Химия растительного сырья. 2026. №4. С. 82–100.
Khimiya rastitel'nogo syr'ya, 2026, no. 4, pp. 82–100.
DOI: 10.14258/jcprm.20260420255

УДК 676.16:620.3-022.532

МИКРОФИБРИЛЛИРОВАННАЯ И НАНОФИБРИЛЛИРОВАННАЯ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ ИЗ ДРЕВЕСНОЙ БИОМАССЫ: ПОЛУЧЕНИЕ, СТРОЕНИЕ И СВОЙСТВА (ОБЗОР)

© ***Е.В. Гнидан[1,2*], Б.Н. Кузнецов[1,2], О.П. Таран[1,2]***

[1] Институт химии и химической технологии СО РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН, Академгородок, 50/24, Красноярск, 660036, Россия, gnidan.ev@icct.krasn.ru
[2] Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, 79, Красноярск, 660041, Россия

Обзор посвящен систематизации современных данных о синтезе, строении и свойствах микрофибриллированной и нанофибриллированной целлюлоз, получаемых из древесного сырья. Методы получения микрофибриллированной и нанофибриллированной целлюлоз из древесного сырья являются многостадийными и включают процессы предварительной обработки сырья, делигнификации, отбелки и механической фибрилляции. Основным фактором, определяющим энергоэффективность технологии и качество получаемых наноцеллюлоз, является подбор оптимального способа предобработки сырья, позволяющего при последующей механической фибрилляции снизить удельное энергопотребление. Среди химических методов предобработки наиболее перспективны пероксидная делигнификация, TEMPO-окисление, обработка органическими кислотами и глубокими эвтектическими растворителями. Для механической фибрилляции предобработанного древесного сырья используют методы гомогенизации при высоком давлении, дискового измельчения, экструзии, ультразвуковой обработки и криоизмельчения. Проведен сравнительный анализ физико-химических характеристик наноцеллюлоз (морфологии, кристалличности, степени полимеризации, механических, термических, реологических, барьерных и оптических свойств) в зависимости от способа их получения.

Ключевые слова: микрофибриллированная целлюлоза, нанофибриллированная целлюлоза, древесное сырье, способы получения, предварительная обработка, механическая фибрилляция, структура и свойства наноцеллюлоз.

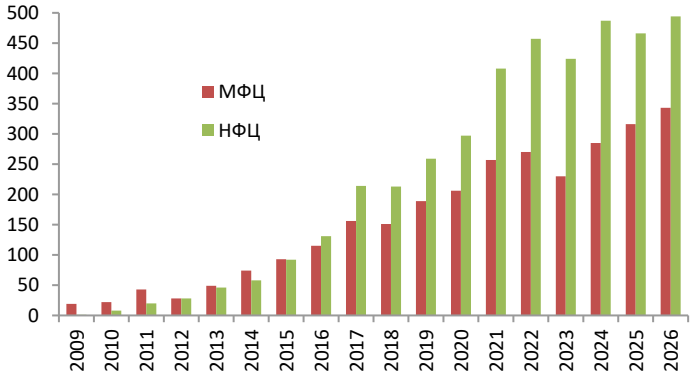
Для цитирования: Гнидан Е.В., Кузнецов Б.Н., Таран О.П. Микрофибриллированная и нанофибриллированная целлюлозы из древесной биомассы: получение, строение и свойства (обзор) // Химия растительного сырья. 2026. №4. С. 82–100. https://doi.org/10.14258/jcprm.20260420255.

Введение

Целлюлоза является самым распространенным природным полимером. Возобновляемость, биоразлагаемость, нетоксичность, уникальная надмолекулярная структура и способность к химической модификации делают этот полимер перспективным для «зеленой» экономики. Природная (нативная) целлюлоза обладает кристаллической структурой типа I. В ней глюкановые цепи расположены параллельно друг другу и упакованы в микрофибриллы, которые, в свою очередь, скреплены матрицей из гемицеллюлоз и лигнина.

В последние годы возрос интерес к переработке растительной целлюлозы в наноцеллюлозные материалы, с уникальными механическими, барьерными и коллоидными свойствами [1–4] (рис.). Различают микрофибриллированную целлюлозу (МФЦ), нанофибриллированную целлюлозу (НФЦ) и нанокристаллическую целлюлозу (НКЦ). Стандарт ISO/TS 20477:2023 определяет наноцеллюлозу как материал, имеющий хотя бы одно измерение в диапазоне 1–100 нм. Для частиц НФЦ характерны ширина 2–10 нм и длина более 10000 нм (соотношение сторон >1000), для частиц МФЦ – ширина 10–100 нм и длина 500–10000 нм (соотношение сторон 50–100). НФЦ и МФЦ сохраняют как кристаллические, так и аморфные области в целлюлозных фибриллах, существующих в клеточной стенке растений (диаметр 5–20 нм). МФЦ, как продукт переработки нативной целлюлозы содержит наряду с нанофибриллами и пучки фибрилл микрометровой толщины [5, 6]. Интервал вариации размеров фибрилл в МФЦ и НФЦ зависит от условий их получения из растительной целлюлозы и лигноцеллюлозного сырья.

* Автор, с которым следует вести переписку.



Количество опубликованных за период 2009–2026 гг. статей, посвященных микрофибриллированной и нанофибриллированной целлюлозам

Огромные ресурсы лигноцеллюлозной биомассы представлены древесными и сельскохозяйственными отходами. Россия занимает первое место в мире по запасам древесины, при переработке которой образуются многотоннажные отходы в виде опилок, стружек, щепы, некондиционной древесины. Эти древесные отходы являются дешевым возобновляемым источником сырья для производства наноцеллюлоз [7]. Использование древесных отходов позволяет не только снизить себестоимость продукции, но и решить экологически важную проблему их утилизации.

Цель настоящего обзора – обобщить последние литературные данные о способах получения из древесного сырья, о строении, свойствах и применении микро- и нанофибриллированных целлюлоз.

