

Е.А. Топтунов, Ю.В. Севастьянова, Ю.А. Саврасова, А.Д. Ивахнов

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ И ПРОДУКТОВ ЕЕ ПЕРЕРАБОТКИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ АЭРОГЕЛЕЙ

Введение. Целлюлоза является одним из самых распространенных биополимеров – основным структурным компонентом клеточной стенки всех растений. Также разновидности целлюлозы могут быть синтезированы микроорганизмами (бактериальная целлюлоза) и выделены из туник оболочников (туницин) [Abdel-Hakim, Mourad, 2023].

Основным направлением использования данного биополимера, выделяемого преимущественно из древесины различных пород, является целлюлозно-бумажная промышленность, в которой целлюлоза выступает в качестве волокнистого полуфабриката для получения различных видов бумаги и картона. Однако в настоящее время активно исследуется возможность расширения области применения целлюлозы, изучаются различные продукты ее переработки, среди которых можно выделить так называемые порошковые целлюлозные материалы – обширную категорию продуктов деструкции, включающую порошковую, микро- и наноцеллюлозу. К микроцеллюлозам относятся микрокристаллическая и микрофибриллярная целлюлозы. Первая представляет собой продукт гидролиза целлюлозы [Аутлов и др., 2013], а вторую получают путем механической фибрилляции целлюлозных волокон [Adel et al., 2016]. К наноцеллюлозам относят нанокристаллическую, нанофибриллярную и бактериальную наноцеллюлозу [Dufresne, 2013]. Также в эту группу включают специальный вид нанокристаллической целлюлозы, полученный из туник оболочников (Т-НКЦ) [Dunlop et al., 2018]. Благодаря своим уникальным характеристикам порошковые целлюлозные материалы находят свое применение в таких областях, как строительная, косметическая, фармацевтическая, пищевая промышленность, рассматриваются в качестве бумажных наполнителей, материалов для гибких экранов и 3D-моделирования [Топтунов, Севастьянова, 2021].

Особый интерес представляют высокопористые материалы на основе целлюлозы, что обуславливается их высокой удельной площадью поверхности в совокупности с биоразлагаемостью и биосовместимостью. Общая схема подготовки таких материалов включает в себя: получение суспензии

путем растворения исходного материала, гелеобразование, подготовку к сушке и непосредственно сушку. В качестве исходного материала может выступать как первичная целлюлоза (например, хлопок), так и переработанный материал (макулатура) или же продукты деструкции целлюлозы (например, микрокристаллическая целлюлоза). Получение геля целлюлозы может осуществляться как путем физического, так и путем химического гелеобразования [Федотова и др., 2023].

Аэрогели представляют собой сверхлегкий материал (плотность менее $0,05 \text{ г/см}^3$), отличающийся высокой удельной поверхностью ($100\text{--}1000 \text{ м}^2/\text{г}$) и пористостью (свыше 90%). Зачастую гели разделяются на различные виды по типу сушки, которая использовалась для их получения. Так, например, аэрогели получают, используя метод сверхкритической сушки, а криогели – сублимационной [Lavoine, Bergström, 2017]. Также для характеристики аэрогелей используют размер пор и пористость. Материалы с пористостью не менее 90% и размером пор 2-50 нм называют аэрогелями [Rahmanian et al., 2021].

Аэрогели на основе целлюлозы относятся к третьему классу аэрогелей – биоаэрогелям. К этому классу также относятся материалы, полученные на основе других полисахаридов (крахмал, хитозан, пектин и др.). Схема их получения аналогична получению обычных аэрогелей [Al Abdallah et al., 2024]. Целлюлозные аэрогели представляют собой новую категорию устойчивых и экологически безопасных материалов, которые имеют ряд преимуществ по сравнению с обычными аэрогелями на основе неорганических и синтетических полимеров. Они обладают высокой пористостью (от 84,0 до 99,9%), значительной удельной поверхностью ($10\text{--}975 \text{ м}^2/\text{г}$) и низкой плотностью (от $0,0005$ до $0,35 \text{ г/см}^3$). Кроме того, целлюлозные аэрогели обладают превосходной прочностью на сжатие (от 5,2 до $16,67 \text{ МПа}$) [Long et al., 2018].

