

ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ НАНОКЛАСТЕРОВ,
СУПРАМОЛЕКУЛЯРНЫХ СТРУКТУР И НАНОМАТЕРИАЛОВ

УДК 544.478

СИНТЕЗ, СТРУКТУРА И КАТАЛИТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
НАНОКОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ НАНОЧАСТИЦ ПАЛЛАДИЯ,
ЗАКИСИ МЕДИ И МАГНЕТИТА, ВНЕДРЕННЫХ
В НАНОЦЕЛЛЮЛОЗНУЮ МАТРИЦУ

© 2024 г. Е. Г. Чепайкин^{a, *}, С. И. Помогайло^{a, b}, О. П. Ткаченко^c, Е. В. Шувалова^c,
Л. М. Кустов^{c, e}, В. Н. Борщ^a, Е. И. Кнерельман^d, Д. А. Помогайло^e

^aИнститут структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А. Г. Мерджанова РАН,
Черноголовка, 142432 Россия

^bВсероссийский институт научной и технической информации РАН, Москва, 125190 Россия

^cИнститут органической химии им. Н. Д. Зелинского РАН, Москва, 119991 Россия

^dФГБУН Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН,
Черноголовка, 142432 Россия

^eМосковский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва 119991 Россия

*e-mail: echeper@ism.ac.ru

Поступила в редакцию 18.09.2023 г.

После доработки 18.09.2023 г.

Принята к публикации 26.09.2023 г.

Получены нанокompозитные материалы на основе наночастиц палладия, закиси меди и магнетита, внедренных в наноцеллюлозную матрицу с использованием методов осаждения-соосаждения *in situ* и *ex situ* из растворов солей соответствующих металлов. Исследования характеристик полученных композитов методами ИК-спектроскопии с преобразованием Фурье, рентгеновской дифракции, СЭМ и ПЭМ показали, что инкапсулированные наночастицы мало влияют на морфологию и структуру нанофибриллярной целлюлозы. Каталитические свойства нанокompозитов испытаны в гидрировании нитробензола.

Ключевые слова: нанокompозиты, наноцеллюлоза, закись меди, магнетит, палладий

DOI: 10.31857/S0044453724060176, **EDN:** PWYTGM

Не ослабевает интерес к исследованиям, направленным на создание нанокompозитов на основе наночастиц металлов, стабилизированных полимерами, для применения в качестве катализаторов в различных реакциях органического синтеза [1–9]. Однако, наночастицы металлов и их оксидов нестабильны и легко самоагрегируются, а также способны к коагуляции в реакционных средах [9]. Поэтому необходима оболочка для их стабилизации и защиты. В качестве носителей катализаторов используются материалы различной природы: неорганической, органической и др. Среди биополимеров целлюлоза является самым распространенным природным полимером, получаемым из различных природных источников (древесины, хлопка, водорослей и бактерий), и используется как носитель наночастиц металлов и их оксидов для применения в катализе [2–4, 6–8]. Среди различных производных целлюлозы нанофибриллярная целлюлоза, которую получают из натуральных волокон целлюлозы,

привлекла внимание исследователей всего мира как новый класс возобновляемых углеводных полимеров из-за своих свойств, таких как: контролируемая морфология, химия поверхности, большая площадь удельной поверхности, экологическая устойчивость и относительно низкая стоимость [10–16].

Целью данной работы является получение нанокompозитных материалов на основе наночастиц палладия, оксидов меди и магнетита в матрице нанофибриллярной целлюлозы (NFC), исследование их структуры, а также тестирование их каталитических свойств в реакции гидрирования нитробензола.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Материалы и реактивы

При проведении исследований использованы: нанофибриллярная целлюлоза, полученная

в ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) им. И. М. Губкина» путем кислотнo-окислительной обработки из небеленой технической целлюлозы производства АО «Соликамскбумпром» [17]. Для приготовления использованы следующие реактивы: $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ («ч.»), $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ («ч.»), NH_4OH (25% раствор), $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ («ч. д. а.»), $\text{N}_2\text{H}_4 \cdot \text{H}_2\text{SO}_4$ («ч. д. а.»), PdCl_2 (59.5% Pd).

Методы исследования

Фазовый состав образцов исследован с использованием дифрактометра ДРОН-3М (фильтрованное медное или железное излучение, автоматизированная съемка по точкам с интервалом 0.02° , экспозиция 2 с). База данных PDF – 2 (The Powder Diffraction File, 1997 год).

Инфракрасные спектры образцов, приготовленных в виде таблеток с бромистым калием, получали с помощью ИК-фурье-спектрометра Nicolet-380 (Thermo Scientific, США).

Микроструктура образцов изучена методом сканирующей электронной микроскопии с полевой эмиссией (FE-SEM) на электронном микроскопе Hitachi SU8000. Съемка изображений проведена в режиме регистрации отраженных электронов (композиционный контраст) при ускоряющем напряжении 10 кВ. Морфология образцов исследована с учетом поправки на поверхностные эффекты напыления проводящего слоя [18]. Оптимизация аналитических измерений проведена в рамках описанного ранее подхода [19]. EDS-SEM исследования проведены на приборе Hitachi HT7700.

