



ТЕХНОЛОГИЯ ХИМИЧЕСКОЙ
ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ И ПРОИЗВОДСТВО
ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Научная статья

УДК 676.168

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-3-162-172

**Поверхностная обработка картона суспензиями наноцеллюлозы
растительного и бактериального происхождения**

Е.А. Топтунов[✉], инж. ИТЦ «Современные технологии переработки биоресурсов
Севера»; ResearcherID: [ABE-4069-2020](https://orcid.org/0000-0001-8441-788X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8441-788X>

Ю.В. Севастьянова, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [ABE-4746-2020](https://orcid.org/0000-0002-1806-9052),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1806-9052>

К.С. Вашукова, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [G-1760-2019](https://orcid.org/0000-0002-7916-2410),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7916-2410>

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб.
Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; zhenyatope@gmail.com[✉],
y-sevastyanova@yandex.ru, k.bolotova@narfu.ru

Поступила в редакцию 05.07.22 / Одобрена после рецензирования 08.10.22 / Принята к печати 11.10.22

Аннотация. Исследованы порошковые целлюлозные материалы, а именно наноцеллюлоза из сырья растительного и бактериального происхождения. Для получения нанопрепаратов целлюлозы проводили гидролиз концентрированными кислотами образцов беленой сульфатной хвойной и лиственной целлюлозы, представленных в линейках крупных целлюлозно-бумажных предприятий России, а также бактериальной целлюлозы, произведенной из культур *Medusomyces gisevii* в лабораторных условиях. Методом микроскопии определены размерные характеристики, визкозиметрически – степень полимеризации. Для беленой хвойной целлюлозы длина частиц наноцеллюлозы составляет 80...200 нм при диаметре частиц 80...100 нм, степень полимеризации – 60. Для беленой лиственной целлюлозы длина частиц – 80...150 нм при диаметре частиц 70...100, степень полимеризации – 50. Для бактериальной целлюлозы длина частиц – 120...250 нм, диаметр частиц – 70...120 нм, степень полимеризации – 110. Из препаратов наноцеллюлозы изготавливали суспензии различной концентрации (от 1 до 10 %), которые использовали в качестве армирующей добавки в образцы картона. Суспензию наноцеллюлозы наносили на поверхность целлюлозы в 1–2 слоя. Добавки препаратов наноцеллюлозы приводили к снижению разрывной длины (от 9,6 до 40,4 %) при увеличении плотности картона (от 6,3 до 23,8 %), жесткости при растяжении (от 14,0 до 25,0 %) и сопротивления продавливанию (до 31,9 %). Лучшие результаты достигнуты при использовании суспензии наноцеллюлозы из хвойной беленой целлюлозы, нанесенной на поверхность картона в 2 слоя: наблюдали снижение разрывной длины на 9,6 % при увеличении плотности на 23,8 %, жесткости при растяжении на 25,0 %, сопротивления продавливанию на 31,9 % относительно образца без добавки. Таким образом, показана возможность использования суспензий наноцеллюлозы, полученных из



сырья растительного и бактериального происхождения методом кислотного гидролиза, для поверхностной обработки картона.

Ключевые слова: порошковые целлюлозные материалы, нанокристаллическая целлюлоза, нанофибриллярная целлюлоза, бактериальная наноцеллюлоза, степень помола, степень полимеризации, структурно-морфологические характеристики

Благодарности: Исследование проведено с использованием оборудования ЦКП НО «Арктика» и ИТЦ «Современные технологии переработки биоресурсов Севера» Северного (Арктического) федерального университета им. М.В. Ломоносова.

Для цитирования: Топтунов Е.А., Севастьянова Ю.В., Вашукова К.С. Поверхностная обработка картона суспензиями наноцеллюлозы растительного и бактериального происхождения // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 3. С. 162–172. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-3-162-172>

Original article

Surface Treatment of Cardboard with Plant and Bacterial Derived Nanocellulose Suspensions

Evgeniy A. Toptunov[✉], Engineer; ResearcherID: [ABE-4069-2020](https://orcid.org/0000-0001-8441-788X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8441-788X>

Yuliya V. Sevastyanova, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [ABE-4746-2020](https://orcid.org/0000-0002-1806-9052), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1806-9052>

Ksenia S. Vashukova, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [G-1760-2019](https://orcid.org/0000-0002-7916-2410), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7916-2410>

