

УДК 543.33+543.41

ТЕСТ-СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ НАНОВОЛОКОН, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОФОРМОВАНИЯ, ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИОНОВ НИКЕЛЯ

© 2022 г. Н. С. Комова^{a, b}, А. И. Данчук^a, В. В. Галушка^a, А. М. Павлов^a,
А. А. Сердобинцев^a, Т. Ю. Русанова^{a, *}

^aСаратовский национальный исследовательский государственный университет
имени Н.Г. Чернышевского, Институт химии
ул. Астраханская, 8, Саратов, 410012 Россия

^bФедеральный исследовательский центр “Фундаментальные основы биотехнологии”
Российской академии наук”, Институт биохимии им. А.Н. Баха
Ленинский просп., 33, стр. 2, Москва, 119071 Россия

*e-mail: tatyanyars@yandex.ru

Поступила в редакцию 07.08.2021 г.

После доработки 28.10.2021 г.

Принята к публикации 28.10.2021 г.

Разработаны тест-системы на основе полимерных нановолокон, полученных методом электроформования, для определения ионов никеля в природных и сточных водах. Детектирование аналитического сигнала тест-систем может проводиться как визуально, так и методом цветометрии. В качестве полимерной матрицы использовали полиакрилонитрил и фторопласт, а в качестве реагентов — рубановодородную кислоту, пиридилазонафтол, диметилглиоксим и α -фурилдиоксим. Имобилизацию реагентов в матрицу осуществляли путем их добавления в формовочный раствор полимера до начала процесса изготовления волокна. Выбраны оптимальные условия получения тест-систем (состав формовочного раствора, параметры электроформования, природа полимера и реагента) и регистрации аналитического сигнала (рН, параметр цветности, время регистрации сигнала). Определены параметры градуировочных зависимостей для определения ионов никеля с использованием различных тест-систем и изучена их селективность по отношению к ионам других тяжелых металлов. Показано, что тест-система на основе полиакрилонитрила (массовая доля полимера в формовочном растворе 12%) и рубановодородной кислоты (концентрация реагента в формовочном растворе 0.05 М) позволяет определять ионы никеля в диапазоне концентраций 1×10^{-6} М–0.01 М. Разработанные тест-системы применены для определения ионов никеля в природной, водопроводной и сточной водах. Достоинством предложенных тест-систем является простота изготовления тестов, отсутствие пробоподготовки и возможность проведения анализа в полевых условиях.

Ключевые слова: нановолокна, электроформование, никель, тест-системы, цветометрия.

DOI: 10.31857/S0044450222080047

Немаловажную роль в загрязнении окружающей среды играют тяжелые металлы, к которым относится и никель. Основные источники загрязнения окружающей среды никелем — предприятия горнорудной промышленности, цветной металлургии, металлообрабатывающие и другие. Никель является необходимым микроэлементом для млекопитающих и растений, обнаруживается во всех биологических материалах. В то же время никель относится к веществам второго класса опасности и оказывает общетоксическое действие на организм. Хроническая интоксикация приводит к возникновению заболеваний носоглотки, легких, появлению злокачественных новообразований и аллергических поражений в ви-

де дерматитов и экзем. В нашей стране установлены ПДК на никель в объектах окружающей среды. Благодаря современным достижениям в области электроники и механики стало возможным применение высокотехнологичных установок для определения ионов никеля при низких концентрациях методами спектрометрии с индуктивно связанной плазмой [1], атомно-абсорбционной спектроскопии [2] и спектрофотометрии [3]. Некоторые из перечисленных методов являются достаточно сложными, требуют дорогостоящего оборудования и непригодны для быстрого и оперативного мониторинга. В качестве альтернативы перечисленным выше методам возрастает значение тест-систем для определения

ионов никеля. Преимуществами использования тест-методов являются отсутствие высоких требований к квалификации персонала, низкая стоимость материалов, простота и экспрессность. Чаще всего такие тест-системы получают на основе фильтровальной бумаги или трубок с порошками, в которых на твердую фазу иммобилизован соответствующий аналитический реагент [4].