Характеристики древесного сырья, используемого для получения микро- и нанофибриллированной целлюлоз

Древесина является основным источником целлюлозосодержащего сырья для получения микро- и нанофибриллированных целлюлоз. Химический состав биомассы различных пород деревьев может существенно отличаться. Содержание целлюлозы немного выше у лиственных пород (~41%), чем у хвойных (~38%). Содержание гемицеллюлоз выше у хвойных (около 28%), чем у лиственных (около 22%) пород, причем в гемицеллюлозах хвойных пород доминирует галактоглюкоманнан, а в гемицеллюлозах у лиственных – глюкуроноксилан. Волокна хвойных пород (сосны, пихты, ели, лиственницы) длиннее (3–5 мм), чем лиственных пород (береза, тополь, осина) (1–2 мм) [8]. Волокна хвойных пород имеют повышенное содержание лигнина (~26%), почти полностью состоящего из гваяцильных (G) единиц. В волокнах лиственных пород содержание лигнина ниже (~20%), и он представляет собой смесь гваяцильных (G) и сирингильных (S) единиц. Содержание неорганических компонентов в лиственных породах выше (<0.80%), чем в хвойных (<0.35%). Экстрактивных веществ в хвойной древесине больше (~5%, преобладают смоляные кислоты и терпены), чем в лиственной (~2%, преобладают фенолы и дубильные вещества) [9].

Методы получения микро- и нанофибриллированной целлюлоз

О первом успешном выделении микрофибрилл целлюлозы из суспензии целлюлозных волокон хвойных пород древесины сообщалось в 1983 году [10]. Для получения микро- и нанофибриллированной целлюлоз применяют различные методы предварительной обработки либо целлюлозосодержащего сырья, либо целлюлозных волокон. Предварительная обработка позволяет снизить потребление энергии при получении фибриллированной целлюлозы, в среднем с 20000–30000 кВтч/тонну до 1000 кВтч/тонну [11]. МФЦ и НФЦ обычно получают в водной среде при низких концентрациях (<5 мас.%) целлюлозы [12].

Способы получения МФЦ и НФЦ включают следующие этапы: измельчение целлюлозосодержащего сырья, очистку, предварительную обработку (химическую, физическую или биологическую), делигнификацию, отбелку, основную механическую и (или) химическую/ферментативную обработку. Способы обработки варьируются в зависимости от вида исходного сырья и конечной формы фибриллированной целлюлозы. Предварительное измельчение сырья повышает эффективность последующих обработок и улучшает процесс удаления водорастворимых примесей, восков, пигментов и растворимых сахаров [13]. Для выделения целлюлозных волокон обычно требуется несколько обработок. На этапе предварительной обработки (предобработки) используют химические, физические и биологические методы, каждый из которых обладает своими достоинствами и недостатками (табл. 1).

Таблица 1. Методы предварительной обработки целлюлозосодержащего сырья, используемые при получении МФЦ и НФЦ

Наименование метода	Сущность способа	Достоинства	Недостатки	Источник
Химические				
Щелочная обработка	Обработка растворами NaOH, KOH, $Ca(OH)_2$, NH_4OH	Эффективная деполимеризация лигнина и пектина; гидролиз гемицеллюлоз	Требует окислителей; загрязнение среды; энергозатратность	[14]
Кислотный гидролиз	Обработка растворами H_2SO_4, HCl или H_3PO_4	Подходит для разных видов сырья; эффективная очистка целлюлозы	Токсичность кислот, коррозия оборудования; загрязнение среды	[15]
Органосольвентная делигнификация	Обработка органическими растворителями (спирты, ацетон и др.)	Экологичность; эффективная очистка целлюлозы	Потери растворителей	[16, 17]
Пероксидная делигнификация	Обработка H_2O_2 в водно-органической среде	Экологичность; эффективная очистка целлюлозы	Большой расход пероксида водорода	[18–21]
Ионная жидкость	Разрушение внутримолекулярных водородных связей, растворение компонентов	Высокая способность растворять целлюлозу; низкая токсичность	Снижение кристалличности целлюлозы; дороговизна реагентов	[22, 23]
Окисление (TEMPO)	Введение групп COOH и CHO в мягких условиях	Предотвращение агрегации наночастиц; улучшение фибриллирования; низкие энергозатраты (до 2 МВт·ч/т)	Высокая стоимость и токсичность реагентов; сложность контроля	[24]
Глубокие эвтектические растворители (ГЭР/DES)	Обработка смесью акцептора и донора водородной связи	Простота получения; низкая токсичность	Кислотные ГЭР агрессивны; требуется тщательная очистка продукта	[25]
Физические				
Механическая обработка	Дисковый рафинер, вальцовый измельчитель, шаровая мельница, ультразвук, блендер и др.	Экологичность	Высокое энергопотребление	[2]
Термическая обработка	Паровой взрыв, автогидролиз / гидротермолиз	Повышение доступности волокон; экологичность	Частичная деградация целлюлозы; повышенное давление	[26–28]
Облучение	Электронно-лучевое, микроволновое	Экологичность	Частичная деструкция целлюлозы; высокая стоимость оборудования	[29–32]
Биологические				
Ферментативная обработка	Использование эндоглюканаз и целлюлаз для частичного гидролиза	Экологичность; снижение энергопотребления	Большая продолжительность; высокая стоимость ферментов	[33]

После предобработки в целлюлозном волокне сохраняется остаточный лигнин, который необходимо удалить для получения МФЦ и НФЦ. Существующие методы делигнификации, такие как сульфитный и сульфатный, нейтрально-сульфитный, органосольвентный, окислительный, щелочной, гидротермальный и другие [34], имеют свои достоинства и недостатки. Конечным продуктом промышленного способа сульфатной варки является получение сульфатной целлюлозы (крафт-целлюлозы небеленой), существенным недостатком которой является высокое содержание лигнина, придающее волокну коричневый цвет. Это требует применения стадий отбелки сульфатной целлюлозы для ее переработки в МФЦ и НФЦ.