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; zhenyatope@gmail.com[✉], y-sevastyanova@yandex.ru, k.bolotova@narfu.ru

Received on July 05, 2022 / Approved after reviewing on October 08, 2022 / Accepted on October 11, 2022

Abstract. This study investigates powdered cellulose materials, particularly nanocellulose derived from plant and bacterial sources. The nanocellulose was generated by hydrolyzing bleached sulphate softwood and hardwood pulp samples with strong acids. The original materials are present in the product lines of leading Russian pulp and paper companies. The bacterial cellulose was produced under laboratory conditions from *Medusomyces gisevii*. The dimensional parameters of the nanocellulose samples were evaluated using electron microscopy, and the degree of polymerization was measured by determining the viscosity of the cellulose solutions in cadoxene. The bleached softwood pulp had a nanocellulose particle length of 80–200 nm, a particle diameter of 80–100 nm, and a degree of polymerization of 60. The bleached hardwood pulp had a particle length of 80–150 nm, a particle diameter of 70–100 nm, and a degree of polymerization of 50. The bacterial nanocellulose had a particle length of 120–250 nm, a particle diameter of 70–120 nm, and a degree of polymerization of 110. Suspensions of various concentrations (from 1 to 10 %) were prepared from nanocellulose samples, which were subsequently used as reinforcing additives in cardboard samples. The additive was applied to the surface in one or two layers. Additives of nanocellulose preparations reduced the breaking length (from 9.6 to 40.4 %) along with an increase in cardboard density (from 6.3 to 23.8 %), tensile rigidity (from 14.0 to 25.0 %) and bursting strength (up to 31.9 %). The best results were obtained by applying a nanocellulose suspension of bleached

softwood pulp to the board surface in two layers: a 9.6 % decrease in breaking length was observed with an increase in density of 23.8 %, tensile rigidity of 25.0 %, and bursting resistance of 31.9 % relative to the control sample. Therefore, the study showed the possibility of using nanocellulose suspensions derived from plants and bacterial sources by acid hydrolysis for the surface treatment of cardboard.

Keywords: powdered cellulose materials, nanocrystalline cellulose, nanofibrillar cellulose, bacterial nanocellulose, freeness value, degree of polymerization, structural and morphological characteristics

For citation: Toptunov E.A., Sevastyanova Yu.V., Vashukova K.S. Surface Treatment of Cardboard with Plant and Bacterial Derived Nanocellulose Suspensions. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 3, pp. 162–172. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-3-162-172>

Введение

Целлюлоза представляет собой наиболее распространенное в природе органическое вещество, которое содержится в древесине хвойных и лиственных пород, в недревесных растениях. Целлюлоза может быть синтезирована некоторыми видами микроорганизмов, а также присутствует в туниках оболочников (туницин).

В последнее время наблюдается интерес к продуктам модификации целлюлозы – порошковым целлюлозным материалам, к которым относится наноцеллюлоза. Выделяют такие типы наноцеллюлозы, как нанокристаллическая (НКЦ), нанофибриллярная, бактериальная (БНЦ), животного происхождения – из туницина. Одним из основных способов получения нанокристаллической целлюлозы является кислотный гидролиз [8].

Наноцеллюлоза отличается от микрокристаллической и порошковой целлюлозы более высоким индексом кристалличности, низкими степенью полимеризации и размерами частиц, находящимися в наноразмерном диапазоне. Средняя степень полимеризации, характерная для наноцеллюлозы, составляет 80...120. Нанокристаллическая целлюлоза имеет форму короткого стержня (вискера) диаметром 2...20 нм (по другим данным – до 100 нм) и длиной 100...500 нм. Нанофибриллярная целлюлоза представляет собой длинные гибкие нановолокна целлюлозы с диаметром до 100 нм и длиной до нескольких микрон [8, 10, 12, 18, 19].

К областям применения наноцеллюлозы относятся целлюлозно-бумажная [6] и пищевая промышленности [5], производство полимерных материалов [11, 22, 23], медицина [15, 16], а также создание новых композитов [20] и модификация поверхностей материала [14, 17, 21]. Исследуют [3, 13] возможность разработки широкого спектра функциональных материалов, полученных темплатным синтезом на основе НКЦ.