В рамках выполнения данного исследования авторы изучали возможность получения аэрогелей из различного целлюлозного сырья (первичный волокнистый полуфабрикат, порошковая целлюлоза, наноцеллюлоза). Целью работы стала оценка возможности получения аэрогелей из образцов целлюлозы, подвергнутых различным методам обработки (порошковая целлюлоза, наноцеллюлоза).

Материалы и методика исследования. В качестве исходных образцов целлюлозы использовались хвойная и лиственная товарная сульфатная белая целлюлоза, предоставленные крупными предприятиями ЦБП России.

Порошковую целлюлозу получали методом сухого размол образцов исходной целлюлозы. Сухой размол осуществлялся на планетарной шаровой мельнице марки Retsch PM400. В размольный стакан загружалось 10 г а.с. целлюлозы и помещалось 24 размалывающих элемента (шарика).

Получение препаратов растительной наноцеллюлозы проводили методом сернокислого гидролиза. Гидролиз осуществляли с помощью ротационного испарителя Heidolph Hei-VAP Advantage (Германия). Процесс получения наноцеллюлозы включал в себя непосредственно гидролиз (концентрация кислоты в массе – 40%, продолжительность – 1 ч, температура обработки 80 °С), 10-кратное разбавление полученной суспензии водой с последующей промывкой центрифугированием. Полученная суспензия наноцеллюлозы высушивалась до пастообразного состояния.

Получение аэрогеля проводили методом углекислотной сверхкритической сушки после вытеснения воды безводным ацетоном. Образец целлюлозы (около 2 г) промывался безводным ацетоном в течение 12 ч при гидромодуле 350, которого оказывается достаточно для полного вытеснения воды из образца. Контроль содержания воды проводили по методу Фишера. Сверхкритическую сушку (экстракционное извлечение ацетона) проводили при температуре 40 °С, давлении 10 МПа и скорости потока 1 мл CO₂/мин. (для состояния CO₂ 10 МПа и 2 °С) в течение 12 ч с использованием установки MV-10ASFE (Waters, USA).

Структурно-морфологические характеристики образцов целлюлозы на различных этапах оценивались с помощью анализатора FiberTester.

Оценку удельной поверхности и пористости образцов проводили методом низкотемпературной адсорбции азота на анализаторе удельной поверхности и пористости ASAP 2020 mp (Micromeritics, USA). Образцы адсорбента предварительно дегазировали в порту дегазации прибора при 90 °С до остаточного давления $7 \cdot 10^{-4}$ Па с выдерживанием при заданных условиях в течение 2 ч. Навеска образцов составляла от 100 до 200 мг в зависимости от предполагаемой структуры образца. Далее в порту анализа проводили адсорбцию и десорбцию газа в интервале давлений от 0 до 101,3 кПа. Используя программное обеспечение прибора, по полученным изотермам рассчитывали параметры пористой структуры. Суммарный объём пор V_{Σ} (см³/г) и удельную площадь поверхности пор S (м²/г) определяли методом Брунауэра-Эммета-Теллера (БЭТ).

Результаты исследования. На первом этапе эксперимента образцы товарной хвойной и лиственной беленой сульфатной целлюлоз подвергали размолу на планетарной шаровой мельнице. Размол проводили в течение 2 ч, выполняя отбор проб через 30 и 60 мин после начала размола. Для полученных образцов порошковой целлюлозы оценивались структурно-морфологические характеристики с использованием анализатора FiberTester и метода сканирующей электронной микроскопии (табл. 1, рис. 1).

