

ПОВЕРХНОСТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

УДК 541.183+544.72

АДСОРБЦИЯ ИНДИГОКАРМИНА АМИНОКСЕРОГЕЛЕМ ИЗ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ

А. Ю. Барабан, В. В. Кравченко, Р. В. Сухов, О. С. Ткаченко, Ю. В. Холин

Изучена сорбция индигокармина аминоксерогелем при различных значениях pH. Экспериментальные изотермы адсорбции индигокармина адекватно описываются уравнением изотермы адсорбции Ленгмюра. В рамках этой модели рассчитаны значения эффективной сорбционной емкости. Показано, что аминоксерогель является эффективным адсорбентом по отношению к индигокармину, а его сорбционная емкость мало меняется в интервале pH растворов 1.7-4.0.

Ключевые слова: аминоксерогель, адсорбция, анионный краситель, индигокармин.

Введение

Ежегодно в мире производится около 1 млн. т красителей [1], главным потребителем которых является текстильная промышленность. Более 10 % красителей попадает в сточные воды, причем около из них 20 % (более $2 \cdot 10^4$ т/год) – это анионные красители [1]. Этим обусловлена актуальность задачи очистки сточных вод от анионных красителей. Основные методы очистки – биодegradация [2-4], нанофильтрация [5-8], коагуляция [2, 5, 6, 9], электрокоагуляция [9-11], фотокаталитическое окисление [2, 12, 13], озонлиз [2, 4, 14, 15] и сорбция [2, 16-19]. Последний метод, благодаря эффективности и дешевизне, рассматривают как наиболее перспективный [16-18]. В качестве сорбентов используют как дешевые природные материалы [16, 17, 19, 20], так и более эффективные, но и более дорогие синтетические сорбенты [18, 21, 22]. Среди синтетических сорбентов, особое внимание привлекают гибридные органо-кремнеземные материалы, обладающие высокой химической и механической стойкостью, большой удельной поверхностью. Дополнительным их достоинством является возможность повторного использования [22-28]. На сорбционную емкость, равновесные и кинетические характеристики сорбции красителей этими материалами влияют содержание модификатора, морфология материала, pH раствора. Синтез наиболее распространенных адсорбентов – мезопористых аминокремнеземов – включает несколько стадий [22, 25, 27, 28] и требует использования ПАВ в качестве темплатов [26, 28]. Актуален поиск новых сорбентов для извлечения анионных красителей, которые могут быть получены по более простым методикам и сохраняют высокую сорбционную емкость в широком интервале pH.

В настоящей работе изучена возможность использования аминоксерогеля, полученного по золь-гель технологии в одну стадию без использования катализаторов гелеобразования и темплатов, в качестве адсорбента для удаления из раствора анионного красителя индигокармина (ИК). Индигокармин был выбран как типичный анионный краситель, существующий в водных растворах в виде двухзарядного аниона в широком интервале pH.

Экспериментальная часть

Краситель индигокармин (ИК, динатриевая соль индиго-5,5'-дисульфокислоты, Na_2Q , $M(\text{ИК}) = 466.4$ г/моль, рис. 1) (ООО «Химлаборреактив», Киев, Украина) квалификации «ч» (чистота не меньше 90%) очищали перекристаллизацией из водного раствора. Использовали этанол квалификации «фарм» с содержанием основного вещества 96% (Дубовязовский спиртовой завод, Украина), тетраэтоксисилан (ТЭОС) и аминопропилтриэтоксисилан (АПТЭС) (оба Merck, ФРГ), содержание основных веществ – не менее 98 %, дистиллированную воду. Другие реактивы имели квалификацию не ниже «чда».

Аминоксерогель синтезировали золь-гель методом по методике [29] (рис. 2). К 20 мл этанола при $23 \pm 2^\circ\text{C}$ приливали смесь 5.6 мл (25.1 ммоль) ТЭОС и 2.4 мл (10,3 ммоль) АПТЭС, перемешивали 5 мин и добавляли 8 мл воды. Реакционную смесь интенсивно перемешивали 35 мин

и оставляли на 24 ч. Осадок фильтровали, промывали 20 мл этанола и сушили в микроволновой печи: 20 мин при мощности излучения 70 Вт и 10 мин при мощности излучения 150 Вт.

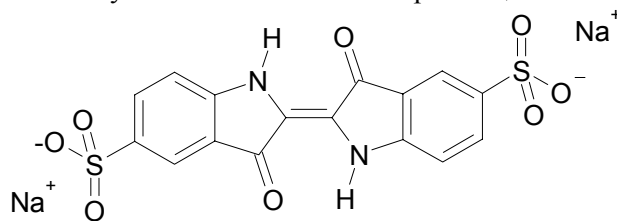


Рис. 1. Индигокармин.

