

УДК 541.183

АДСОРБЦИЯ СИНТЕТИЧЕСКИХ КРАСИТЕЛЕЙ В УСЛОВИЯХ КАПИЛЛЯРНОГО ЗОННОГО ЭЛЕКТРОФОРЕЗА

А.Ю. Лаптев, Н.Б. Рожманова, Т.И. Тихомирова, С.Н. Ланин, П.Н. Нестеренко*

*(Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, химический факультет, кафедра аналитической химии; *e-mail: p.nesterenko@phys.chem.msu.ru)*

Методом капиллярного зонного электрофореза изучены миграция и сопутствующая адсорбция пищевых синтетических анионных красителей: Желтого «солнечный закат» (E110) и Зеленого прочного FCF (E143) в кварцевом капилляре. Оценку адсорбции красителей рассчитывали на основании изменения электрофоретической зависимости ($\mu_{\text{эф}}$) от концентрации в пробе. Установлено, что для красителя E143 максимальное значение электрофоретической подвижности достигается при малой концентрации и меньших ее значениях по сравнению с красителем E110 вследствие большего размера и более высокой гидрофильности молекулы E143. Зависимости $\mu_{\text{эф}}$ от концентрации Зеленого прочного FCF в пробе сопоставлены с изотермой адсорбции этого красителя на кремнеземе Силохром С-80. Максимальная адсорбционная емкость E143 на кремнеземе составила $6 \cdot 10^{-4}$ мкМ/м².

Ключевые слова: капиллярный зонный электрофорез, анионный краситель, адсорбция, Желтый «солнечный закат» (E110), Зеленый прочный FCF (E143).

Синтетические красители более устойчивы и часто дешевле натуральных, поэтому они находят широкое применение в качестве добавок в фармацевтической и пищевой промышленности. Однако из-за отрицательного влияния на организм человека все большее значение приобретает разработка методов контроля содержания красителей в различных объектах. Широко используется в этих целях метод капиллярного зонного электрофореза (КЗЭ) [1, 2]. Известно, что КЗЭ особенно эффективен для разделения низкомолекулярных гидрофильных заряженных соединений, таких как неорганические ионы [3], карбоновые кислоты [4], комплексы металлов [5, 6] и другие соединения. Несмотря на высокую эффективность разделения методом КЗЭ, его применение ограничено из-за размывания формы электрофоретических пиков.

Среди факторов, вызывающих искажение формы пиков и понижающих эффективность разделения определяемых веществ в результате проведения КЗЭ, можно выделить разогрев кварцевого капилляра (КК) вследствие высокого напряжения (U), электромиграционное размывание и адсорбцию компонентов пробы на внутренних стенках КК [7]. Эти факторы существенно затрудняют и ограничивают практическое применение КЗЭ.

Адсорбция на внутренних стенках немодифицированного кварцевого капилляра, наибо-

лее часто используемого в КЗЭ, обусловлена электростатическими взаимодействиями между отрицательно заряженной поверхностью (в щелочной среде при $\text{pH} > 9,0$ силанольные группы диссоциированы) КК и противоположно заряженными компонентами пробы, а также наличием водородных связей, диполь-дипольных и ван-дер-ваальсовых взаимодействий [8]. Кроме того, травление внутренней поверхности, возникающее в результате регенерационной промывки КК щелочью, изменяет ее площадь, а следовательно, и число сорбционных центров, что приводит к дополнительному изменению профиля электроосмотического потока, а это способствует уширению полос или пиков аналитов [9]. Адсорбция компонентов пробы на стенках КК приводит к появлению на электрофореграммах размытых асимметричных пиков с большими «хвостами». Количественная обработка таких пиков затруднена, а часто и невозможна. Следует отметить, что при наличии существенного вклада адсорбции в миграцию разделяемых соединений можно говорить о трансформации КЗЭ в капиллярную электрохроматографию в полых трубках.

Прямая количественная оценка адсорбции в КК затруднена из-за низкой площади поверхности внутренних стенок (общая площадь внутренней поверхности капилляра диаметром 75 мкм и длиной 60 см равна $0,265 \cdot 10^{-6}$ м²) и

малого количества адсорбируемых соединений, поэтому адсорбцию в данном случае можно измерять лишь для сильно поглощающих свет соединений, таких как органические красители или их комплексы с металлами, либо применять более чувствительные способы детектирования, например флуоресцентное.

