

УДК 543.[33+054+421]

КОНЦЕНТРИРОВАНИЕ И ТЕСТ-ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФЕНОЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ НАНОВОЛОКНА НА ОСНОВЕ ПОЛИАМИДА

© 2023 г. Т. М. Махова^а, А. И. Аржанухина^а, С. Ю. Доронин^а, *

^аСаратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, Институт химии
ул. Астраханская, 83, Саратов, 410012 Россия

*e-mail: doroninsu@mail.ru

Поступила в редакцию 03.04.2023 г.

После доработки 28.04.2023 г.

Принята к публикации 03.05.2023 г.

Получены новые тест-средства из нановолокон на основе полиамида-6 (ПА-6) для предварительно-го сорбционного концентрирования некоторых фенолов в виде их азопроизводных и последующего их цветометрического определения. Предложены подходы к дериватизации фенола и хлорпроизводных по реакции азосочетания с 4-нитрофенилдиазонием и окислительной конденсации с 4-аминоантипирином для повышения сорбционных характеристик исследуемых фенолов. Проведена сравнительная оценка эффективности двух способов дериватизации. Изучены кинетика сорбции производных фенола, 2-хлорфенола и влияние pH на характер их сорбции. Интерпретированы особенности сорбции производных фенолов на нетканых материалах и соответствующие изотермы сорбции. Приведены примеры количественной оценки содержания фенолов в водных средах посредством математической обработки цифровых изображений окрашенных зон тест-средств. Показано, что предложенные способы могут быть применены для определения фенола и 2-хлорфенола с предварительным концентрированием их дериватизатов нановолокном ПА-6 в диапазоне 0.2–1.0 мкМ (≈ 0.02 – 0.09 мг/л для фенола, ≈ 0.03 – 0.13 мг/л для 2-хлорфенола) с погрешностью цветометрического определения не более 20% (ПДК_{хоз.-быт} фенола составляет 0.001 мг/л для суммы летучих фенолов в водных объектах при условии обеззараживания воды хлором; в иных случаях ПДК составляет 0.1 мг/л).

Ключевые слова: цветометрия, нановолокна, фенолы, дериватизация, сорбция, тест-методы.

DOI: 10.31857/S0044450223100134, **EDN:** ZINZZF

Фенол и его хлорпроизводные являются одними из приоритетных органических загрязнителей природных и сточных вод, вследствие их токсичного (в том числе и канцерогенного) действия на живые организмы; кроме того, они обладают биоаккумулятивностью и характеризуются устойчивостью в окружающей среде [1]. Определение фенола и его хлорпроизводных – актуальная аналитическая задача. Основными источниками загрязнения природных объектов фенолом и его производными являются производства пластмасс, лаков, красителей, лекарств, пестицидов, поверхностно-активных веществ и др. [1].

Фенолы, как правило, определяют методами высокоэффективной жидкостной хроматографии, газовой хроматографии (с пламенно-ионизационным детектированием после дериватизации фенолов), тонкослойной хроматографии, капиллярного электрофореза, спектрофотометрии, флуориметрии, а также электрохимическими и масс-спектрометрическими методами [2–5]. Однако прямое определение фенолов на уровне предельно допустимых концентраций (ПДК) (~ 1 мкг/л) ука-

занными методами требует их предварительного концентрирования для дальнейшего определения в объектах окружающей среды [6–8].

Наряду с методами жидкостной экстракции для концентрирования фенолов применяют способы твердофазной экстракции на основе высокоэффективных сорбентов, среди которых выделяют силикагели, активированные угли, природные и полимерные сорбенты [8–13]. Несмотря на огромное разнообразие применяемых сорбентов, некоторые из них характеризуются низкой механической прочностью, сложностью количественной десорбции и др. Разработка новых сорбентов, а также минимизация и/или устранение указанных недостатков имеющихся сорбентов для дальнейшего их использования в сорбционных процессах – актуальное направление развития сорбционных методов.

Современные тенденции в развитии методов твердофазной экстракции направлены на повышение коэффициентов извлечения и селективности извлечения аналитов. Полимерные сорбенты, в том числе нетканые материалы (НМ, на-

новолокна), полученные методом электроформования [14–22], обладают высокой удельной площадью поверхности, высокопористой структурой, улучшенными механическими свойствами, а также относительной простотой и низкой стоимостью получения.