Приготовление образцов $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NFC}$ ex situ

Для получения композита $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NFC}$ были предварительно синтезированы наночастицы магнетита методом химического соосаждения солей Fe(III) и Fe(II) при молярном соотношении 2:1 в присутствии гидроксида аммония в атмосфере азота. После добавления раствора аммиака в раствор солей Fe^{3+} и Fe^{2+} наблюдали образование черного осадка. Полученные магнитные наночастицы были промыты дистиллированной водой, высушены и идентифицированы. Для приготовления композитных материалов $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NFC}$ к суспензии наноцеллюлозы в воде при перемешивании добавляли порошок полученного и охарактеризованного магнетита. Смесь интенсивно перемешивали 2 ч и отфильтровывали. Образовавшийся осадок $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NFC}$ промывали несколько раз деионизированной водой и высушивали.

Приготовление образцов $\text{Cu}_2\text{O}@\text{NFC}$ in situ

Приготовление композиционного материала на основе наночастиц оксидов меди в наноцеллюлоз-

ной матрице ($\text{Cu}_2\text{O}@\text{NFC}$) проведено *in situ* восстановлением ионов меди (II) из сульфата меди гидразинсульфатом непосредственно в заранее приготовленной суспензии наноцеллюлозы в воде. Процесс восстановления проводили в слабощелочной среде, которая была достигнута прибавлением 25%-ного раствора аммиака.

Приготовление образцов $\text{Pd}@\text{NFC}$ in situ

К суспензии (0.18 г в 20 мл воды) наноцеллюлозы добавляли 6 мл 0.008 М раствора PdCl_2 . К полученной светло-коричневой суспензии добавляли 2 мл 0.04 М раствора $\text{N}_2\text{H}_4 \cdot \text{H}_2\text{SO}_4$. При этом молярное соотношение $\text{Pd}^{2+}:\text{N}_2\text{H}_4$ составляло 1:2. Затем добавляли раствор аммиака до достижения pH 10, при котором наблюдали образование черной массы. Осадок отфильтровывали и высушивали.

Приготовление нанокмппозитов $\text{PdCu}_2\text{O}@\text{NFC}$ in situ

К суспензии (0.18 г в 20 мл воды) наноцеллюлозы добавляли 5 мл 0.1 М раствора сульфата меди(II) и 6 мл 0.008 М раствора хлорида меди(II). Затем вводили 5 мл 0.2 М раствора гидразинсульфата. При этом наблюдали небольшое осветление суспензии, которая по мере прикапывания раствора аммиака до pH 6 стала черной. Осадок отфильтровывали и высушивали.

Каталитические испытания

В качестве объекта исследования был выбран нитробензол. Гидрирование нитробензола проводили под давлением водорода 1.5 МПа в стальном автоклаве с тефлоновым вкладышем объемом 60 см³, снабженным краном-дозатором высокого давления для отбора проб во время реакции. Пробы, отобранные во время реакции, анализировали на хроматографе Кристаллюкс-4000 с пламенно-ионизационным детектором (капиллярная колонка ОРТМА с фазой OV-1, длина 30 м, газ-носитель – азот). Температура испарителя и детектора 240°C, температура термостата 140°C. Объем пробы 1 мкл.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Нанопибриллирная целлюлоза (NFC)

По данным СЭМ структура нанопибриллирной целлюлозы (рис. 1а, б) представляет собой перекрывающиеся ленты-волокна длиной от 65 мкм до 130 мкм, толщиной от 11 мкм до 15 мкм.

По результатам измерений, полученных с помощью ПЭМ, данные волокна состоят из мелких округлых бахромчатых клубков диаметром от 6 до 30 нм, а также обрывков нитей длиной от 40 до 60 нм и толщиной до 3–4 нм.

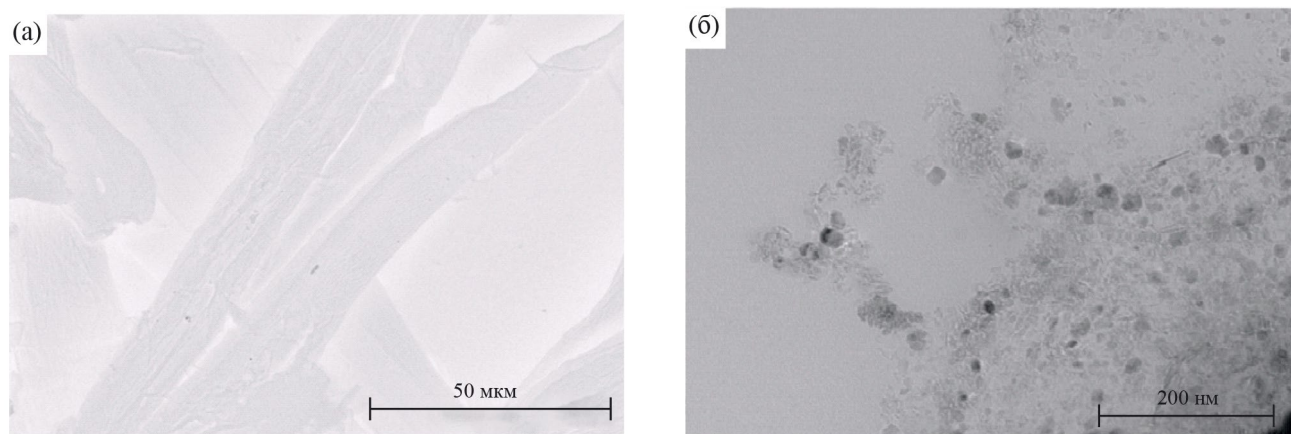


Рис. 1. Микрофотографии нановибрилярной целлюлозы, полученные с помощью СЭМ (а) и ПЭМ (б).