В настоящее время активно развивается использование наноцеллюлозы в композиции бумаги/картона. Наноцеллюлоза, ее суспензии и гидрогели могут быть как введены в массу, так и нанесены поверхностно. В зависимости от точки и способа введения наноцеллюлозы она может оказывать различный эффект. Исследователями ранее рассмотрена возможность введения гидрогелей наноцеллюлозы на стадии формования бумажного и картонного полотна в

мокрой части машины, при этом было показано положительное влияние на степень удержания минеральных наполнителей и мелкого волокна в полотне. Отмечено повышение ключевых показателей качества массовых видов бумаги и картона [1]: например, добавка нанофибриллярной целлюлозы в композицию бумаги для гофрирования привела к увеличению показателей качества [7]. Известно использование нанофибриллярной целлюлозы для оптимизации водоудержания и реологических свойств меловальных составов в производстве тонкой мелованной бумаги [9]. Рассматривают [2] возможность создания композиционной бумаги на основе бактериальной наноцеллюлозы и растительной целлюлозы. Такие образцы бумаги получены при различном соотношении бактериальной наноцеллюлозы и хвойной целлюлозы. Для образцов наблюдали увеличение прочностных характеристик (сопротивление продавливанию, жесткость при растяжении, работа разрушения, разрывная длина).

Цель – оценка влияния поверхностной обработки картона суспензиями наноцеллюлозы растительного и бактериального происхождения на его прочностные характеристики.

Объекты и методы исследования

В качестве исходных образцов растительной целлюлозы использовали образцы беленой хвойной и лиственной сульфатной целлюлозы, предоставленные целлюлозно-бумажными предприятиями России.

Получение препаратов растительной наноцеллюлозы проводили методом кислотного гидролиза, который осуществляли с помощью ротационного испарителя Heidolph Hei-VAP Advantage (Германия) согласно методике, описанной в работе [4]. Отличием от метода [4] было применение предварительного размола на мельнице PFI (Россия) вместо ручного измельчения исходной целлюлозы, а также замена разделения суспензии на гомогенизаторе выпариванием в сушильном шкафу. Размол осуществляли до достижения предельной степени помола (≥ 85 °ШР). Гидролиз проводили 75%-й серной кислотой, причем объем кислоты взят таким образом, что ее концентрация в целлюлозной суспензии составляла 40 % (учитывалась влажность навески целлюлозы). Обработку осуществляли в течение 1 ч при 80 °С, после чего суспензию 10-кратно разбавляли водой, центрифугировали, доводили pH до 5...6, вновь центрифугировали и выпаривали при 90 °С в течение 48...72 ч.

У полученных препаратов наноцеллюлозы определяли содержание сухого вещества, структурно-морфологические характеристики, степень полимеризации и методом микроскопии – размеры и параметры микроstructures.

Бактериальную целлюлозу (БЦ) получали микробиологическим способом. В качестве продуцента БЦ использовали симбиотическую культуру *Medusomyces gisevii*, состоящую из уксуснокислых бактерий и дрожжей. Для культивирования биомассы клеток с последующим биосинтезом БЦ брали питательную среду состава: сахароза – 19 г/л, K_2HPO_4 – 4 г/л, пептон – 1 г/л, дрожжевой экстракт – 1 г/л. Культивирование биомассы продуцентов целлюлозы осуществляли при pH 6 и температуре 18...21 °С.

Эффективность биосинтеза целлюлозы оценивали визуально по увеличению ее массы в культуральной среде. Бактериальную целлюлозу, синтезированную на поверхности культуральной среды в виде гель-пленки, промывали водой до нейтральной среды и замораживали для хранения и последующего гидролиза.

Гидролиз образцов БЦ проводили в течение 4 ч аналогично описанному выше гидролизу с использованием серной или 2,5 н соляной кислоты.

Степень полимеризации препаратов определяли путем измерения вязкости растворов образцов целлюлозы в кадоксене согласно ГОСТ 25438–82. Установление структурно-морфологических характеристик волокна осуществляли с использованием анализатора FiberTester согласно ISO 16065-2:2014. Оценку размера и формы частиц наноцеллюлозы и исследование микроморфологической структуры целлюлозы выполняли методом электронной микроскопии на сканирующем микроскопе высокого разрешения SEM Sigma VP ZEISS (ускоряющее напряжение – 10 кВ, детектор – InLens).