Таблица 1

**Изменение структурно-морфологических характеристик образцов
целлюлозы в процессе сухого размола**

Structural and morphological characteristics of cellulose samples during ball milling

Наименование образца	Продолжительность размола, мин	Средняя длина, мм	Средняя ширина, мкм	Средний фактор формы, %	Грубость
Беленая хвойная СФА целлюлоза	0	2,243	26,9	82,5	205
	30	0,405	34,2	87,1	650
	60	0,389	33,7	86,9	590
	120	0,262	36,8	90,3	620
Беленая лиственная СФА целлюлоза	0	0,888	21,2	89,8	137
	30	0,377	26,4	84,2	380
	60	0,351	27,5	84,8	470
	120	0,234	32,2	89,1	570

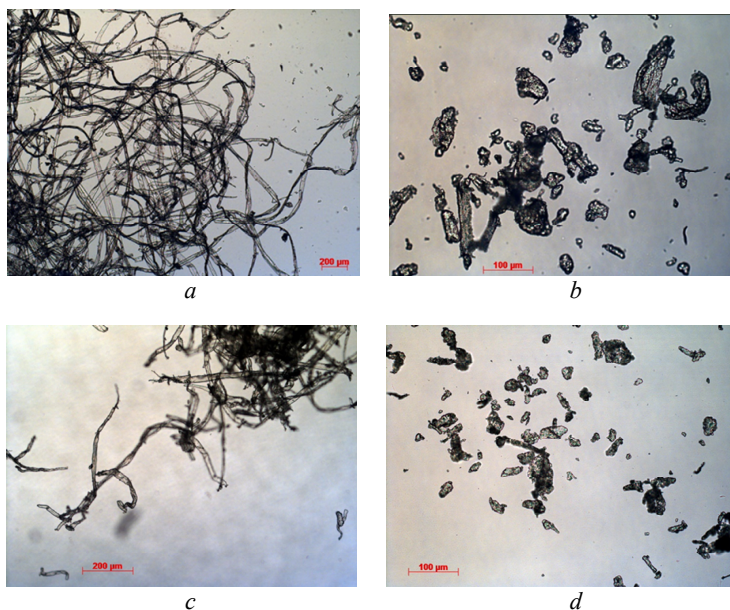


Рис. 1. Микрофотографии образцов до и после 120 мин размола:
(а, б) беленая хвойная целлюлоза; (с, д) беленая лиственная целлюлоза

Fig. 1. Microphotographs of samples before and after 120 min of grinding:
a, b – bleached softwood pulp; c, d – bleached hardwood pulp

В результате проведенного сухого размола образцов целлюлозы было отмечено, что наиболее интенсивное снижение размеров волокон происходит в первые полчаса размола. Также отмечено, что в процессе сухого размола образец целлюлозы теряет волокнистую структуру и превращается в отдельные частицы, составляющие порошок.

Для полученных образцов порошковой целлюлозы проводилось исследование удельной поверхности с целью определения влияния сухого размола на данную характеристику (табл. 2).

Таблица 2

Оценка изменения удельной поверхности и общего объема пор образцов целлюлозы в процессе сухого размола

Evaluation of changes in the specific surface area and total pore volume of cellulose samples during ball milling

Наименование образца	Продолжительность размола, мин	Удельная поверхность, $\text{м}^2/\text{г}$	$V_{\Sigma \text{пор}}, \text{см}^3/\text{г}$
Беленая хвойная СФА целлюлоза	30	1,53	0,0039
	60	1,48	0,0041
	120	1,76	0,0045
Беленая лиственная СФА целлюлоза	30	1,84	0,0047
	60	1,65	0,0048
	120	2,34	0,0054

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что в ходе сухого размола на шаровой мельнице планетарного типа наблюдается небольшое снижение удельной поверхности при часе размола, что может быть обусловлено наличием в образце как разработанных, так и остатков неразработанных волокон. В целом размол образцов на шаровой мельнице планетарного типа не приводит к значительному увеличению удельной поверхности образцов.

Для оценки возможности использования порошковой целлюлозы в качестве материала для получения аэрогеля использовали образец порошковой белой хвойной целлюлозы. Образец был преобразован в аэрогель по описанному выше методу (табл. 3).

