

ISSN 1561-8323 (Print)
ISSN 2524-2431 (Online)

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ
TECHNICAL SCIENCES

УДК 539.23+681.586.7
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2024-68-3-247-254>

Поступило в редакцию 21.02.2024
Received 21.02.2024

**Д. В. Сапсалёв^{1,2}, Г. Б. Мельникова¹, А. В. Аксютчиц³, Т. Н. Толстая¹,
Д. А. Котов³, академик С. А. Чижик¹**

¹*Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь*

²*Белорусский государственный педагогический университет имени Максима Танка,
Минск, Республика Беларусь*

³*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
Минск, Республика Беларусь*

**КОМПОЗИЦИОННЫЕ ПОКРЫТИЯ ПОЛИМЕТИЛМЕТАКРИЛАТА
С НАНОЧАСТИЦАМИ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ ДЛЯ ЕМКОСТНЫХ ДАТЧИКОВ
КОНТРОЛЯ СОДЕРЖАНИЯ НИКЕЛЯ В ВОДЕ**

Аннотация. Загрязнение окружающей среды, в частности источников воды, тяжелыми металлами является серьезной экологической проблемой. В связи с этим актуальна разработка новых сенсорных систем, позволяющих проводить экспресс-тесты и не уступающих при этом по аналитическим параметрам классическим методам детекции тяжелых металлов. Перспективными материалами для создания таких сенсорных систем являются композиционные покрытия на основе полимерных соединений с неорганическими наночастицами. В работе представлены результаты применения покрытий полиметилметакрилата (ПММА) и нанокомпозитов ПММА с наночастицами диоксида кремния (нч-SiO₂) для разработки емкостных датчиков анализа содержания ионов Ni²⁺ в воде. Методом атомно-силовой микроскопии исследованы структурно-морфологические характеристики проводящего никелевого слоя и наноструктурированных пленок на основе полиметилметакрилата. На основании экспериментальных данных зависимости емкостных характеристик датчиков от концентрации Ni²⁺ в растворах установлены рабочие характеристики сенсоров: время отклика – 5 мин; рабочий диапазон концентраций ионов Ni²⁺: 1 · 10⁻³–50 мМ; нижний предел обнаружения ≈ 0,06 мг/л (ПДК никеля в воде – 0,1 мг/л). Показано, что формирование на проводящем слое никеля покрытия состава ПММА + нч-SiO₂ (1 : 41,7 моль) методом спин-коатинга приводит к увеличению чувствительности датчика и срока его службы (до семи циклов).

Ключевые слова: емкостные датчики, полиметилметакрилат, нанокомпозиты, атомно-силовая микроскопия, спин-коатинг

Для цитирования. Композиционные покрытия полиметилметакрилата с наночастицами диоксида кремния для емкостных датчиков контроля содержания никеля в воде / Д. В. Сапсалёв [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2024. – Т. 68, № 3. – С. 247–254. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2024-68-3-247-254>

**Dmitry V. Sapsaliou^{1,2}, Galina B. Melnikova¹, Aliaksandr V. Aksyuchyts³, Tatyana N. Tolstaya¹,
Dmitry A. Kotov³, Academician Sergei A. Chizhik¹**

¹*A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Science of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

²*Belarusian State Pedagogical University named after Maxim Tank, Minsk, Republic of Belarus*

³*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus*

**COMPOSITE COATINGS OF POLY(METHYL METHACRYLATE) WITH SILICON DIOXIDE
NANOPARTICLES FOR CAPACITIVE SENSORS OF NICKEL CONTENT CONTROL IN WATER**

Abstract. Pollution of the environment, in particular water sources, with heavy metals is a serious environmental problem. In this regard, it is relevant to develop new sensor systems that allow rapid tests and are not inferior in analytical parameters to classical methods for detecting heavy metals. Promising materials for creating such sensor systems are

composite coatings based on polymer compounds with inorganic nanoparticles. The article presents the results of using poly(methyl methacrylate) (PMMA) coatings and PMMA nanocomposites with silicon dioxide nanoparticles (SiO₂ NPs) to develop capacitive sensors for analyzing the content of Ni²⁺ ions in water. The structural and morphological characteristics of a conductive nickel layer and nanostructured films based on poly(methyl methacrylate) were studied using atomic force microscopy. Based on the experimental data on the dependence of the capacitance characteristics of sensors on the concentration of Ni²⁺ in solutions, the operating characteristics of sensors were established: response time is 5 min; working range of concentrations of Ni²⁺ ions: 1 · 10⁻³ – 50 mM; lower detection limit ≈ 0.06 mg/l (maximum nickel concentration limit in water is 0.1 mg/l). It has been shown that the formation of a coating of the composition PMMA + NPs-SiO₂ (1 : 41.7 mol) on a conductive nickel layer using the spin-coating method leads to increasing the sensitivity of a sensor and its service life (up to seven cycles).