Для изучения возможности применения препаратов наноцеллюлозы в качестве армирующей добавки в картон изготавливали лабораторные отливки картона с добавлением суспензии препаратов. Образцы картона получали из беленой хвойной сульфатной целлюлозы согласно ГОСТ 14363.4–89. Масса отливки составляла 120 г/м². Концентрация суспензии препаратов наноцеллюлозы растительного и бактериального происхождения, добавляемой при изготовлении картона, – от 1 до 10 %. Дозировка суспензий препаратов наноцеллюлозы: 2 г абсолютно сухого препарата наноцеллюлозы на образец картона массой 3,5 г. Нанесение суспензий наноцеллюлозы на поверхность образцов картона осуществляли с использованием пульверизатора. В 1 слой суспензию наносили на высушенный образец картона с последующим досушиванием. В случае нанесения в 2 слоя 1-й слой наносили на влажный образец, а 2-й – на высушенный с последующим досушиванием.

Для оценки эффекта добавки наноцеллюлозы в картон измеряли прочностные характеристики и сопоставляли их с контрольным образцом (лабораторные отливки без добавления наноцеллюлозы). Определение прочностных характеристик картона при растяжении осуществляли согласно ГОСТ ИСО 1924-1–96; сопротивления продавливанию – согласно ГОСТ Р ИСО 2759–2017.

Результаты исследования и их обсуждение

Для оценки влияния предварительного (предгидролизного) механического размола на характеристики целлюлозной массы растительного происхождения определяли структурно-морфологические характеристики волокон до и после размола на мельнице PFI (табл. 1).

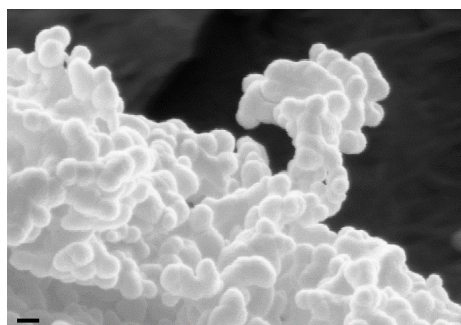
В процессе водного размола на мельнице PFI средняя длина волокон всех образцов снизилась, причем для хвойного образца – на 24,9 %, для лиственного – на 17,1 %. Для образца лиственной целлюлозы значительно увеличилось количество мелочи – на 4,2 %. Несмотря на то, что окончанием размола планировали считать точку 90 °ШР, ни для одного из образцов не удалось достичь степени помола выше 86 °ШР.

Таблица 1

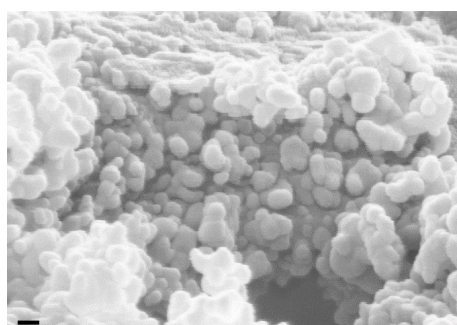
Структурно-морфологические характеристики волокна до и после PFI размола
Structural and morphological characteristics of the fiber before and after the PFI grinding

| Беленая целлюлоза | Среднее значение показателя | | | Грубость | Доля мелочи, % |
|--|-----------------------------|-------------|-----------------|----------|----------------|
| | длина, мм | ширина, мкм | фактор формы, % | | |
| <i>До размола</i> | | | | | |
| Хвойная | 2,243 | 26,9 | 82,5 | 205 | 4,3 |
| Лиственная | 0,888 | 21,2 | 89,8 | 137 | 3,2 |
| <i>Размол до степени помола ≥ 85 °ШР</i> | | | | | |
| Хвойная | 1,685 | 29,2 | 81,4 | 150 | 5,0 |
| Лиственная | 0,736 | 26,6 | 82,9 | 140 | 7,4 |

После механического размола подбирали параметры гидролиза образцов растительной целлюлозы. Гидролиз образцов бактериальной целлюлозы проводили без предварительной механической обработки. На рисунке представлена структура препаратов наноцеллюлозы растительного и бактериального происхождения.