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что использование порошковой целлюлозы в качестве материала для аэрогеля позволяет незначительно повысить удельную поверхность. Следовательно, такой материал не подходит для получения аэрогелей.

Таблица 3

Оценка удельной поверхности и общего объема пор белой хвойной порошковой целлюлозы и аэрогеля, полученного на ее основе

Evaluation of the specific surface area and total pore volume of bleached softwood powdered cellulose and aerogel obtained on its basis

Наименование образца	Удельная поверхность, м ² /г	V _{Σпор} , см ³ /г
Порошковая целлюлоза	1,76	0,0045
Аэрогель из порошковой целлюлозы	5,56	0,0121

С целью наиболее полной разработки поверхности образцов белой хвойной и лиственной целлюлоз они были подвергнуты сернокислому гидролизу с целью получения образцов наноцеллюлозы. В ходе такой обработки получается пастообразный материал, содержащий в себе частицы наноцеллюлозы. Преимущественно частицы наноцеллюлозы расположены на остатках более крупных волокон (рис. 2) и могут быть изолированы, например, путем ультразвуковой обработки. В данной работе использовался пастообразный материал, полученный путем кислотного гидролиза образца целлюлозы с последующим центрифугированием.

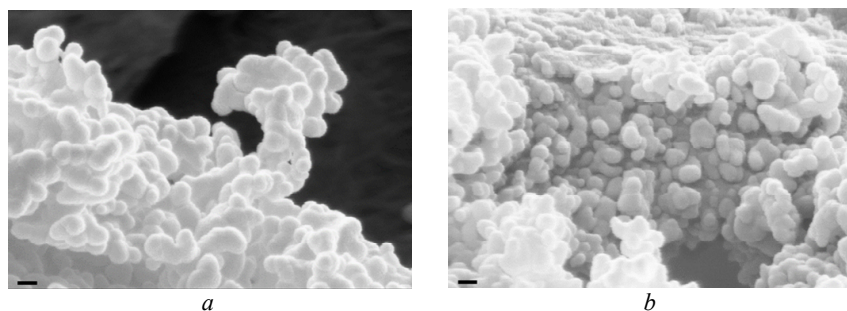


Рис. 2. Микрофотографии образцов наноцеллюлозы:

(а) белая хвойная целлюлоза; (б) белая лиственная целлюлоза

Fig. 2. Microphotographs of nanocellulose samples:

(a) bleached softwood pulp; (b) bleached hardwood pulp

С использованием описанного выше метода были получены аэрогели на основе наноцеллюлозы из белой хвойной и лиственной целлюлозы и выполнена оценка их удельной поверхности (табл. 4).

Таблица 4

**Сравнительная характеристика аэрогелей, полученных
из различных образцов наноцеллюлозы**

Comparative analysis of aerogels obtained from various nanocellulose samples

Наименование образца	Удельная поверхность, м ² /г	V _{Σпор} , см ³ /г
Аэрогель из хвойной беленой наноцеллюлозы	91,7	0,2551
Аэрогель из лиственной беленой наноцеллюлозы	135,32	0,2502

На основании приведенных данных можно отметить, что использование образцов наноцеллюлозы в качестве исходного сырья позволяет получить образцы аэрогелей, соответствующие требованиям к характеристикам качества.

Закключение. В настоящее время активно развивается интерес к получению аэрогелей целлюлозного происхождения. В рамках проведенного исследования была оценена возможность использования различных продуктов переработки целлюлозы для получения аэрогелей. Было показано, что в ходе получения порошковой целлюлозы методом сухого размола не происходит значительной разработки поверхности волокон и частиц целлюлозы, что при дальнейшем формировании аэрогеля не дает требуемых результатов удельной поверхности.

Перспективным способом разработки поверхности целлюлозы является кислотный гидролиз с получением образцов наноцеллюлозы. Аэрогели, полученные из образцов хвойной и лиственной наноцеллюлозы, обладают характеристиками, требуемыми для аэрогелей (удельная поверхность, объем пор).