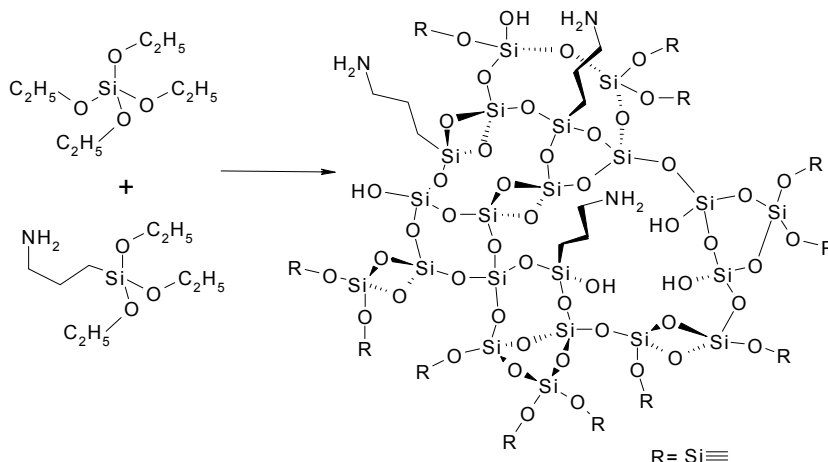


Рис. 2. Схема образования аминоксерогеля.

Удельную поверхность ($S_{уд}$, m^2/g) аминоксерогеля определяли по изотермам адсорбции-десорбции азота при 77.3 К (аппарат Nova Station Quantachrome, США). Перед проведением экспериментов материалы очищали от газов при 353К на протяжении 4 ч. Значение $S_{уд}$ находили методом БЭТ [30].

Структуру аминоксерогеля (рис. 3) наблюдали с помощью просвечивающего электронного микроскопа ПЕМ-125К (ОАО «SELMI», Сумы, Украина).

Содержание аминогрупп в материале определяли элементным анализом на азот на приборе Perkin-Elmer 2400 (США).

Равновесия протонизации закрепленных аминогрупп изучали методом рН-метрического титрования. Точные навески материалов (~ 0.1 г) суспендировали в 20.0 мл воды при $(20 \pm 2)^\circ C$ и титровали раствором HCl с концентрацией 0.1 моль/л. Для определения рН измеряли э.д.с. цепей с переносом со стеклянным электродом с водородной функцией ЭС-10603, хлорсеребряным электродом сравнения ЭВЛ 1-МЗ; солевой мостик заполняли насыщенным раствором KNO_3 в агар-агаре. Э.д.с. измеряли с помощью лабораторного иономеров U-160 МИ (ООО «Измерительная техника», Россия). Градуировку цепей проводили по стандартным буферным растворам. Погрешность измерения рН составляла ~ 0.01 . Для пересчета оценок активностей ионов H^+ в равновесные концентрации $[H^+]$ использовали предельный закон Дебая-Хюккеля (ионная сила раствора менялась в интервале $(0.1 - 2) \cdot 10^{-2}$ моль/л). Суспензионный эффект наблюдался только при интенсивном перемешивании (более ~ 200 min^{-1}), величина суспензионного эффекта не превышала 0.1 рН.

Исследуя адсорбцию ИК, исходные растворы красителя готовили растворением точных навесок в заданных объемах дистиллированной воды. Рабочие растворы готовили, смешивая соответствующие стандартные буферные растворы с исходными растворами красителя в соотношении 1:1 по объему. Было установлено, что система водный раствор ИК – аминоксерогель быстро достигает стационарного состояния: за 90 мин адсорбируется 95 % от максимально возможного количества красителя.

Адсорбцию красителя проводили из растворов с рН 1.68, 3.56, 4.01 и 6.86. Точные навески материалов (~ 0.02 г) вносили в 8.00 мл рабочих растворов и перемешивали 90 мин при $25 \pm 2^\circ C$.

После этого отделяли твердую фазу от растворов центрифугированием ($5000 \text{ об}\cdot\text{мин}^{-1}$). Остаточные концентрации красителей в растворах определяли спектрофотометрически при длине волны $\lambda = 610 \text{ нм}$ (толщина светопоглощающего слоя 0.5 и 1.0 см) на приборе КФК-3 («Загорский оптико-механический завод», Россия). Изучая влияние концентрации хлорид-ионов в растворе на адсорбцию ИК, варьировали концентрацию KCl в диапазоне 0.12-1.25 моль/л. При исследовании зависимости адсорбции от массы сорбента брали навески 10-40 мг.

Адсорбцию ИК (q_E , ммоль/г) рассчитывали как

$$q_E = \frac{(C_0 - C_E) \cdot V}{m} \quad (1)$$

где C_0 и C_E – начальная и равновесная концентрации красителя (моль/л), соответственно; V – объем раствора (л); m – масса сорбента (г).

Результаты и их обсуждение

Синтезированный аминоксерогель представляет собой неупорядоченный материал с удельной поверхностью $110 \pm 5 \text{ м}^2/\text{г}$, состоящий из агрегатов глобулярных частиц диаметром 20-30 нм (рис. 3).