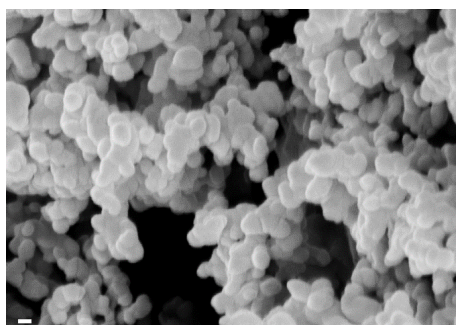
а



б

Структура образцов наноцеллюлозы: а – беленая хвойная целлюлоза; б – беленая лиственная целлюлоза; в – бактериальная целлюлоза. Масштабная линейка – 100 нм

The structure of nanocellulose samples: а – bleached softwood pulp; б – bleached hardwood pulp; в – bacterial cellulose. Scale bar – 100 nm



в

На основании результатов микроскопического исследования можно сделать вывод о схожести формы частиц препаратов наноцеллюлозы вне зависимости от используемого сырья. Сравнительные характеристики размеров наночастиц препаратов наноцеллюлозы растительного и бактериального происхождения приведены в табл. 2.

Таблица 2

Характеристика препаратов наноцеллюлозы
Characteristic of nanocellulose samples

| Наноцеллюлоза | Диапазон размеров частиц препарата, нм | | Степень полимеризации |
|-----------------------|--|----------|-----------------------|
| | длина | диаметр | |
| Беленая хвойная | 80...200 | 80...100 | 60 |
| Беленая лиственничная | 80...150 | 70...100 | 50 |
| Бактериальная | 120...250 | 70...120 | 110 |

Установлено (табл. 2), что диапазон размеров наночастиц и степень полимеризации соответствуют показателям, характерным для нанокристаллической целлюлозы.

Из полученных препаратов наноцеллюлозы готовили суспензии, которые использовали в качестве армирующей добавки в картон. В ходе предварительных экспериментов с суспензией препарата наноцеллюлозы из хвойной беленой целлюлозы с концентрациями от 1 до 10 % было определено, что оптимальной концентрацией суспензии является 5 %. Использование 5%-й суспензии позволило увеличить: жесткость картона – на 30,0 %, сопротивление продавливанию – на 25,0 %, плотность – на 25,4 % относительно исходного образца, при этом разрывная длина уменьшается на 8,8 % (табл. 3).

Таблица 3

Влияние концентрации суспензии препарата наноцеллюлозы (поверхностное нанесение в 1 слой) на характеристики качества картона
Effect of nanocellulose suspension concentration (single-layer surface treatment) on the quality characteristics of the cardboard

| Концентрация суспензии наноцеллюлозы, % | Характеристика картона | | Показатели механической прочности картона | | |
|---|------------------------|------------------------------|---|--------------------------------|----------------------------------|
| | средняя толщина, мкм | плотность, г/см ³ | разрывная длина, м | жесткость при растяжении, кН/м | сопротивление продавливанию, кПа |
| Без добавки | 180 | 0,63 | 5100 | 500 | 240 |
| 1 | | 0,62 | | 510 | 250 |
| 5 | | 0,79 | | 4650 | 650 |
| 7 | 170 | 0,76 | 4350 | 525 | 250 |
| 10 | 180 | 0,66 | 5000 | 550 | 230 |

Добавка 1%-й суспензии наноцеллюлозы (табл. 3) практически не приводит к изменению показателей механической прочности. Добавки 7 и 10%-й суспензии наноцеллюлозы снижают разрывную длину на 14,7 и 2,0 % соответственно, при этом увеличение жесткости при растяжении и сопротивления продавливанию для 7%-й суспензии составляет 5,0 и 4,2 % относительно образца без добавки соответственно, для 10%-й суспензии наблюдается повышение жесткости при растяжении на 10,0 %, а также снижение сопротивления продавливанию на 4,2 %. Для 7%-й суспензии отмечено увеличение плотности на 20,6 %, для 10%-й суспензии – на 4,8 % относительно образца без добавки.

Использование поверхностного нанесения суспензий препаратов нано-целлюлозы с концентрацией 5 % в 2 слоя позволило повысить сопротивление продавливанию (табл. 4).