Keywords: capacitive sensors, poly(methyl methacrylate), nanocomposites, atomic force microscopy, spin coating

For citation. Sapsaliou D. V., Melnikova G. B., Aksiuchyts A. V., Tolstaya T. N., Kotov D. A., Chizhik S. A. Composite coatings of poly(methyl methacrylate) with silicon dioxide nanoparticles for capacitive sensors of nickel content control in water. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2024, vol. 68, no. 3, pp. 247–254 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2024-68-3-247-254>

Введение. Быстрый рост населения и связанное с этим развитие добывающей и перерабатывающей промышленности приводят к загрязнению окружающей среды, в том числе водных ресурсов. Одними из самых распространенных загрязнителей являются тяжелые металлы, например Hg²⁺, Pb²⁺, Cu²⁺, Cd²⁺, Cr³⁺, Ni²⁺ и пр. Опасность присутствия в источниках воды тяжелых металлов обусловлена их стойкостью в окружающей среде и биоаккумуляционной природой (способностью накапливаться в пищевой цепи за счет взаимодействия с белками). Возникающее при попадании тяжелых металлов в организм токсическое действие может приводить к поражению нервной, сердечно-сосудистой, репродуктивной систем, нарушениям функций почек, печени, твердых тканей (кости и зубы) и другим тяжелым последствиям [1–4]. В связи с этим актуальной задачей является мониторинг воды.

На сегодняшний день известно множество методов качественного и количественного анализа содержания тяжелых металлов в воде: жидкостная хроматография, атомная абсорбция, УФ/видимая спектроскопия и пр. Несмотря на очевидные преимущества данных методов (позволяют определять загрязнители в малых и сверхмалых концентрациях), существует ряд недостатков их применения: длительная пробоподготовка, часто связанная с предварительным концентрированием, необходимость в громоздком и дорогостоящем оборудовании, высокие требования к квалификации специалистов [2]. Альтернативным методом детекции тяжелых металлов в водных средах является применение электрохимических датчиков (ЭД).

Использование систем данного типа позволяет, регистрируя взаимодействие сенсорного слоя ЭД с аналитом, получать точную информацию о химическом составе среды в режиме реального времени [5–8]. Работа электрохимических датчиков может быть основана на регистрации зависимости изменений различных характеристик сенсорных слоев от концентрации анализируемого компонента среды (емкости [9; 10], вольт-амперных характеристик [11–13], сопротивления [14] и т. д.).

Усилия исследователей в последние годы направлены на разработку новых составов чувствительных слоев ЭД с целью улучшения их эксплуатационных характеристик [10–14]. Большим потенциалом в этом отношении обладают наноконпозиционные покрытия на основе полимерных соединений с неорганическими нанонаполнителями. Применение таких слоев для создания ЭД позволяет получать системы с высокими показателями чувствительности и селективности. Кроме того, использование полимерных наноконпозитов облегчает разработку простых в реализации и экономически эффективных методик определения различных загрязнителей окружающей среды [6; 12–14].

Так, в [12] сообщается о разработке тонкопленочных наноконпозиционных покрытий состава наночастицы (нч) CuO–полиметилметакрилат (ПММА) с добавлением различных углеродных нанонаполнителей для обнаружения ионов Hg²⁺. Датчик демонстрирует хорошие аналитические параметры: широкий линейно-динамический диапазон – от 0,1 нМ до 0,01 мМ, чувствительность – 1,70 · 10² мкАмкМ⁻¹см⁻², предел обнаружения – 55,76 ± 2,79 пМ и предел количественного определения – 185,87 пМ.

Разработан импедиметрический датчик на основе стеклоглеродного электрода, модифицированного нанокompозитом углеродные точки/хитозан. Предлагаемый датчик демонстрирует линейный отклик на ионы Cu^{2+} в диапазоне 10^{-9} – 10^{-5} М. Датчик показал хорошую проводимость, большую площадь поверхности и улучшенный перенос заряда на границе раздела электролит/пленка, что определяет хорошие показатели селективности по отношению к ионам Cu^{2+} , воспроизводимости, стабильности и нижний предел обнаружения порядка $5 \cdot 10^{-10}$ М [14].

Таким образом, конструирование новых ЭД с чувствительными нанокompозиционными покрытиями на основе полимеров является перспективным направлением в области контроля содержания тяжелых металлов в водных средах. Применение нанокompозитов актуально для создания экономичных, компактных, простых в обращении и портативных устройств, позволяющих проводить анализ на месте.

Цель работы – разработка композиционных сенсорных слоев на основе полиметилметакрилата с наночастицами диоксида кремния для емкостных датчиков анализа содержания ионов тяжелых металлов в воде (на примере ионов Ni^{2+}).

Материалы и методы исследования. Использованный в работе емкостный датчик встречно-штыревого типа представляет собой проводящее никелевое покрытие, сформированное методом ионно-лучевого распыления (установка ВУ-1БСп, СССР) на ситалловой подложке. Для формирования рисунка токопроводящего слоя заданной топологии на подложку предварительно закреплялась маска (расстояние от мишени никеля – 200 мм), период рабочей поверхности встречно-штыревых электродов составил 1 мм (рис. 1, а).