Более экологичными альтернативами традиционным методам варки являются окислительный и органосольвентный способы делигнификации [35]. В процессах окислительной делигнификации применяются пероксид водорода, озон, кислород или воздух.

Перспективным методом получения целлюлозы является окисление с использованием 2,2,6,6-тетраметилпиперидин-1-оксильного радикала (TEMPO) [36]. Однако генотоксичность и высокая стоимость TEMPO создают серьезные препятствия для промышленного внедрения [37, 38]. Стратегии регенерации

позволяют снизить расход ТЕМРО более чем на 90% и уменьшить себестоимость примерно на 31%, однако экономическая целесообразность в целом пока не достигнута [39, 40].

Системы на основе ГЭР малотоксичны и биоразлагаемы. Получаемые наноцеллюлозы обладают низкой цитотоксичностью, а регенерация растворителя технологически осуществима [41]. Тем не менее падение эффективности регенерации при увеличении числа циклов и резкое снижение выхода при масштабировании требуют оптимизации процесса (в частности, создания замкнутых систем рециркуляции растворителя и непрерывных технологий) [42].

Органосольвентная делигнификация основана на использовании низкокипящих органических растворителей (метанол, этанол, ацетон, этилацетат). Процессы могут проводиться как без катализаторов, так и с добавлением щелочных или кислотных катализаторов [17]. Важным преимуществом этого метода является возможность легкой регенерации растворителей путем простой перегонки при низких энергозатратах.

Гидротермальный метод использует воду при повышенном давлении в качестве экологически безопасного растворителя [43, 44].

Для очистки целлюлозного продукта от остаточного лигнина применяют процессы отбелки. Традиционно для этого используют хлорсодержащие соединения в кислой среде (гипохлорит кальция, гипохлорит натрия, хлорит натрия) или пероксид водорода в щелочной среде [13]. Пероксид водорода выгодно отличается от серо- и хлорсодержащих реагентов своей нетоксичностью и способностью эффективно удалять лигнин при минимальном повреждении целлюлозы. Смеси $NaOH–H_2O_2$ и $CH_3COOH–H_2O_2$ обеспечивают селективное удаление лигнина при умеренных температурах [45, 46]. После завершения этапов делигнификации и отбелки содержание целлюлозы в волокнах может достигать 98% [13].

Механическая обработка является наиболее распространенным способом фибрилляции целлюлозных волокон до наноразмерного состояния [47, 48]. Однако механические методы требуют высокого энергопотребления при осуществлении интенсивных сдвиговых и ударных нагрузок [4, 49–52].

Традиционные механические методы включают гомогенизацию высокого давления, микрофлюидизацию, дисковое измельчение/шлифование (супермасс-коллоидер), рафинирование. В последние годы активно развиваются альтернативные методы: двухшнековая экструзия, ультразвуковая обработка, измельчение шарами, криоизмельчение, встречное столкновение водных потоков [52, 53].

Дисковое измельчение, проводимое в аппаратах типа супермасс-коллоидер, является одним из промышленных методов получения МФЦ. Принцип действия заключается в пропускании водной суспензии целлюлозных волокон между вращающимся и неподвижным абразивными дисками (керамическими или каменными). Зазор между дисками может регулироваться, а число проходов варьируется от 1 до 10 и более [53, 54]. Многократное дисковое измельчение древесной массы позволяет получить фибриллы размером 20–50 нм [52]. Однако степень фибрилляции зависит от вида сырья, и длительная обработка может вызвать аморфизацию целлюлозы [48].

Другим классическим методом является гомогенизация под высоким давлением (также известная как микрофлюидизация) [55]. Суспензия целлюлозных волокон (обычно 1–3 мас.%) продавливается через узкую камеру (или Z-образный канал) при давлении до 1500–2000 бар. В камере возникают интенсивные сдвиговые напряжения, кавитация и турбулентность, которые разделяют волокна на фибриллы [46, 53]. Гомогенизация под высоким давлением превосходит дисковое измельчение и ультразвук по тонкости получаемых фибрилл (<20 нм) и числу проходов, но требует предварительного удаления лигнина и гемицеллюлоз [4, 54]. С целью преодоления этих недостатков используют также процесс механической предварительной обработки сырья с помощью дисковых рафинеров, мельниц, битеров и блендеров для получения мелких частиц (менее 100 мкм) [54].

Ультразвук (20–100 кГц) создает кавитацию, микроудары и сдвиг, разрушающие волокна [46]. Достоинства способа: простота, работа с малыми объемами, отсутствие высокого давления. Недостатки: плохое масштабирование, локальный перегрев, возможная деструкция волокон. Использование коротких циклов (5–15 мин) и охлаждение снижает до минимума повреждения волокон [56, 57].

Шаровые мельницы (в т.ч. планетарные) действуют ударами и истиранием, возможны сухой и мокрый помол [58–60]. К недостаткам относят: износ шаров, загрязнение продукта металлом и его широкая полидисперсность [56, 60].

Криоизмельчение заключается в замораживании водонасыщенных волокон жидким азотом; кристаллы льда разрывают стенки, облегчая фибрилляцию [61, 62].

Валковые и коллоидные мельницы используются для получения МФЦ высокой концентрации (до 10 мас.%) [63, 64].

Истирание в среде органических растворителей (глицерин, DMSO) позволяет избежать агрегации волокон и снизить энергозатраты за счет уменьшения капиллярных сил [65].

Метод экструзии, в зависимости от конструкции винтов, либо уменьшает размер волокон и повышает их удельную поверхность, либо осуществляет их фибрилляцию до микро- или наномасштаба [66, 67].

Способ водного встречного столкновения, когда две струи водных суспензий, содержащих целлюлозу, сталкиваются друг с другом под высоким давлением, что позволяет получать МФЦ с амфифильными характеристиками [68, 69].