Таблица 4

**Влияние препаратов наноцеллюлозы на характеристики качества картона
(поверхностное нанесение в 2 слоя)**

**Effect of different nanocellulose additives on cardboard characteristics
(two-layer surface treatment)**

| Наноцеллюлоза | Характеристики картона | | Показатели механической прочности картона | | |
|---|------------------------|------------------------------|---|--------------------------------|----------------------------------|
| | средняя толщина, мкм | плотность, г/см ³ | разрывная длина, м | жесткость при растяжении, кН/м | сопротивление продавливанию, кПа |
| Контрольный образец (без добавок) | 180 | 0,63 | 5200 | 500 | 235 |
| Хвойная беленая | | 0,78 | 4700 | 625 | 310 |
| Лиственная беленая | | 0,69 | 4500 | 570 | 175 |
| БНЦ, полученная гидролизом: серной кислотой | | 0,70 | 3250 | 470 | 160 |
| соляной кислотой | | 0,67 | 3100 | 450 | 180 |

В целом добавки препаратов наноцеллюлозы (табл. 4) приводили к снижению разрывной длины (от 9,6 до 40,4 %) при увеличении плотности картона (от 6,3 до 23,8 %), жесткости при растяжении (от 14,0 до 25,0 %) и сопротивления продавливанию (до 31,9 %). Следует отметить, что увеличение всех трех параметров наблюдалось только при поверхностном нанесении суспензии наноцеллюлозы из хвойной белой целлюлозы. При получении картона добавка БНЦ по сравнению с добавками растительной наноцеллюлозы не оказала значительного влияния на его прочностные характеристики. Ранее [2] рассматривали создание композиционной бумаги на основе хвойной целлюлозы и бактериальной наноцеллюлозы. При использовании поверхностного нанесения суспензии БНЦ было отмечено увеличение прочностных характеристик бумаги. По сравнению с растительной наноцеллюлозой добавка БНЦ при поверхностном нанесении менее эффективна для улучшения качественных характеристик картона.

Выводы

1. Для повышения качественных показателей картона оптимальной является концентрация суспензий растительных и бактериальной наноцеллюлоз 5 %.

2. При поверхностном нанесении препаратов наноцеллюлозы растительного происхождения в 1–2 слоя наблюдается увеличение плотности и прочностных характеристик картона (жесткость при растяжении, сопротивление продавливанию) при небольшом снижении разрывной длины.

3. Наибольшее влияние на усиление прочностных свойств оказывает наноцеллюлоза из хвойной беленной целлюлозы, нанесенная на поверхность картона в 2 слоя, при этом плотность увеличивается на 23,8 %, жесткость при растяжении – на 25,0 % и сопротивление продавливанию – на 31,9 %.

4. Наноцеллюлоза бактериального происхождения не оказывает влияния на прочностные характеристики картона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Воскобойников И.В., Кондратьев В.А., Никольский С.Н., Константинова С.А., Коротков А.Н. Применение гидрогелей наноцеллюлозы при формировании бумаги и картона из различных видов волокнистого сырья // Вестн. МГУЛ – Лесной вестн. 2012. № 8. С. 110–116.

Vosko-boynikov I.V., Kondratyuk V.A., Nikolskiy S.N., Konstantinova S.A., Korotkov A.N. Application of Nanocellulose Hydrogels in the Formation of Paper, and Cardboard from Different Types of Fibrous Raw Materials. *Lesnoj vestnik = Forestry Bulletin*, 2012, no. 8, pp. 110–116. (In Russ.).

2. Гисматулина Ю.А., Будаева В.В., Ситникова А.Е., Бычин Н.В., Гладышева Е.К., Шавыркина Н.А., Миронова Г.Ф., Севастьянова Ю.В. Композиционная бумага из бактериальной наноцеллюлозы и хвойной целлюлозы // Изв. вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2021. Т. 11, № 3. С. 460–471.

Gismatulina Yu.A., Budaeva V.V., Sitnikova A.E., Bychin N.V., Gladysheva E.K., Shavyrkina N.A., Mironova G.F., Sevastyanova Yu.V. Bacterial Nanocellulose and Softwood Pulp for Composite Paper. *Izvestiya vuzov. Prikladnaya ximiya i biotekhnologiya. = Proceedings of Universities Applied Chemistry and Biotechnology*, 2021, vol. 11, no. 3, pp. 460–471. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2021-11-3-460-471>

3. Зарубина А.Н., Иванкин А.Н., Кулезнев А.С., Кочетков В.А. Целлюлоза и наноцеллюлоза. Обзор // Лесн. вестн. / *Forestry Bulletin*. 2019. Т. 23, № 5. С. 116–125.