Типичный процесс электроформования включает в себя применение электрического поля, индуцированного от источника высокого напряжения от единиц до ста киловольт, между раствором полимера и осадительным электродом (коллектором) [14]. Большое внимание при электроформовании уделяется выбору самого полимера и растворителя. Кроме того, управляя параметрами электроформования можно получать материалы с заданными свойствами, с контролируемыми размерами нановолокон и пор (межволоконных расстояний), нужной степенью гидрофильности или гидрофобности, что играет ключевую роль при изучении сорбции органических аналитов. Так, молекулы фенола и его производных можно отнести к относительно полярным, поэтому для их извлечения необходимо применение полимеров, обладающих гидрофильными свойствами, т.е. содержащих полярные функциональные группы, такие как $-C(O)-OH$, $-OH$, $-C(O)H$, $>C=O$, $-NH_2$, $-NH$, $-C(O)-NH_2$, $-C(NH)-OR$ и др. [15]. Химическая модификация полимера, например посредством гидролиза или сополимеризацией с гидрофильными мономерами, также позволяет варьировать его свойства, однако усложняет процесс получения нановолокон. Таким образом, указанные выше уникальные свойства нановолокон позволяют сочетать варианты твердофазной экстракции с различными аналитическими методами. Кроме того, высокая степень гибкости нановолокон, а также отсутствие окраски допускают колориметрическое определение при создании тест-средств на их основе.

Цель настоящей работы – разработка способов сорбционного концентрирования фенола и его хлорпроизводных в виде окрашенных дериватизатов, полученных реакциями азосочетания и окислительной конденсации, нановолоконном на основе полиамида-6 (ПА-6) для их дальнейшего определения методом цветометрии с применением цифровых технологий, которые в последние годы активно развиваются и находят широкое применение в аналитической практике [23–26].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Реагенты. В работе применяли: ПА-6 ($M_r \sim 60000$, Sigma, Германия), фенол ($\geq 99\%$, Sigma, Германия), 2-хлорфенол (2-ХФ) ($\geq 99\%$, Sigma, Германия), 4-аминоантипирин (4-ААП) ч. д. а. (ЛенРеактив, Россия), 4-нитроанилин (4-НА) ($\geq 99\%$, Sigma, Германия), $NaNO_2$ ч. ч. (Реахим, Россия),

Na_2CO_3 ч. д. а. (Реахим, Россия), $K_3Fe(CN)_6$ ч. ч. (Реахим, Россия).

Исходные 1×10^{-2} М растворы исследуемых фенолов готовили растворением их точных навесок в дистиллированной воде. 4-Нитрофенилдиазоний готовили смешением растворов 4-НА и $NaNO_2$ с концентрациями 4×10^{-3} М в присутствии 1 М HCl.

Аппаратура. Нетканый материал на основе ПА-6 получали на установке бескапиллярного электроформования Nanospider NS Lab 200 (Elmarco, Чехия). Электронные спектры поглощения исследуемых растворов регистрировали на двухлучевом сканирующем спектрофотометре Shimadzu UV-1800 (Япония). Для получения изображений применяли зеркальный фотоаппарат Nikon D 5100 (параметры фотоаппарата: ISO – 160, выдержка – 1/250, приближение – 18 мм, F – 3.5. Объектив AF-S Nikkor 18–55 мм. Качество изображений – RAW). Значения pH контролировали pH-метром рХ-150Мп (Беларусь), погрешность измерения ± 0.01 ед. pH.

Методики дериватизации фенолов. Для улучшения эффективности сорбции исследуемых фенолов их подвергали предварительной дериватизации. Соответствующие методики, в основе которых лежат различные реакции, приведены ниже.

Методика 1: в мерные колбы емк. 25 мл вносят от 3 до 5 мл водных растворов фенолов (рабочая концентрация 5×10^{-4} М), 3.25 мл 4-нитрофенилдиазония, 1.25 мл 2 М раствора Na_2CO_3 и доводят до метки дистиллированной водой. Смесь тщательно перемешивают и оставляют на ~ 10 мин.

Методика 2: в мерные колбы емк. 25 мл вносят от 3 до 5 мл растворов фенолов (рабочая концентрация 5×10^{-4} М), 0.25 мл 0.1 М спиртового раствора 4-ААП, 0.25 мл 8%-ного раствора $K_3Fe(CN)_6$, 5 мл 1.25 М раствора Na_2CO_3 и доводят до метки дистиллированной водой. Содержимое перемешивают в течение 2 мин.

В качестве сорбента фенолов применяли нетканый материал на основе ПА-6, полученный методом бескапиллярного электроформования. Методика приготовления формовочного раствора и условия электроформования подробно рассмотрены в работе [27].