Наиболее эффективен комбинированный метод получения МФЦ, включающий мягкую химическую/биологическую предобработку и последующую механическую фибрилляцию [70]. Предварительное TEMPO-окисление перед гомогенизацией позволяет достичь высокой степени фибрилляции при меньших энергозатратах (<2 МВт·ч/т) [46]. Предобработка по методу Фентона ($H_2O_2 + Fe^{2+}$) лиственной сульфатной целлюлозы перед дисковым измельчением снижает потребляемую энергию на 40% и обеспечивает узкое распределение волокон по размерам [71]. Продолжительность фибрилляции можно сократить при использовании набухающих агентов (например, $Ca(OH)_2$) [72].

В таблице 2 приведены некоторые физико-химические характеристики МФЦ и НФЦ, полученных из древесного сырья с использованием различных методов.

Физико-химические свойства микро- и нанофибриллированной целлюлоз

Свойства микро- и нанофибриллированной целлюлоз определяются методом получения и видом сырья (табл. 2). Способ обработки определяет морфологию, кристалличность, степень полимеризации, механические, термические, барьерные, реологические и оптические характеристики конечного продукта [60]. Выход продукта варьируется от 40–65% (при мягких химических или комбинированных методах) [49, 78] до 11–27% (при кислотном гидролизе) [73].

Химическая модификация наноцеллюлоз позволяет целенаправленно менять их свойства. Сульфатирование придает стабильность суспензиям микро- и нанофибриллированной целлюлоз, но снижает их термостойкость. Фосфорилирование, наоборот, придает им лучшую термостойкость и огнестойкость. Окисление (TEMPO, периодатное) повышает их коллоидную устойчивость и улучшает фибрилляцию. Ацетилирование и карбоксиметилирование контролируют гидрофобно-гидрофильные свойства наноцеллюлоз. Амидирование способствует повышению гидрофобности и термостабильности наноцеллюлоз. Сшивание катионами позволяет получать из НФЦ сверхпористые гидрогели [80–82].

Таблица 2. Физико-химические характеристики микро- и нанофибриллированной целлюлоз, полученных из древесного сырья различными методами

Сырье	Тип целлюлозы	Метод получения	Выход, % мас.	Диаметр волокон, нм	Длина волокон, мкм	Индекс кристалличности	Дзета-потенциал, мВ	$T_н$, °C	T_{max}, °C	Источник
1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*	*10*	*11*
Древесина оливкового дерева, тополя, эвкалипта	МФЦ	Сульфитная и кислородная делигнификация, пероксидная отбелка, микрофлюидизация	11.3–13.3	–	–	0.76–0.84	–	–	–	[7]
Древесина сосны	НФЦ	Отбелка, TEMPO-окисление, УЗ-обработка, центрифугирование	65	~10	~1	–	–	–	–	[50]
Древесина каучукового дерева	МФЦ	Обработка ионной жидкостью (IL)+ H_2SO_4 / TEMPO-окисление, УЗ-обработка	–	100–300	до 1	–	–	98 (IL/ H_2SO_4) / 280 (TEMPO)	200 (H_2SO_4) / 280 (IL) / 320 (TEMPO)	[59]

Окончание таблицы 2

1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*	*10*	*11*
Древесина рододендрона понтийского	МФЦ	Отбелка $NaClO_2$, заморозка, фибриллирование в двухшнековом экструдере	–	8300	–	0.59–0.69	–	–	–	[62]
Древесина березы	МФЦ	Мех. активация Кислотный гидролиз с кат. ZrO_2/SO_4^{2-} Пероксидная делигнификация с кат. TiO_2 Кислотный гидролиз, центрифугирование, УЗ-обработка, лиофильная сушка	27.7	91.3	–	0.78	-24.4	–	–	[73]
Древесина сосны	МФЦ	Предварительная обработка H_2SO_4, делигнификация $Na_2S/NaOH$, отбелка ClO_2/H_2O_2, гидролиз H_2SO_4	60	130–220	~1	0.75–0.80	-44	–	–	[74]
Древесина эвкалипта	МФЦ	Предварительная обработка ГЭР, микрофибриллирование	–	17–20	–	0.26–0.42	–	261–276	377–384	[75]
Древесина осины	МФЦ / НФЦ	Щелочная и органосольвентная обработки, пероксидная делигнификация с кат. H_2SO_4, сернокислотный гидролиз, УЗ-обработка, центрифугирование	14.4 / 19.0	200–600/40–400	0.4–2.5/ ~1	0.86	-41.5	120 и 150	242 и 362/ 227 и 361	[76]
Древесина ели	МФЦ	Пероксидная делигнификация, гидролиз H_2SO_4, УЗ-обработка, центрифугирование	45.2	<100	5–10	0.78	-25	–	–	[77]
Древесина осины	НФЦ	ТЕМРО-окисление, карбоксиметилирование, ГЭР, микрофлюидизация	44–55	~2 (ТЕМРО/карбоксиметилирование) / 2–100 (ГЭР)	–	–	–	–	220–280	[78]
Древесина сосны	НФЦ	Пероксидная делигнификация, размол в шаровой мельнице, УЗ-обработка	–	105	–	0.68	-11.4	262	364	[79]

$T_н$, °С – температура начала интенсивной потери массы; $T_{мах}$, °С – температура максимальной потери массы; УЗ – ультразвуковая обработка; ГЭР – глубокий эвтектический растворитель

Морфология и размеры фибрилл. Механические методы без использования предварительной обработки дают широкое распределение волокон по размерам: от 20 до 100 нм и более, причем присутствуют и нефибриллированные волокна [5, 6]. Гомогенизация под высоким давлением позволяет получить более тонкие фибриллы (10–30 нм), но требует использования нескольких проходов [60, 61].

Химические и ферментативные предварительные обработки значительно улучшают фибрилляцию и однородность наноцеллюлоз [83]. ТЕМРО-окисление приводит к образованию нанофибрилл диаметром 2–5 нм и длиной в несколько микрометров [51, 78]. Карбоксиметилирование и кватернизация также способствуют получению более тонких фибрилл [84]. Ферментативная обработка позволяет получать волокна с более высоким соотношением сторон (<300) и улучшенной однородностью [61]. ГЭР позволяет выделить фибриллы шириной 15–200 нм, а при оптимизации процесса – до 2–5 нм [75, 85]. Наиболее длинные фибриллы формируются при щадящем механическом измельчении [86], а короткие (0.4–2.5 мкм) – после УЗ-обработки с щелочной и/или окислительной предобработкой [76, 77].