Были получены аэрогели из беленой хвойной и лиственной наноцеллюлоз и выполнен их сравнительный анализ. Отмечено, что образец, полученной из лиственной наноцеллюлозы, отличается несколько большей удельной поверхностью, чем образец из хвойной наноцеллюлозы.

Благодарности. Работа выполнялась с использованием оборудования ЦКП НО «Арктика» и ИТЦ «Современные технологии переработки биоресурсов Севера» (ИТЦ СТПБС) Северного Арктического федерального университета имени М.В. Ломоносова, г. Архангельск

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Аутлов С.А., Базарнова Н.Г., Кушнир Е.Ю. Микрокристаллическая целлюлоза: структура, свойства и области применения (обзор) // Химия растительного сырья. 2013. № 3. С. 33–41.

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

Федотова О.В., Трофимова К.В., Цыганков П.Ю., Сафаров Р.Р. Исследования влияния параметров получения высокопористых целлюлозных материалов на их структурные характеристики // ИВУЗ. Химия и хим. технология. 2023. Т. 66, вып. 2. С. 107–113.

Al Abdallah H., Tannous J.H., Abu-Jdayil B. Cellulose and nanocellulose aerogels, their preparation methods, and potential applications: a review // Cellulose. 2024. Vol. 31. P. 2001–2029.

Abdel-Hakim A., Mourad R. Nanocellulose and its polymer composites: preparation, characterization, and applications // Russian Chemical Reviews. 2023. Vol. 92, no. 4. Art. no. RCR5076.

Adel A.M., El-Gendy A.A., Diab M.A., Abou-Zeid R.E., El-Zawawy W.K., Dufresne A. Microfibrillated cellulose from agricultural residues. Part I: Papermaking application // Industrial Crops and Products. 2016. Vol. 93. P. 161–174.

Dufresne A. Nanocellulose: a new ageless bionanomaterial // Materials Today. 2013. Vol.16. P. 220–227.

Dunlop M.J., Acharya B., Bissessur R. Isolation of nanocrystalline cellulose from tunicates // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2018. Vol. 6, no. 4. P. 4408–4412.

Lavoine N., Bergström L. Nanocellulose-based foams and aerogels: processing, properties, and applications // Journal of Materials Chemistry A. 2017. No. 5. P. 16105–16117.

Long L.Y., Weng Y.X., Wang Y.Z. Cellulose aerogels: synthesis, applications, and prospects // Polymers. 2018. No. 8. P. 1–28.

Rahmanian V., Pirzada T., Wang S., Khan S.A. Cellulose-based hybrid aerogels: strategies toward design and functionality // Advanced Materials. 2021. No. 33. P. 1–26.

References

Al Abdallah H., Tannous J.H. Abu-Jdayil B. Cellulose and nanocellulose aerogels, their preparation methods, and potential applications: a review. *Cellulose*, 2024, vol. 31, pp. 2001–2029.

Abdel-Hakim A., Mourad R. Nanocellulose and its polymer composites: preparation, characterization, and applications. *Russian Chemical Reviews*, 2023, vol. 92, no. 4, art. no. RCR5076.

Adel A.M., El-Gendy A.A., Diab M.A., Abou-Zeid R.E., El-Zawawy W.K., Dufresne A. Microfibrillated cellulose from agricultural residues. Part I: Papermaking application. *Industrial Crops and Products*, 2016, vol. 93, pp. 161–174.

Autlov S.A., Bazarnova N.G., Kushnir E.Yu. Microcrystalline cellulose. Structure, properties and applications. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja*, 2013, no. 3, pp. 33–41. (In Russ)

Fedotova O.V., Trofimova K.V., Tsygankov P.Yu., Safarov R.R. Research of the influence of parameters for obtaining highly porous cellulosic materials on their structural characteristics. *IVUZ. Khimiya i khim. tekhnologiya*, 2023, vol. 66, no. 2, pp. 107–113. (In Russ)

Dufresne A. Nanocellulose: a new ageless bionanomaterial. *Materials Today*, 2013, vol. 16, pp. 220–227.