Для визуального определения ионов никеля предложен ряд твердофазных носителей на основе силикагеля [5, 6] и ионообменника [7], модифицированных различными реагентами. Визуальный тест-метод с иммобилизованными на силикагеле 4-(2-пиридилазо)-2-нафтолом и его комплексом с Zn(II) позволяет определять Ni(II) в питьевой воде при концентрации ≥ 3 мкг/л [5]. В работе [6] описана тест-методика концентрирования никеля сорбцией на модифицированном бензилдиоксимом и диметилглиоксимом силихроме CX-120 для определения никеля в фазе сорбента прямыми методами спектроскопии диффузного отражения и цветометрии. Разработанная методика позволила достичь предела обнаружения никеля 0.3 мкг/мл (в случае бензилдиоксима) и 0.6 мкг/мл (в случае диметилглиоксима) с использованием цветометрических характеристик (светлота, яркость и цветовой тон). Методика имеет один недостаток – окраска сорбатов комплексов никеля во влажном состоянии неравномерна, что затрудняет использование цветометрического метода. Альтернативный твердофазный носитель – макросетчатый карбоксильный катионит КБ-2Э, модифицированный диметилглиоксимом для определения никеля с помощью цветометрических характеристик (R, G, B). Предложенная методика анализа исключает стадию десорбции и позволяет достичь чувствительности определения ионов Ni²⁺ до 0.0001 ПДК в воде водоемов [7].

В настоящее время все более популярным становится метод электроформования для получения тест-систем на основе нановолокон. Наиболее важными преимуществами данных материалов являются высокая удельная площадь поверхности, большое количество используемых полимеров, а также возможность введения широкого круга реагентов. Эти достоинства позволяют создавать уникальные материалы для различных применений. Об этом свидетельствует большое количество публикаций, посвященных разработке электрохимических сенсоров [8], ферментных биосенсоров [9, 10], флуоресцентных [11] и оптических датчиков [12].

При получении систем с иммобилизованными органическими реагентами используют различные способы внедрения индикатора в структуру волокна. Органические реагенты могут фиксиро-

ваться на полимерной матрице как физическим, так и химическим способами [13, 14]. Для иммобилизации физическими способами используют адсорбцию [14], растворение [15], ионный обмен [16] и др. Данные методы достаточно просты, но ограниченная растворимость индикатора в полимерной матрице приводит к выщелачиванию реагента. На наш взгляд, перспективным способом иммобилизации реагентов в нановолокна является введение индикатора в раствор полимера непосредственно перед процессом электроформования, что позволяет избежать вымывания реагента из полученного материала.

Цель настоящей работы – создание тест-систем на основе нановолокон, полученных методом электроформования, с иммобилизованными органическими реагентами и применение данных систем для определения ионов никеля.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Материалы и реагенты. Исходный раствор ионов никеля (10 мМ) готовили растворением твердого Ni(NO₃)₂·6H₂O в бидистиллированной воде, рабочие растворы готовили непосредственно перед применением последовательным разбавлением исходного в бидистиллированной воде.

Использовали растворы реагентов (ч.д.а.): рубеоноводородной кислоты (РК), пиридилазонафтола (ПАН), диметилглиоксима (ДМГ), α-фурилдиоксима (α-ФДО), которые готовили растворением навесок в диметилформамиде (ДМФА, х.ч.).

Растворы полимеров готовили растворением навесок в ДМФА (полиакрилонитрил, ПАНИ, 150 кДа, Sigma-Aldrich) и смеси ДМФА–бутил-ацетат (1 : 1) (политетрафторэтилен (фторопласт, ФП) Ф42-Л, АО “Галаполимер”, Россия, 100–150 кДа). Растворы перемешивали в течение 3 ч до полного растворения.

Методика получения тест-систем на основе нановолокон с иммобилизованными органическими реагентами. Иммобилизацию реагента в волокно осуществляли путем добавления реагента к раствору полимера до начала процесса изготовления волокна. Формовочный раствор получали смешиванием в соотношении 3 : 1 раствора полимера (полиакрилонитрила или фторопласта) с определенной массовой долей (ω, %) и раствора реагента (РК, ДМГ, ПАН, α-ФДО). Постоянное электрическое напряжение 45 кВ подавали между металлической иглой (положительный электрод), через которую продавливался формовочный раствор с помощью дозатора, и металлической пластиной (отрицательный электрод, заземлен), на которой закреплялась подложка (лист офисной бумаги формата А4, 80 г/м²), на котором происходило осаждение волокон. Расстояние между иглой и подложкой составляло 30 см. Скорость

истечения полимера подбирали таким образом, чтобы выталкиваемый полимер успевал переноситься электрическим полем на подложку, не образуя капель и сгустков. После процесса электроформования полученный материал высушивали в течение 1 ч. Далее подготовленный материал удаляли с подложки и нарезали полосками размером 1×10 см. Для проведения тест-анализа растворы ионов никеля точно наносили на материал (объем капли 1 мкл).

