

## **МОДИФИЦИРОВАНИЕ ВОЛОКОННЫХ ЦЕЛЛЮЛОЗНЫХ МАТЕРИАЛОВ АМОРФИЗИРОВАННЫМИ ФОСФАТАМИ КАЛЬЦИЯ И НАНОЧАСТИЦАМИ МЕДИ**

О.Н. Мусская, В.К. Крутько, А.И. Кулак, Е.Н. Крутько  
ГНУ «Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси»  
220072, Республика Беларусь, Минск, ул. Сурганова, 9/1  
*musskaja@igic.bas-net.by*

DOI: 10.26456/pcascnn/2022.14.811

**Аннотация:** Этерификацией поверхности целлюлозных носителей фосфорной кислотой в присутствии мочевины получены волоконные материалы, характеризующиеся повышенной степенью набухания в водных средах (в 1,1-1,5 раза). Боргидридным методом с использованием натриевой соли карбоксиметилцеллюлозы в качестве полимера-стабилизатора синтезированы наночастицы меди и их композиты с аморфизированными фосфатами кальция. Полученные коллоидные растворы меди и их композиты с гидроксипатитом характеризуются стабильностью от нескольких суток до 2 месяцев. Выявлено, что модифицирование целлюлозных (исходных и фосфорилированных) материалов иммерсионным методом с использованием водных составов, содержащих аморфизированные фосфаты кальция, наночастицы меди либо композиты на их основе, в присутствии натриевой соли карбоксиметилцеллюлозы и аскорбиновой кислоты при величине *pH* 6 и 11 приводит к снижению кристалличности полимерного носителя. Методом ИК-спектроскопии показано, что аморфизация модифицированных волоконных целлюлозных материалов обусловлена изменением статической однородности системы водородных связей в структуре полимера.

*Ключевые слова:* целлюлоза, фосфорилированная целлюлоза, натриевая соль карбоксиметилцеллюлозы, аморфизированные фосфаты кальция, гидроксипатит, наночастицы меди.

### **1. Введение**

Функционализация поверхности волоконных носителей является одним из способов регулирования их физико-химических свойств. В случае целлюлозных материалов модифицирование осуществляется обычно за счет физической адсорбции модификатора либо ковалентного связывания функциональных групп [1]. При структурной модификации целлюлозы, например, в процессе мерсеризации, происходит изменение ориентации макромолекул и надмолекулярной структуры [2]. Химическая обработка приводит к изменению состава и строения целлюлозы [3]. В результате таких превращений происходит частичное замещение гидроксильных групп целлюлозы на различные функциональные группы.

В последние годы широкое применение во многих отраслях находят наночастицы меди [4, 5], благодаря наличию уникальных физико-химических свойств и биологической активности. Ранее нами [6] были получены композиты на основе наночастиц меди и аморфизированных фосфатов кальция (ФК), перспективные в качестве активных модифицирующих компонентов.

Целью данной работы являлось модифицирование целлюлозных материалов аморфизированными ФК, наночастицами меди и их композитами, а также исследование их физико-химических свойств.

## **2. Методика эксперимента**

Модифицирование волоконных целлюлозных материалов проводили иммерсионным методом с использованием водных составов, содержащих аморфизированные ФК, наночастицы меди либо композиты на их основе. Аморфизированные ФК осаждали на волоконные материалы путем выдерживания в 3–5% суспензии гидроксиапатита (ГА) в течение 5–10 мин с последующим высушиванием при 20–60°C. Обработку целлюлозных образцов наночастицами меди осуществляли путем выдерживания в коллоидном растворе (содержание наночастиц 0,18 г/л) и высушивания на воздухе при 20°C. В случае модифицирования волоконных материалов композитами ФК с наночастицами меди обработку проводили 3 способами: 1) на образцы сначала осаждали ФК, затем выдерживали в коллоидном растворе меди; 2) образцы обрабатывали суспензиями, содержащими совместно осажденные ФК и наночастицы меди (содержание ФК – 0,147 г/л, мольное соотношение  $Ca/Cu$  1:1); 3) на образцы сначала осаждали ФК, затем обрабатывали суспензиями, содержащими совместно осажденные ФК и наночастицы меди. Полученные образцы, содержащие наночастицы меди, дополнительно пропитывали 5–10% раствором натриевой соли карбоксиметилцеллюлозы – Na-КМЦ (с добавлением 3 г/л аскорбиновой кислоты либо ее смеси с гидроксидом натрия для регулирования величины  $pH$  от 6 до 11), затем обрабатывали этанолом и высушивали на воздухе при 20°C.