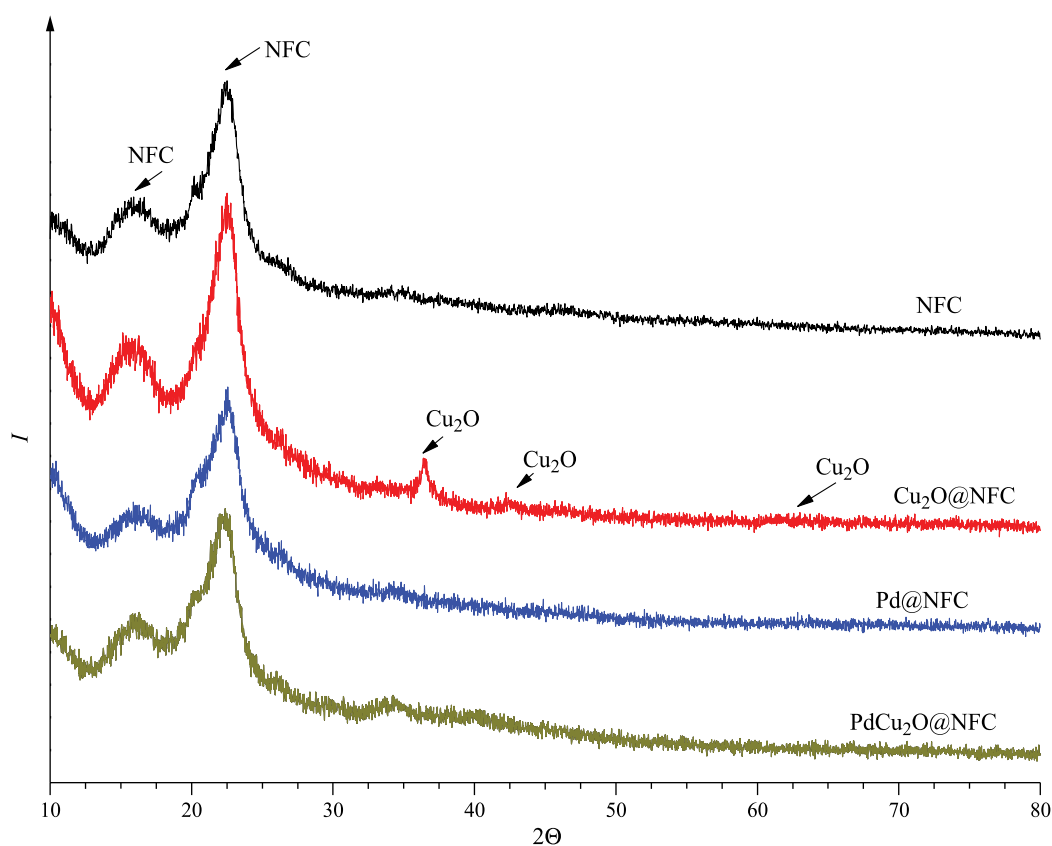


Рис. 2. Дифрактограммы NFC, $\text{Cu}_2\text{O}@NFC$, $\text{Pd}@NFC$, $\text{PdCu}_2\text{O}@NFC$; Θ — угол отражения.

Данные рентгеновской дифракции подтверждают структуру целлюлозы в соответствии с рефлексами в области 2Θ 15.24° и 22.5°, соответствующими кристаллической фазе целлюлозы (рис. 2).

В ИК-спектрах NFC (рис. 3) присутствуют полосы в области 3400–3200 см^{-1} , обусловленные валентными колебаниями гидроксильных

групп, 2900–2800 см^{-1} и 1375 см^{-1} , соответствующие валентным и деформационным колебаниям С–Н-связей в метиленовых и метиновых группах целлюлозы. Также присутствуют полосы 1100–950 см^{-1} , характерные для колебаний групп С–О и С–Н гликозидной связи и глюкопиранозного кольца.