Для сорбционно-цветометрического определения фенолов предварительно получали аналитические азо- и ациформы 4-нитрофенилазосоединений, после чего проводили сорбционное концентрирование нановолоконном ПА-6. Затем образцы НМ фотографировали в специализированном боксе, внутренняя поверхность которого имела черный матовый цвет, снабженном двумя лампами дневного света. Полученные цифровые изображения окрашенных нетканых материалов обрабатывали с помощью графического редактора Ado-

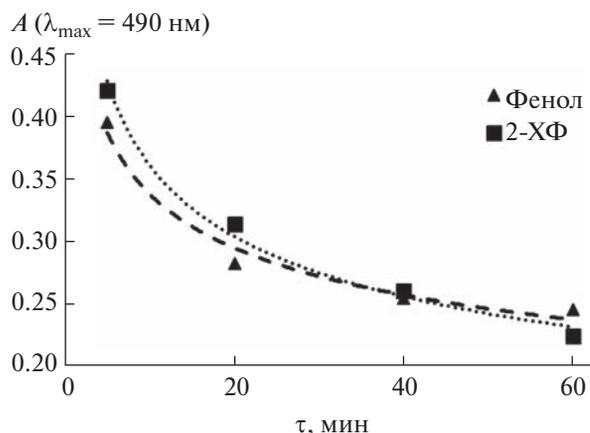


Рис. 1. Зависимость $A (\lambda_{\max} = 490 \text{ нм})$ от времени в системе: фенол (2-хлорфенол)–4-аминоантипирин– $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ – Na_2CO_3 .

be Photoshop CS6 для количественной оценки соответствующих цветовых параметров R, G, B, C, M, Y, K, а также для построения лепестковых диаграмм (ЛД) в указанных координатах цветности и зависимостей математически обработанных параметров цветности (линейные зависимости геометрических параметров ЛД) от концентрации анализов: площади (S) и периметра (P) ЛД, рассчитанных по следующим формулам:

$$P = \sum \sqrt{a^2 + b^2 - 2ab \cos(ab)},$$

$$S = \sum \left(\frac{1}{2} ab \sin(ab) \right),$$

где a, b – длины сторон треугольника; $\cos(ab)$ – \cos угла между сторонами a, b ; $\sin(ab)$ – \sin угла между сторонами a, b (соседними радиусами на лепестковой диаграмме).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Дериватизация фенолов по реакциям азосочетания и окислительной конденсации. Предварительно полученные данные по сорбции фенола показали, что нановолокна на основе ПА-6 без дополнительных стадий модификации полимера и дериватизации аналитов малоэффективны для концентрирования как фенола, так и его монозамещенных. Для увеличения степени извлечения фенолов предложено получение их окрашенных аналитических форм реакциями азосочетания с 4-нитрофенилдиазонием (методика 1), а также окислительной конденсации с 4-аминоантипирином (методика 2). Фенол и его производные реагируют с 4-ААП в присутствии гексацианоферрата(III) калия при $\text{pH} \geq 10.2$ с образованием окрашенных соединений – антипириновых красителей (I, схема 1), содержащих хроморфорную группу – хиноидный фрагмент.

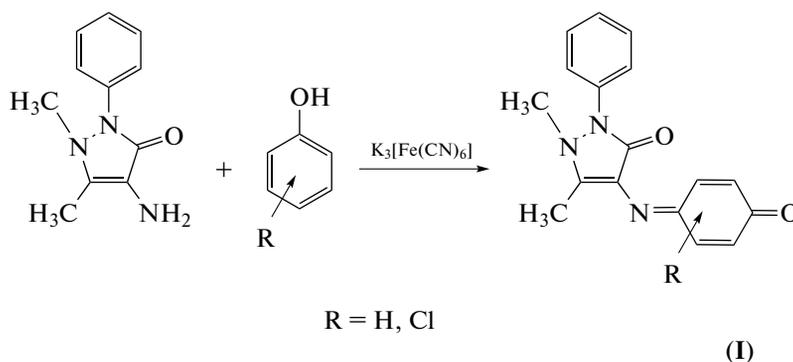


Схема 1. Схема реакции фенола/хлорфенола с 4-аминоантипирином.

Анализ кинетической зависимости (рис. 1) показывает, что антипириновый краситель, получа-

емый в ходе окислительной конденсации фенола или его хлорпроизводных, нестабилен, период

полураспада составляет от 50 до 60 мин, что затрудняет проведение сорбции таких аналитических форм в равновесных условиях.

В качестве диазосоставляющей в реакции азосочетания применяли диазотированный 4-нитро-

анилин (ДНА), выбор которого обусловлен наибольшей чувствительностью и устойчивостью азосоединения (II, схема 2). Ее максимальный выход достигается при концентрациях 4-НА 3×10^{-4} М, NaNO_2 3×10^{-4} М, Na_2CO_3 0.1 М.