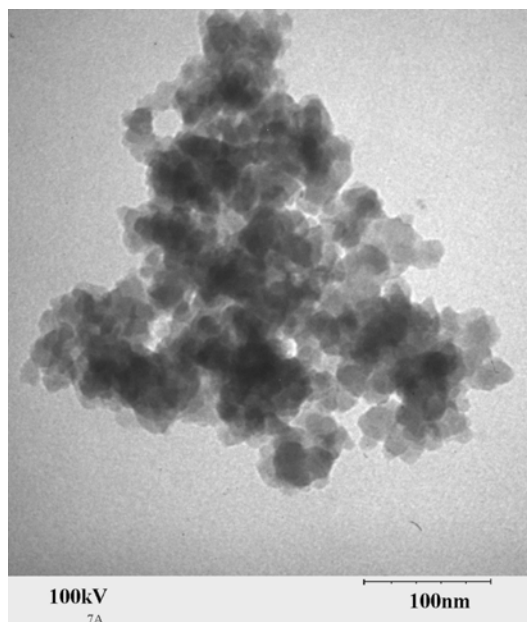


Рис. 3. Электронно-микроскопическое изображение аминоксерогеля.

Полное содержание аминоксиров в материале ($3.28 \pm 0.02 \text{ ммоль/г}$) больше эффективной адсорбционной емкости по отношению к ионам H^+ ($2.35 \pm 0.05 \text{ ммоль/г}$), т.е. часть аминоксиров недоступна для сорбатов.

Адсорбцию ИК аминоксерогелем уместно связывать с электростатическим взаимодействием аниона ИК с протонированными поверхностными аминоксировыми группами [31, 32]. Для того чтобы определить интервал pH, в котором закрепленные аминоксировые группы протонированы, по данным pH-метрического титрования суспензий аминоксировоземной кислоты нашли количественные характеристики протолитических равновесий. Равновесия описывали с помощью модели триденатного связывания [33]. В этой модели полагают, что поверхность аминоксирового геля можно представить как ансамбль независимых сорбционных центров, каждый из которых содержит три аминоксировые группы (Z), а связывание ионов H^+ триденатными центрами является ступенчатым процессом (рис. 4):

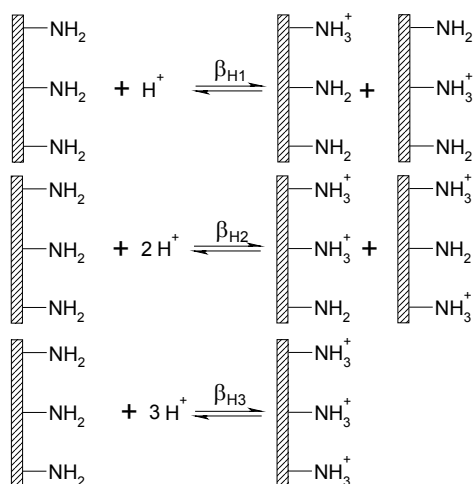


Рис. 4. Описание протонизации закрепленных аминогрупп в модели тридентатного связывания. β_{H1} – общие константы протонизации аминогрупп в тридентатном центре Z_3 .

Модель обеспечивает адекватное описание экспериментальных данных. При оценке стандартного отклонения $s(\text{pH}) = 0.065$ значение статистики выполняется неравенство $\chi^2_{\text{эксп}} = 15.0 < \chi^2_{f=N-Z}(5\%) = 19.7$, где

$$\chi^2_{\text{эксп}} = \sum_{k=1}^N w_k \times ([\text{H}^+]_k^{\text{расчет}} - [\text{H}^+]_k^{\text{эксперимент}})^2,$$

k – номер точки кривой титрования, N – число точек, статистический вес k -го измерения

$w_k = \frac{1}{([\text{H}^+]_k^{\text{эксперимент}} \cdot \ln(10) \cdot s(\text{pH}))^2}$, $\chi^2_{f=N-Z}(5\%)$ – 5%-ная точка распределения χ^2 для

$f = 14 - 3 = 11$ степеней свободы. Логарифмы констант протонизации составили: $\lg \beta_{H1} = 7.90$ (0.05); $\lg \beta_{H2} = 13.72$ (0.06); $\lg \beta_{H3} = 17.42$ (0.07) (в скобках приведены средние квадратические отклонения). С использованием полученных констант рассчитали зависимость степеней образования химических форм $\text{H}_i\text{Z}_3^{i+}$, $i = 0, 1, 2, 3$, (α_i , %) от pH (рис. 5). Практически полное протонирование аминогрупп происходит в кислых средах, и, значит, в этих условиях адсорбционная емкость аминоксерогеля по отношению к ИК должна быть максимальной. Вместе с тем, даже при pH 7 в протонированной форме находится более 30 % аминогрупп, так что аминоксерогель может служить эффективным сорбентом для извлечения ИК и из нейтральных, и из слабощелочных растворов.

На основе результатов моделирования протолитических равновесий на поверхности аминоксерогеля, изучили адсорбцию ИК из кислых и нейтральных сред. Изотермы адсорбции ИК при разных значениях pH растворов представлены на рис. 6.