Zarubina A.N., Ivankin A.N., Kuleznev A.S., Kochetkov V.A. Cellulose and Nanocellulose. Review. *Lesnoj vestnik = Forestry Bulletin*, 2019, vol. 23, no. 5, pp. 116–125. (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2019-5-116-125>

4. Иоелович М.Я. Оптимизация процесса получения нанокристаллической целлюлозы и композитов на ее основе // Химия растит. сырья. 2021. № 1. С. 55–61.

Ioelovich M.Ya. Optimization of Process for Production of Nanocrystalline Cellulose and Its Composites. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya = Chemistry of Plant Raw Material*, 2021, no. 1, pp. 55–61 (In Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.2021018667>

5. Кузнецова Т.Г., Селиванова Е.Б., Богданова А.В., Иванкин А.Н. Наноидентификация нанообъектов в составе сырья и продуктов пищевого назначения // Экол. системы и приборы. 2012. № 2. С. 18–22.

Kuznetsova T.G., Selivanova E.B., Bogdanova A.V., Ivankin A.N. Nanoidentification Nanocomposite in Raw Materials and Food Products. *Ekologicheskiye sistemy i pribory = Ecological Systems and Devices*, 2012, no. 2, pp. 18–22. (In Russ.).

6. Прошина О.П., Олиференко Г.Л., Евдокимов Ю.М., Иванкин А.Н. Наноцеллюлоза и получение бумаги на ее основе // Нанотехнологии и наноматериалы в лесном комплексе: тез. докл. Междунар. конф., Москва, 15–17 нояб. 2011 г., М.: МГУЛ, 2011. С. 24–28.

Proshina O.P., Oliferenko G.L., Evdokimov Yu.M., Ivankin A.N. Nano-Cellulose and Reception of a Paper on Its Basis. *Nanotechnologies and Nanomaterials in the Forest Complex: Proceedings of the International Conference, Moscow, 15–17 November 2011. Moscow, BMSTU Publ.*, 2011, pp. 24–28. (In Russ.).

7. Семкина Л.И., Сарана Н.В., Лепешкина Е.В., Товстошкuroв Е.М., Горячев Н.Л., Тюрин Е.Т., Зуйков А.А., Константинова С.А., Новиков А.А. Применение нанофибриллярной целлюлозы в композиции бумаги для гофрирования // Лесн. вестн. / Forestry Bulletin. 2020. Т. 24, № 2. С. 119–126.

Semkina L.I., Sarana N.V., Lepeshkina E.V., Tovstoshkurov E.M., Goraychev N.L., Tyurin E.T., Zuikov A.A., Konstantinova S.A., Novikov A.A. Nanofibrillated Cellulose in Corrugating Paper Composition. *Lesnoj vestnik* = Forestry Bulletin, 2020, vol. 24, no. 2, pp. 119–126. (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2020-2-119-126>

8. Топтунов Е.А., Севастьянова Ю.В. Порошковые целлюлозные материалы: обзор, классификация, характеристики и области применения // Химия растит. сырья. 2021. № 4. С. 31–45.

Toptunov E.A., Sevastyanova Yu.V. Powdered Cellulosic Materials: Overview, Classification, Characteristics and Fields of Application. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya* = Chemistry of Plant Raw Material, 2021, no. 4, pp. 31–45. (In Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.2021049186>

9. Тюрин Е.Т., Зуйков А.А., Бондарев А.И., Гульянц Е.П., Фадеева Л.А., Константинова С.А., Новиков А.А., Аникушин Б.М., Винокуров В.А. Проведение испытаний экспериментальных образцов нанофибриллярной целлюлозы в производстве легкомелованной бумаги // Лесн. вестн. / Forestry Bulletin. 2021. Т. 25, № 2. С. 90–98.