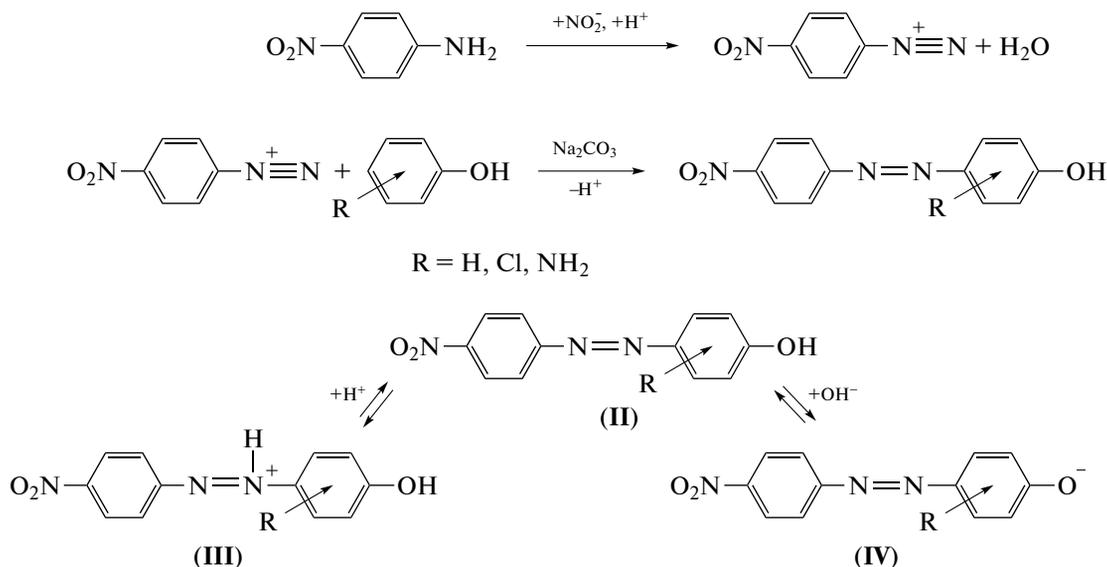


Схема 2. Схема диазотирования 4-нитроанилина и азосочетания фенолов с диазотированным 4-нитроанилином.

Важную роль при изучении сорбции фенолов играет pH. На рис. 2 представлены спектры поглощения 4-нитрофенилазофенола (4-НФАФ) в зависимости от кислотности среды. Так, 4-НФАФ может находиться в разных формах: в нейтральной

и слабокислой средах в форме II ($\lambda_{\text{max}} = 380$ нм), в щелочной – в форме IV ($\lambda_{\text{max}} = 480$ нм).

Варьирование pH позволяет селективно сорбировать одну из форм 4-нитрофенилазосоединений: форму II при pH ~ 5.0; форму III при pH < 4.0; форму IV при pH ~ 9.0. В дальнейших исследованиях применяли для дериватизации методику 1.

Сорбционные свойства нановолокна на основе полиамида-6. Кислотность среды является важнейшим фактором, влияющим и на эффективность сорбции фенолов. С одной стороны, в зависимости от pH молекула азокрасителя может находиться в растворе в различных формах, как показано выше (рис. 2). С другой стороны, pH влияет на состояние функциональных групп сорбента и величину его поверхностного заряда. Изучали влияния pH на сорбцию фенола и 2-ХФ в виде их азопроизводных на НМ (ПА-6). Наибольшая степень извлечения 4-НФАФ и 4-нитрофенилазо-2-хлорфенола (4-НФА-2-ХФ) достигается при pH 5 и составляет 86 ± 3 и $83 \pm 2\%$ соответственно (рис. 3а).

Установили оптимальное время сорбции фенолов в виде их азопроизводных нетканым волокном на основе ПА-6 в условиях: $m(\text{НМ}) = 0.03$ г, $V_{\text{р-ра}} = 10$ мл, $c_a = 5$ мг/л (рис. 3б). Сорбционное равновесие в системах устанавливается в течение 20–30 мин. При этом в начальный момент времени (5–10 мин) скорость сорбции достаточно вы-

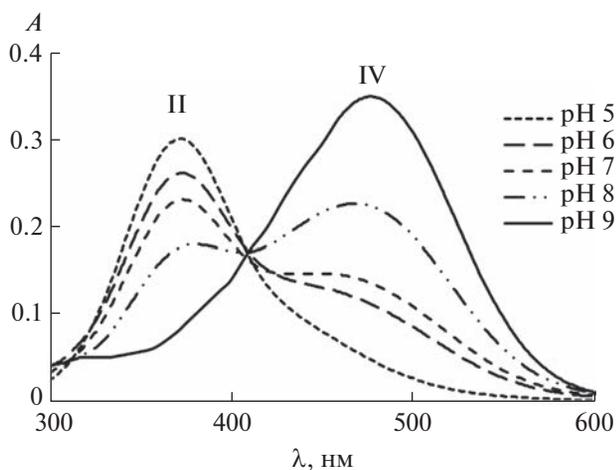


Рис. 2. Спектры поглощения системы 4-нитроанилин– NaNO_2 –фенол при разных значениях pH.