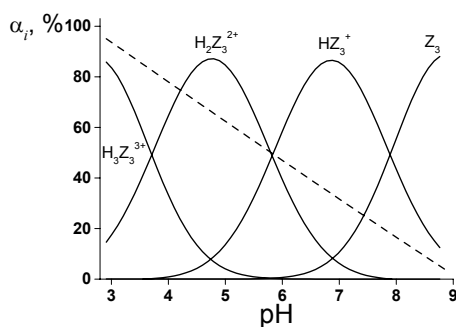


Рис. 5. Зависимость степеней образования форм $\text{H}_i\text{Z}_3^{i+}$, $i = 0, 1, 2, 3$, от pH. Штриховая линия показывает степень протонирования аминогрупп.

При поиске модели, описывающей равновесия адсорбции ИК, вначале связывание анионов красителя рассматривали как следствие реакций ионного обмена (рис. 7):



где $\sim \text{R}$ – поверхность сорбента, Q^{2-} – анион ИК, чертой над формулами обозначены реагенты в фазе аминоксерогеля. Подгоночными параметрами модели ионного обмена служат константы равновесия реакций (2) и (3) и удельная концентрация активных центров $\sim \text{RNH}_3^+$.

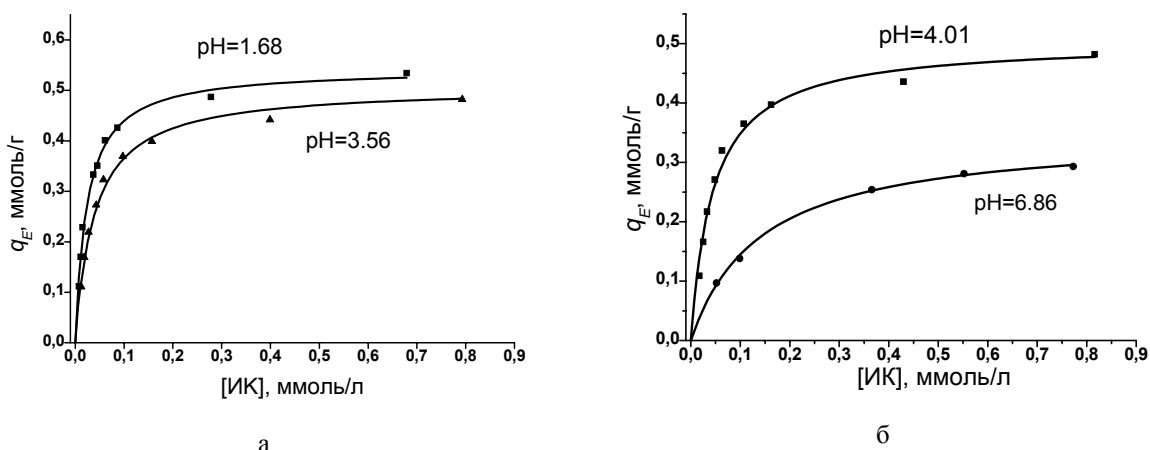


Рис. 6. Изотермы адсорбции ИК из растворов с различными pH. Точки – эксперимент, линии – аппроксимация уравнением изотермы Ленгмюра.

Однако при расчетах по программе CLINP 2.1 [34] выяснилось, что ни при каких допустимых значениях подгоночных параметров не удастся описать экспериментальные данные по сорбции ИК в пределах погрешностей измерения. Добиться адекватного описания экспериментальных данных, можно, обращаясь к электростатическим моделям приповерхностного слоя с большим числом подгоночных параметров (см., например, [35]), однако такое описание, в силу переопределенности модели, будет формальным.

Для того чтобы убедиться в том, что модель ионного обмена далека от реальности, изучили, влияет ли концентрация хлорид-ионов в растворе на адсорбцию ИК. Измерения выполнили при pH раствора 1.68 и массе навески аминоксерогеля 20 мг. Оказалось, что варьирование концентрации хлорид-ионов в растворе не сказывается на адсорбции ИК (рис. 8), т.е. схема извлечения ИК из раствора, передаваемая уравнениями (2) и (3), не является адекватной.

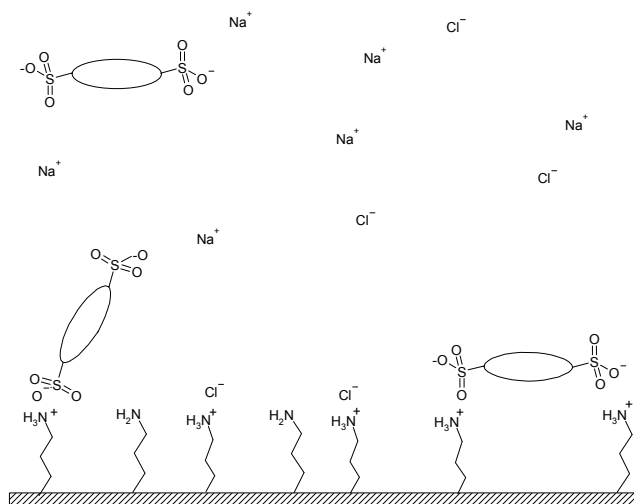


Рис. 7. Схематическое представление состояния поверхности аминоксерогеля с сорбированным ИК.

