of methylene blue onto bamboo-based activated carbon: Kinetics and equilibrium studies // J. Hazard. Mater. 2007. V. 141. N 3. P. 819–825. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.07.049>
- [3] Пьянова Л. Г., Корниенко Н. В., Седанова А. В., Лавренов А. В. Адсорбция ализаринового красного на техническом углероде // ЖПХ. 2021. Т. 94. № 5. С. 596–602. <https://doi.org/10.31857/S0044461821050078>
- [4] P'yanova L. G., Kornienko N. V., Sedanova A. V., Lavrenov A. V. Adsorption of alizarin red onto carbon black // Russ. J. Appl. Chem. 2021. V. 94. N 5. P. 601–606. <https://doi.org/10.1134/S1070427221050074>
- [5] Mingfei Z., Peng L. Adsorption of methylene blue from aqueous solutions by modified expanded graphite powder // Desalination. 2009. V. 249. N 1. P. 331–336. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2009.01.037>
- [6] Hamdaoui O. Batch study of liquid-phase adsorption of methylene blue using cedar sawdust and crushed brick // J. Hazard. Mater. 2006. V. 135. N 1. P. 264–273. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.11.062>
- [7] Liu T., Li Y., Dua Q., Suna J., Jiao Y., Yanga G., Wang Z., Xia Y., Zhang W., Wang K., Zhu H., Wu D. Adsorption of methylene blue from aqueous solution by graphene // Col. Surf. B. 2012. V. 90. P. 197–203. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2011.10.019>
- [8] Kong L., Enders A., Rahman T. S., Dowben P. A. Molecular adsorption on graphene // J. Phys. Condens. Matter. 2014. V. 26. P. 1–27. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/26/44/443001>
- [9] Кулакова И. И., Лисичкин Г. В. Перспективы применения графеновых наноматериалов: сорбенты, мембраны, газовые сенсоры (обзор) // ЖПХ. 2021. Т. 94. № 9. С. 1090–1103. <https://doi.org/10.31857/S0044461821090012> [Kulakova I. I., Lisichkin G. V. Prospects for using graphene nanomaterials: Sorbents, membranes, and gas sensors // Russ. J. Appl. Chem. 2021. V. 94. N 9. P. 1177–1188. <https://doi.org/10.1134/S1070427221090019>]
- [10] Zhao J., Wang Z., White J. C., Xing B. Graphene in the aquatic environment: Adsorption, dispersion, toxicity and transformation environ // Sci. Technol. 2014. V. 48. N 17. P. 9995–10009. <https://doi.org/10.1021/es5022679>
- [11] Xu J., Cao Z., Zhang Y., Yuan Z., Lou Z., Xu X., Wang X. A Review of functionalized carbon nanotubes and graphene for heavy metal adsorption from water: Preparation, application, and mechanism // Chemosphere. 2018. V. 195. P. 351–364. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.12.061>
- [12] Hossain F., Akther N., Zhou Y. Recent advancements in graphene adsorbents for wastewater treatment: Current status and challenges // Chin. Chem. Lett. 2020. V. 31. N 10. P. 2525–2538. <https://doi.org/10.1016/j.ccl.2020.05.011>
- [13] Whitener K. E., Sheehan E. Graphene synthesis // Diam. Relat. Mater. 2014. V. 46. P. 25–34. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2014.04.006>

- [14] *Voznyakovskii A., Vozniakovskii A., Kidalov S.* New way of synthesis of few-layer graphene nanosheets by the self propagating high-temperature synthesis method from biopolymers // *Nanomaterials*. 2022. V. 12. N 4. ID 657. <https://doi.org/10.3390/nano12040657>
- [15] *Vozniakovskii A., Voznyakovskii A., Kidalov S., Osipov V.* Structure and paramagnetic properties of graphene nanoplatelets prepared from biopolymers using self-propagating high-temperature synthesis // *J. Struct. Chem.* 2020. V. 65. P. 869–878. <https://doi.org/10.1134/S0022476620050200>
- [16] *Puskar L., Petit T.* FTIR spectroscopy of nanodiamonds: Methods and interpretation // *Diam. Relat. Mater.* 2018. V. 89. P. 52–62. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2018.08.005>
- [17] *Li Y., Du Q., Wang X., Zhang P., Wang D., Wang Z., Xia Y.* Removal of lead from aqueous solution by activated carbon prepared from *Enteromorpha prolifera* by zinc chloride activation // *J. Hazard. Mater.* 2010. V. 183. N 1. P. 583–589. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.07.063>
- [18] *Langmuir I.* The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum // *J. Am. Chem. Soc.* 1918. V. 40. N 9. P. 1361–1403. <https://doi.org/10.1021/ja02242a004>
- [19] *Shams K., Sidqi A., Kamal M., Patil S.* Surfactant adsorption isotherms: A Review // *ACS Omega*. 2021. V. 6. N 48. P. 32342–32348. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c04661>
- [20] *Freundlich H.* Über die Adsorption in Lösungen // *Zeitschrift für physikalische chemie*. 1907. V. 57. N 1. P. 385–470. <https://doi.org/10.1515/zpch-1907-5723>
- [21] *Murugan M., Jansi M., Subramaniam P., Subramanian E.* Use of activated carbon prepared from *Prosopis spicigera* L. wood (PSLW) plant material for the removal of rhodamine 6G from aqueous solution // *Desalination Water Treat.* 2016. V. 57. N 7 P. 3048–3058. <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.986204>
- [22] *Wang C., Feng C., Gao Y., Ma X., Wu Q., Wang Z.* Preparation of a graphene-based magnetic nanocomposite for the removal of an organic dye from aqueous solution // *Chem. Eng. J.* 2011. V. 173. N 1. P. 92–97. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.07.041>
- [23] *Dong Z., Wang D., Liu X., Pei X., Chena L., Jin J.* Bio-inspired surface-functionalization of graphene oxide for the adsorption of organic dyes and heavy metal ions with a superhigh capacity // *J. Mater. Chem. A*. 2014. V. 2. P. 5034–5040. <https://doi.org/10.1039/C3TA14751G>
- [24] *Хамизова П. Х.* О кинетическом уравнении псевдо-второго порядка в сорбционных процессах // *ЖФХ*. 2020. Т. 94. № 1. С. 125–130. <https://doi.org/10.31857/S0044453720010148> [*Khamizov R. K.* A pseudo-second order kinetic equation for sorption processes // *Russ. J. Phys. Chem. A*. 2020. V. 94. N 1. P. 171–176. <https://doi.org/10.1134/S0036024420010148>].
- [25] *Крижановская О. О., Синяева Л. А., Карпов С. И., Селеменев В. Ф., Бородин Е. В., Рёсснер Ф.* Кинетические модели при описании сорбции жирорастворимых физиологически активных веществ высокоупорядоченными неорганическими кремнийсодержащими материалами // *Сорбцион. и хроматогр. процессы*. 2014. Т. 14. № 5. С. 784–794. <https://www.elibrary.ru/SXLCFF>
-