Кристалличность и степень полимеризации. Индекс кристалличности (ИК) целлюлозных волокон в древесине составляет 0.44–0.65 и обычно возрастает при обработках [76, 87]. Причем кислотный гидролиз

повышает ИК целлюлозы до 0.70–0.85, но одновременно снижает степень ее полимеризации (СП) [73, 76]. TEMPO-окисление позволяет сохранить более высокую СП и кристалличность (0.60–0.75) [88].

Интенсивная механическая обработка снижает кристалличность и СП целлюлозы. Шаровое измельчение древесины снижает с 0.41 до 0.10 после 60 мин [89]. Дисковое измельчение и гомогенизация уменьшают СП целлюлозы с ~1000 до 300–400 [90], шаровые мельницы – до 150–200 [91]. Ферментативный гидролиз может повышать ИК, но при длительной обработке также снижает СП целлюлозы [53].

Механические свойства. Механические свойства МФЦ и НФЦ определяются способом обработки [92]. Пленки из механически полученной МФЦ имеют прочность на растяжение 100–150 МПа, модуль упругости ~6 ГПа [56]. TEMPO-обработка повышает прочность пленок до 200–300 МПа за счет образования карбоксильных групп [93]. Карбоксиметилирование также повышает модуль упругости и прочность пленок [94]. Пленки НФЦ и МФЦ, полученные механическим способом с использованием предварительной обработки, имеют прочность 45–80 МПа, модуль 5–6 ГПа [95]. Ориентированные фибриллы (например, формируются при сушке с вытяжкой) имеют повышенные механические свойства [96, 97]. Также высокое соотношение длины к диаметру фибрилл (100) способствует армированию пленок [98].

Уменьшение размера фибрилл и пористости конечных продуктов является эффективным способом повышения прочности и ударной вязкости композитов на основе МФЦ и НФЦ [99]. Совместимость с полимерами в них достигается за счет гидроксильных, сульфатных и карбоксильных групп, образующих водородные связи [92].

Сборка фибрилл в макроволокна является общей стратегией для их конструкционных применений [96]. Ориентированные нанофибриллы, собранные микрофлюидным прядением, имеют прочность на разрыв до 1.6 ГПа и модуль упругости до 86 ГПа [95], однако производство длинных волокон без дефектов остается сложной задачей [100].

Термическая стабильность. Немодифицированные НФЦ и МФЦ подвергаются интенсивной термодеструкции при 280–350 °C [46]. TEMPO-окисление несколько снижает термостабильность наноцеллюлоз ($T_{мах}$ около 300 °C), органические кислоты (щавелевая, муравьиная), а также лигнин повышают [83, 101]. НФЦ, полученные ферментативным способом, более термостабильны ($T_{мах}$ ~325 °C), чем полученные кислотным гидролизом ($T_{мах}$ ~200 °C) [102]. Введение в наноцеллюлозу сульфатных групп снижает температуру максимальной скорости терморазложения ($T_{мах}$), например, до 200 °C для МФЦ из каучукового дерева [59].

Коллоидные свойства. Коллоидное поведение суспензий МФЦ и НФЦ определяется наличие поверхностных функциональных групп, морфологией и степенью фибрилляции [9, 103]. Степень фибрилляции оценивают прямыми методами (ЭМ, АСМ), седиментацией, а также косвенно – по водоудерживающей способности, которая достигает 800–1000% [104]. Оптические методы (УФ-видимая спектроскопия, турбидиметрия) регистрируют светопропускание и мутность суспензий наноцеллюлоз [12, 66]. С ростом степени фибрилляции увеличивается удельная поверхность, повышается прочность и достигается более узкое распределение фибрилл по размерам [67].

Коллоидная стабильность суспензий наноцеллюлоз зависит от поверхностного заряда. Немодифицированные фибриллы агрегируют за счет водородных связей [105]. TEMPO-окисление вводит карбоксильные группы, обеспечивая дзета-потенциал -50…-70 мВ и стабильность при pH > 4 [106]. Гемицеллюлозы и лигнин также влияют на величину заряда (неотбеленная целлюлоза имеет более отрицательный дзета-потенциал, чем отбеленная [107]), а катионизация наноцеллюлоз дает положительный дзета-потенциал (+30…+53 мВ) [108].

Реологические свойства. Суспензии НФЦ и МФЦ проявляют псевдопластичное поведение (уменьшение вязкости с ростом скорости сдвига) и тиксотропию [109]. TEMPO-окисление снижает их вязкость при низких сдвигах за счет отталкивания [90], а катионизация повышает вязкость и критическое напряжение геля [110]. Контролируемая кватернизация (NaOH, глицидилтриметиламмоний хлорид **(**GTMAC)) позволяет варьировать вязкость от $1.3 \cdot 10^3$ до $1 \cdot 10^5$ Па·с и σ_c от 8 до 103 Па при содержании катионных групп до 3.3 ммоль/г [108].

Микро- и нанофибриллированная целлюлозы являются эффективными реологическими модификаторами, позволяющими управлять текучестью продуктов [108, 111, 112]. Термочувствительная МФЦ с привитым Jeffamine M2005 стабильна при 4–16 °C и агрегирует при 16–30 °C, проявляя объемную и динамическую реологию [112].

Барьерные свойства. Пленки на основе НФЦ и МФЦ проявляют кислородные барьерные свойства, сопоставимые с передовыми синтетическими материалами, скорость пропускания кислорода для таких

пленок 1–20 мл/м^2·сут [113]. При увеличении относительной влажности барьерные свойства пленок в отношении кислорода ухудшаются [109].