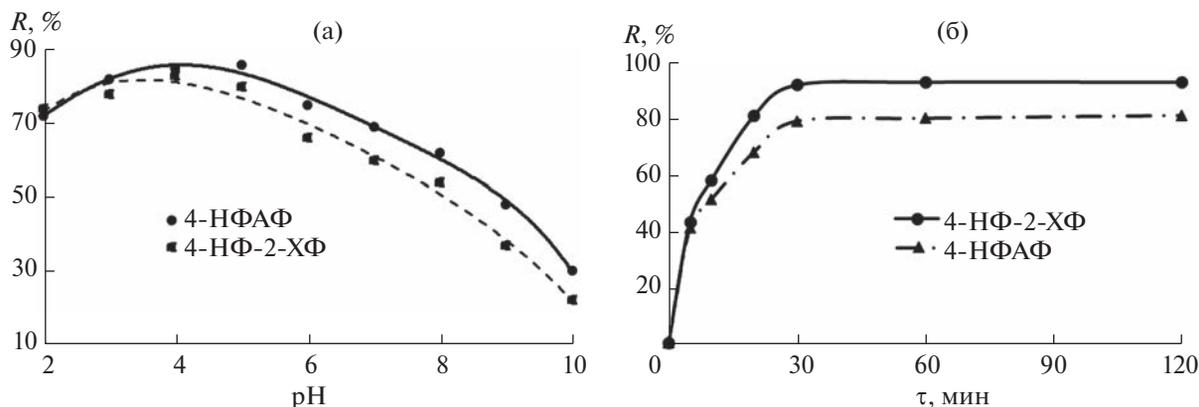


Рис. 3. (а): Зависимость степени извлечения 4-нитрофенилазофенола и 4-нитрофенилазо-2-хлорфенола нетканым материалом на основе полиамида-6 от рН исходных растворов. (б): Кинетика сорбции некоторых 4-нитрофенилазо-соединений полиамидом-6.

сока, но при достижении равновесия снижается. На основании полученных данных построили зависимости сорбционной емкости ПА-6 по отношению к 4-нитрофенилазосоединениям от их концентрации (рис. 4).

В интервале концентраций исследуемых фенолов от 4 до 20 мг/л изотермы сорбции описываются уравнением Ленгмюра, что свидетельствует о мономолекулярном характере сорбции. Область насыщения на изотермах не достигается, поскольку при увеличении концентрации азосоединений их аналитические формы агрегируют и, вследствие малой растворимости, образуют коллоидные системы.

Сорбционно-цветометрическое определение фенолов. В методиках цифрового цветометрического определения аналитов различной природы в качестве аналитического сигнала широко применяют координаты цветности цифровых изображений (как до, так и после математических преобразований), полученные с помощью различных устройств (видео-, фотокамер, планшетных сканеров и т.д.) [23–26]. Так, для цветометрического определения необходимо получение окрашенной аналитической формы, характеризующей спектральные свойства образца, что сопровождается изменением интенсивностей параметров цвета его цифрового изображения [28–32]. С помощью специализированных программ цифровые изображения преобразуют и анализируют, получая более удобный для интерпретации вторичный цифровой аналитический сигнал в виде алгебраических выражений, градуировочных кривых, геометрических фигур, матриц и т.д. Существует несколько цветовых моделей [23], возможности которых можно использовать для различных прикладных целей – это модели RGB (красный – R, зеленый – G, синий – B), HSB (тон – H, насыщенность – S, яркость – V), CMYK (голубой – C, пурпурный – M, желтый – Y,

черный – K), Lab (светлота – L, красно-зеленая ось – а, желто-синяя ось – в) и др. В настоящей работе реализована модель RGB в сочетании со СМУК ввиду возможности быстрого и легкого получения необходимых данных в графическом редакторе Adobe Photoshop.