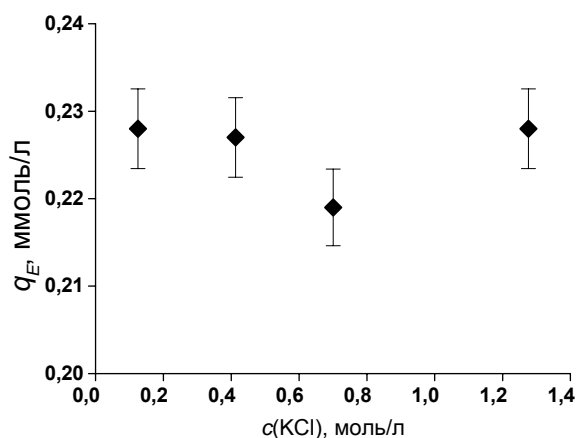


Рис. 8. Зависимость степени извлечения ИК аминокремнеземом от концентрации КСl.

В качестве альтернативы модели ионного обмена использовали различные модели равновесий адсорбции (в таких моделях состояние противоионов не учитывается). Экспериментальные изотермы адсорбции ИК аппроксимировали уравнениями изотерм адсорбции Ленгмюра (4), Фрейндлиха (5) и Сипса (6):

$$q_E = \frac{q_{\max} \cdot K_L \cdot C_E}{1 + K_L \cdot C_E}, \quad (4)$$

$$q_E = K_F \cdot C_E^{1/n}, \quad (5)$$

$$q_E = \frac{q_{\max} \cdot K_S \cdot C_E^{1/n}}{1 + K_S \cdot C_E^{1/n}}, \quad (6)$$

где q_{\max} – эффективная адсорбционная емкость, моль/г; C_E – равновесная молярная концентрация красителя; K_L – константа адсорбции Ленгмюра; K_F – константа адсорбции Фрейндлиха; K_S – константа адсорбции Сипса; n – коэффициент.

Уравнение изотермы Ленгмюра описывает монослойную адсорбцию на энергетически однородной поверхности в отсутствие латеральных взаимодействий и других эффектов кооперативности (идеальную адсорбцию); уравнения изотерм Фрейндлиха и Сипса применимы для описания адсорбции на поверхностях с определенными типами энергетической неоднородности [36].

Подгоночные параметры рассчитывали нелинейным методом наименьших квадратов, минимизируя функционал

$$\chi_{\text{эксп}}^2 = \sum_{k=1}^N w_k \times (q_e^{\text{расчет}} - q_e^{\text{эксперимент}})^2,$$

статистические веса назначали как $w_k = 1 / (0.05 \cdot q_e^{\text{эксперимент}})^2$.

Уравнение изотермы адсорбции Сипса оказалось неприменимым вследствие переопределенности модели – по экспериментальным данным удается определить лишь две линейные комбинации трех подгоночных параметров. Кроме того, модель не воспроизводит изотермы адсорбции в пределах погрешности измерений.

Уравнение изотермы адсорбции Фрейндлиха также не обеспечивает адекватного описания эксперимента (табл.).

При использовании уравнения изотермы адсорбции Ленгмюра удается адекватно аппроксимировать экспериментальные изотермы и получить точные и имеющие физический смысл оценки параметров уравнения. Таким образом, следует полагать, что извлечение ИК из раствора аминоксерогелем происходит как идеальная адсорбция. Рассчитанные значения эффективной сорбционной емкости и логарифмов констант сорбционных равновесий, характеризующие сорбцию ИК при разных рН, приведены в таблице.

Таблица. Описание адсорбции ИК при разных значениях pH уравнениями изотерм адсорбции Ленгмюра и Фрейндлиха

pH	1.68	3.56	4.01	6.86
<i>Уравнение Ленгмюра</i>				
$\lg K_L$	4.63±0.03	4.46±0.03	4.35±0.04	3.85±0.02
q_{max} , ммоль/г	0.54±0.01	0.49±0.01	0.50±0.02	0.35±0.01
$\chi^2_{эксп} / \chi^2_{критич} *$	13.3 / 14.1	9.02 / 14.1	12.36 / 14.1	0.40 / 11.1
<i>Уравнение Фрейндлиха</i>				
$-\lg K_F$	2.5±0.2	2.55±0.15	2.5±0.2	2.2±0.2
n^{-1}	0.23±0.04	0.24±0.04	0.25±0.05	0.43±0.03
$\chi^2_{эксп} / \chi^2_{критич}$	370 / 14.1	253 / 14.1	100 / 14.1	10.1 / 11.1

* $\chi^2_{критич}$ – критическое значение статистики χ^2 (5%-ная точка распределения χ^2 для числа степеней свободы $N - z$, где z – число подгоночных параметров).

Результаты моделирования равновесий адсорбции показывают, что аминоксерогель обладает высокой эффективной сорбционной емкостью по отношению к ИК, причем она мало меняется в интервале pH раствора 1.68-4.01, а в нейтральной среде существенно снижается, что согласуется с выводами, сделанными на основе моделирования протолитических равновесий на поверхности материала.