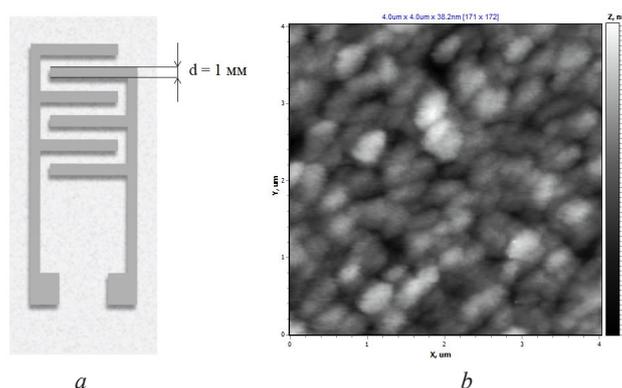


Рис. 1. Схема емкостного датчика встречно-штыревого типа (а) и данные АСМ о структуре никелевого покрытия, сформированного методом ионно-лучевого распыления на поверхности ситалловой подложки (б)

Fig. 1. Schematic of an interdigitated capacitive sensor (a) and AFM data on the structure of a nickel coating formed by ion-beam sputtering on the surface of a glass-ceramic substrate (b)

Предварительно проводили атомарную очистку поверхности подложек плазмой диэлектрического барьерного разряда при атмосферном давлении (система генерации плазмы при атмосферном давлении, ЦМИ НИЧ БГУИР, Республика Беларусь). Толщина сформированных никелевых покрытий составила 100 ± 10 нм (микроинтерферометр МИИ-4, СССР).

Покрытие полиметилметакрилата (ПММА, Sigma-Aldrich, $M_r \approx 10000$) формировали на поверхности никелевых слоев методом спин-коатинга из его раствора в хлороформе ($c = 1$ мг/мл). С целью получения чувствительных пленок, обладающих более развитой поверхностью, в состав полимерного покрытия вводили наночастицы диоксида кремния (нч- SiO_2). Для этого раствор ПММА ($c = 2$ мг/мл) смешивали с суспензиями наночастиц SiO_2 (Sigma-Aldrich, $d = 10$ – 20 нм) в хлороформе ($c = 0,5$ мг/мл, $c = 1$ мг/мл), предварительно выдержанными в ультразвуковой ванне в течение 10 мин. В результате были получены рабочие суспензии ПММА + нч- SiO_2 с мольными соотношениями полимера и наночастиц 1 : 41,7 моль и 1 : 83,3 моль соответственно.

Для реализации метода спин-коатинга аликвоту раствора ПММА (суспензии ПММА + нч- SiO_2) прикапывали на подложку, вращающуюся со скоростью 3200 оборотов в минуту. Вращение не прекращали в течение минуты для удаления остаточных количеств растворителя.

Структуру поверхности сформированных покрытий исследовали методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) на установке NT-206 (ОДО «Микротестмашины», Республика Беларусь) с использованием кремниевых кантилеверов FMG 01 (TipsNano, Российская Федерация).

Гидрофильные свойства оценивали для покрытий, сформированных на поверхности кремниевых пластин, методом лежащей капли на основании измерения краевого угла смачивания (КУС) на установке DSA 100E (Ktüss, Германия) по двум рабочим жидкостям – воде и диодметану; объем капли – 2 мкл. Значения удельной поверхностной энергии рассчитывали по модели Оуэнса–Вендта–Рабеля–Кельбле.

Рабочие характеристики датчиков оценивали на основании анализа зависимости емкостных характеристик от частоты (измеритель иммитанса E7-25, Республика Беларусь) при выдерживании в растворах сульфата никеля (II) с различной концентрацией. Растворы готовили из $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ квалификации «ч»; объем анализируемой пробы – 60 мл. За один цикл принято измерение емкостных характеристик датчика для растворов со значениями концентраций NiSO_4 от $1 \cdot 10^{-4}$ до 50 мМ.

Результаты и их обсуждение. Анализ данных атомно-силовой микроскопии о структуре сформированного на ситалле металлического покрытия показал, что поверхность никеля представлена равномерно распределенными зернами продолговатой формы. Максимальный размер отдельных зерен достигает 800 нм (рис. 1, *b*).

Пленка ПММА, сформированная на поверхности никеля, имеет ячеистую структуру с конгломератами как вытянутой, так и сферической форм. В структуре наноконпозиционных покрытий ПММА + нч- SiO_2 отмечено наличие конгломератов с близкой к сферической формой. Установлено, что размеры конгломератов увеличиваются с ростом содержания наночастиц диоксида кремния в суспензии для формирования покрытия и достигают 720 нм и 2,3 мкм для мольных соотношений ПММА и нч- SiO_2 (1 : 41,7) и (1 : 83,3) соответственно. Собственная ячеистая структура матрицы полимера сохраняется (рис. 2).