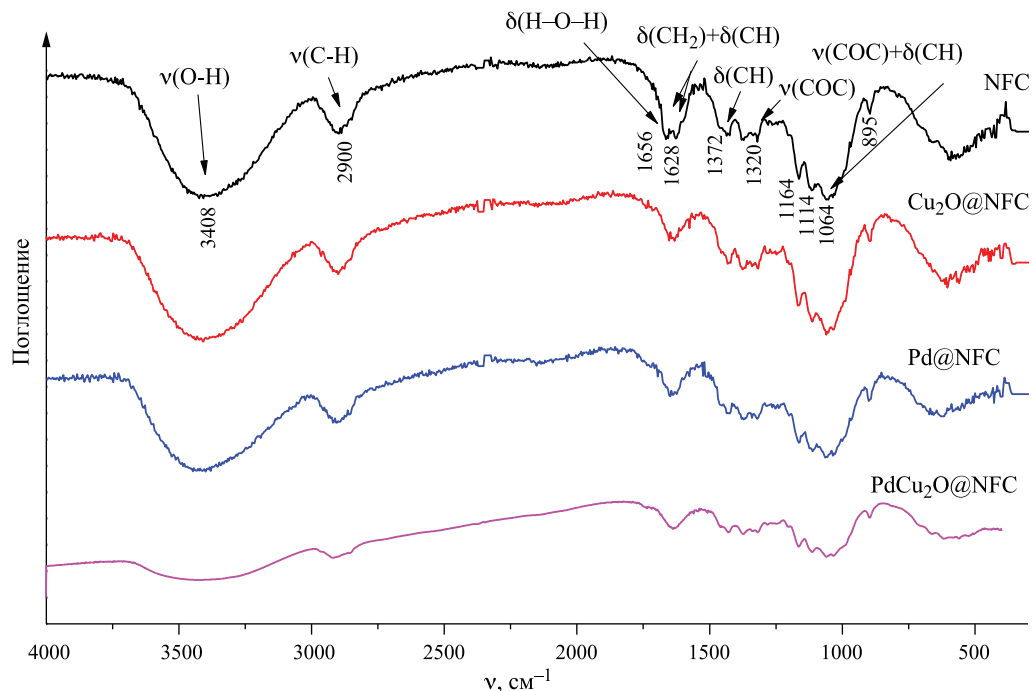


Рис. 3. ИК-спектры образцов: NFC, $\text{Cu}_2\text{O@NFC}$, Pd@NFC , $\text{PdCu}_2\text{O@NFC}$; ν — волновое число.

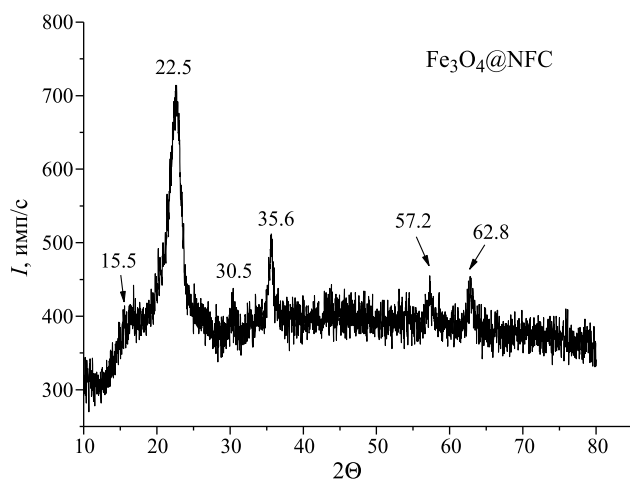


Рис. 4. Дифрактограмма образца $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{@NFC}$.

Наноккомпозиты на основе $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{@NFC}$

Наночастицы магнетита, полученные путем осаждения из солей хлоридов железа (II) и (III), до введения их в NFC имеют средний размер области когерентного рассеяния 14.9 нм, вычисленный по формуле Дебая-Шеррера. На дифрактограммах наноккомпозитов $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{@NFC}$ присутствуют рефлексы при $2\theta = 30.5^\circ$, 35.6° , 57.2° , 62.8° , соответствующие магнетиту, и рефлексы при $2\theta = 15.5^\circ$ и 22.5° ,

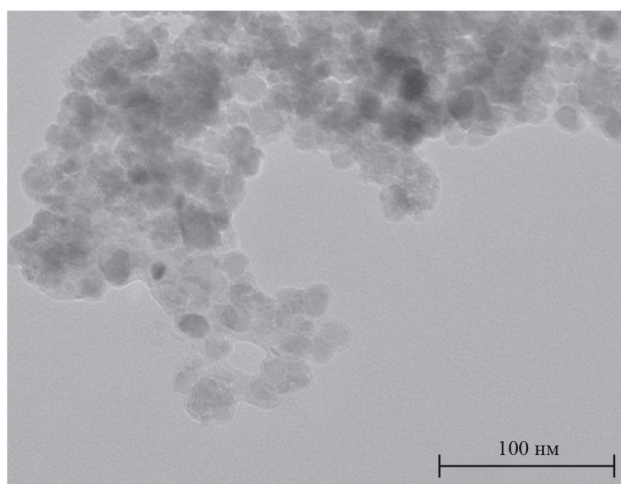


Рис. 5. Микрофотография ПЭМ наноккомпозита $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{@NFC}$.

соответствующие кристаллической фазе целлюлозы (рис. 4).

Размер области когерентного рассеяния частиц Fe_3O_4 в наноккомпозите $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{@NFC}$ составляет 20.5–40 нм. На СЭМ-снимках видны частицы, различающиеся немного по контрастности со средними размерами до 22 нм, что подтверждается микрофотографиями ПЭМ, где видны наночастицы размерами от 13 до 27 нм (рис. 5).