Методика определения цветометрических характеристик. Изображения тест-систем получали, используя цифровой фотоаппарат Nikon D 3100. Полученные изображения обрабатывали в программе “Adobe Photoshop CS6”: выделяли пятна исследуемых образцов с помощью инструмента “Магнитное лассо”, далее усредняли цвета пятен согласно следующим операциям: “Фильтр” → → “Размытие” → “Среднее” и, наконец, выбирали цвета с помощью инструмента “Color Picker (Пипетка)”, получая соответствующие цветовые параметры изображений – R, G и B.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Перспективной основой для тест-систем могут стать волокна, получаемые методом электроформования, в связи с высокой удельной площадью поверхности, возможностью введения широкого круга реагентов, высокой стабильностью реагента в волокне. Такие волокна получают в результате действия электростатических сил на электрически заряженную струю полимерного раствора. Электрическое напряжение от единиц до ста киловольт прикладывается к раствору полимера, который при помощи дозатора подается через капилляр. Высокое напряжение индуцирует в растворе полимера одноименные электрические заряды, которые в результате кулоновского электростатического взаимодействия приводят к вытягиванию раствора полимера в тонкую струю. В процессе электростатического вытягивания полимерной струи она может претерпевать ряд последовательных расщеплений на более тонкие струи при определенном соотношении значений вязкости, поверхностного натяжения и плотности электрических зарядов в волокне. Полученные струи затвердевают за счет испарения растворителя или в результате охлаждения, превращаясь в волокна, и под действием электростатических сил дрейфуют к заземленной подложке, имеющей противоположное значение электрического потенциала (рис. 1).

Для формирования нановолокон использовали такие полимеры, как полиакрилонитрил и фторопласт. В качестве реагентов выбрали ДМГ, α -ФДО, РК и ПАН как наиболее известные реагенты на ионы никеля. Имобилизацию реагента в волокно осуществляли путем добавления рас-

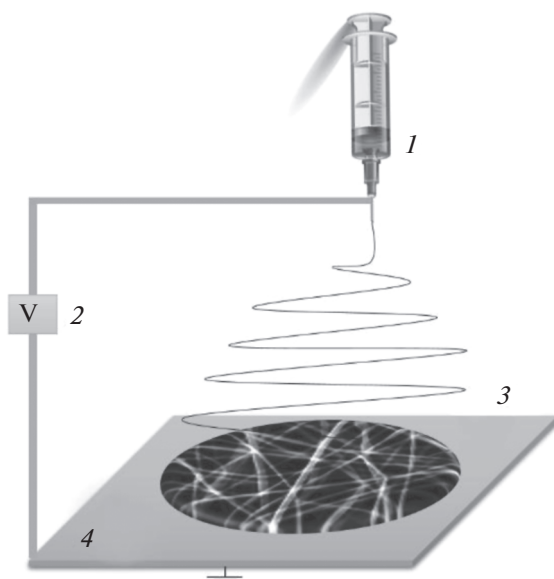


Рис. 1. Схема получения нановолокон методом электроформования: 1 – шприц с раствором полимера, 2 – высоковольтный источник тока, 3 – волокно, 4 – коллектор.

творя реагента к раствору полимера до начала процесса изготовления волокна. При этом также варьировали природу и концентрацию реагентов.

В итоге получили следующие материалы:

1) нановолокна на основе полиакрилонитрила ($\omega = 12\%$), содержащие в исходном для формования растворе 0.25, 0.125, 0.05 М РК; 2.5 мМ ПАН; 1, 0.5, 0.2 М ДМГ; 0.125 М α -ФДО.

2) нановолокна на основе фторопласта ($\omega = 5\%$), содержащие в исходном для формования растворе 0.25 М РК; 2.5 мМ ПАН.

Морфологию полученных материалов исследовали методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). В качестве примера на рис. 2 представлены изображения волокон ПАН без красителя (рис. 2а) и с красителем – РК (рис. 2б). Как видно, полученные материалы имеют гладкую и однородную поверхность без узлов. Однако диаметр волокна с красителем несколько больше ($\sim 0.23 \pm 0.03$ мкм) по сравнению с волокном без красителя ($\sim 0.18 \pm 0.03$ мкм). Похожая картина наблюдалась и в случае других материалов.