Из растворов с pH ≤ 4 и начальными концентрациями красителя 0.25–1.0 ммоль/л при отношении массы навески аминоксерогеля (г) к объему раствора (л) 2.5:1 извлекается более 90 % ИК (рис. 9).

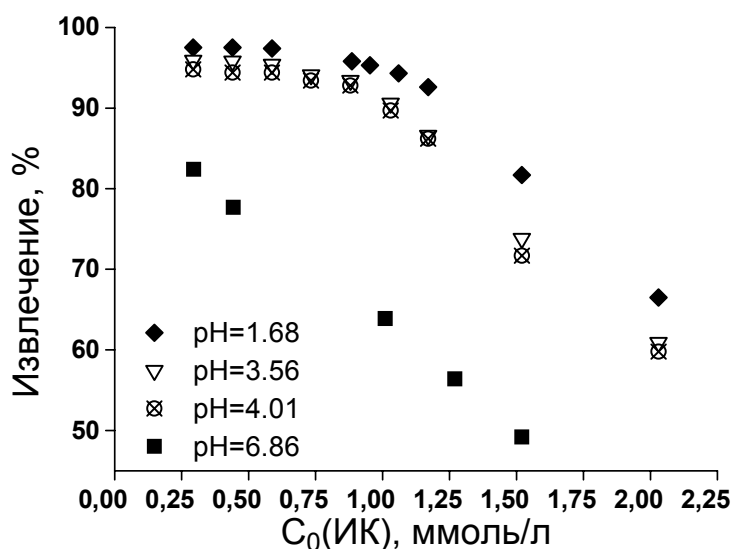


Рис. 9. Зависимость степени извлечения ИК аминокремнеземом от начальной концентрации красителя.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки, молодежи и спорта Украины в рамках проекта «Процессы сорбции и разделения на нанопорядоченных монокристаллических, сплошных и пористых материалах». Авторы благодарны Институту химии университета штата Сан-Пауло в Кампинасе (Бразилия) за предоставление возможности измерить удельную поверхность аминоксерогеля и содержание азота. О.Т. признателен Министерству образования и науки, молодежи и спорта Украины за финансирование стажировки в университете штата Сан-Пауло в Кампинасе.

Литература

1. В. В. Карпов, А. Е. Белов. Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева), Т. XLVI, № 1, 2002, С. 67-71.
2. G. Mezohegyi, F. P. van der Zee, J. Font e.a. J. Environ. Management, V. 102, 2012, P. 148-164.
3. R.G. Saratale, G.D. Saratale, J.S. Chang, e.a. J. Taiwan Institute Chem. Eng., V. 42, № 1, 2011, P. 138-157.
4. Selene Maria de Arruda Guelli Ulson de Souza, Karin Angela Santos Bonilla, Antônio Augusto Ulson de Souza. J. Hazard. Mater., V. 179, № 1-3, 2010, P. 35-42.
5. M. Riera-Torres, C. Gutiérrez-Bouzán, M. Crespi. Desalination, V. 252, № 1-3, 2010, P. 53-59.
6. I. Khouni, B. Marrot, Ph. Moulin, e.a. Desalination, V. 268, № 1-3, 2011, P. 27-37.
7. I. Petrinčić, Niels Peder Raj Andersen, S. Šostar-Turk, e.a. Dyes Pigm., V. 74, № 3, 2007, P. 512-518.
8. Shuying Cheng, D. L. Oatley, P. M. Williams, e.a. Water Research, V. 46, № 1, 2012, P. 33-42.
9. B. Merzouk, B. Gourich, K. Madani, e.a. Desalination, V. 272, № 1-3, 2011, P. 246-253.
10. S. M. Palácio, F. R. Espinoza-Quñones, A. N. Módenes, e.a. J. Hazard. Mater., V. 172, № 1, 2009, P. 330-337.
11. Ming-Chi Wei, Kai-Sung Wang, Chin-Lin Huang, e.a. Chem. Eng. J., V. 192, 2012, P. 37-44.
12. Chen Shifu, Liu Wei, Zhang Huaye, e.a. J. Hazard. Mater., V. 186, № 2-3, 2011, P. 1687-1695.
13. R. Bergamini, E. B. Azevedo, L. R. Raddi de Araújo. Chem. Eng. J., V. 149, № 1-3, 2009, P. 215-220.
14. K. Turhan, I. Durukan, S. A. Ozturkcan, e.a. Dyes Pigm., V. 92, № 3, 2012, P. 897-901.
15. S. Atcharyawut, J. Phattaranawik, T. Leiknes, e.a. Sep. Purif. Technol., V. 66, № 1, 2009, P. 153-158.
16. V. K. Gupta, Suhas. J. Environ. Management, V. 90, № 8, 2009, P. 2313-2342.
17. C. P. Kaushik, R. Tuteja, N. Kaushik, e.a. Chem. Eng. J., V. 155, № 1-2, 2009, P. 234-240.
18. W. S. Wan Ngah, L.C. Teong, M.A.K.M. Hanafiah. Carb. Polymers, V. 83, № 4, 2011, P. 1446-1456.
19. E. Errais, J. Duplay, F. Darragi, e.a. Desalination, V. 275, № 1-3, 2011, P. 74-81.
20. V. Dulman, S. M. Cucu-Man. J. Hazard. Mater., V. 162, № 2-3, 2009, P. 1457-1464.
21. M. Ghaedi, H. Hossainian, M. Montazerzohori, e.a. Desalination, V. 281, 2011, P. 226-233.
22. M. Anbia, S. A. Hariri, S.N. Ashrafzadeh. Appl. Surf. Sci., V. 256, № 10, 2010, P. 3228-3233.
23. J. B. Joo, J. Park, J. Yi. J. Hazard. Mater., V. 168, № 1, 2009, P. 102-107.
24. M. A. Kamboh, I. B. Solangi, S.T.H. Sherazi, e.a. J. Hazard. Mater., V. 186, № 1, 2011, P. 651-658.
25. A. R. Cestari, E. F. S. Vieira, G. S. Vieira, e.a. J. Hazard. Mater., V. 161, № 1, 2009, P. 307-316.
26. H. Yang, Q. Feng. Microporous Mesoporous Mater., V. 135, № 1-3, 2010, P. 124-130.
27. N. M. Mahmoodi, S. Khorramfar, F. Najafi. Desalination, V. 279, № 1-3, 2011, P. 61-68.
28. M. Anbia, S. Salehi. Dyes Pigm., V. 94, № 1, 2012, P. 1-9.
29. Пат. Российская Федерация № 2139244. Моросанова Е. И., Великородный А. А., Кузьмин Н. М. и др, 1999, Бюл. № 28.
30. S. Brunauer, P. H. Emmett, E. Teller. J. Am. Chem. Soc., V. 60, № 1, 1938, P. 309-319.