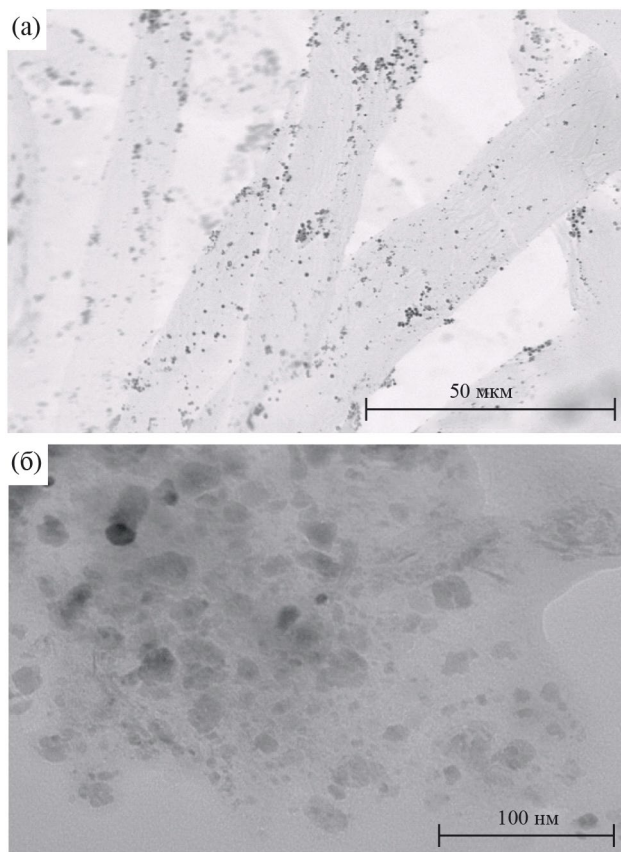


Рис. 6. СЭМ- и ПЭМ микрофотографии $\text{Cu}_2\text{O@NFC}$.

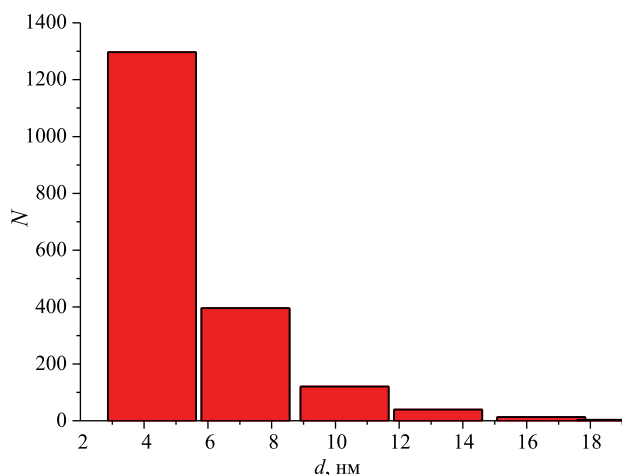


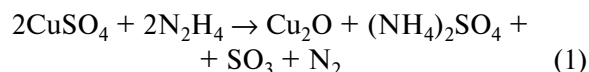
Рис. 7. Гистограмма распределения наночастиц закиси меди в наноцеллюлозной матрице; N — количество частиц, d — диаметр частиц.

По данным ИК-фурье-спектроскопии (рис. 3) в спектрах нанокмпозитов $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{@NFC}$ присутствуют полосы поглощения, свойственные

целлюлозе, которые подтверждают отсутствие видимых изменений в связях целлюлозы.

Нанокмпозиты на основе $\text{Cu}_2\text{O@NFC}$

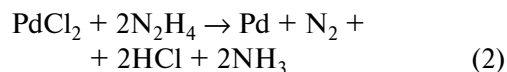
Нанокмпозиты $\text{Cu}_2\text{O@NFC}$ получены *in situ* по уравнению



Дифрактограммы полученных образцов $\text{Cu}_2\text{O@NFC}$ (рис. 2) подтверждают образование наночастиц оксида меди (I) и сохранение структуры наноцеллюлозы. По данным СЭМ (рис. 6а) видно сохранение структуры волокон наноцеллюлозы и внедренные округлые агломераты размером 150–800 нм, но из снимков ПЭМ (рис. 6б) следует, что они состоят из округлых наночастиц с распределением размеров в диаметре от 4 до 15.5 нм (рис. 7).

Нанокмпозиты на основе Pd@NFC

Нанокмпозиты Pd@NFC получены *in situ* по уравнению



На микрофотографиях СЭМ (рис. 8а) нанокмпозитов Pd@NFC на фоне микрометровых волокон (длиной 30 мкм и толщиной 15 мкм) видны темные частицы, которые, по-видимому, представляют собой агрегаты из частиц палладия или оксидов палладия диаметром 310–840 нм.

Снимки ПЭМ (рис. 8б) свидетельствуют об образовании отдельных зернышек — частиц палладия в матрице (120×130 нм) наноцеллюлозы. Размер частиц палладия составляет от 2.5 нм до 8.5 нм (рис. 9).