В качестве волоконных материалов использовали хлопчатобумажную ткань – исходную и после фосфорилирования. Фосфорилированную целлюлозу с обменной емкостью 2 мг-экв/г получали по методике [7] путем обработки целлюлозы водным раствором, содержащим мочевины и ортофосфорную кислоту, при 80°C в течение 30 мин с последующим высушиванием при 50°C. Затем образцы термообработывали при 140–150°C в течение 60 мин, промывали дистиллированной водой и высушивали при комнатной температуре. Массовое соотношение целлюлозы, мочевины и ортофосфорной кислоты составляло 1:3,5:1,5.

Гидроксиапатит в виде водной суспензии получали жидкофазным синтезом по методике [8] путем взаимодействия хлорида кальция и гидрофосфата аммония при величине  $pH$  10–11. Полученную суспензию после выдерживания в щелочной среде в течение 7–10 сут промывали дистиллированной водой до значения величины  $pH$  7,0–7,4.

Наночастицы меди в виде коллоидных растворов получали восстановлением хлорида меди (II) боргидридным методом в присутствии аскорбиновой кислоты (3 г/л) по методике [6]. В качестве полимера-стабилизатора использовали *Na*-КМЦ. Количества соли меди, полимера и боргидрида натрия рассчитывали с учетом концентрации коллоидных частиц 0,06 г/л и мольных соотношений *Cu*/полимер/*NaBH*<sub>4</sub> 1:3:3.

Соосаждение ФК и наночастиц меди осуществляли путем одновременного прикапывания растворов 0,3 М (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> и 0,1 М *NaBH*<sub>4</sub> к раствору, содержащему 0,01 М *CuCl*<sub>2</sub>, 0,3 М *CaCl*<sub>2</sub>, 0,02 М *Na*-КМЦ (ультранизкой вязкости), 0,02 М аскорбиновой кислоты и 0,1 М *NaOH* при *pH* 10. Количества солей меди и кальция рассчитывали с учетом мольных соотношений *Cu*/*Ca* 0,03 и *Ca*/*P* 1,67.

Оптические спектры поглощения коллоидных растворов меди регистрировали на спектрофотометре Agilent 8453.

Рентгенофазовый анализ (РФА) образцов проводили на дифрактометре ДРОН-3 с излучением *Cu*<sub>K<sub>α</sub></sub>=1,5405 Å. Структурные изменения целлюлозы после модифицирования оценивали по рентгенограммам с использованием кристаллического соотношения (*K*<sub>rel</sub>), рассчитанного по формуле [9]:

$$K_{rel} = 1 - \frac{h_{am}}{H - h_{am}},$$

где *h*<sub>am</sub> – высота над нулевой линией минимума дифрактограммы между значениями 2θ 18 и 19°, *H* – высота над нулевой линией максимума дифрактограммы между значениями 2θ 22 и 23°.

ИК-спектры образцов регистрировали на спектрометре Tenzor-27 (Bruker, Германия) в диапазоне 400–4000 см<sup>-1</sup>. Индекс симметрии (*a*/*b*) полосы валентных колебаний гидроксильных групп рассчитывали, как отношение левой *a* и правой *b* части ширины поглощения *OH*-групп, измеренных от середины перпендикуляра, проведенного через максимум. Индекс кристалличности оценивали по отношению оптических плотностей при волновых числах 1430 и 900 см<sup>-1</sup> (*D*<sub>1430</sub> / *D*<sub>900</sub>) [10].

### 3. Обсуждение результатов

Коллоидные растворы меди, полученные с использованием *Na*-КМЦ в качестве полимера-стабилизатора, сохраняют устойчивость от нескольких суток до 2 месяцев. Наличие наночастиц металла в коллоидных растворах было подтверждено спектрофотометрическим методом по максимумам поглощения, характерным для наночастиц меди в диапазоне 570–600 нм, что согласуется с литературными данными [11].