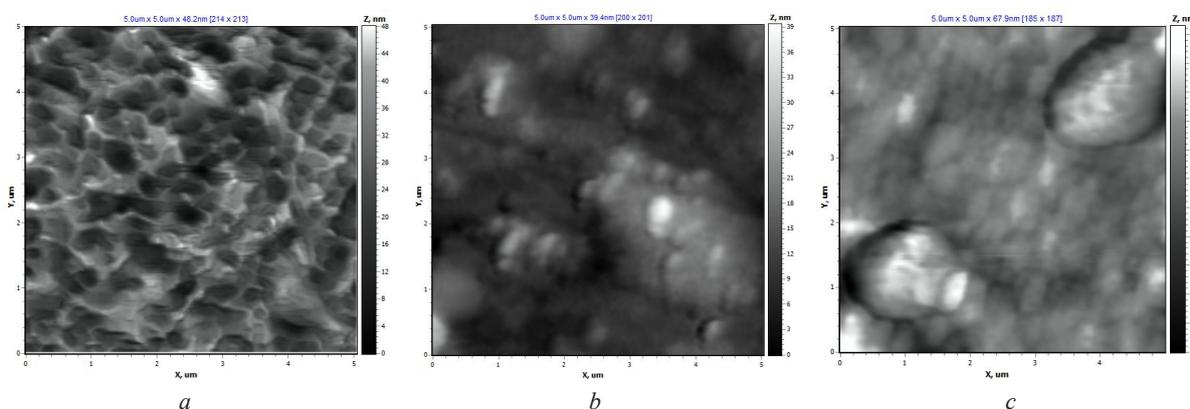


Рис. 2. Структура покрытий на основе ПММА, сформированных на поверхности никеля методом спин-коатинга: *a* – ПММА; *b* – ПММА + нч- SiO_2 (1 : 41,7); *c* – ПММА + нч- SiO_2 (1 : 83,3)

Fig. 2. Structure of PMMA-based coatings formed on a nickel surface by the spin coating method: *a* – PMMA; *b* – PMMA + SiO_2 NPs (1 : 41,7); *c* – PMMA + SiO_2 NPs (1 : 83,3)

Время отклика датчиков оценивали по достижению постоянных значений емкости при 1000 Гц. Установлено, что оптимальное время выдерживания датчиков в растворах Ni^{2+} составляет 5 мин. Дальнейшее выдерживание сенсорных систем в растворах соли нецелесообразно, поскольку значения емкости не изменяются в пределах доверительного интервала.

Установлено, что значения емкости датчиков снижаются с увеличением частоты электрического тока для всех анализируемых растворов; при увеличении концентрации NiSO_4 емкость сенсоров возрастает [15]. Датчики демонстрируют линейный отклик в диапазоне концентраций $1 \cdot 10^{-3}$ –50 мМ. Линейный характер зависимости наблюдается в логарифмических координатах при значениях частоты электрического тока до 300 Гц. В работе приведены данные зависимости емкостных характеристик датчиков от концентрации ионов Ni^{2+} при 120 Гц (рис. 3).

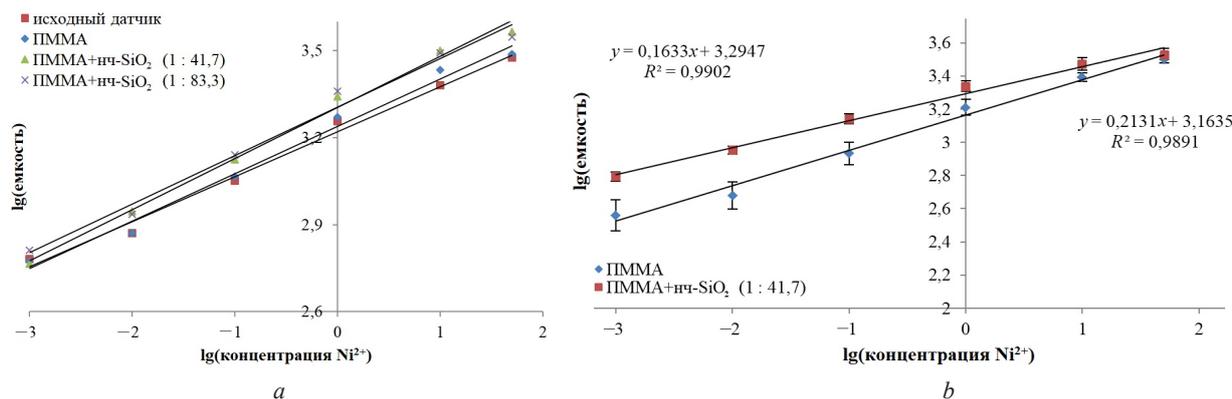


Рис. 3. Зависимости $\lg(C)$ от $\lg(c)$ при 120 Гц для исходного датчика и сенсоров с наноструктурированными чувствительными покрытиями на основе ПММА при выдерживании в растворах NiSO_4 с различной концентрацией в течение 5 минут (1 цикл) (a) и калибровочные прямые для датчиков с покрытиями ПММА и ПММА + нч-SiO₂ (1 : 41,7) (b)

Fig. 3. Dependences of $\lg(C)$ on $\lg(c)$ at 120 Hz for the original sensor and sensors with nanostructured sensitive coatings based on PMMA when kept in NiSO_4 solutions with different concentrations for 5 minutes (1 cycle) (a) and calibration lines for sensors with PMMA and PMMA + SiO₂ NPs (1 : 41,7) coatings (b)

Показано, что чувствительность датчика при модификации его поверхности слоем ПММА значительно не изменяется, в то время как формирование композиционных покрытий с наночастицами диоксида кремния на поверхности никелевых электродов приводит к увеличению отклика сенсора (рис. 3, a). Нижний предел обнаружения ионов Ni^{2+} составляет $\approx 0,06$ мг/л, что позволяет считать разработанные датчики перспективными устройствами для анализа качества воды (ПДК никеля в воде – 0,1 мг/л (СанПиН 10-124 РБ 99)).