Предварительные исследования полученных материалов показали, что ПАН в полиакрилонитрильном волокне при обработке ионами никеля не дает аналитический сигнал, что, возможно, связано со стерическими затруднениями при взаимодействии этого реагента с ионами металла. Остальные системы дают отклик на никель: ПАН во фторопласте образует хелаты красного цвета, РК образует с никелем голубую внутрикомплексную соль; ДМГ, реагируя с никелем в щелочной

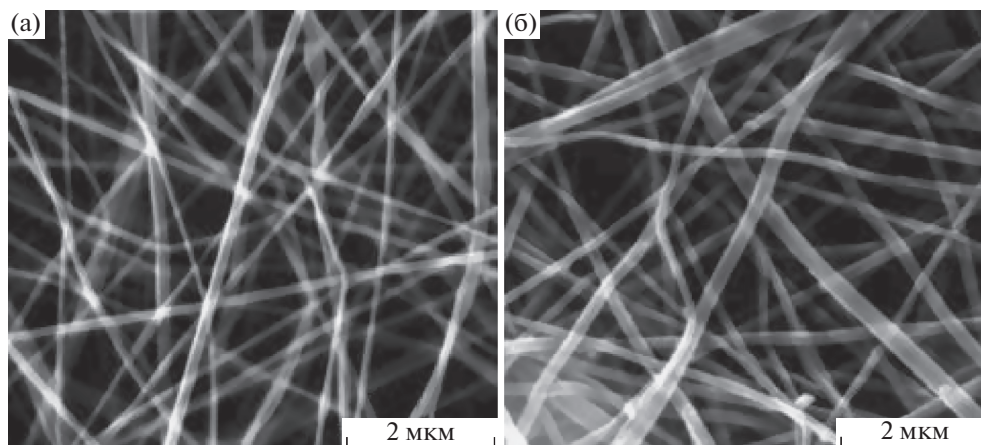


Рис. 2. СЭМ-изображение волокон полиакрилонитрила без красителя (а) и с красителем — рубеноводородной кислотой (б).

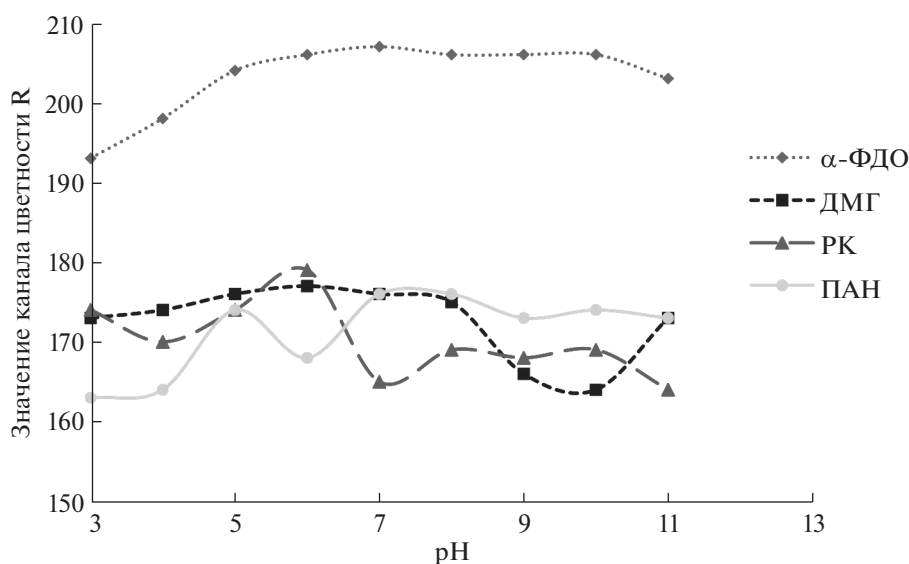


Рис. 3. Зависимость канала цветности R пятна тест-систем при определении Ni^{2+} ($c = 1 \times 10^{-3}$ М) с различными реагентами от pH среды.

среде, образует диоксимный хелат; α -ФГО — устойчивое комплексное соединение желто-оранжевого цвета [17]. Необходимо отметить, что тест-системы на основе фторопласта требуют больше времени для проведения анализа в связи с более высокой гидрофобностью материала.