По барьерным свойствам в отношении пара пленки НКЦ с более высокой кристалличностью уступают пленкам МФЦ, содержащей гидрофобный лигнин и жирные кислоты [114]. Химический состав исходного сырья оказывает большое влияние на барьерные свойства пленок МФЦ [115]. Переход от макрофибрилл целлюлозы к МФЦ снижает скорость пропускания водяного пара на 20–30%. Хорошие барьерные свойства имеет пленка МФЦ из отбеленной лиственной целлюлозы (200 г/м^2·сут), а лигнин повышает ее паропроницаемость до 300–460 г/м^2·сут [115]. Различие в морфологии и заряде фибрилл мало влияет на паропроницаемость пленок МФЦ. Важное значение имеет дисперсность фибрилл – мелкие фибриллы снижают паропроницаемость, а их агломерация повышает [116]. Для снижения паропроницаемости пленок МФЦ используют их химическую модификацию и формируют многослойные композиты [117].

Оптические свойства. Морфология и размер фибрилл являются основными факторами, определяющими оптические свойства пленок наноцеллюлоз. Пленки НФЦ превосходят МФЦ по прозрачности (до ~90% при толщине ~20 мкм), поскольку диаметр их фибрилл (5–100 нм) значительно меньше длины волны света [107, 109]. Качественное диспергирование фибрилл повышает прозрачность пленок НФЦ, тогда как наличие в них агрегированных фибрилл или остаточного лигнина снижает пропускание света [118]. Матовость пленок можно регулировать изменением соотношения длины и диаметра фибрилл, а также плотностью их упаковки [3]. Оптические свойства пленок наноцеллюлоз также зависят от ориентации фибрилл и кристалличности [108, 119]. Пленки из наноцеллюлоз эффективно поглощают ультрафиолетовое излучение [107], причем это свойство усиливается при наличии в них остаточного лигнина [118].

Биологическая активность. Путем химической модификации МФЦ и НФЦ получают биоактивные материалы [120]. Использование катионизации (введение четвертичных аммониевых групп) позволяет получать наноцеллюлозы с антибактериальными свойствами [121]. Альтернативным способом получения антибактериальных наноцеллюлоз является TEMPO-окисление, однако на такую модификацию не реагируют кислотоустойчивые бактерии [122].

Выводы

Получение микрофибриллированной и нанофибриллированной целлюлоз из древесного сырья представляет собой многостадийный процесс, включающий предварительную обработку сырья, делигнификацию, отбелку и механическую фибрилляцию. Рассмотрены существующие методы получения древесных наноцеллюлоз, их структура и свойства.

Характеристики МФЦ и НФЦ определяются породой древесины, режимами предобработки и условиями механической фибрилляции. Индекс кристалличности и степень полимеризации наноцеллюлоз зависят от эффективности удаления аморфных полисахаридов и лигнина. Механические свойства наноцеллюлоз (прочность, модуль упругости) определяются соотношением длины и диаметра фибрилл, их ориентацией и количеством межфибриллярных водородных связей. Термическая стабильность наноцеллюлоз варьируется в широком диапазоне: от 120–200 °С для сульфатированных образцов и до 350 °С для немодифицированных и лигнинсодержащих наноцеллюлоз. Коллоидная стабильность суспензий наноцеллюлоз обеспечивается электростатическим отталкиванием, достигаемым за счет их химической модификации. Так, TEMPO-окисление обеспечивает дзета-потенциал в диапазоне от -70 до -50 мВ, а катионизация – от +30 до +53 мВ. Барьерные и оптические свойства пленок наноцеллюлоз определяются многими факторами: морфологией фибрилл, их дисперсностью и химическим составом поверхности, вариация которых позволяет адаптировать эти свойства под конкретные требования.

Перспективы дальнейшего развития технологий получения наноцеллюлоз связаны со снижением энергозатрат, повышением экологической безопасности, масштабируемости, а также с созданием новых материалов с заданным комплексом свойств для разнообразных применений – от биоразлагаемой упаковки и медицинских изделий до гибкой оптоэлектроники и продуктов «зеленой» химии.

Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 26-93-20012, https://rscf.ru/project/26-93-20012/, за счет целевого финансирования (гранта) Красноярского краевого фонда науки, на базе Института химии и химической технологии СО РАН ФИЦ КНЦ СО РАН и при софинансировании квалифицированного заказчика Акционерное общество «Управляющая компания Биохимического холдинга "Оргхим"».

Конфликт интересов
Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Открытый доступ
Эта статья распространяется на условиях международной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), которая разрешает неограниченное использование, распространение и воспроизведение на любом носителе при условии, что вы предоставите соответствующие ссылки на автора(ов), источник и Лицензию Creative Commons и укажете, были ли внесены изменения.