31. A. Andrzejewska, A. Krysztafkiewicz, T. Jesionowski. *Dyes Pigm.*, V. 75, № 1, 2007, P. 116-124.
32. Ah. M. Donia, A. A. Atia, W. A. Al-amrani, e.a. *J. Hazard. Mater.*, V. 161, № 2-3, 2009, P. 1544-1550.
33. M. S. Lucho, A. V. Panteleimonov, Y. V. Kholin, e.a. *J. Colloid Int. Sci.*, V. 310, № 1, 2007, P. 47-56.
34. С. А. Мерный, Д. С. Коняев, Ю. В. Холин. *Вісник Харківського університету. Хімія*. № 420, Вип. 2, 1998, С. 112-120.
35. R. G. Harris, J. D. Wells, M. J. Angove. *Clays and Clay Minerals*, V. 54, № 4, 2006, P. 456-465.
36. R. Sips. *J. Chem. Phys.* V. 18, № 8, 1950, P. 1024-1026.

References

1. V. V. Карпов, А. Е. Белов. *Ros. him. j. (J. Ros. him. ob-va im. D.I. Mendeleeva)*, V. XLVI, № 1, 2002, P. 67-71.
2. G. Mezohegyi, F. P. van der Zee, J. Font, e.a. *J. Environ. Manage.*, V. 102, 2012, P. 148-164.
3. R.G. Saratale, G.D. Saratale, J.S. Chang, e.a. *J. Taiwan Institute Chem. Eng.*, V. 42, № 1, 2011, P. 138-157.
4. Selene Maria de Arruda Guelli Ulson de Souza, Karin Angela Santos Bonilla, Antônio Augusto Ulson de Souza. *J. Hazard. Mater.*, V. 179, № 1-3, 2010, P. 35-42.
5. M. Riera-Torres, C. Gutiérrez-Bouzán, M. Crespi. *Desalination*, V. 252, № 1-3, 2010, P. 53-59.
6. I. Khouni, B. Marrot, Ph. Moulin, e.a. *Desalination*, V. 268, № 1-3, 2011, P. 27-37.
7. I. Petrinić, Niels Peder Raj Andersen, S. Šostar-Turk, e.a. *Dyes Pigm.*, V. 74, № 3, 2007, P. 512-518.
8. Shuying Cheng, D. L. Oatley, P. M. Williams, e.a. *Water Research*, V. 46, № 1, 2012, P. 33-42.
9. B. Merzouk, B. Gourich, K. Madani, e.a. *Desalination*, V. 272, № 1-3, 2011, P. 246-253.
10. S. M. Palácio, F. R. Espinoza-Quiñones, A. N. Módenes, e.a. *J. Hazard. Mater.*, V. 172, № 1, 2009, P. 330-337.
11. Ming-Chi Wei, Kai-Sung Wang, Chin-Lin Huang, e.a. *Chem. Eng. J.*, V. 192, 2012, P. 37-44.
12. Chen Shifu, Liu Wei, Zhang Huaye, e.a. *J. Hazard. Mater.*, V. 186, № 2-3, 2011, P. 1687-1695.
13. R. Bergamini, E. B. Azevedo, L. R. Raddi de Araújo. *Chem. Eng. J.*, V. 149, № 1-3, 2009, P. 215-220.
14. K. Turhan, I. Durukan, S. A. Ozturkcan, e.a. *Dyes Pigm.*, V. 92, № 3, 2012, P. 897-901.
15. S. Atcharyawut, J. Phattaranawik, T. Leiknes, e.a. *Sep. Purif. Technol.*, V. 66, № 1, 2009, P. 153-158.
16. V. K. Gupta, Suhas. *J. Environ. Manage.*, V. 90, № 8, 2009, P. 2313-2342.
17. C. P. Kaushik, R. Tuteja, N. Kaushik, e.a. *Chem. Eng. J.*, V. 155, № 1-2, 2009, P. 234-240.
18. W. S. Wan Ngah, L.C. Teong, M.A.K.M. Hanafiah. *Carb. Polymers*, V. 83, № 4, 2011, P. 1446-1456.
19. E. Errais, J. Duplay, F. Darragi, e.a. *Desalination*, V. 275, № 1-3, 2011, P. 74-81.
20. V. Dulman, S. M. Cucu-Man. *J. Hazard. Mater.*, V. 162, № 2-3, 2009, P. 1457-1464.
21. M. Ghaedi, H. Hossainian, M. Montazerzohori, e.a. *Desalination*, V. 281, 2011, P. 226-233.
22. M. Anbia, S. A. Hariri, S.N. Ashrafizadeh. *Appl. Surf. Sci.*, V. 256, № 10, 2010, P. 3228-3233.
23. J. B. Joo, J. Park, J. Yi. *J. Hazard. Mater.*, V. 168, № 1, 2009, P. 102-107.
24. M. A. Kamboh, I. B. Solangi, S.T.H. Sherazi, e.a. *J. Hazard. Mater.*, V. 186, № 1, 2011, P. 651-658.
25. A. R. Cestari, E. F. S. Vieira, G. S. Vieira, e.a. *J. Hazard. Mater.*, V. 161, № 1, 2009, P. 307-316.
26. H. Yang, Q. Feng. *Microporous Mesoporous Mater.*, V. 135, № 1-3, 2010, P. 124-130.
27. N. M. Mahmoodi, S. Khorrarnfar, F. Najafi. *Desalination*, V. 279, № 1-3, 2011, P. 61-68.
28. M. Anbia, S. Salehi. *Dyes Pigm.*, V. 94, № 1, 2012, P. 1-9.