Кислотность среды является одним из важнейших факторов, определяющих направление смещения равновесий процесса комплексообразования. Изучали влияние pH среды на интенсивность окраски комплексов с $\text{Ni}(\text{II})$. Помимо визуальной оценки отклика определяли цветометрические характеристики окрашенной зоны. Получили зависимости интенсивностей каналов цветности от pH раствора в интервале 3–11. В ка-

честве примера на рис. 3 представлены зависимости параметра R от pH для разных реагентов. Как видно, изменение pH среды в пределах от 3 до 11 практически не влияет на развитие окраски комплекса с α -ФДО, в то время как наиболее яркая окраска комплекса ионов никеля с РК наблюдается при pH ~ 7 (наиболее низкое значение параметра цветности), а с ДМГ — в диапазоне pH 9–10. Параметры G и B показывали те же результаты, хотя чувствительность каналов отличалась для различных реагентов.

Изучали кинетику образования комплексов с ионами никеля. Для этого измеряли аналитический сигнал через определенные промежутки времени после нанесения анализируемого рас-

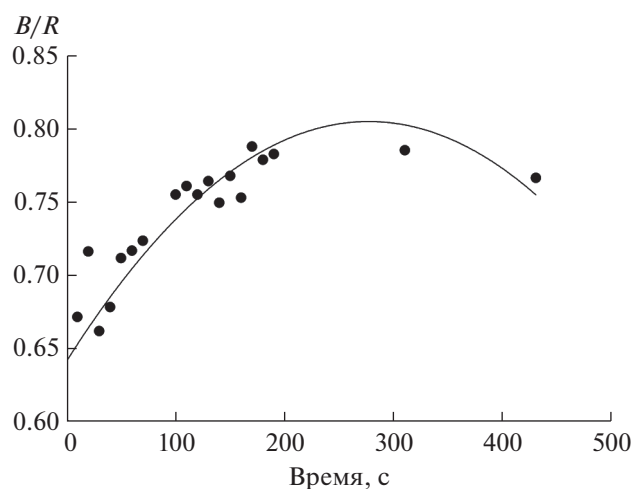


Рис. 4. Время отклика тест-системы рубеоанодородная кислота (0.05 М) + полиакрилонитрил (12%).

творя на тест-систему. В качестве примера на рис. 4 показан отклик тест-системы на основе полиакрилонитрила с РК. Для исключения влияния цвета матрицы на оси ординат показано отношение параметров цветности B/R . Установлено, что детектирование аналитического сигнала оптимально проводить через 3–5 мин после нанесения исследуемого образца на тест-полоску. Остальные исследуемые тест-системы показали аналогичное время отклика.

С помощью полученных тест-систем на основе нановолокон определяли концентрации никеля по интенсивности окрашенной зоны после контакта их с исследуемым раствором. Установили, что интенсивность окраски и площадь пятна при уменьшении концентрации никеля уменьшается. Примеры тест-систем представлены на рис. 5.

При выбранных оптимальных значениях pH построили градуировочные зависимости интенсивности различных каналов цветности от кон-

центрации никеля в растворе. В табл. 1 представлены параметры градуировочных зависимостей для определения никеля(II). Наибольшую чувствительность и хорошее значение коэффициента аппроксимации показала система РК (0.05 М) + полиакрилонитрил, а в качестве регистрируемого сигнала – канал R. Уменьшение концентрации реагента в волокнах позволило получить наиболее воспроизводимую систему при определении низких концентраций ионов никеля (от 1×10^{-6} до 0.01 М). Квадрат коэффициента аппроксимации составил 0.99 для канала R.

Сравнение отклика реагента, иммобилизованного в волокне и на фильтровальной бумаге, показало значительное различие в чувствительности определения. Так, бумага, обработанная РК, не дает отклик на ионы никеля при концентрации 5×10^{-5} М, в то время как волокнистый материал позволяет определять Ni^{2+} на уровне 1×10^{-6} М, что говорит об увеличении чувствительности нановолокон по сравнению с фильтровальной бумагой более чем в 50 раз.