Tyurin E.T., Zuikov A.A., Bondarev A.I., Gulyanz L.P., Fadeeva L.A., Konstantinova S.A., Novikov A.A., Anikuchin B.M., Vinokurov V.A. Testing of Experimental Samples of Nanofibrillar Cellulose in the Production of Lightweight Coated Paper. *Lesnoj vestnik* = Forestry Bulletin, 2021, vol. 25, no. 2, pp. 90–98. (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2021-2-90-98>

10. Abitbol T., Amit R., Yifeng C., Yuval N., Eldho A., Tal B.-S., Shaul L., Oded S. Nanocellulose, a Tiny Fiber with Huge Applications. *Current Opinion in Biotechnology*, 2016, vol. 39, pp. 76–88. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2016.01.002>

11. Bras J., Hassan M.L., Bruzesse C., Hassan E.A., El-Wakil N.A., Dufresne A. Mechanical, Barrier, and Biodegradability Properties of Bagasse Cellulose Whiskers Reinforced Natural Rubber Nanocomposites. *Industrial Crops and Products*, 2010, vol. 32, no. 3, pp. 627–633. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2010.07.018>

12. Camarero Espinosa S., Kuhnt T., Foster E.J., Weder C. Isolation of Thermally Stable Cellulose Nanocrystals by Phosphoric Acid Hydrolysis. *Biomacromolecules*, 2013, vol. 14, no. 4, pp. 1223–1230. <https://doi.org/10.1021/bm400219u>

13. Grinshpan D.D., Gonchar A.N., Savitskaya T.A., Tsygankova N.G., Makarevich S.E. Rheological Properties of Cellulose-Chitosan-Phosphoric Acid Systems in Different Phase States. *Polymer Science, Series A*, 2014, vol. 56, no. 2, pp. 137–145. <https://doi.org/10.1134/S0965545X14020059>

14. Hayase G., Kanamori K., Hasegawa G., Maeno A., Kaji H., Nakanishi K. A Superamphiphobic Macroporous Silicone Monolith with Marshmallow-Like Flexibility. *Angewandte Chemie*, 2013, vol. 52, no. 41, pp. 10788–10791. <https://doi.org/10.1002/anie.201304169>

15. Jorfi M., Foster J.E. Recent Advances in Nanocellulose for Biomedical Applications. *Journal of Applied Polymer Science*, 2015, vol. 132, no. 14, pp. 1–19. <https://doi.org/10.1002/app.41719>

16. Lin N., Dufresne A. Nanocellulose in Biomedicine: Current Status and Future Prospect. *European Polymer Journal*, 2014, vol. 59, pp. 302–325. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2014.07.025>

17. Liu K., Tian Y., Jiang L. Bio-Inspired Superoleophobic and Smart Materials: Design, Fabrication, and Application. *Progress in Materials Science*, 2013, vol. 58, no. 4, pp. 503–564. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2012.11.001>

18. Moon R.J., Martini A., Nairn J., Simonsen J., Youngblood J. Cellulose Nanomaterials Review: Structure, Properties and Nanocomposites. *Chemical Society Reviews*, 2011, vol. 40, no. 7, pp. 3941–3994. <https://doi.org/10.1039/c0cs00108b>
19. Revol J.F., Bradford H., Giasson J., Marchessault R.H., Gray D.G. Helicoidal Self-Ordering of Cellulose Microfibrils in Aqueous Suspension. *International Journal of Biological Macromolecules*, 1992, vol. 14, no. 3, pp. 170–172. [https://doi.org/10.1016/S0141-8130\(05\)80008-X](https://doi.org/10.1016/S0141-8130(05)80008-X)
20. Robles E., Urruzola I., Labidi J., Serrano L. Surface-Modified Nano-Cellulose as Reinforcement in Poly (Lactic Acid) to Conform New Composites. *Industrial Crops and Products*, 2015, vol. 71, pp. 44–53. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.03.075>
21. Si Y., Guo Z. Superhydrophobic Nanocoatings: From Materials to Fabrications and to Applications. *Nanoscale*, 2015, vol. 7, no. 14, pp. 5922–5946. <https://doi.org/10.1039/C4NR07554D>
22. Siqueira G., Bras J., Dufresne A. Cellulosic Bionanocomposites: A Review of Preparation, Properties and Applications. *Polymers*, 2010, vol. 2, no. 4, pp. 728–765. <https://doi.org/10.3390/polym2040728>
23. Wei H., Rodriguez K., Renneckar S., Vikesland P.J. Environmental Science and Engineering Applications of Nanocellulose-Based Nanocomposites. *Environmental Science. Nano*, 2014, vol. 1, no. 4, pp. 302–316. <https://doi.org/10.1039/C4EN00059E>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article