Синтезированный ФК, согласно данным РФА и ИК-спектроскопии,

представляет собой ГА в аморфизированной форме. При получении композитов совместным осаждением ФК и наночастиц меди по данным РФА наблюдаются рефлексы только ГА. Образование наночастиц меди было подтверждено спектрофотометрически по наличию максимума поглощения при 578 нм. Полученная суспензия изначально обладает равномерной серо-коричневой окраской, а при хранении под маточным раствором через 10–14 суток наблюдается ее постепенное расслоение: верхний слой становится молочно-белым, а в нижнем слое появляются точечные скопления частиц темно-серого цвета. Следует отметить, что через 1,5–2 месяца суспензия приобретает голубую окраску за счет окисления металла и перехода меди в ионную форму.

На рентгенограммах исходной целлюлозы (см. рис. 1) видны уширенные рефлексы при  $2\theta$  14,9; 16,6 и 22,9°, которые соответствуют полиморфной модификации I согласно [9]. После фосфорилирования наблюдается уменьшение интенсивности основных рефлексов, их незначительное смещение в область больших углов, а также снижение кристаллического отношения от 0,90 до 0,84 (см. Таблицу 1), что может свидетельствовать об изменении надмолекулярной структуры полимера. Фосфорилирование волоконных целлюлозных материалов сопровождается появлением желтовато-коричневой окраски и повышением степени набухания образцов в 1,1–1,5 раза, при этом может отмечаться разволокнение материала.

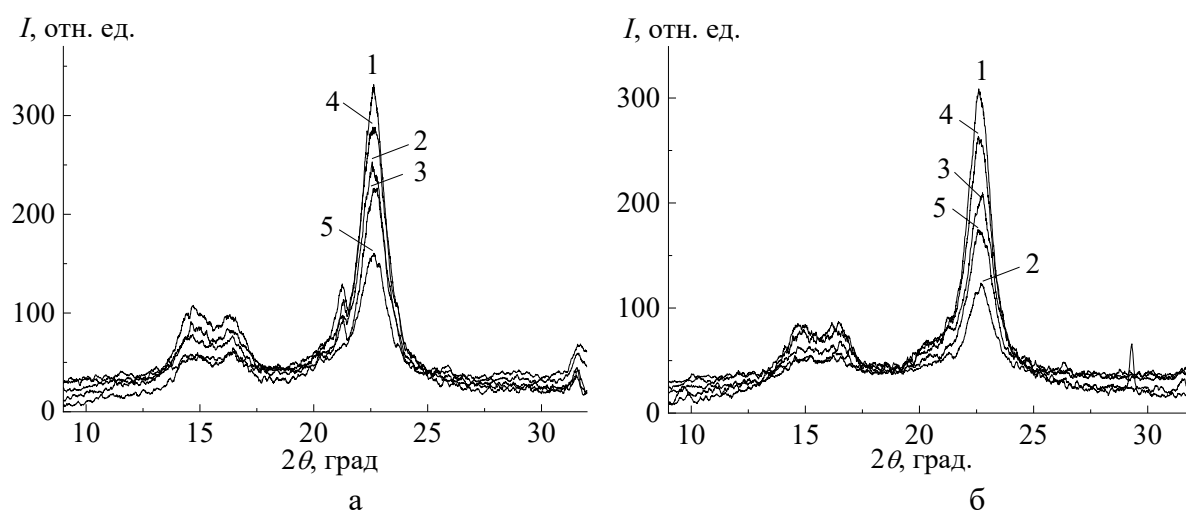


Рис. 1. Рентгенограммы волоконных материалов на основе целлюлозы до (а) и после фосфорилирования (б): 1 – исходный; 2 – модифицирование ФК; 3 – модифицирование наночастицами меди в пленке Na-КМЦ ( $pH$  6); 4 – модифицирование наночастицами меди в пленке Na-КМЦ ( $pH$  11); 5 – модифицирование композитами ФК с наночастицами меди в пленке Na-КМЦ ( $pH$  6; 1 способ).

Модифицирование волоконных материалов сопровождается приростом массы от 0,1 до 0,2 г/г (соответствует 9–17%). В случае

обработки образцов составами, содержащими наночастицы меди, отмечается их окрашивание в светло-коричневый цвет. При этом влагосвязывающая способность модифицированных образцов по сравнению с исходными снижается в 1,1–3,9 раз, что особенно заметно в случае фосфорилированной целлюлозы, обработанной ФК либо их композитами с наночастицами меди.