Так, ЭД с покрытием ПММА + нч-SiO₂ (1 : 41,7) демонстрирует более высокие значения емкости по сравнению с исходным датчиком и сенсором, модифицированным ПММА, что обусловлено увеличением смачиваемости поверхности и ростом удельной поверхностной энергии за счет увеличения ее полярной составляющей, вызванными введением нч-SiO₂ в структуру полимерной матрицы (значения приведены в таблице).

Данные определения КУС, удельной поверхностной энергии (w) и ее полярной составляющей (γ^p) наноструктурированных покрытий на основе ПММА, сформированных на поверхности кремниевых пластин методом спин-коатинга

Data for determining CA, specific surface energy (w) and its polar component (γ^p) of nanostructured coatings based on PMMA, formed on the surface of silicon wafers by the spin coating method

Содержание нч-SiO ₂ (моль) на 1 моль ПММА Content of SiO ₂ NPs (mol) per 1 mol of PMMA	КУС, ° CA, °	w , мДж/м ² w , мДж/м ²	γ^p , мДж/м ² γ^p , мДж/м ²
0	72,6	47,2	5,8
41,7	54,4	51,0	19,0
83,3	38,4	62,8	24,0

Повышение чувствительности датчика в случае с покрытием ПММА + нч-SiO₂ (1 : 83,3) объясняется, помимо увеличения значений w и γ^p , также ростом значений нанощероховатости поверхности от $R_a = 6,2$ нм и $R_q = 8,0$ нм для исходного металлического покрытия до $R_a = 8,5$ нм и $R_q = 11,7$ нм для нанокomпозиционного слоя, сформированного на поверхности никеля (область сканирования 5×5 мкм). Указанные факторы (увеличение смачиваемости, w , γ^p , R_a , R_q) положительным образом сказываются на способности покрытий адсорбировать заряженные частицы из водных сред, что и обуславливает увеличение значений емкости датчиков с нанокomпозиционными покрытиями.

Для датчиков с лучшими показателями чувствительности оценены эксплуатационные характеристики. Емкостные характеристики датчика с сенсорным слоем ПММА + нч-SiO₂ (1 : 41,7)

не изменяются в пределах доверительного интервала в течение 7 циклов измерений (рис. 4, *a*). Восьмой цикл характеризуется снижением значений емкости, что обусловлено изменением структуры сенсорного слоя (рис. 4, *b*); значения нанощероховатости изменяются от $R_a = 3,9$ нм и $R_q = 5,4$ нм (до выдерживания в анализируемых растворах) до $R_a = 4,4$ нм и $R_q = 6,4$ нм (после 8 циклов измерений). Датчики с покрытием ПММА + нч-SiO₂ (1 : 83,3) уступают по сроку службы сенсорам с пленками ПММА + нч-SiO₂ (1 : 41,7): значения емкости заметно снижаются с каждым последующим циклом измерений, что обусловлено значительными изменениями в структуре сенсорного слоя (рис. 4, *c*, *d*). Это объясняется сильной реструктуризацией пленки вследствие взаимодействия относительно больших конгломератов наночастиц с водой. Как результат, наблюдается снижение параметров нанощероховатости покрытий до $R_a = 5,3$ нм и $R_q = 7,2$ нм (после 5 циклов измерений).

Датчик с покрытием ПММА выдерживает 8 циклов измерений [15]. Для сенсоров с лучшими показателями срока службы (датчики с чувствительными покрытиями ПММА и ПММА + нч-SiO₂ (1 : 41,7)) получены калибровочные прямые (рис. 3, *b*).

Таким образом, разработанные сенсорные системы могут найти применение при решении задач экологического мониторинга воды на предмет содержания ионов тяжелых металлов. Наилучшими характеристиками среди исследованных сенсорных покрытий обладает пленка ПММА + нч-SiO₂ (1 : 41,7) – большой уровень чувствительности по сравнению с исходным датчиком и датчиком, модифицированным покрытием ПММА, стабильность работы в течение 7 циклов измерений (рис. 3, 4).