Список литературы

1. Kim J.-H., Shim B.S., Kim H.S., Lee Y.-J., Min S.-K., Jang D., Abas Z., Kim J. Review of nanocellulose for sustainable future materials // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology. 2015. Vol. 2, no. 2. Pp. 197–213. https://doi.org/10.1007/s40684-015-0024-9.
2. Phanthong P., Reubroycharoen P., Hao X., Xu G., Abudula A., Guan G. Nanocellulose: extraction and application // Carbon Resources Conversion. 2018. Vol. 1, no. 1. Pp. 32–43. https://doi.org/10.1016/j.crcon.2018.05.004.
3. Thomas B., Raj M.C., Athira K.B., Rubiyah M.H., Joy J., Moores A., Drisko G.L., Sanchez C. Nanocellulose, a versatile green platform: from biosources to materials and their applications // Chemical Reviews. 2018. Vol. 118, no. 24. Pp. 11575–11625. https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.7b00627.
4. Osong S.H., Norgren S., Engstrand P. Processing of wood-based microfibrillated cellulose and nanofibrillated cellulose, and applications relating to papermaking: a review // Cellulose. 2016. Vol. 23, no. 1. Pp. 93–123. https://doi.org/10.1007/s10570-015-0798-5.
5. Chinga-Carrasco G. Cellulose fibres, nanofibrils and microfibrils: The morphological sequence of MFC components from a plant physiology and fibre technology point of view // Nanoscale Research Letters. 2011. Vol. 6, no. 1. 417. https://doi.org/10.1186/1556-276X-6-417.
6. Kalia S., Boufi S., Celli A., Kango S. Nanofibrillated cellulose: surface modification and potential applications // Colloid and Polymer Science. 2014. Vol. 292, no. 1. Pp. 5–31. https://doi.org/10.1007/s00396-013-3112-9.
7. Ibarra D., Martín-Sampedro R., Wicklein B., Jiménez-López L., Eugenio M.E. Production of microfibrillated cellulose from fast-growing poplar and olive tree pruning by physical pretreatment // Applied Sciences. 2021. Vol. 11, no. 14. 6445. https://doi.org/10.3390/app11146445.
8. Xue H. et al. A Review: Sources, Preparation and Application of Nanocellulose // Journal of Polymer Materials. 2025. Vol. 42, no. 2. Pp. 379–409. https://doi.org/10.32604/jpm.2025.066695.
9. Lendewig M., Forfora N., Marquez R., Enriquez-Medina I., Franco J., Cordoba Y., Urdaneta F., Morizet-Davis J., Frazier R., Pawlak J., Venditti R., Jameel H., Gonzalez R. Feedstock and processing strategies for fibrillated cellulose: performance implications in man-made cellulosic fibers, nonwovens and molded pulp products // Progress in Materials Science. 2026. Vol. 162. 101731. https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2026.101731.
10. Turbak A.F., Snyder F.W., Sandberg K.R. Microfibrillated cellulose, a new cellulose product: properties, uses, and commercial potential // Journal of Applied Polymer Science: Applied Polymer Symposium. 1983. Vol. 37, no. 9. Pp. 815–827.
11. Mishra R.K., Sabu A., Tiwari S.K. Materials chemistry and the futurist eco-friendly applications of nanocellulose: Status and prospect // Journal of Saudi Chemical Society. 2018. Vol. 22, no. 8. Pp. 949–978. https://doi.org/10.1016/j.jscs.2018.02.005
12. Wang L., Li K., Copenhaver K., Mackay S., Lamm M.E., Zhao X., Dixon B., Wang J., Han Y., Neivandt D., Johnson D.A., Walker C.C., Ozcan S., Gardner D.J. Review on nonconventional fibrillation methods of producing cellulose nanofibrils and their applications // Biomacromolecules. 2021. Vol. 22, no. 10. Pp. 4037–4059. https://doi.org/10.1021/acs.biomac.1c00640.
13. Ventura-Cruz S., Tecante A. Nanocellulose and microcrystalline cellulose from agricultural waste: Review on isolation and application as reinforcement in polymeric matrices // Food Hydrocolloids. 2021. Vol. 118. 106771. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106771.
14. Liu M., Tsui T.-H., Zhang L., Jurišić V., Liu R. Advances in nanocellulose extraction from lignocellulosic biomass // Discover Chemical Engineering. 2026. Vol. 6. 30. https://doi.org/10.1007/s43938-026-00133-z.
15. Khunnonkwao P., Thitiprasert S., Jaiaue P., Khumrangsee K., Cheirsilp B., Thongchul N. The outlooks and key challenges in renewable biomass feedstock utilization for value-added platform chemical via bioprocesses // Heliyon. 2024. Vol. 10, no. 10. e30830. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e30830.
16. Matsakas L., Raghavendran V., Yakimenko O., Persson G., Olsson E., Rova U., Olsson L., Christakopoulos P. Lignin-first biomass fractionation using a hybrid organosolv–steam explosion pretreatment technology improves the saccharification and fermentability of spruce biomass // Bioresource Technology. 2019. Vol. 273. Pp. 521–528. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.11.055.
17. Xu X., Wang K., Zhou Y., Lai C., Zhang D., Xia C. Comparison of organosolv pretreatment of masson pine with different solvents in promoting delignification and enzymatic hydrolysis efficiency // Fuel. 2023. Vol. 338. 127361. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.127361.