Таблица 1. Значения  $K_{rel}$  волоконных материалов на основе исходной и фосфорилированной целлюлозы до и после модифицирования различными составами.

Волоконный материал	Модифицирующие компоненты						
	без обработки	ФК	наночастицы меди в пленке Na-КМЦ		ФК с наночастицами меди в пленке Na-КМЦ (pH 6)		
			pH 6	pH 11	1 способ	2 способ	3 способ
исходный	0,90	0,88	0,83	0,83	0,82	0,87	0,86
фосфорилированный	0,84	0,84	0,83	0,79	0,80	0,81	0,80

На рентгенограмме волоконных целлюлозных материалов, модифицированных различными составами (суспензией ГА, коллоидным раствором меди), композитами на основе ФК и наночастиц меди наблюдается уменьшение интенсивности рефлекса при  $2\theta$  22,6°, соответствующего кристаллическим участкам полимера (см. рис. 1). При этом отмечается также снижение кристаллического отношения (см. Таблицу 1) целлюлозы, что свидетельствует о ее частичной аморфизации. В случае фосфорилированной целлюлозы обработка ФК способствует структурному упорядочению полимера, что проявляется в небольшом повышении  $K_{rel}$ . При использовании в качестве модифицирующих компонентов наночастиц меди (особенно в щелочной среде) либо их композитов с ФК отмечается более заметное повышение аморфизации полимерного носителя по сравнению с исходной целлюлозой.

На ИК-спектрах модифицированного целлюлозного материала межмолекулярное взаимодействие проявляется в изменении полосы валентных колебаний гидроксильных групп ( $\nu_{OH}$ ), включенных в водородную связь, в области 3000–3700  $\text{см}^{-1}$  (см. рис. 2). Считается [9], что низкочастотная область этой полосы отвечает за более сильные водородные связи. Изменение положения максимума поглощения  $\nu_{OH}$  и индекса симметрии  $a/b$  полосы OH-групп свидетельствует о различном характере меж- и внутримолекулярных водородных связей (см. Таблицу 2).

Изменение индекса кристалличности  $D_{1430}/D_{900}$  по данным ИК-спектроскопии коррелирует с результатами, полученными с помощью РФА, особенно в случае образцов на основе исходной целлюлозы. Анализ значений индекса симметрии полосы OH-групп показал, что после

фосфорилирования полимерный носитель обладает менее упорядоченной структурой, однако последующее модифицирование составами, содержащими ФК и наночастицы меди, способствует увеличению однородности системы. Характерно, что в образцах на основе исходной целлюлозы отмечается обратная тенденция. Кроме того, положение максимума  $\nu_{OH}$  смещается в низкочастотную область в случае носителей на основе фосфорилированной целлюлозы, что может свидетельствовать о более прочном связывании полимера и модифицирующих компонентов.