Индекс кристалличности наноцеллюлозы и полученных нанокмпозитов (табл. 1) по данным рентгеновской дифракции, рассчитанный по уравнению Сегала [20] как отношение интенсивности кристаллического рефлекса I_k при $2\theta = 22.5^\circ$ за вычетом максимальной интенсивности аморфного гало I_a при $2\theta = 19^\circ$, к I_k : $I_{kr} = (I_k - I_a)/I_k$, составляет 0.53, 0.54, 0.51 и 0.46, соответственно, для NFC , Cu@NFC , Pd@NFC , $\text{PdCu}_2\text{O@NFC}$. Степень кристалличности целлюлозных звеньев в этих же нанокмпозитах, рассчитанная по данным ИК-спектроскопии и методу [20] из отношения интенсивностей характеристических полос при 1430 и 900 см^{-1} , согласно [21], равна 0.86, 0.86, 0.91 и 0.80. Таким образом, введение наночастиц в NFC приводит к небольшому разупорядочению, т.е. уменьшению кристалличности.

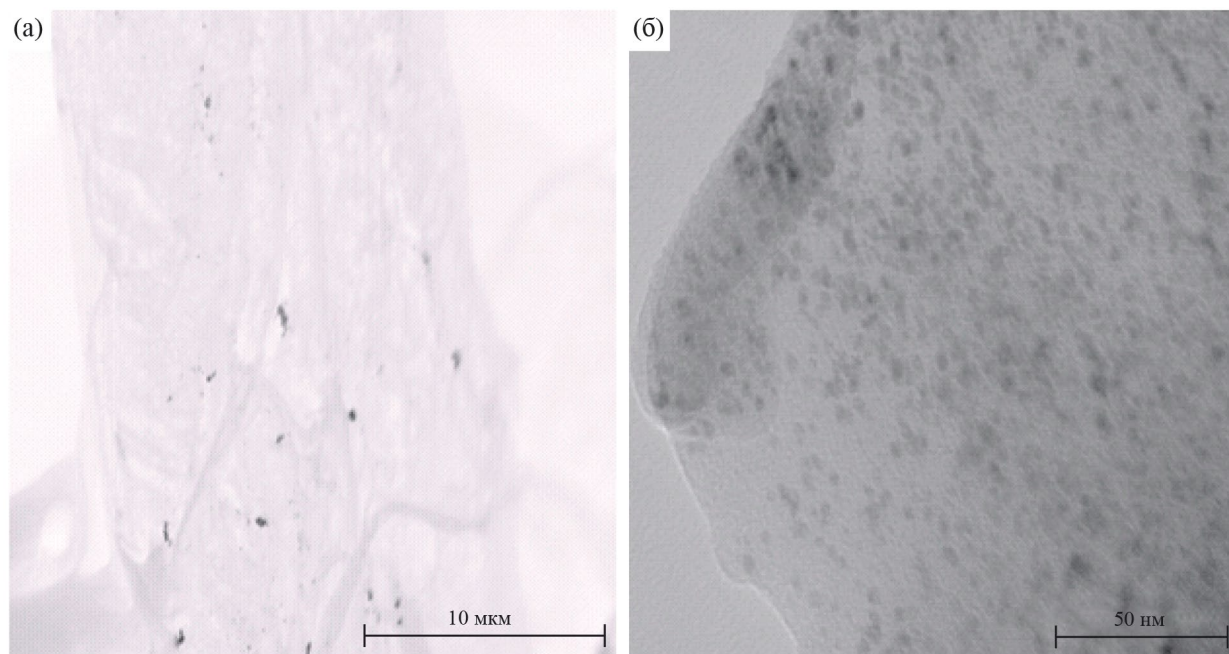
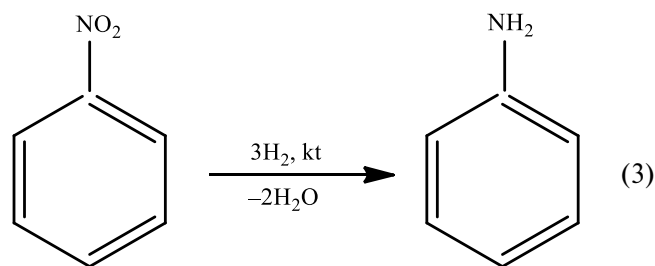


Рис. 8. Микрофотографии СЭМ и ПЭМ образца Pd@NFC.

Катализ реакции гидрирования нитробензола

В последнее время достигнуты большие успехи в гидрировании нитроаренов, в которых применяются гетерогенные катализаторы [3]. Известно, что восстановление нитрогрупп на катализаторах, в состав которых входит Pd, протекает в мягких условиях [22, 23], в то время как для проведения реакции гидрирования нитроаренов на катализаторах, содержащих неблагородные металлы, такие как Cu, Fe, необходимы высокое давление водорода и высокая температура [24–26]



Тестирование полученных нанокомпозитов в реакции гидрирования нитробензола (см. уравнение (3)) показало (см. табл. 2), что нанокомпозиты Pd@NFC обладают, как и следовало ожидать, лучшей активностью в гидрировании нитробензола, конверсия нитробензола достигает 85.7% при 70°C за 10 мин. В присутствии Cu₂O@NFC конверсия нитробензола достигает 18% при 170°C за 60 мин. Более высокая конверсия нитробензола

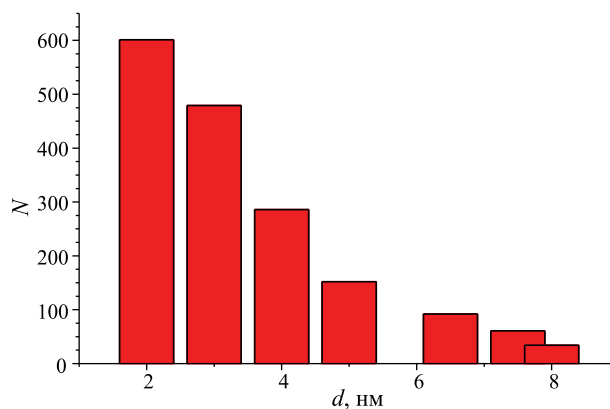


Рис. 9. Гистограмма распределения наночастиц палладия в наноцеллюлозной матрице.