29. Pat. Ross. Federac. № 2139244. Morosanova E. I., Velikorodny A. A., Kuzmin N. M., e.a., 1999, Bul. № 28.
30. S. Brunauer, P. H. Emmett, E Teller. J. Am. Chem. Soc., V. 60, № 1, 1938, P. 309-319.
31. A. Andrzejewska, A. Krysztafkiewicz, T. Jesionowski. Dyes Pigm., V. 75, № 1, 2007, P. 116-124.
32. Ah. M. Donia, A. A. Atia, W. A. Al-amrani, e.a. J. Hazard. Mater., V. 161, № 2–3, 2009, P. 1544-1550.
33. M. S. Lucho, A. V. Panteleimonov, Y. V. Kholin, e.a. J. Colloid Int. Sci., V. 310, № 1, 2007, P. 47-56.
34. S. A. Merny, D. S. Konyaev, Yu. V. Kholin. Visn. Hark. nac. univ., № 420, Ser. Him., issue 2 (1998), P. 112-120.
35. R. G. Harris, J. D. Wells, M. J. Angove. Clays and Clay Minerals, V. 54, № 4, 2006, P. 456-465.
36. R. Sips. J. Chem. Phys. V. 18, № 8, 1950, P. 1024-1026.

Поступила в редакцию 24 июня 2012 г.

А. Ю. Барабан, В. В. Кравченко, Р. В. Сухов, О. С. Ткаченко, Ю. В. Холін. Адсорбція індигокарміну аминоксерогелем з водних розчинів.

Вивчено сорбцію індигокарміну аминоксерогелем при різних значеннях рН. Експериментальні ізотерми адсорбції індигокарміну адекватно описуються рівнянням адсорбції Ленгмюра. У рамках цієї моделі розраховані значення ефективної сорбційної ємності. Показано, що аминоксерогель є ефективним адсорбентом стосовно індигокарміну, і його сорбційна ємність мало змінюється в інтервалі рН розчину 1.7-4.0.

Ключові слова: аминоксерогель, адсорбція, аніонний барвник, індигокармін.

A. Yu. Varaban, V. V. Kravchenko, R. V. Sukhov, O. S. Tkachenko, Yu. V. Kholin. Adsorption of indigo carmine by aminoxerogel from aqueous solutions.

Adsorption of indigo carmine by aminoxerogel was studied at different pH values. The experimental adsorption isotherms of indigo carmine are adequately described by the Langmuir equation. The effective adsorption capacity were calculated within this approach. Aminoxerogel has been shown to be the efficient adsorbent for indigo carmine with small variation of the sorption capacity in the pH range 1.7 to 4.0.

Key words: aminoxerogel, adsorption, anionic dye, indigo carmine.

Kharkov University Bulletin. 2012. № 1026. Chemical Series. Issue 21 (44).