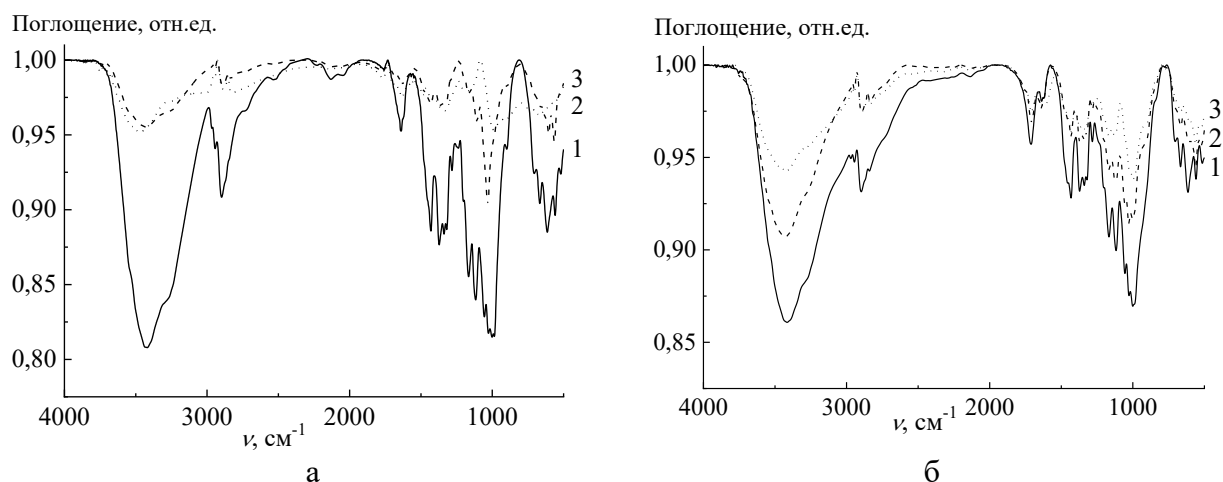


Рис. 2. ИК-спектры волоконных тканевых материалов на основе целлюлозы до (а) и после фосфорилирования (б): 1 – исходный; 2 – модифицирование ФК; 3 – модифицирование композитами ФК с наночастицами меди в пленке *Na*-КМЦ (*pH* 6; 1 способ).

Таблица 2. Характеристики состояния *OH*-групп волоконных материалов на основе исходной и фосфорилированной целлюлозы до и после модифицирования различными составами.

Волоконный материал	Модифицирующие компоненты	Характеристики		
		Максимум $\nu_{OH}$ , $\text{cm}^{-1}$	$a/b$	$D_{1430} / D_{900}$
целлюлоза	без обработки	3427	0,65	1,91
	ФК	3435	0,61	1,61
	композит ФК с наночастицами меди в пленке <i>Na</i> -КМЦ с <i>pH</i> 6 (1 способ)	3450	0,52	0,67
фосфорилированная целлюлоза	без обработки	3415	0,60	1,04
	ФК	3435	0,64	0,92
	композит ФК с наночастицами меди в пленке <i>Na</i> -КМЦ с <i>pH</i> 6 (1 способ)	3422	0,61	1,11

Таким образом, модифицирование волоконных целлюлозных материалов составами на основе ФК и наночастиц меди сопровождается

перераспределением меж- и внутримолекулярных водородных связей, что проявляется в изменении физико-химических свойств полимерного носителя.

#### **4. Заключение**

Фосфорилированием целлюлозы получены волоконные материалы с обменной емкостью 2 мг-экв/г. Обработка поверхности целлюлозных (исходных и фосфорилированных) материалов кальцийфосфатной суспензией, коллоидным раствором меди либо суспензией, содержащей совместно осажденные ФК и наночастицы меди, в присутствии *Na*-КМЦ приводит к аморфизации полимера и снижению его влагосвязывающей способности. Снижение кристалличности модифицированных волоконных целлюлозных материалов обусловлено изменением надмолекулярной структуры полимера.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта БРФФИ № X21КОВИД-008.*