В работе [10] предложено использовать зависимость электрофоретической подвижности вещества ($\mu_{\text{эф.}}$) от его концентрации (c) в вводимой пробе для описания адсорбции аналитов на границе раздела жидкость – твердое тело (внутренняя стенка) в КК. Построение зависимости $\mu_{\text{эф.}}$ от c в вводимой пробе можно использовать для оценки адсорбции по аналогии с жидкостной колоночной хроматографией [11–13]. В этих целях получают электрофореграммы для различных концентраций аналита и рассчитывают значения электрофоретической подвижности $\mu_{\text{эф.}}$ по формуле [10]:

$$\mu_{\text{эф.}} = \mu_{\text{общ.}} - \mu_{\text{ЭОП}} = ((L_{\text{общ.}} L_{\text{эф.}})/U) \cdot (1/t_{\text{мигр.}} - 1/t_{\text{ЭОП}}). \quad (1)$$

где $L_{\text{общ.}}$ – общая длина КК; $L_{\text{эф.}}$ – длина КК до детектора; $t_{\text{мигр.}}$, $t_{\text{ЭОП}}$ – время миграции аналита и электроосмотического потока (ЭОП); $\mu_{\text{общ.}}$ – результирующая наблюдаемая подвижность; $\mu_{\text{ЭОП}}$ – подвижность электроосмотического потока.

Адсорбция красителя на внутренней поверхности КК изменяет ее эффективный заряд и влияет на величину ЭОП. Соответственно, долю сорбированного красителя (f_s) можно оценить по относительному изменению электрофоретической подвижности:

$$f_s = n_s / (n_s + n_w) = \mu_{\text{общ.}} / (\mu_{\text{эф.}(\text{макс.})} + \mu_{\text{ЭОП}}), \quad (2)$$

где n_w и n_s – число молей красителя в фоновом электролите (ФЭ) и на внутренней стенке КК соответственно; $\mu_{\text{эф.}(\text{макс.})}$ – максимальная электрофоретическая подвижность аналита. Коэффициент относительного удерживания k красителя определяется согласно уравнению (3).

$$k = n_w / n_s = f_w / f_s = (1 - f_s) / f_s, \quad (3)$$

где f_w – доля красителя, сорбированного на внутренней стенке КК, причем справедливо, что $f_s + f_w = 1$.

Следует отметить полуколичественный характер оценки адсорбции, поскольку в основе метода лежит изменение величины ЭОП, определяемое экранированием неустановленного

числа заряженных силанольных групп одной объемной молекулой красителя, адсорбированной в условиях КЗЭ. Определение степени экранирования силанольных групп представляет сложную задачу.

Цель настоящей работы заключалась в изучении адсорбции синтетических красителей E110 и E143 на стенках КК в условиях КЗЭ и сравнении полученных значений с данными по адсорбции красителя E143 в статических условиях на кремнеземе.

Экспериментальная часть

Реагенты и аппаратура

В работе использовали соляную кислоту («х.ч.»), гидроксид натрия («ч.д.а.») («Germed», Германия), динатрия тетраборат декагидрат («ч.д.а.») («Реахим», Россия), ацетон («ос.ч.»), Желтый «солнечный закат», Зеленый прочный FCF («Sigma-Aldrich»). Стандартные растворы красителей с концентрацией 1 г/л готовили растворением их точной навески в дистиллированной воде. Рабочие растворы с концентрацией от 1,0 до 50,0 мг/л готовили разбавлением стандартного раствора дистиллированной водой.

Для изучения сорбции на кремнеземе использовали кремнезем марки «Силохром С-80» с удельной поверхностью ($S_{\text{уд.}}$), равной 80 м²/г, средний диаметр пор 50 нм, фракция частиц с размером 0,16–0,25 мкм.

Использовали систему «Капель-105М» (НПФ АП «Люмэкс», Россия) со спектрофотометрическим детектором, КК с внутренним диаметром 75 мкм и общей/эффективной длиной 60/50 см («Polymicro Technologies», «Phoenix», США). Ввод проб проводили под давлением 30 мбар в течение 10 с. Прилагаемое напряжение U составляло +25 кВ. Детектирование проводили при длине волны 215 нм. Температура термостатирования КК составляла +25 °С. Для обработки данных использовали программное обеспечение «Эльфоран» (ООО «Люмэкс», Россия). Дегазацию растворов проводили в ультразвуковой ванне «Сапфир» (НПФ «Сапфир», Россия), рабочая частота 35 кГц, мощность 60 Вт.