Таблица 1. Рассчитанные данные степени кристалличности нанокомпозитов

Образец	Индекс кристалличности	
	По данным РФА	По данным ИК-спектроскопии
NFC	0.53	0.86
Cu ₂ O@NFC	0.54	0.86
Pd@NFC	0.51	0.91
PdCu ₂ O@NFC	0.46	0.80

Таблица 2. Сравнение каталитической активности нанокмпозитов в гидрировании нитробензола

Катализатор	Содержание металла, мас. %			T, °C	τ, мин	α, %	TOF, мин ⁻¹
	Pd	Cu	Fe				
Pd@NFC	1.3	0	0	70	10	85.7	17.5
PdCu ₂ O@NFC	1.3	13.2	0	70	10	88.0	17.9
Cu ₂ O@NFC	0	13.2	0	170	60	18.0	0.05
Fe ₃ O ₄ @NFC	0	0	30	170	60	33.7	0.03

Примечание. Условия: катализатор, 50 мг; субстрат – нитробензол, 200 мг; растворитель – этиловый спирт, 20 мл; давление H₂ 1.5 МПа; τ – время, α – конверсия нитробензола.

в присутствии Fe₃O₄@NFC при тех же условиях объясняется более высоким содержанием магнетита в нанокмпозите, расчет TOF показывает более низкую активность Fe₃O₄@NFC, чем у Cu₂O@NFC. Также установлено, что биметаллический нанокмпозит PdCu₂O@NFC эффективнее, чем монометаллические – Pd@NFC и Cu₂O@NFC (см. табл. 2), что, видимо, объясняется синергизмом обоих металлов.

Таким образом, получены нанокмпозиты на основе наночастиц палладия, закиси меди и магнетита, внедренные в нанофибрилярную структуру целлюлозы. Наночастицы магнетита в нанокмпозитах, полученных методом *ex situ*, имели больший размер, чем наночастицы палладия и закиси меди в нанокмпозитах, полученных *in situ*, что подтверждает влияние матрицы наноцеллюлозы как стабилизатора. В свою очередь, введение наночастиц магнетита, закиси меди, палладия не вносит существенных изменений в структуру наноцеллюлозы. Полученные нанокмпозиты как катализаторы активны в гидрировании нитробензола в анилин.

Работа выполнена по теме Государственного задания ИСМАН № 122032800155-9 и гос. задания (шифр темы: 0089-2019-0018, номер государственной регистрации: АААА-А19-119022690098-3) с использованием оборудования Центра коллективного пользования “Новые нефтехимические процессы, полимерные композиты и адгезивы” (№ 77601) в части исследования структуры катализаторов.

Авторы (ЛМК и ОПТ) благодарят Российский научный фонд за финансовую поддержку (грант № 23-73-30007) в части исследования каталитических свойств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Помогайло А.Д., Розенберг А.С., Уфлянд И.Е. // Наночастицы металлов в полимерах. М.: Химия, 2000. 672с. [Pomogailo A.D., Rozenberg A.S., Uflyand I.E. // Nanochasticy metallov v polimerah. Moscow. 2005. 672p.]
2. Кустов А.Л., Дунаев С.Ф., Финашина Е.Д. // Журн. физ. химии. 2023. Т. 97. № 2. С. 223. [Kustov A.L., Dunaev S.F., Finashina E.D. // Russ. J. Phys. Chem. A. 2023. V. 97. P. 340.] <https://doi.org/10.1134/S0036024423020127>
3. Шестеркина А.А., Стрекалова А.А., Кустов Л.М. // Журн. физ. химии. 2020. Т. 94. № 6. С. 888. [Shesterkina A.A., Strekalova A.A. & Kustov L.M. // Russ. J. Phys. Chem. A. 2020. V. 94. P. 1180.] <https://doi.org/10.1134/S0036024420060217>
4. Li D.-D., Zhang J.-W., Cai C. // Catalysis Communications. 2018. V.103. P. 47–50. <https://doi.org/10.1016/j.catcom.2017.09.024>
5. Zhou Z., Lu C., Wu X. and Zhang X. // RSC Adv. 2013. 3. 26066 DOI: 10.1039/c3ra43006e
6. Hajdu, V., Prekob, Á., Muránszky, G. et al. // Reac Kinet Mech Cat. 2020. V.129. P. 107. <https://doi.org/10.1007/s11144-019-01719-1>
7. Reddy K.R., Kumar N.S., Sreedhar B., M. Kantam M.L. // J. Mol. Catal. A: Chemical. 2006. V. 252. № 1–2. P. 136. <https://doi.org/10.1016/j.molcata.2006.02.053>.
8. Кустов Л.М., Костюхин Е.М., Корнеева Е.Ю., Кустов А.Л. // Изв. АН. Сер. хим. 2023. Т. 72. № 3. С. 583. [Kustov L.M., Kostyukhin E.M., Korneeva E. Yu. and Kustov A.L. // Russ. Chem. Bull. 2023. V. 72. № 3. P. 583.] <https://doi.org/10.1007/s11172-023-3823-5>
9. Ahmad H. // J. Clust. Science. 2022. V. 33. P. 1421. <https://doi.org/10.1007/s10876-021-02000-z>
10. Атаханов А.А., Сарымсаков А.А., Рашидова С.Ш. Наносистемы целлюлозы и серебра: синтез, структура, свойства. Ташкент: Изд-во «Фан» АН РУз. 2016. 256 с. [Atahanov A.A., Sarymsakov A.A., Rashidova S. Sh. Nanosistemy tsellyulozy i srebra, sintez, structura, svoistva. Tashkent. Izd-vo «Phan» AN Ruz. 2016. 256 p.]
11. Nanocellulose. From Fundamentals to Advanced Materials. / Ed. by Jin Huang, Alain Dufresne and Ning Lin. / Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. Weinheim. Germany. 486p.