#### **Библиографический список:**

1. **Izadyar, S.** Palmitic acid functionalization of cellulose fibers for enhancing hydrophobic property / S. Izadyar, M. Aghabozorgi, M. Azadfallah // *Cellulose*. – 2020. – V. 27. – I. 10. – P. 5871-5878. DOI: 10.1007/s10570-020-03174-x.
2. **Комаров, В.Б.** Изменение физико-химических характеристик целлюлозы при ее  $\gamma$ -облучении и последующей мерсеризации / В.Б. Комаров, А.Ф. Селиверстов, Ю.О. Лагунова и др. // *Химия высоких энергий*. – 2019. – Т. 53. – № 1. – С. 54-58. DOI: 10.1134/S0023119319010066.
3. **Zhou, L.** Recent progress on chemical modification of cellulose for high mechanical-performance Poly(lactic acid)/Cellulose composite: A review / L. Zhou, K. Ke, M.-B. Yang, W. Yang // *Composites Communications*. – 2021. – V. 23. – Art. no. 100548. – 11 p. DOI: 10.1016/j.coco.2020.100548.
4. **Mukhopadhyay, R.** Synthesis and characterization of copper nanoparticles stabilized with *Quisqualis indica* extract: Evaluation of its cytotoxicity and apoptosis in B16F10 melanoma cells / R. Mukhopadhyay, J. Kazi, M.C. Debnath // *Biomedicine & Pharmacotherapy*. – 2018. – V. 97. – P. 1373-1385. DOI: 10.1016/j.biopha.2017.10.167.
5. **Ruparelia, J.P.** Strain specificity in antimicrobial activity of silver and copper nanoparticles / J.P. Ruparelia, A.K. Chatterjee, S.P. Duttagupta, S. Mukherji // *Acta Biomaterialia*. – 2008. – V. 4. – I. 3. – P. 707-716. DOI: 10.1016/j.actbio.2007.11.006.
6. **Мусская, О.Н.** Композиты на основе фосфатов кальция и наночастиц меди / О.Н. Мусская, В.К. Крутько, А.И. Кулак, Е.Н. Крутько // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. – 2021. – Вып. 13. – С. 320-328. DOI: 10.26456/rcascnn/2021.13.320.
7. **Капуцкий, Ф.Н.** Лекарственные препараты на основе производных целлюлозы / Ф.Н. Капуцкий, Т.Л. Юркштович. – Минск: Университетское, 1989. – 111 с.
8. **Глазов, И.Е.** Апатитные фосфаты кальция: жидкофазное формирование, термические превращения, терминология и идентификация / И.Е. Глазов, В.К. Крутько, О.Н. Мусская, А.И. Кулак // *Журнал неорганической химии*. – 2022. – Т. 67. – № 2. – С. 193-202. DOI: 10.31857/S0044457X22020040.
9. **Петропавловский, Г.А.** Гидрофильные частично замещенные эфиры целлюлозы и их модификация путем химического сшивания / Г.А. Петропавловский. – Л.: Наука, 1988. – 298 с.
10. **Базарнова, Н.Г.** Методы исследования древесины и ее производных: учеб. пособие / Н.Г. Базарнова Е.В. Карпова, И.Б. Катраков и др.; под ред. Н.Г. Базарновой. – Барнаул: Изд-во Алт. гос. ун-та, 2002. – 160 с.
11. **Dang, T.M.D.** Synthesis and optical properties of copper nanoparticles prepared by a chemical reduction method / T.M.D. Dang, T.T.T. Le, E. Fribourg-Blanc, M.C. Dang // *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*. – 2011. – V. 2. – № 1. – Art. no. 015009. 6 p. DOI: 10.1088/2043-6262/2/1/015009.

**References:**

1. Izadyar S., Aghabozorgi M., Azadfallah M. Palmitic acid functionalization of cellulose fibers for enhancing hydrophobic property, *Cellulose*, 2020, vol. 27, issue 10, pp. 5871-5878. DOI: 10.1007/s10570-020-03174-x.
2. Komarov V.B., Seliverstov A.F., Lagunova Yu.O. et al. Changes in the physicochemical characteristics of cellulose upon its  $\gamma$ -irradiation and the subsequent mercerization, *High Energy Chemistry*, 2019, vol. 53, issue 1, pp. 66-70. DOI: 10.1134/S0018143919010065.
3. Zhou L., Ke K., Yang M.-B., Yang W. Recent progress on chemical modification of cellulose for high mechanical-performance Poly(lactic acid)/Cellulose composite: A review, *Composites Communications*, 2021, vol. 23, art. no. 100548, 11 p. DOI: 10.1016/j.coco.2020.100548.
4. Mukhopadhyay R., Kazi J., Debnath M.C. Synthesis and characterization of copper nanoparticles stabilized with *Quisqualis indica* extract: Evaluation of its cytotoxicity and apoptosis in B16F10 melanoma cells, *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 2018, vol. 97, pp. 1373-1385. DOI: 10.1016/j.biopha.2017.10.167.
5. Ruparelia J.P., Chatterjee A.K., Duttagupta S.P., Mukherji S. Strain specificity in antimicrobial activity of silver and copper nanoparticles, *Acta Biomaterialia*, 2008, vol. 4, issue 3, pp. 707-716. DOI: 10.1016/j.actbio.2007.11.006.
6. Musskaya O.N., Krut'ko V.K., Kulak A.I., Krutsko E.N. Kompozity na osnove fosfatov kal'tsiya i nanochastits medi [Composites based on calcium phosphates and copper nanoparticles], *Fiziko-himicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2021, issue 13, pp. 320-328. DOI: 10.26456/pcascnn/2021.13.320. (In Russian).
7. Kaputsky F.N., Yurkshtovich T.L. *Lekarstvennyye preparaty na osnove proizvodnykh tsellyulozy* [Medicines based on cellulose derivatives]. Minsk, Universitetskoe Publ., 1989, 111 p. (In Russian).
8. Glazov I.E., Krut'ko V.K., Musskaya O.N., Kulak A.I. Calcium phosphate apatites: wet formation, thermal transformations, terminology, and identification, *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, 2022, vol. 67, issue 2, pp. 173-182. DOI: 10.1134/S0036023622020048.
9. Petropavlovsky G.A. *Gidrofil'nye chastichno zameshchennyye efiry tsellyulozy i ikh modifikatsiya putem khimicheskogo sshivaniya* [Hydrophilic partially substituted cellulose ethers and their modification by chemical crosslinking]. Leningrad, Nauka Publ., 1988, 298 p. (In Russian).
10. Bazarnova N.G., Karpova E.V., Katrakov I.B. et al. *Metody issledovaniya drevesiny i yeye proizvodnykh: Uchebnoye posobiye* [Methods for the study of wood and its derivatives: Tutorial], ed. by N.G. Bazarnova. Barnaul, Altai State University Publishing House, 2002, 160 p. (In Russian).
11. Dang T.M.D., Le T.T.T., Fribourg-Blanc E., Dang M.C. Synthesis and optical properties of copper nanoparticles prepared by a chemical reduction method, *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, 2011, vol. 2, art. no. 015009, 6 p. DOI: 10.1088/2043-6262/2/1/015009.