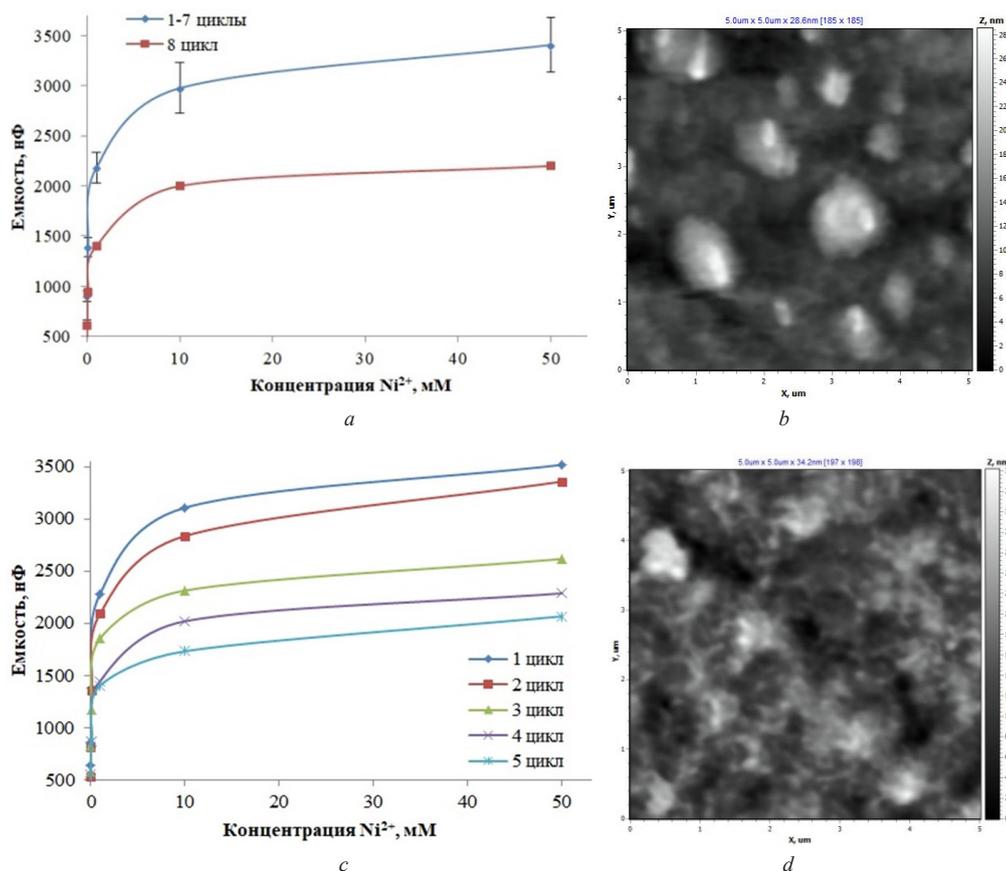


Рис. 4. Зависимости емкости датчиков, модифицированных наноконпозиционными покрытиями на основе ПММА, от концентрации ионов Ni²⁺ при 120 Гц (*a*, *c*) и структура пленок после 8 (*b*) и 5 (*d*) циклов измерений соответственно.

ПММА + нч-SiO₂ (1 : 41,7) – *a*, *b*; ПММА + нч-SiO₂ (1 : 83,3) – *c*, *d*

Rice. 4. Dependence of the capacitance of sensors modified with nanocomposite coatings based on PMMA, on the concentration of Ni²⁺ ions at 120 Hz (*a*, *c*) and film structure after 8 (*b*) and 5 (*d*) measurement cycles, respectively.

PMMA + SiO₂ NPs (1: 41,7) – *a*, *b*; PMMA + SiO₂ NPs (1: 83,3) – *c*, *d*

Заключение. Разработаны емкостные датчики встречно-штыревого типа, представляющие собой металлический слой никеля заданной топологии, сформированный методом ионно-лучевого распыления на поверхности ситалловой подложки, с сенсорными покрытиями составов ПММА + нч-SiO₂ (1 : 41,7) и (1 : 83,3), полученными методом спин-коатинга.

Показано, что формирование на проводящем слое никеля нанокпозиционных покрытий ПММА + нч-SiO₂ методом спин-коатинга позволяет увеличить чувствительность сенсора.

Наилучшими характеристиками среди исследованных сенсорных покрытий обладает пленка ПММА + нч-SiO₂ (1 : 41,7) – большой уровень чувствительности по сравнению с исходным датчиком и датчиком, модифицированным покрытием ПММА. Рабочие характеристики: время отклика – 5 мин; рабочий диапазон концентраций ионов Ni²⁺ – 1 · 10⁻³–50 мМ, нижний предел обнаружения ≈0,06 мг/л, стабильность работы в течение 7 циклов измерений.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственной программы научных исследований на 2021–2025 гг. «Энергетические и ядерные процессы и технологии», подпрограммы «Энергетические процессы и технологии» (задание 2.25).

Acknowledgements. The investigation was performed within the state program of scientific research for 2021–2025 «Energy and nuclear processes and technologies», subprogram «Energy processes and technologies» (assignment 2.25).