В процессе анализа помимо целевых могут протекать побочные реакции с участием реагента и посторонних ионов, присутствующих в анализируемой смеси. Это может вызвать целый ряд нежелательных явлений: понижение чувствительности реакций, изменение окраски и др. Основными мешающими ионами при определении ионов никеля являются ионы меди, железа и кобальта. Для оценки селективности полученных тест-систем проанализировали растворы солей различных металлов – Cr(III), Co(II), Cu(II), Ba(II), Al(III), Pb(II), Mn(II) и Cd(II) – при варьировании их концентрации. Наблюдали, что при концентрациях ионов металлов 0.01 М тест-система с РК помимо никеля проявляла отклик на кобальт и медь, причем пятно с кобальтом окрашено в желтый цвет, с никелем и медью – в синий. При уменьшении концентрации всех металлов в анализируемом растворе в 100 раз наблюдается аналитический отклик только на ни-

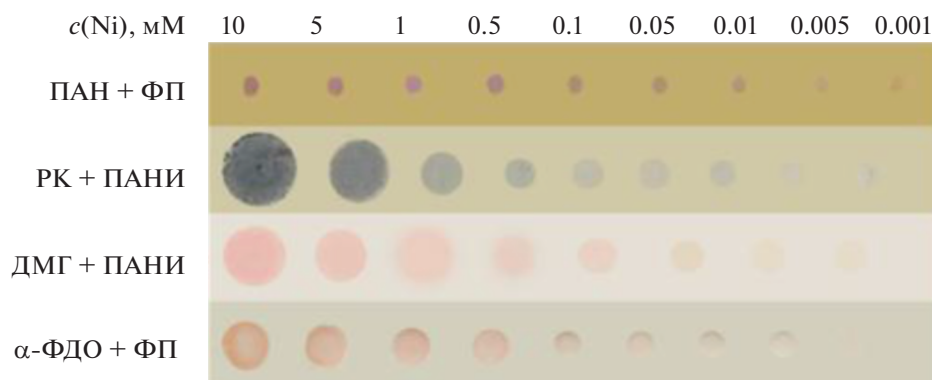


Рис. 5. Примеры тест-систем при взаимодействии с ионами Ni(II).

Таблица 1. Параметры градуировочных зависимостей для определения никеля(II)

Система	Канал цветности	$I - c$	R^2	Интервал линейности градуировочной зависимости, М
РК (0.25 М) + полиакрилонитрил	R	$y = -12756x + 170$	0.91	$1 \times 10^{-5} - 0.01$
	G	$y = -8794x + 132$	0.93	$1 \times 10^{-5} - 0.01$
	B	$y = -2267x + 65$	0.99	$1 \times 10^{-5} - 0.01$
РК (0.125 М) + полиакрилонитрил	R	$y = -3996x + 201$	0.89	$5 \times 10^{-5} - 0.01$
	G	$y = -2645x + 181$	0.88	$5 \times 10^{-5} - 0.01$
	B	$y = -912x + 135$	0.79	$5 \times 10^{-5} - 0.01$
РК (0.05 М) + полиакрилонитрил	R	$y = -4620x + 192$	0.99	$1 \times 10^{-6} - 0.01$
	G	$y = -3825x + 186$	0.98	$1 \times 10^{-6} - 0.01$
	B	$y = -1427x + 163$	0.97	$1 \times 10^{-6} - 0.01$
РК (0.25 М) + фторопласт	R	$y = -5784x + 146$	0.74	$1 \times 10^{-6} - 0.01$
	G	$y = -4142x + 125$	0.64	$1 \times 10^{-6} - 0.01$
	B	$y = 818x + 54$	0.12	$1 \times 10^{-6} - 0.01$
ПАН (2.5×10^{-2} М) + фторопласт	R	$y = 309x + 182$	0.03	$1 \times 10^{-6} - 0.01$
	G	$y = -555x + 149$	0.19	$1 \times 10^{-6} - 0.01$
	B	$y = 392x + 102$	0.28	$1 \times 10^{-6} - 0.01$
α -ФДО (0.125 М) + полиакрилонитрил ($\omega = 12\%$)	R	$y = -1116x + 208$	0.91	$1 \times 10^{-4} - 0.01$
	G	$y = -3007x + 195$	0.86	$1 \times 10^{-4} - 0.01$
	B	$y = -3217x + 188$	0.87	$1 \times 10^{-4} - 0.01$
ДМГ (1 М) + полиакрилонитрил ($\omega = 12\%$)	R	$y = -725x + 194$	0.95	$1 \times 10^{-4} - 0.01$
	G	$y = -2858x + 187$	0.99	$1 \times 10^{-4} - 0.01$
	B	$y = -1803x + 190$	0.96	$1 \times 10^{-4} - 0.01$
ДМГ (0.5 М) + полиакрилонитрил ($\omega = 12\%$)	R	$y = -496x + 191$	0.97	$5 \times 10^{-4} - 0.01$
	G	$y = 1349x + 168$	0.73	$5 \times 10^{-4} - 0.01$
	B	$y = 713x + 176$	0.67	$5 \times 10^{-4} - 0.01$
ДМГ (0.2 М) + полиакрилонитрил ($\omega = 12\%$)	R	$y = -466x + 184$	0.61	$5 \times 10^{-4} - 0.1$
	G	$y = 1132x + 165$	0.88	$5 \times 10^{-4} - 0.1$
	B	$y = 606x + 174$	0.85	$5 \times 10^{-4} - 0.1$