Dunlop M.J., Acharya B., Bissessur R. Isolation of nanocrystalline cellulose from tunicates. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2018, vol. 6, no. 4, pp. 4408–4412.

Lavoine N., Bergström L. Nanocellulose-based foams and aerogels: processing, properties, and applications. *Journal of Materials Chemistry A*, 2017, no. 5, pp. 16105–16117.

Long L.Y., Weng Y.X., Wang Y.Z. Cellulose aerogels: synthesis, applications, and prospects. *Polymers*, 2018, no. 8, pp. 1–28.

Rahmanian V., Pirzada T., Wang S., Khan S.A. Cellulose-based hybrid aerogels: strategies toward design and functionality. *Advanced Materials*, 2021, no. 33, pp. 1–26.

Toptunov E.A., Sevastyanova Yu.V. Powdered cellulosic materials: overview, classification, characteristics and fields of application. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja*, 2021, no. 4, pp. 31–45. (In Russ)

Материал поступил в редакцию 19.03.2024

Топтунов Е.А., Севастьянова Ю.В., Саврасова Ю.А., Ивахнов А.Д. Использование целлюлозы и продуктов ее переработки для получения аэрогелей // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 252. С. 360–371. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.252.360-371

В настоящее время активно исследуется возможность расширения областей применения целлюлозы. Отдельное внимание начинает уделяться продуктам деструкции целлюлозы – порошковым целлюлозным материалам. Наиболее распространенными порошковыми целлюлозными материалами являются микро- и наноцеллюлозы. Они обладают рядом уникальных характеристик, отличающихся от обычной целлюлозы, что обуславливает их использование в таких отраслях как строительная, косметическая, фармацевтическая промышленность. Порошковые целлюлозные материалы рассматриваются как материал для изготовления гибких экранов и 3D-моделирования. Наряду с этим возрастает интерес к высокопористым

материалам на основе целлюлозы, в частности, получению аэрогелей из первичной целлюлозы, переработанных материалов (макулатура) и продуктов деструкции целлюлозы (например, микрокристаллической целлюлозы). Целлюлозные аэрогели относятся к биоаэрогелям (третий класс аэрогелей) и представляют собой новую категорию устойчивых и экологически безопасных материалов. В рамках выполнения данного исследования была оценена возможность получения аэрогелей из различных целлюлозных материалов. Были исследованы структурно-морфологические характеристики и удельная поверхность образцов порошковой целлюлозы, полученной сухим размолом на шаровой мельнице планетарного типа с разной продолжительностью. Из образцов блененной хвойной порошковой целлюлозы был получен и проанализирован аэрогель. Отмечено, что такая обработка не позволяет достаточно разработать поверхность целлюлозы и получить аэрогель с требуемыми характеристиками. С целью наиболее полной разработки поверхности образцов целлюлозы они были подвергнуты сернокислому гидролизу с выделением наноцеллюлозы. Полученные образцы наноцеллюлозы были использованы для изготовления аэрогелей. Было отмечено, что аэрогели на основе наноцеллюлозы обладают удельной поверхностью и объемом пор, которые требуются для таких материалов.

Ключевые слова : порошковые целлюлозные материалы, наноцеллюлоза, аэрогель, кислотный гидролиз, удельная поверхность.