Список использованных источников

1. Recent advances in portable heavy metal electrochemical sensing platforms / A. Garcia-Miranda Ferrari [et al.] // *Environmental Science: Water Research & Technology*. – 2020. – Vol. 6, N 10. – P. 2676–2690. <https://doi.org/10.1039/d0ew00407c>
2. A review on detection of heavy metals from aqueous media using nanomaterial-based sensors / J. A. Buledi [et al.] // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2021. – Vol. 28. – P. 58994–59002. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-07865-7>
3. Detection of heavy metals using fully printed three electrode electrochemical sensor / S. G. R. Avuthu [et al.] // *IEEE SENSORS 2014 Proceedings*. – Valencia, Spain, 2014. – P. 669–672. <https://doi.org/10.1109/icsens.2014.6985087>
4. Nanostructured Sensors for Detection of Heavy Metals: A Review / Li Ming [et al.] // *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. – 2013. – Vol. 1, N 7. – P. 713–723. <https://doi.org/10.1021/sc400019a>
5. A Review of Nanocomposite-Modified Electrochemical Sensors for Water Quality Monitoring / O. Kanoun [et al.] // *Sensors*. – 2021. – Vol. 21, N 12. – Art. 4131. <https://doi.org/10.3390/s21124131>
6. Polymer based nanocomposites: A strategic tool for detection of toxic pollutants in environmental matrices / A. Shaheel [et al.] // *Chemosphere*. – 2022. – Vol. 303, part 1. – Art. 134923. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134923>
7. A Portable Sensor System with Ultramicro Electrode Chip for the Detection of Heavy-Metal Ions in Water / Y. Wang [et al.] // *Micromachines*. – 2021. – Vol. 12, N 12. – Art. 1468. <https://doi.org/10.3390/mi12121468>
8. Flexible copper-biopolymer nanocomposite sensors for trace level lead detection in water / P. Pathak [et al.] // *Sensors and Actuators B: Chemical*. – 2021. – Vol. 344. – Art. 130263. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2021.130263>
9. Effect of film thickness and different electrode geometries on the performance of chemical sensors made of nanostructured conducting polymer films / N. K. L. Wiziack [et al.] // *Sensors and Actuators B: Chemical*. – 2007. – Vol. 122, N 2. – P. 484–492. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2006.06.016>
10. Heavy metal ion detection using a capacitive micromechanical biosensor array for environmental monitoring / G. Tsekenis [et al.] // *Sensors and Actuators B: Chemical*. – 2015. – Vol. 208. – P. 628–635. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2014.10.093>
11. Ultrasensitive determination of mercury ions using a glassy carbon electrode modified with nanocomposites consisting of conductive polymer and amino-functionalized graphene quantum dots / B. Tian [et al.] // *Microchimica Acta*. – 2020. – Vol. 187. – Art. 210. <https://doi.org/10.1007/s00604-020-4191-1>
12. Selective Hg²⁺ sensor performance based various carbon-nanofillers into CuO-PMMA nanocomposites / D. F. Katoah [et al.] // *Polymers for Advanced Technologies*. – 2020. – Vol. 31, N 9. – P. 1946–1962. <https://doi.org/10.1002/pat.4919>
13. Eltayeb, N. E. Preparation and properties of newly synthesized Polyaniline@Graphene oxide/Ag nanocomposite for highly selective sensor application / N. E. Eltayeb, A. Khan // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2020. – Vol. 9, N 5. – P. 10459–10467. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.07.031>
14. Development of an impedimetric sensor based on carbon dots and chitosan nanocomposite modified electrode for Cu(II) detection in water / M. Echabaane [et al.] // *Journal of Solid State Electrochemistry*. – 2021. – Vol. 25. – P. 1797–1806. <https://doi.org/10.1007/s10008-021-04949-3>
15. Сенсорные слои полиметилметакрилата для емкостных датчиков анализа содержания катионов тяжелых металлов в воде / Д. В. Сапсалёв [и др.] // *Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. навук*. – 2024. – Т. 60, № 1. – С. 81–88. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2024-60-1-81-88>

References

1. Garcia-Miranda Ferrari A., Carrington P., Rowley-Neale S. J., Banks C. E. Recent advances in portable heavy metal electrochemical sensing platforms. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 2020, vol. 6, no. 10, pp. 2676–2690. <https://doi.org/10.1039/d0ew00407c>
2. Buledi J. A., Amin S., Haider S. I., Bhangar M. I., Solangi A. R. A review on detection of heavy metals from aqueous media using nanomaterial-based sensors. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, vol. 28, pp. 58994–59002. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-07865-7>