Цветометрическому определению фенолов предшествовал перевод их в 4-нитрофенилазосоединения с последующим сорбционным концентрированием неткаными материалами на основе ПА-6. Для количественной оценки содержания фенолов строили лепестковые диаграммы с применением цветометрических параметров R, G, B, C, M, Y, K (рис. 5) и концентрационные зависимости интенсивностей цветовых сигналов I и площадей лепестковых диаграмм $S_{лд}$ со степенью аппроксимации, достаточной для построения градуировочных кривых ($R^2 \geq 0.95$). Наилучшие результаты по чув-

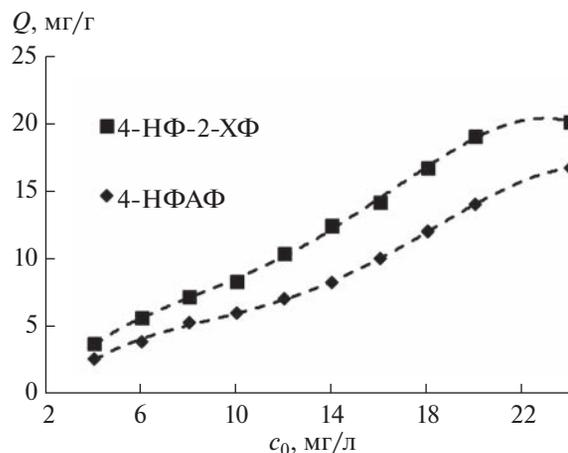


Рис. 4. Зависимости сорбционной емкости полиамида-6 по отношению к 4-нитрофенилазосоединениям от их концентрации.

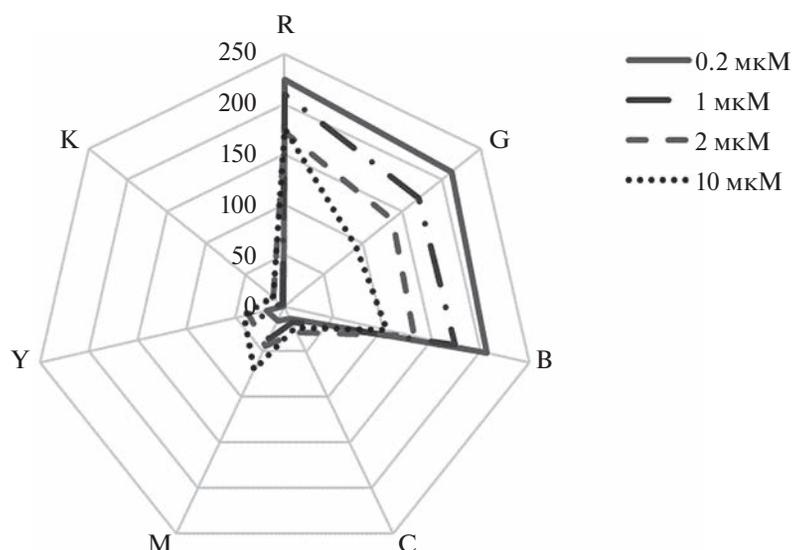


Рис. 5. Профили лепестковых диаграмм в координатах цветных каналов R, G, B, C, M, Y, K при различных концентрациях 2-хлорфенола.

Таблица 1. Уравнения градуировочных графиков для цветиметрического определения фенола и 2-хлорфенола

Аналит	Параметр	Уравнение градуировочного графика (c , мкМ)	R^2
Фенол	I_B	$I_B = -57c + 250$	0.980
	$S_{ЛД}$	$S_{ЛД} = -41400c + 118000$	0.985
2-Хлорфенол	I_B	$I_B = -60c + 230$	0.984
	$S_{ЛД}$	$S_{ЛД} = -36700c + 106000$	0.986

Таблица 2. Контроль правильности цветиметрического определения фенолов методом введено–найдено ($n = 3$, $P = 0.95$)

Аналит	Параметр	Введено, мкМ	Найдено, мкМ	$c_{мин}$, мкМ	S_f
Фенол	Цветиметрический, I_B	0.30	0.26 ± 0.03	0.09	0.05
		0.60	0.54 ± 0.06		0.05
		0.90	0.79 ± 0.13		0.07
	Геометрический, $S_{ЛД}$	0.30	0.27 ± 0.05	0.13	0.04
		0.60	0.53 ± 0.07		0.06
		0.90	0.78 ± 0.11		0.07
2-ХФ	Цветиметрический, I_B	0.30	0.27 ± 0.04	0.13	0.07
		0.60	0.53 ± 0.06		0.05
		0.90	0.78 ± 0.13		0.06
	Геометрический, $S_{ЛД}$	0.30	0.26 ± 0.04	0.11	0.05
		0.60	0.53 ± 0.07		0.06
		0.90	0.80 ± 0.09		0.06

ствительности и коэффициенту детерминации градуировочных зависимостей ($R^2 > 0.96$) получены для геометрического параметра $S_{\text{лд}}$ (табл. 1). В табл. 2 приведены пределы обнаружения фенола и 2-хлорфенола после их дериватизации по методике 1, которые не превышали 0.13 мкМ. Полученные данные могут быть применены для сорбционно-цветометрического определения фенолов в диапазоне концентраций от 0.2 до 1.0 мкМ с относительной погрешностью определения, не превышающей 20%.