Техника эксперимента

Раствор фонового электролита (ФЭ) готовили растворением точной навески декагидрата тетрабората натрия в дистиллированной воде. Перед использованием растворы фильтровали через мембранную фильтрующую насадку на

шприц Chromafil® Xtra с размером пор 0,45 мкм и дегазировали. Новый КК готовили к работе, последовательно промывая 1 М соляной кислотой, водой, 1 М гидроксидом натрия, дистиллированной водой (по 15 мин) и раствором ФЭ в течение 30 мин [8]. Перед началом работы и между анализами КК последовательно промывали 0,5 М гидроксидом натрия (6 мин), водой (6 мин) и ФЭ (15 мин). Величину $\mu_{\text{ЭОП}}$ определяли по пику 5%-го (по объему) раствора ацетона, добавляемого в пробы.

Методика изучения адсорбции красителя E143 в статическом режиме на кремнеземе

Для построения изотермы адсорбции в мерные пробирки емкостью 15 мл к навеске кремнезема Силохром С-80 массой 0,3 г добавляли раствор красителя E143 в диапазоне концентраций от 0,005 до 0,4 г/л, 8 мл боратного буферного раствора (рН 9,3; $c = 8,3 \cdot 10^{-3}$ М) и доводили общий объем раствора дистиллированной водой до 10 мл. Пробирки встряхивали в течение 30 мин на механическом виброремеси-

теле (по литературным данным, этого времени достаточно для установления равновесия при сорбции E143 на кремнеземных сорбентах). Контроль за распределением красителя проводили после десорбции красителя дистиллированной водой (5 мл). Измеряли оптическую плотность растворов при 624 нм до и после адсорбции и определяли концентрацию E143 по градуировочному графику.

Результаты и их обсуждение

Изученные красители представляют собой водорастворимые сульфосоединения. Молекула азокрасителя E110 (рис. 1, а) содержит две сульфогруппы и одну фенольную с $pK_{a,OH}$, равным $\sim 10,6$ [14]. В молекуле трифенилметанового красителя E143 (рис. 1, б) имеются три функциональные группы: сульфогруппа, енаминовая и фенольная ($pK_{a,OH} = 8,11 \pm 0,13$ [15]). Эффективный заряд молекул красителей определяется диссоциацией фенольной группы и в условиях проведения КЗЭ близок к значениям -3 и -4 соответственно для E110 и E143. Факторы гидрофобности $\lg P$, рассчитанные для

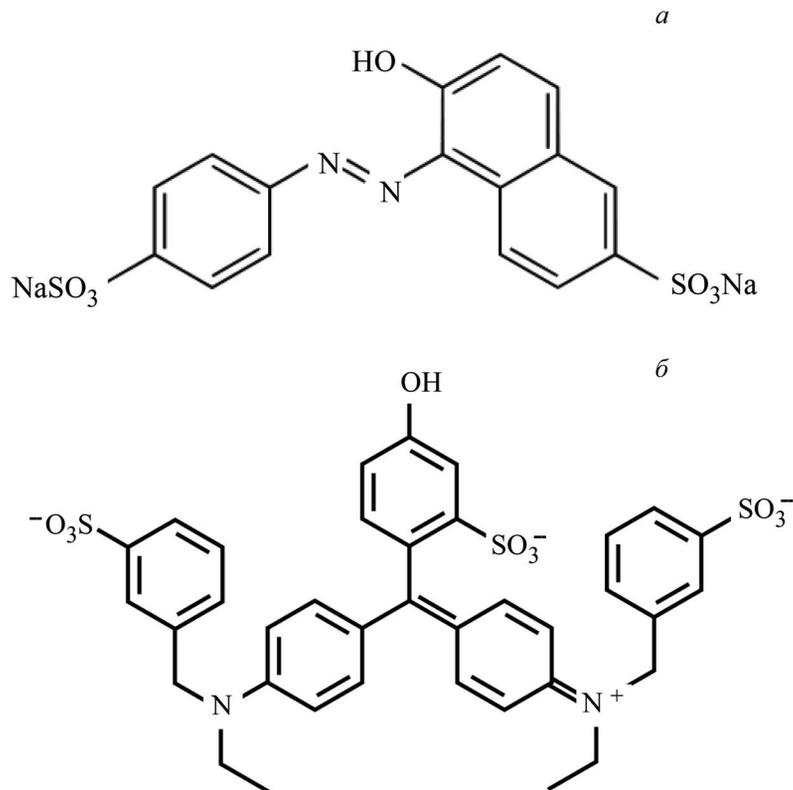


Рис. 1. Структурные формулы изученных красителей: а – Желтый «солнечный закат» (E110), б – Зеленый прочный FCF (E143)