кель. Тест-система на основе ДМГ не давала отклик на все исследуемые металлы, кроме Со(II). Мешающие факторы для предложенных тест-систем, зафиксированные при постоянной концентрации ионов никеля 1×10^{-5} М и переменных

концентрациях ионов других металлов, представлены в табл. 2.

Тест-системы на основе полиакрилонитрила с РК (0.05 М), показавшие наилучшие результаты при определении низких концентраций ионов

Таблица 2. Мешающее влияние некоторых ионов металлов на определение Ni(II) тест-системами с рубеановодородной кислотой и диметилглиоксимом

Мешающий ион	$F_{\text{меш}}$
РК (0.05 М) + полиакрилонитрил ($\omega = 12\%$)	
Cu ²⁺	10
Co ²⁺	100
Cr ³⁺	>1000
Ba ²⁺	>1000
Al ³⁺	>1000
Pb ²⁺	>1000
Mn ²⁺	>1000
Cd ²⁺	>1000
ДМГ (1 М) + полиакрилонитрил ($\omega = 12\%$)	
Co ²⁺	5

никеля, использовали для их определения в природной и водопроводной водах. Правильность определения подтверждали методом введено–найденно. Примеры результатов тест-определения представлены в табл. 3.

Таблица 3. Проверка правильности определения ионов Ni(II) тест-системой полиакрилонитрил + рубеановодородная кислота (0.05 М) методом введено–найденно ($n = 3$, $P = 0.95$)

Вода	Введено, моль/л	Найдено, моль/л	s_r , %
Водопроводная	5.0×10^{-5}	$(5.2 \pm 1.4) \times 10^{-5}$	11
	1.0×10^{-4}	$(1.2 \pm 0.3) \times 10^{-4}$	10
	5.0×10^{-4}	$(4.8 \pm 1.1) \times 10^{-4}$	9.2
Природная	5.0×10^{-5}	$(5.3 \pm 1.3) \times 10^{-5}$	9.9
	1.0×10^{-4}	$(1.1 \pm 0.2) \times 10^{-4}$	7.3
	5.0×10^{-4}	$(5.0 \pm 1.2) \times 10^{-4}$	9.7

Таблица 4. Результаты (моль/л) определения ионов Ni²⁺ в сточной воде гальванического производства до и после очистки с использованием системы полиакрилонитрил + α -фурилдиоксим (0.125 М) ($n = 3$, $P = 0.95$)

Вода	Спектрофотометрия	Тест-метод, визуальная оценка по шкале	Тест-метод, цветометрия
До очистки	$(2.9 \pm 0.3) \times 10^{-5}$	3×10^{-5}	$(3.1 \pm 0.5) \times 10^{-5}$
После очистки	$(2.5 \pm 0.2) \times 10^{-6}$	Не обнаружен	Не обнаружен

Для определения ионов никеля в сточной воде гальванического производства до и после ее очистки, где содержание никеля гораздо выше по сравнению с водопроводной или природной водами, а также находится большое количество мешающих элементов, целесообразно использовать тест-систему полиакрилонитрил + α -ФДО (0.125 М). Тест-определение проводили, используя визуальную шкалу, а также методом цветометрии (с использованием градуировочной зависимости, диапазон концентраций которой расширен за счет нелинейного участка). Результаты сравнивали с результатами, полученными методом спектрофотометрии (табл. 4).

Таким образом, разработаны тест-системы на основе нановолокон, полученных методом электроформования, для определения ионов никеля в природных и сточных водах. Достоинством данных тест-систем являются простота изготовления тестов, отсутствие пробоподготовки и возможность проведения анализа в полевых условиях.