Правильность сорбционно-цветометрического определения фенола и 2-хлорфенола контролировали методом введено-найдено (табл. 2). Полученные результаты показали, что при определении фенолов в водах по предложенной методике систематические погрешности отсутствуют.

Предложенные подходы к дериватизации фенолов позволили повысить сорбционную емкость полученного методом электроформования нетканого материала на основе ПА-6 по отношению к фенолу и 2-хлорфенолу. Установлено, что повышение эффективности сорбции (более 90%) аналитических форм фенолов достигается варьированием рН в диапазоне 3–5 и времени сорбции (20–30 мин). Показана возможность применения синтетического нановолокна на основе полиамида-6 для концентрирования фенола и 2-хлорфенола в виде их 4-нитрофенилазопроизводных с последующим определением этих соединений на уровне ПДК с применением математической обработки цифровых изображений окрашенных зон сорбентов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гагарина О.В. Оценка и нормирование качества природных вод: критерии, методы, существующие проблемы. Ижевск: Удмуртский университет, 2012. 199 с.
2. Kovács Á., Mörtl M., Kende A. Development and optimization of a method for the analysis of phenols and chlorophenols from aqueous samples by gas chromatography-mass spectrometry, after solid-phase extraction and trimethylsilylation // *Microchem. J.* 2011. Т. 99. № 1. С. 125.
3. Дедов А.Г., Зайцев Н.К., Некрасова В.В., Шкинев В.М., Дедиков Е.В. Определение фенолов в очищенных сточных водах предприятий нефте-газового комплекса (Обзор) // *Нефтехимия*. 2001. Т. 41. № 2. С. 84.
4. Karim F., Fakhruddin A.N.M. Recent advances in the development of biosensor for phenol: A review // *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* 2012. Т. 11. № 3. С. 261.
5. Arfin T., Sonawane K., Tarannum A. Review on detection of phenol in water // *Adv. Mater. Lett.* 2019. Т. 10. № 11. С. 753.
6. Rodríguez I., Llompart M.P., Cela R. Solid-phase extraction of phenols // *J. Chromatogr. A.* 2000. Т. 885. № 1–2. С. 291.
7. Andrade-Eiroa A., Canle M., Leroy-Cancellieri V., Cerdà V. Solid-phase extraction of organic compounds: A critical review (Part I) // *Trends Anal. Chem.* 2016. Т. 80. С. 641.
8. Fontanals N., Marcé R.M., Borrull F. New materials in sorptive extraction techniques for polar compounds // *J. Chromatogr. A.* 2007. Т. 1152. № 1–2. С. 14.
9. Djebbar M., Djafri F., Bouchekara M., Djafri A. Adsorption of phenol on natural clay // *Appl. Water Sci.* 2012. Т. 2. № 2. С. 77.
10. Gupta V.K., Saleh T.A. Sorption of pollutants by porous carbon, carbon nanotubes and fullerene – An overview // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2013. Т. 20. № 5. С. 2828.
11. Abussaud B., Asmaly H.A., Ihsanullah I., Saleh T.A., Gupta V.K., Laoui T., Atieh M.A. Sorption of phenol from waters on activated carbon impregnated with iron oxide, aluminum oxide and titanium oxide // *J. Mol. Liq.* 2016. Т. 213. С. 351.
12. Фазылова Г.Ф., Валинурова Э.Р., Хатмуллина Р.М., Кудашева Ф.Х. Сорбционные параметры производных фенолов на различных углеродных материалах // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2013. Т. 13. № 5. С. 728.
13. Nafees M., Waseem A. Organoclays as sorbent material for phenolic compounds: A review // *Clean – Soil, Air, Water.* 2014. Т. 42. № 11. С. 1500.
14. Матвеев А.Т., Афанасов И.М. Получение нановолокон методом электроформования. Учебное пособие / Под ред. Авдеева В.В., Алентьева А.Ю., Лазоряка Б.И., Шорниковой О.Н. М.: МГУ имени М.В. Ломоносова, Научно-образовательный центр по нанотехнологиям, Химический факультет, Кафедра химической технологии и новых материалов, 2010. 83 с.
15. Махова Т.М., Доронин С.Ю. Нановолокна как сорбенты для концентрирования органических токсикантов из водных сред // *Бутлеровские сообщения*. 2018. Т. 53. № 3. С. 55.
16. Luo C.J., Stoyanov S.D., Stride E., Pelan E., Edirisinghe M. Electrospinning versus fibre production methods: from specifics to technological convergence // *Chem. Soc. Rev.* 2012. Т. 41. № 13. С. 4708.
17. Ahmed F.E., Lalia B.S., Hashaikh R. A review on electrospinning for membrane fabrication: Challenges and applications // *Desalination*. 2015. Т. 356. С. 15.
18. Wang X., Hsiao B.S. Electrospun nanofiber membranes // *Curr. Opin. Chem. Eng.* 2016. Т. 12. С. 62.
19. Thavasi V., Singh G., Ramakrishna S. Electrospun nanofibers in energy and environmental applications // *Energy Environ. Sci.* 2008. Т. 1. № 2. С. 205.
20. Persano L., Camposo A., Tekmen C., Pisignano D. Industrial upscaling of electrospinning and applications of polymer nanofibers: A review // *Macromol. Mater. Eng.* 2013. Т. 298. № 5. С. 504.
21. Zhang W., He Z., Han Y., Jiang Q., Zhan C., Zhang K., Li Z., Zhang R. Structural design and environmental applications of electrospun nanofibers // *Compos. Part A: Appl. Sci. Manuf.* 2020. Т. 137. Article 106009.