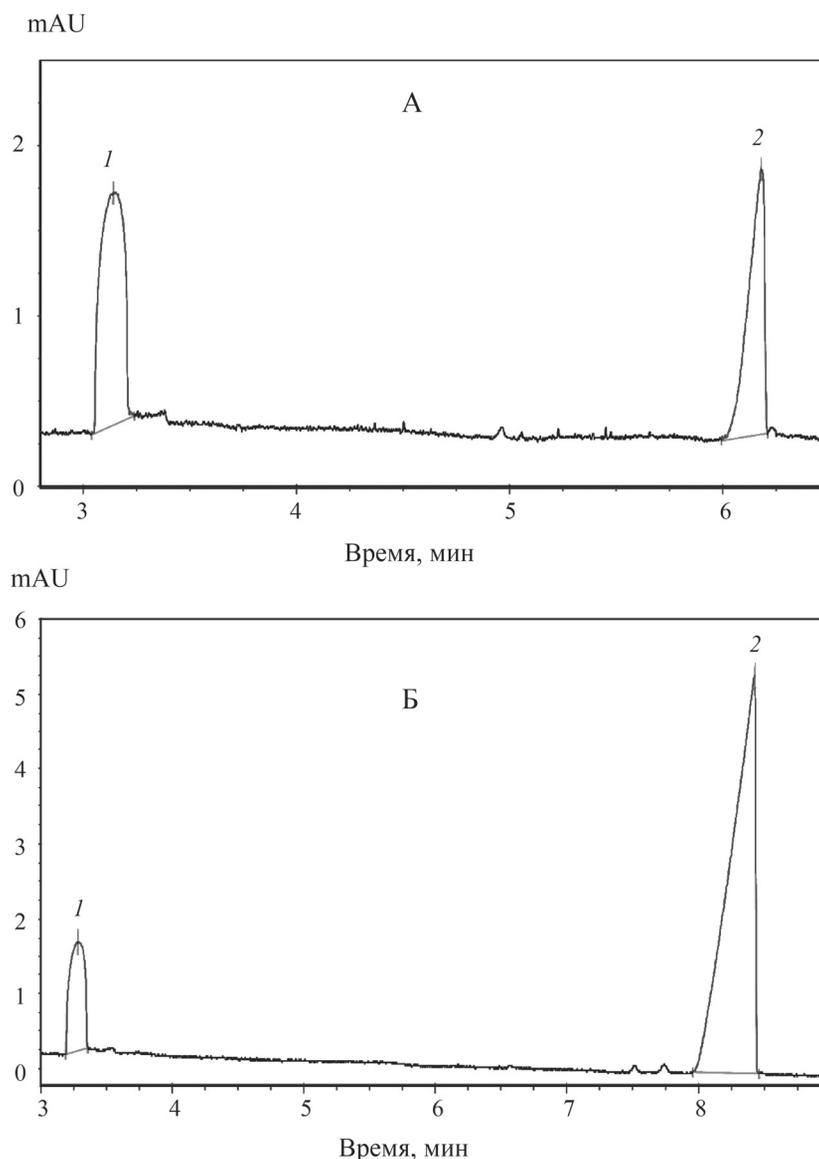


Рис. 2. Электрофореграммы красителей (1 – маркер ЭОП, 2 – краситель): А – E143 ($c = 3,26 \times 10^{-5}$ М), Б – E110 ($c = 1,11 \times 10^{-4}$ М)

красителей с помощью программы KOWWIN [16], составляют соответственно $-1,18$ и $-3,22$.

Адсорбция красителей на капилляре

Согласно [1], для изучения электрофоретической подвижности красителей в кварцевом капилляре в качестве ФЭ использовали 10 мМ тетраборатный буфер (рН 9,3). В этих условиях молекулы красителей отрицательно заряжены и мигрируют после маркера ЭОП при положительной полярности электрического тока на конце капилляра, используемого для ввода пробы. При увеличении концентрации красителя в пробе [1] происходит размывание фронта пика, что свидетельствует о наличии адсорбционных взаимодействий красителей с внутренней поверхностью КК (рис. 2, 3).

Изменение формы пика зависит от концентрации красителя в пробе. При низкой концентрации сорбата, когда число свободных адсорбционных центров на стенках КК значительно, все молекулы красителя одинаково взаимодействуют с поверхностью КК. Увеличение концентрации сорбата приводит к тому, что молекулы фронта зоны преимущественно адсорбируются на стенках КК, а молекулы задней границы зоны такой возможности не имеют и поэтому движутся с большей скоростью, вследствие чего происходит дополнительное размывание пика.