Работа выполнена при поддержке РНФ (проект № 21-13-00267).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Smirnova S.V., Ilin D.V., Pletnev I.V.* Extraction and ICP-OES determination of heavy metals using tetrabutylammonium bromide aqueous biphasic system and oleophilic collector // *Talanta*. 2021. V. 221. Article 121485.
2. *Ferreira S.L.C., Bezerra M.A., Santos A.S., Dos Santos W.N.L. et al.* Atomic absorption spectrometry – A multi element technique // *Trends Anal. Chem.* 2018. V. 100. P. 1.
3. *Zhou F., Li Ch., Zhu H., Li. Yo.* A novel method for simultaneous determination of zinc, nickel, cobalt and copper based on UV–Vis spectrometry // *Оптик*. 2019. V. 182. P. 58.
4. *Золотов Ю.А., Иванов В.М., Амелин В.Г.* Химические тест-методы анализа. М.: Едиториал УРС, 2002. 304 с.
5. *Запорожец О.А., Петрунec Н.И., Калиниченко Е.В., Сухан В.В.* Визуальный тест-метод для определения Ni(II) на основе иммобилизованного на кремнеземе 4-(2-пиридилазо)-2-нафтолата цинка // *Химия и технология воды*. 1999. Т. 21. № 3. С. 281.
6. *Иванов В.М., Ершова В.И.* Спектроскопия диффузного отражения иммобилизованных на силикагеле комплексом никеля с диметилглиоксимом и бензилдиоксимом // *Вестн. МГУ. Сер. 2. Химия*. 1999. Т. 40. № 1. С. 22.
7. *Бобкова Л.А., Односторонцева Т.В., Козик В.В.* Сорбционно-цветометрическое и тест-определение ионов марганца(II), кобальта(II), никеля(II) и меди(II) в природных водах // *Ползуновский Вестник*. 2009. № 3. С. 209.
8. *Tiwari A., Terada D., Yoshikawa C., Kobayashi H.* An enzyme-free highly glucose-specific assay using self-assembled aminobenzene boronic acid upon polyelectrolytes electrospun nanofibers-mat // *Talanta*. 2010. V. 82. № 5. P. 1725.
9. *Cleeton C., Keirouz A., Chen Xi., Radacsi N.* Electrospun nanofibers for drug delivery and biosensing // *ACS Biomater. Sci. Eng.* 2019. V. 5. № 9. P. 4183.
10. *Sapountzi E., Braiek M., Vocanson F., Chateaux J.-F., Jaffrezic-Renault N., Lagarde F.* Gold nanoparticles assembly on electrospun poly(vinyl alcohol)/poly(ethyleneimine)/glucose oxidase nanofibers for ultrasensitive electrochemical glucose biosensing // *Sens. Actuators B*. 2017. V. 238. P. 392.
11. *Tonsomboon K., Noppakudrittidej P., Sutikulsombat S., Petdum A., Panchan W., Wanichacheva N., Sooksimuang T., Karoonuthaisiri N.* Turn-On fluorescence resonance energy transfer (FRET)-based electrospun fibrous membranes: Rapid and ultrasensitive test strips for on-site detection of Mercury (II) ion // *Sens. Actuators B*. 2021. V. 344. Article 130212.
12. *Aydogdu S., Ertekin K., Suslu A., Ozdemir M., Celik E., Cocen U.* Optical CO₂ sensing with ionic liquid doped electrospun nanofibers // *J. Fluoresc.* 2011. V. 21. № 1. P. 607.
13. *Najafi M., Frey M.W.* Electrospun nanofibers for chemical separation // *Nanomaterials (Basel)*. 2020. V. 10. № 5. P. 982.
14. *Schoolaert E., Hoogenboom R., De Clerck K.* Colorimetric nanofibers as optical sensors // *Adv. Funct. Mater.* 2017. V. 12. № 38. Article 1702646.
15. *Mills A., Lepre A., Theobald B.R.C., Slade E. and Murrer B.A.* Use of luminescent gold compounds in the design of thin-film oxygen sensors // *Anal. Chem.* 1997. V. 69. P. 2842.
16. *Zhu Z., Wu P., Liu G., He X., Qi B., Zeng G., Wang W., Sun Y., Cui F.* Ultrahigh adsorption capacity of anionic dyes with sharp selectivity through the cationic charged hybrid nanofibrous membranes // *Chem. Eng. J.* 2017. V. 313. P. 957.
17. *Пешкова В.М., Савостина В.М.* Аналитическая химия никеля. М.: Наука, 1966. 204 с.