22. *Nthunya L.N., Gutierrez L., Derese S., Mamba B.B., Verliejde A.R., Mhlanga S.D.* Adsorption of phenolic compounds by polyacrylonitrile nanofibre membranes: A pretreatment for the removal of hydrophobic bearing compounds from water // *J. Environ. Chem. Eng.* 2019. Т. 7. № 4. Article 103254.
23. *Аяри В.В., Горбунова М.В., Исаченко А.И., Дмитриенко С.Г., Золотов Ю.А.* Использование бытовых цветорегистрирующих устройств в количественном химическом анализе // *Журн. аналит. химии.* 2017. Т. 72. № 11. С. 963.
24. *Рудаков О.Б., Хорохордина Е.А., Данг Ч.Х., Рудакова Л.В.* Определение бисфенола А, триклозана и нонилфенола в материалах и экстрактах методом ТСХ, совмещенным с цифровой цветометрией // *Сорбционные и хроматографические процессы.* 2016. Т. 16. № 5. С. 686.
25. *Аяри В.В., Дмитриенко С.Г., Золотов Ю.А.* Аналитические возможности цифровых цветометрических технологий. Определение нитрит-ионов с использованием пенополиуретана // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия.* 2011. Т. 52. № 1. С. 36.
26. *Шульц Э.В., Моногарова О.В., Осолок К.В.* Цифровая цветометрия: аналитические возможности и перспективы использования // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия.* 2019. Т. 60. № 2. С. 79.
27. *Разуваева Л.М., Фомина А.Д., Махова Т.М., Аржанухина А.И., Доронин С.Ю.* Твердофазные сорбенты на основе синтетических нановолокон и глауконита для извлечения магнезона I из водных сред // *Изв. Саратовского ун-та. Новая Серия. Химия. Биология. Экология.* 2022. Т. 22. № 4. С. 382.
28. *Terra I.A.A., Mercante L.A.* Fluorescent and colorimetric electrospun nanofibers for heavy-metal sensing // *Biosensors.* 2017. Т. 7. № 61. С. 1.
29. *Rattanarat P., Dungchai W., Cate D., Volckens J., Chailapakul O., Henry C.S.* Multilayer paper-based device for colorimetric and electrochemical quantification of metals // *Anal. Chem.* 2014. Т. 86. № 7. С. 3555.
30. *Raj S., Shankaran D.R.* Curcumin based biocompatible nanofibers for lead ion detection // *Sens. Actuators B: Chem.* 2016. Т. 226. С. 318.
31. *Ariza-Avidad M., Salinas-Castillo A., Cuéllar M.P., Agudo-Acemel M., Pegalajar M.C., Capitán-Vallvey L.F.* Printed disposable colorimetric array for metal ion discrimination // *Anal. Chem.* 2014. Т. 86. № 17. С. 8634.
32. *Firdaus M.L., Alwi W., Trinoveldi F., Rahayu I., Rahmidar L., Warsito K.* Determination of chromium and iron using digital image-based colorimetry // *Procedia Environ. Sci.* 2014. Т. 20. С. 298.