Когда электропроводность внутри зоны пробы меньше, чем в несущем электролите, происходит увеличение напряженности поля [8] и молекулы пробы в зоне концентрационного максимума

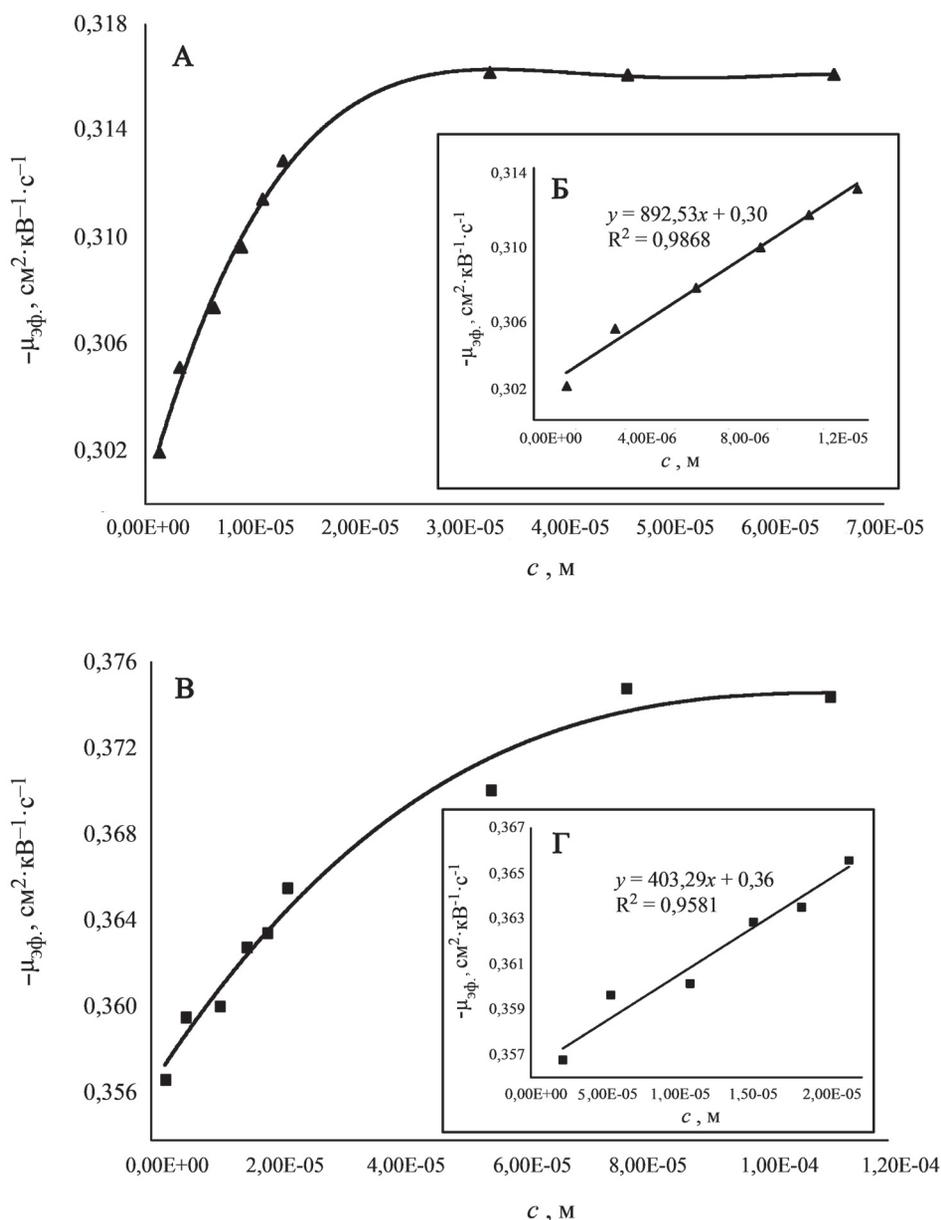


Рис. 3. Зависимость электрофоретической подвижности красителей E143 (А) и E110 (В) от их концентрации; начальные линейные участки для E143 (Б) и E110 (Г)

начинают перемещаться быстрее, чем на его краях. В результате этого скачка напряжения на границе пиков происходит их деформация и образуются пологий и крутой края пика.

Количественно оценить адсорбцию красителей на стенках КК достаточно сложно. В КЗЭ это можно сделать, регистрируя изменения $\mu_{\text{общ. сорбата}}$ и $\mu_{\text{ЭОП}}$ маркера ЭОП. Зависимость электрофоретической подвижности от концентрации красителя можно в первом приближении рассматривать как некий аналог изотермы сорбции в жидкостной колоночной хроматографии [17, 18]. Тем не менее, изменение ЭОП вследствие адсорбции красителя неоднозначно зависит от его концентрации у поверхности, поэто-

му изменение числа экранируемых зарядов на поверхности КК неопределенно.