*Original paper*

**MODIFICATION OF FIBER CELLULOSE MATERIALS WITH AMORPHIZED CALCIUM  
PHOSPHATES AND COPPER NANOPARTICLES**

O.N. Musskaya, V.K. Krut'ko, A.I. Kulak, E.N. Krutsko

*Institute of General and Inorganic Chemistry of the NAS of Belarus, Minsk, Belarus*

DOI: 10.26456/pcascnn/2022.14.811

**Abstract:** Etherification of the surface of cellulose carriers with phosphoric acid in the presence of urea yielded fiber materials characterized by an increased degree of swelling in aqueous media (by a factor of 1,1-1,5). The copper nanoparticles and their composites with amorphized calcium phosphates were synthesized by the borohydride method using the sodium salt of carboxymethyl cellulose as a stabilizer polymer. The obtained colloidal solutions of copper and their composites with hydroxyapatite are characterized by stability from several days to 2 months. It was found that the modification of cellulose materials (initial and phosphorylated) by the immersion method using aqueous compositions containing amorphized calcium phosphates, copper nanoparticles or composites based on them in the presence of sodium carboxymethylcellulose and ascorbic acid at pH 6 and 11 leads to a decrease in the crystallinity of the polymer carrier. It has been shown by IR spectroscopy that the amorphization of modified fiber cellulose materials is due to a change in the static homogeneity of the system of hydrogen bonds in the polymer structure.

**Keywords:** cellulose, phosphorylated cellulose, sodium carboxymethylcellulose, amorphized calcium phosphates, hydroxyapatite, copper nanoparticles.



*Мусская Ольга Николаевна – к.х.н., доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории фотохимии и электрохимии государственного научного учреждения «Институт общей и неорганической химии Национальной академии наук Беларуси»*

*Крутько Валентина Константиновна – к.х.н., доцент, заведующий лабораторией фотохимии и электрохимии государственного научного учреждения «Институт общей и неорганической химии Национальной академии наук Беларуси»*

*Кулак Анатолий Иосифович – д.х.н., профессор, академик НАН Беларуси, директор государственного научного учреждения «Институт общей и неорганической химии Национальной академии наук Беларуси»*

*Крутько Евгений Николаевич – научный сотрудник лаборатории фотохимии и электрохимии государственного научного учреждения «Институт общей и неорганической химии Национальной академии наук Беларуси»*

*Olga N. Musskaya – Ph. D., Assistant Professor, Leading Researcher, Laboratory of Photochemistry and Electrochemistry, The Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus*

*Valentina K. Krut'ko – Ph. D., Assistant Professor, Head of the Laboratory of Photochemistry and Electrochemistry, The Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus*

*Anatoly I. Kulak – D. Sc., Professor, Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, Director of the Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus*

*Evgeny N. Krutsko – Researcher, Laboratory of Photochemistry and Electrochemistry, The Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus*

Поступила в редакцию/received: 05.09.2022; после рецензирования/revise: 09.10.2022; принята/accepted 11.10.2022.