12. Зарубина А.Н., Иванкин А.Н., Кулезнев А.С., Кочетков В.А. Целлюлоза и наноцеллюлоза. Обзор // Лесной вестник 2019. Т. 23. № 5. С. 116. [Zarubina A.N., Ivankin A.N., Kuleznev A.S., Kochetkov V.A. // Forestry Bulletin. 2019. V. 23. № 5. P. 116.] <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2019-5-116-125>.
13. Котельникова Н.Е., Лысенко Е.Л., Serimaa R., и др. // Высокомолекуляр. Соед. А. 2008. Т. 50. № 1. С. 63. [Kotel'nikova N.E., Lysenko E.L., Serimaa R. et al. // Polym. Sci. Ser. A. 2008. 50. P. 51.] <https://doi.org/10.1134/S0965545X08010094>
14. Скатова А.В., Сарин С.А., Щипунов Ю.А. // Коллоидн. журн. 2020. Т. 82. № 3. С. 377. <https://doi.org/10.31857/S002329122003012X> [Skatova A.V., Sarin S.A., Shchipunov Y.A. // Colloid Journal. 2020. V. 82. № 3. P. 324.] <https://doi.org/10.31857/S002329122003012X>
15. Reddy K.R., Kumar N.S., Sreedhar B., M. Kantam M.L. // J. Mol. Catal. A: Chemical. 2006. V. 252. № 1–2. P. 136. <https://doi.org/10.1016/j.molcata.2006.02.053>.
16. Kirillova M.V., Santos C.I.M., Wu W., et al. // J. Mol. Catal. A: Chem. 2017. 426. P. 343. <https://doi.org/10.1016/j.molcata.2016.06.028>.
17. Новиков А.А., Аникушин Б.М., Петрова Д.А., и др. // Химия и технология топлив и масел. 2018. Т. 609. № 5. С. 27. [Novikov A.A., Anikushin B.M., Petrova D.A., et al. // Chemistry and Technology of Fuels and Oils. 2018. V. 54. № 5. P. 564.] <https://doi.org/10.1007/s10553-018-0960-5>
18. Кашин А.С., Анаников В.П. // Изв. АН. Сер. хим. 2011. № 12. С. 2551. [Kashin A.S., Ananikov V.P. // Russ. Chem. Bull. 2011. V. 60. P. 2602]. <https://doi.org/10.1007/s11172-011-0399-x>
19. Качала В.В., Хемчян Л.Л., Кашин А.С., и др. // Успехи химии. 2013. 82. 648–685. [Kachala V.V., Klemchyan L.L., Kashin A.S. et al. // Russ. Chem. Rev. 2013. V. 82. C. 648.] <https://doi.org/10.1070/RC2013v082n07ABEH004413>
20. Segal L., Creely J.J., Martin A.E. et al. // Textile research journal. 1959. V. 29. P. 786. <http://dx.doi.org/10.1177/004051755902901003>
21. Nelson M.L., O'Connor R.T. // J. Appl. Polym. Sci. 1964. V. 8. № 3. P. 1325. <https://doi.org/10.1002/app.1964.070080323>
22. Mironenko R.M., Belskaya O.B., Stepanova L.N. et al. // Catal. Lett. 2020. V. 150. P. 888. <https://doi.org/10.1007/s10562-019-02974-6>
23. Kazemimoghadam M. // Intern. J. of Scientific Research in Research Paper. Chemical Sciences. 2017. V. 4. Is. 5. P. 1.
24. Kirichenko O.A., Shuvalova E.V. & Redina E.A. // Russ. Chem. Bull. 2019. V. 68. P. 2048. <https://doi.org/10.1007/s11172-019-2665-2>
25. Shuvalova E.V., Kirichenko O.A. // Mendeleev Commun. 2021. V. 31. № 6. P. 875–877. <https://doi.org/10.1016/j.mencom.2021.11.036>
26. Shesterkina A.A., Shuvalova E.V., Kirichenko O.A. et al. // Russ. J. Phys. Chem. A. 2017. V. 91. P. 201. <https://doi.org/10.1134/S0036024417020285>