Электрофоретическую подвижность красителей рассчитывали по формуле (1). Поскольку красители мигрируют разнонаправленно по отношению к ЭОП, то значения их электрофоретической подвижности отрицательны. В связи с этим по оси ординат откладывали средние значения подвижностей $-\mu_{эф.}$, рассчитанные по трем параллельным измерениям. Полученные зависимости $-\mu_{эф.}$ от c представлены на рис. 3. При повышении концентрации красителей в пробе значение величины $\mu_{\text{ЭОП}}$ изменяется вследствие уменьшения числа свободных адсорбционных центров, а электрофоретическая подвижность

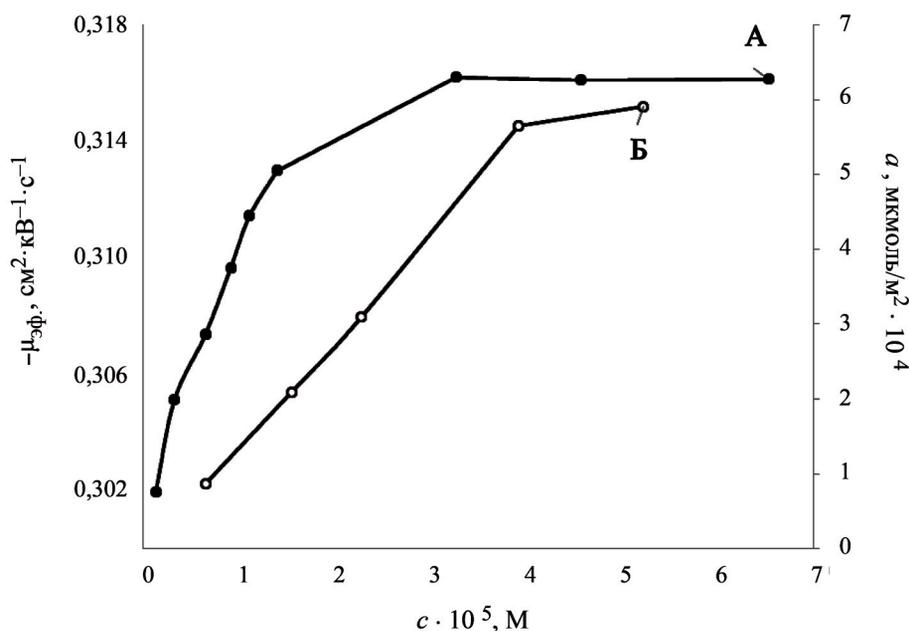


Рис. 4. Зависимость электрофоретической подвижности от концентрации красителя E143 (А) и изотерма адсорбции E143 на кремнеземе (Б)

увеличивается и достигает своего максимального значения $\mu_{\text{эф. (макс.)}}$, оставаясь постоянной при дальнейшем увеличении концентрации сорбата (рис. 3). Если концентрация красителя мала, то с ее ростом значение $\mu_{\text{эф.}}$ увеличивается и удовлетворительно описывается линейным уравнением $\mu_{\text{эф.}} = f(c)$.

Значения $\mu_{\text{эф. (макс.)}}$ изученных красителей составили $-0,316 \text{ см}^2 \cdot \text{кВ}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ для E143 при концентрации $3,26 \cdot 10^{-5} \text{ M}$ и $-0,375 \text{ см}^2 \cdot \text{кВ}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ для E110 при концентрации $7,74 \cdot 10^{-5} \text{ M}$. Для E143 максимальное значение электрофоретической подвижности ниже, чем для E110 и достигается при меньшей концентрации (рис. 3). Очевидно, что в случае E143 адсорбционные центры заполняются меньшим числом более объемных молекул по сравнению с E110. В составе молекулы E143 имеются также две основные азотсодержащие группы, способные к более сильному взаимодействию с диссоциированными силанольными группами, что приводит к их параллельной или развернутой ориентации (относительно поверхности) в адсорбированном состоянии и, как следствие, более высокому значению площади поверхности, занимаемой одной молекулой.

Начальный участок зависимости $-\mu_{\text{эф.}}$ от концентрации (c) линеен для обоих красителей в интервале концентраций $(0,2-2,2) \cdot 10^{-6} \text{ M}$ и описывается уравнением:

$$\mu_{\text{эф.}} = Ac + B, \quad (4)$$

где A – константа, пропорциональная степени заполнения поверхности КК. Константа A характеризует скорость изменения значения $\mu_{\text{эф.}}$ в зависимости от концентрации красителя в пробе.