Top tunov E.A., Sevastyanova Yu.V., Savrasova Yu.A., Ivakhnov A.D. Application of cellulose and its processed products for the production of aerogels. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2025, iss. 252, pp. 360–371 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.252.360-371

Currently, the possibility of expanding the areas of application of cellulose is being actively investigated. Special attention is beginning to be paid to the products of cellulose destruction – powdered cellulose materials. The most common powdered cellulose materials are micro- and nanocelluloses. They have a number of unique characteristics that differ from cellulose, which leads to their use in such industries as construction, cosmetics, and pharmaceuticals. Powdered cellulose materials are considered as a material for flexible screens and 3D modeling. Along with this, there is growing interest in highly porous cellulose-based materials, in particular the production of aerogels from cellulose, recycled materials (waste paper) and cellulose destruction products (for example, microcrystalline cellulose). Cellulose aerogels belong to bioaerogels (the third class of aerogels) and represent a new category of sustainable and environmentally friendly materials. As part of this study, the possibility of obtaining aerogels from various cellulose materials was assessed. The structural and morphological characteristics and specific surface area of samples of powdered cellulose obtained by dry grinding in a planetary type ball mill with different durations were investigated. An aerogel was prepared and analyzed from samples of bleached softwood powdered cellulose. It is noted that such treatment does not allow developing the

cellulose surface and obtaining an aerogel with the required characteristics. In order to improve the surface development of cellulose samples, they were subjected to sulfuric acid hydrolysis to release nanocellulose. The resulting nanocellulose samples were used to prepare aerogels. It was noted that nanocellulose-based aerogels have the necessary specific surface area and pore volume required for such materials.

Keywords: powdered cellulose materials, nanocellulose, aerogel, acid hydrolysis, specific surface area.

ТОПТУНОВ Евгений Алексеевич – аспирант кафедры целлюлозно-бумажных и лесохимических производств Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова, инженер ИТЦ «Современные технологии переработки биоресурсов Севера». ResearcherID: ABE-4069-2020. ORCID: 0000-0001-8441-788X.

163002, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия. E-mail: zhenyatope@gmail.com

TOPTUNOV Evgeniy A. – PhD student of the Department of Pulp, Paper and Wood Chemical Production, Northern Arctic Federal University named after M.V. Lomonosov, engineer of RTC “Modern technologies of processing of North bioresources”. ResearcherID: ABE-4069-2020. ORCID: 0000-0001-8441-788X.

163002. Severnaya Dvina emb. 17. Arkhangelsk. Russia. E-mail: zhenyatope@gmail.com

СЕВАСТЬЯНОВА Юлия Вениаминовна – профессор кафедры целлюлозно-бумажных и лесохимических производств Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова, кандидат технических наук. ResearcherID: ABE-4746-2020. ORCID: 0000-0002-1806-9052;

163002, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия. E-mail: y-sevastyanova@yandex.ru

SEVASTYANOVA Yulia V. – PhD (Technical), Professor of the Department of Pulp, Paper and Wood Chemical Production, Northern Arctic Federal University named after M.V. Lomonosov.

163002. Severnaya Dvina emb. 17. Arkhangelsk. Russia. E-mail: y-sevastyanova@yandex.ru

САВРАСОВА Юлия Александровна – учебный мастер кафедры целлюлозно-бумажных и лесохимических производств Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова. SPIN-код: 8292-4175. ORCID: 0000-0003-2096-4379.

163002, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия. E-mail: yulia925@mail.ru

SAVRASOVA Yulia A. – training master of the Department of Pulp, Paper and Wood Chemical Production, Northern Arctic Federal University named after M.V. Lomonosov. SPIN-code: 8292-4175. ORCID: 0000-0003-2096-4379.

163002. Severnaya Dvina emb. 17. Arkhangelsk. Russia. E-mail: yulia925@mail.ru

ИВАХНОВ Артем Дмитриевич – старший научный сотрудник ФИЦ комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаврова УрО РАН, кандидат химических наук. ResearcherID: U-4822-2019. ORCID: 0000-0003-2822-9192.

163002, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия. E-mail: ivahnov-tema@yandex.ru

IVAKHNOV Artem D. – PhD (Chemical), Senior Researcher, N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the RAS. ResearcherID: U-4822-2019. ORCID: 0000-0003-2822-9192.

163002. Severnaya Dvina emb. 17. Arkhangelsk. Russia. E-mail: ivahnov-tema@yandex.ru