3. Avuthu S. G. R., Narakathu B. B., Eshkeiti A., Emamian S., Bazuin B. J., Joyce M., Atashbar M. Z. Detection of heavy metals using fully printed three electrode electrochemical sensor. *IEEE SENSORS 2014 Proceedings*. Valencia, Spain, 2014, pp. 669–672. <https://doi.org/10.1109/icsens.2014.6985087>
4. Ming Li, Honglei Gou, Israa Al-Ogaidi, Nianqiang Wu. Nanostructured Sensors for Detection of Heavy Metals: A Review. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2013, vol. 1, no. 7, pp. 713–723. <https://doi.org/10.1021/sc400019a>
5. Kanoun O., Lazarević-Pašti T., Pašti I., Nasraoui S., Talbi M., Brahem A., Adiraju A., Sheremet E., Rodriguez R. D., Ali M. B., Al-Hamry A. A Review of Nanocomposite-Modified Electrochemical Sensors for Water Quality Monitoring. *Sensors*, 2021, vol. 21, no. 12, art. 4131. <https://doi.org/10.3390/s21124131>
6. Shakeel A., Rizwan K., Farooq U., Iqbal S., Iqbal T., Awwad N. S., Ibrahim H. A. Polymer based nanocomposites: A strategic tool for detection of toxic pollutants in environmental matrices. *Chemosphere*, 2022, vol. 303, part 1, art. 134923. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134923>
7. Wang Y., Xu Y., Jiang J., Li Y., Tong J., Bian C. A Portable Sensor System with Ultramicro Electrode Chip for the Detection of Heavy-Metal Ions in Water. *Micromachines*, 2021, vol. 12, no. 12, art. 1468. <https://doi.org/10.3390/mi12121468>
8. Pathak P., Hwang J.-H., Li R. H. T., Rodriguez K. L., Rex M. M., Lee W. H., Cho H. J. Flexible copper-biopolymer nanocomposite sensors for trace level lead detection in water. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2021, vol. 344, art. 130263. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2021.130263>
9. Wiziack N. K. L., Paterno L. G., Fonseca F. J., Mattoso L. H. C. Effect of film thickness and different electrode geometries on the performance of chemical sensors made of nanostructured conducting polymer films. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2007, vol. 122, no. 2, pp. 484–492. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2006.06.016>
10. Tsekenis G., Filipidou M. K., Chatzipetrou M., Tsouti V., Zergioti I., Chatzandroulis S. Heavy metal ion detection using a capacitive micromechanical biosensor array for environmental monitoring. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2015, vol. 208, pp. 628–635. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2014.10.093>
11. Tian B., Kou Y., Jiang X., Lu J., Xue Y., Wang M., Tan L. Ultrasensitive determination of mercury ions using a glassy carbon electrode modified with nanocomposites consisting of conductive polymer and amino-functionalized graphene quantum dots. *Microchimica Acta*, 2020, vol. 187, art. 210. <https://doi.org/10.1007/s00604-020-4191-1>
12. Katowah D. F., Alqarni S., Mohammed G. I., Al Sheheri S. Z., Alam M. M., Ismail S. H., Asiri A. M., Hussein M. A., Rahman M. M. Selective Hg²⁺ sensor performance based various carbon-nanofillers into CuO-PMMA nanocomposites. *Polymers for Advanced Technologies*, 2020, vol. 31, no. 9, pp. 1946–1962. <https://doi.org/10.1002/pat.4919>
13. Eltayeb N. E., Khan A. Preparation and properties of newly synthesized Polyaniline@Graphene oxide/Ag nanocomposite for highly selective sensor application. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, vol. 9, no. 5, pp. 10459–10467. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.07.031>
14. Echabaane M., Hfaiedh S., Smiri B., Saidi F., Dridi C. Development of an impedimetric sensor based on carbon dots and chitosan nanocomposite modified electrode for Cu(II) detection in water. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 2021, vol. 25, pp. 1797–1806. <https://doi.org/10.1007/s10008-021-04949-3>
15. Sapsaliou D. V., Melnikova G. B., Aksiuchyts A. V., Tolstaya T. N., Kotov D. A., Chizhik S. A. Sensory layers of poly(methyl methacrylate) for capacitive sensors for analysis of the content of heavy metal cations in water. *Vestsi Natsyunal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2024, vol. 60, no. 1, pp. 81–88 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2024-60-1-81-88>

Информация об авторах

Сапсальёв Дмитрий Владимирович – мл. науч. сотрудник. Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Беларусь); аспирант. Белорусский государственный педагогический университет им. М. Танка (ул. Советская, 18, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: dsapsalev@list.ru.

Мельникова Галина Борисовна – канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник. Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: galachkax@gmail.com.

Аксиуцц Александр Владимирович – аспирант, мл. науч. сотрудник. Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (ул. П. Бровки, 6, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: a.aksiuchyts@bsuir.by.

Толстая Татьяна Николаевна – науч. сотрудник. Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: tolstaya.tn@yandex.ru.

Котов Дмитрий Анатольевич – канд. техн. наук, доцент. Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (ул. П. Бровки, 6, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: kotov@bsuir.by.

Чижик Сергей Антонович – академик, д-р техн. наук, профессор, гл. науч. сотрудник. Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: chizhik_sa@tut.by.

Information about the authors

Sapsaliou Dmitry V. – Junior Researcher. A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus); Postgraduate Student. Belarusian State Pedagogical University named after Maxim Tank (18, Sovetskaya Str., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dsapsalev@list.ru.

Melnikova Galina B. – Ph. D. (Engineering), Senior Researcher. A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: galachkax@gmail.com.

Aksiuchyts Aliaksandr V. – Postgraduate Student, Junior Researcher. Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (6, P. Brovka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: a.aksiuchyts@bsuir.by.

Tolstaya Tatyana N. – Researcher. A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: tolstaya.tn@yandex.ru.

Kotov Dmitry A. – Ph. D. (Engineering), Associate Professor. Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (6, P. Brovka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kotov@bsuir.by.

Chizhik Sergei A. – Academician, D. Sc. (Engineering), Professor, Chief Researcher, A.V. Luikov Heat and Mass transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: chizhik_sa@tut.by.