Константа A равна $892,5 \text{ см}^2 \cdot \text{кВ}^{-1} \cdot \text{M}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ в случае E143 и составляет $403,3 \text{ см}^2 \cdot \text{кВ}^{-1} \cdot \text{M}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ в случае E110. Поскольку значения констант A небольшие для обоих красителей, то можно сделать предположение, что адсорбция последних невелика.

Для подтверждения адсорбции красителей на поверхности КК, наблюдаемой в КЗЭ, в тех же условиях построена изотерма адсорбции E143 на кремнеземе, химия поверхности которого аналогична химии поверхности КК (рис. 4, Б). Установлено, что в интервале концентраций $(0,5-3,75) \cdot 10^{-5} \text{ M}$ наблюдается область линейности изотермы. Следует отметить, что начальный участок зависимости $-\mu_{\text{эф.}}$ от c линеен в том же диапазоне концентраций E143.

Значение коэффициента распределения в области Генри не превышает $1,0 \text{ см}^3 \cdot \text{г}^{-1}$, что свидетельствует о слабом взаимодействии молекул красителя E143 с поверхностью кремнезема. Максимальная емкость составила $6 \cdot 10^{-4} \text{ мкм} \cdot \text{м}^{-2}$. Оценена площадь проекции молекул красителя на поверхность сорбента (S_i), расчет которой проводили по формуле:

$$S_i = (S_{\text{уд.}} \cdot 10^{21}) / a_m \cdot N_A, \quad (5)$$

где a_m – максимальная сорбционная емкость ($\text{ммоль} \cdot \text{г}^{-1}$), N_A – число Авогадро ($6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$) $S_{\text{уд.}}$ – удельная поверхность сорбента ($\text{м}^2 \cdot \text{г}^{-1}$).

Рассчитанное значение площади проекции молекулы на поверхность сорбента составило $2,3 \cdot 10^3 \text{ нм}^2$, что практически на два порядка больше площади самой молекулы красителя, равной 9 нм^2 (оценка проведена по программе Marvin Sketch с применением опции учета вандер-ваальсовых радиусов). Следовательно, в области максимального насыщения только сотая часть поверхности занята сорбатом, что согласуется с литературными данными [19]. В работе показано, что отрицательно заряженные красители E110 и E143 слабо адсорбируются (не более 1–3 мас.%) на силикагеле из-за электростатического отталкивания от одноименно заряженной поверхности с диссоциированными силанольными группами.

При совмещении графиков изотермы сорбции E143 на кремнеземе и зависимости $-\mu_{\text{эф.}}$ от c для этого красителя (рис. 4) можно оценить сорбцию красителя на капилляре ($\text{мкм} \cdot \text{м}^{-2}$) для любого значения $-\mu_{\text{эф.}}$ в области линейности при допущении схожести свойств непористого кварца и пористого силикагеля. Анализ полученных

результатов позволяет говорить о весьма слабой адсорбции на стенках КК. Тем не менее, совокупность адсорбционных взаимодействий оказывает заметное влияние на форму пиков и подвижность многозарядных анионов в электрическом поле с напряжением 25 кВ.

Следует отметить, что описанный метод может быть использован для оценки адсорбции только слабо адсорбируемых соединений, в противном случае эти соединения, возможно, будут необратимо адсорбироваться на стенках КК и не будут мигрировать в КЗЭ.

Таким образом, адсорбция синтетических анионных красителей на стенках кварцевого капилляра в условиях капиллярного зонного электрофореза установлена на основании зависимости электрофоретической подвижности красителей от концентрации. Полученные данные подтверждены методом построения изотермы адсорбции красителя E143 на кремнеземе.

Работа выполнена в рамках программы НИР «Физикохимия поверхности, адсорбция и катализ» кафедры физической химии химического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. Конфликта интересов нет.

Дополнительных материалов нет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Berzas Nevado J.J., Guiberteau Cabanillas C., Contento Salcedo A.M. // *Anal. Chim. Acta*. 1999. Vol. 378. P. 63.
- Ryvolová M., Táborský P., Vrabel P., Krásenský P., Preisler J. // *J. Chromatogr. A*. 2007. Vol. 1141. N 2. P. 206.
- Gaudry A.J., Guijt R.M., Macka M., Hutchinson J.P., Johns C., Hilder E.F., Dicoski G.W., Nesterenko P.N., Haddad P.R., Breadmore M.C. // *Anal. Chim. Acta*. 2013. Vol. 781. P. 80.
- Черноглазов В.М., Нестеренко П.Н. // *Рос. хим. ж.* 1996. Т. 40. N 1. С. 100.
- Nesterenko P., Levitin I., Chernoglazova N., Paskonova E., Penner N., Tsikalova M. // *Inorg. Chim. Acta*. 1998. Vol. 280. N 1/2. P. 295.
- Macka M., Nesterenko P., Andersson P., Haddad P.R. // *J. Chromatogr. A*. 1998. Vol. 803. P. 279.
- Macka M., Nesterenko P., Haddad P. // *J. Microcolumn Sep.* 1999. Vol. 11. N 1. P. 1.
- Практическое руководство по использованию систем капиллярного электрофореза. / Н.В. Комарова, Я.С. Каменцев. СПб., 2006.
- Stedry M., Gas B., Kennedler E. // *Electrophoresis*. 1995. Vol. 16. 2027.
- Fang N., Zhang H., Li H.-W., Yeung E.S. // *Anal. Chem.* 2007. Vol. 79. P. 6047.
- Paces M., Kosek J., Marek M., Tallarek U., Seidel-Morgenstern A. // *Electrophoresis*. 2003. Vol. 24. P. 380.
- Lanin S.N., Rychkova S.A., Vinogradov A.E., Lanina K.S., Obrezkov O.N., Nesterenko P.N. // *Adsorption*. 2017. Vol. 23. P. 639.
- Lanin S.N., Rychkova S.A., Vinogradov A.E., Lanina K.S., Obrezkov O.N., Nesterenko P.N. // *Diam. Relat. Mater.* Vol. 64. P. 49.
- Rukosueva E.A., Aliyarova G.R., Tikhomirova T.I., Apyari V.V., Nesterenko P.N. // *Intern. J. Analyt. Chem.* 2020. Article ID 2409075.
- Shokrollahi A., Roozestan T. // *Anal. Methods*. 2013. Vol. 5. Iss. 18. P. 4824.
- Estimation Program Interface (EPI) Suite, US Environmental Protection Agency. Version 1. 67.
- Lanin S.N., Ledenkova M.Yu., Nikitin Yu.S. *Mendeleev Comm.* 2000. Vol. 10. Iss. 1. P. 37.
- Lanin S.N., Ledenkova M.Yu., Nikitin Yu.S. // *J. Chromatogr. A*. 1998. Vol. 797. N 1–2. P. 3–9.
- Рамазанова Г.Р., Тихомирова Т.И., Аняри В.В. // *Журн. анал. хим.* 2015. Т. 70. № 6. С. 602. [Ramazanova G.R., Tikhomirova T.I., Apyari V.V. // *J. Anal. Chem.* 2015. V. 70. № 6. P. 685].

Поступила в редакцию 15.09.2020
Получена после доработки 10.11.2020
Принята к публикации 12.11.2020

ADSORPTION OF SYNTHETIC DYES UNDER CAPILLARY ZONE ELECTROPHORESIS

A.Yu. Laptev, N.B. Rozhmanova, T.I. Tikhomirova, S.N. Lanin, P.N. Nesterenko*

*(Division of Analytical Chemistry, Chemistry Department, M.V. Lomonosov Moscow State University; *e-mail: p.nesterenko@phys.chem.msu.ru)*

The migration and concomitant adsorption of food synthetic anionic dyes: Yellow “sunset” (E110) and Green strong FCF (E143) in a quartz capillary was studied by capillary zone electrophoresis. The adsorption of dyes was evaluated from the dependence of electrophoretic mobility (μ_{ef}) on sample concentration. It was found that for the dye E143, the maximum value of electrophoretic mobility is achieved at low concentrations and lower values in comparison with the dye E110, due to the larger size and higher hydrophilicity of the E143 molecule. The dependences of electrophoretic mobility μ_{ef} on sample concentration of Green strong FCF are compared with its adsorption isotherm on Sikhrom S-80. Maximum adsorption value of $6 \cdot 10^{-4}$ μM of E143 dye per m^2 was obtained.

Key words: capillary zone electrophoresis, anion dye, adsorption, yellow “sunset” (E110), green durable FCF (E143).

Сведения об авторах: *Лаптев Андрей Юрьевич* – студент химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова (andrey.u.l@mail.ru); *Рожманова Нина Борисовна* – доцент кафедры аналитической химии химического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, канд. хим. наук (nb.rozhmanova@mail.ru); *Тихомирова Татьяна Ивановна* – вед. науч. сотр. кафедры аналитической химии химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, докт. хим. наук (tikhomirova-tatyana@yandex.ru); *Ланин Сергей Николаевич* – профессор кафедры физической химии химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, докт. хим. наук (Silica2012@gmail.com); *Нестеренко Павел Николаевич* – вед. науч. сотр. кафедры физической химии химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, докт. хим. наук (p.nesterenko@phys.chem.msu.ru).