18. Хакимова Ф.Х., Синяев К.А., Жуланова А.Е., Хакимов Р.Р. Пероксидная делигнификация целлюлозы // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. 2016. №4. С. 70–79. https://doi.org/10.15593/2224-9400/2016.4.05.
19. Пен Р.З., Шапиро И.Л., Каретникова Н.В. Пероксидная целлюлоза из пшеничной соломы // Химия растительного сырья. 2022. №2. С. 299–305. https://doi.org/10.14258/jcprm.20220210688.
20. Пен Р.З., Шапиро И.Л., Амбросович Ю.А., Пен В.Р. Окислительная делигнификация пшеничной соломы: пероксидная варка и щелочная экстракция // Хвойные бореальной зоны. 2022. Т. 40, №2. С. 168–172.
21. Судакова И.Г., Гарынцева Н.В., Чудина А.И., Кузнецов Б.Н. Экспериментальная и математическая оптимизация процесса пероксидной делигнификации древесины лиственницы в присутствии катализатора $MnSO_4$ // Катализ в промышленности. 2020. Т. 20, №1. С. 67–75. https://doi.org/10.18412/1816-0387-2020-1-67-75.
22. Szabó L., Milotskyi R., Sharma G., Takahashi K. Cellulose processing in ionic liquids from a materials science perspective: turning a versatile biopolymer into the cornerstone of our sustainable future // Green Chemistry. 2023. Vol. 25, no. 14. Pp. 5338–5389. https://doi.org/10.1039/D2GC04730F.
23. Haron G.A.S., Mahmood H., Noh M.H., Alam M.Z., Moniruzzaman M. Ionic liquids as a sustainable platform for nanocellulose processing from bioresources: overview and current status // ACS Sustainable Chemistry & Engineering. 2021. Vol. 9, no. 3. Pp. 1008–1034. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c06409.
24. Tang Z., Lin X., Yu M., Mondal A.K., Wu H. Recent advances in TEMPO-oxidized cellulose nanofibers: Oxidation mechanism, characterization, properties and applications // International Journal of Biological Macromolecules. 2024. Vol. 259(1). 129081. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.129081.
25. Wang S., Zhang L., Khan K.A., Ullah M.W., Fan Y., Wang Z. Deep eutectic solvents as a 'multifunctional operating platform' for nanocellulose production and modification: A review on sustainable composite advancements // Materials Science and Engineering: R: Reports. 2025. Vol. 165. 101025. https://doi.org/10.1016/j.mser.2025.101025.
26. El Hage P., El Hage R., Segovia C., Liao J., Mendoza-Castillo D.I., Brosse N., Vahabi H. Steam Explosion Processing of Bast Fibers: Effects on Fiber Structure and Performance in Textile and Composites Applications // Fibers. 2026. Vol. 14, no. 7. 79. https://doi.org/10.3390/fib14070079.
27. Tanpichai S., Witayakran S., Boonmahitthisud A. Study on structural and thermal properties of cellulose microfibers isolated from pineapple leaves using steam explosion // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2019. Vol. 7, no. 1. 102836. https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.102836.
28. Abdel Hakim A., Mourad R. Nanocellulose and its polymer composites: preparation, characterization, and applications // Russian Chemical Reviews. 2023. Vol. 92, no. 4. RCR5076. https://doi.org/10.57634/rcr5076.
29. Wan Ishak W.H., Ahmad I., Ramli S., Mohd Amin M.C.I. Gamma irradiation-assisted synthesis of cellulose nanocrystal-reinforced gelatin hydrogels // Nanomaterials. 2018. Vol. 8, no. 10. 749. https://doi.org/10.3390/nano8100749.
30. Haldar D., Purkait M.K. Lignocellulosic conversion into value-added products: A review // Process Biochemistry. 2020. Vol. 89. Pp. 110–133. https://doi.org/10.1016/j.procbio.2019.10.001.
31. Ogura I., Moriyama A., Iizumi Y., Endoh S., Fujita K., Horie M., Okazaki T., Matsuzawa T. Effect of gamma irradiation on cellulose nanofibers // Journal of Wood Science. 2025. Vol. 71. 37. https://doi.org/10.1186/s10086-025-02215-y.
32. Dash C., Bisoyi D.K. Microwave radiation technique for the isolation of Sunn Hemp natural fiber in the application of material processing // Journal of Non-Crystalline Solids. 2022. Vol. 591. 121706. https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2022.121706.
33. Tong X., He Z., Zheng L., Pande H., Ni Y. Enzymatic treatment processes for the production of cellulose nanomaterials: A review // Carbohydrate Polymers. 2023. Vol. 299. 120199. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.120199.
34. Seck I. Chemical and Biological Delignification of Biomass: A Review // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2023. Vol. 62, no. 33. Pp. 12969–12988. https://doi.org/10.1021/acs.iecr.3c01231.
35. Sun S. et al. Oxidative pretreatment of lignocellulosic biomass for enzymatic hydrolysis: Progress and challenges // Bioresource Technology. 2023. Vol. 367. 128208. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128208.
36. Levanič J., Svedström K., Liljeström V. et al. Cellulose fiber and nanofibril characteristics in a continuous sono-assisted process for production of TEMPO-oxidized nanofibrillated cellulose // Cellulose. 2022. Vol. 29, no. 17. Pp. 9121–9142. https://doi.org/10.1007/s10570-022-04845-7.
37. Park J., Lee D., Hwang K., Lee J., Lee Tai-J., Kim Y., Kim H. J., Lee J., Youe Won-J., Chun Sang-J., Gwon J. Effect of catalyst and oxidant concentrations in a TEMPO oxidation system on the production of cellulose nanofibers // RSC Adv. 2024. Vol. 14, no. 45. Pp. 32852–32862. https://doi.org/10.1039/d4ra04948a.
38. Mołoń M., Szlachcikowska D., Stępień K., Kielar P., Galiniak S. Two faces of TEMPO (2,2,6,6-tetramethylpiperidinyl-1-oxyl) - An antioxidant or a toxin? // Biochimica et biophysica acta. Molecular cell research. 2023. Vol. 1870, no. 2. 119412. https://doi.org/10.1016/j.bbamcr.2022.119412.
39. Xu H., Sanchez-Salvador J.L., Blanco A., Balea A., Negro C. Recycling of TEMPO-mediated oxidation medium and its effect on nanocellulose properties // Carbohydrate Polymers. 2023. Vol. 319. 121168, https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.121168.
40. Shaohuang C., Ning Y., Mei C., Penkova A., Renliang H., Wei Q., Zhimin H., Rongxin S. Integrating direct reuse and extraction recovery of TEMPO for production of cellulose nanofibrils // Carbohydrate Polymers. 2022. Vol. 294. 119803. https://doi.org/ 10.1016/j.carbpol.2022.119803.
41. Ortega-Córdova R., Blanco-Gutiérrez G., Quiñonez-Angulo P., Flores-Ruiz F.J., Sánchez-Carrillo K., Armando Soltero-Martínez J.F., Pérez-García M.G., Juarez-Moreno K., Mota-Morales J.D. From Colloids to Hydrogels:

Concentration-Dependent Cytocompatibility of Carboxylated Cellulose Nanocrystals Prepared via Deep Eutectic Solvents // Langmuir. 2026. Vol. 42, no. 24. Pp. 17658–17671. https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.6c02021.
42. Mariño M.A., Paredes M.G., Martinez N., Millan D., Tapia R.A., Ruiz D., Isaacs M., Pavez P. A ternary eutectic solvent for cellulose nanocrystal production: exploring the recyclability and pre-pilot scale-up // Frontiers in chemistry. 2023. Vol. 11. 1233889. https://doi.org/10.3389/fchem.2023.1233889.
43. Gladysheva E.K. Liquid Hot Water and Steam Explosion Pretreatment Methods for Cellulosic Raw Materials: A Review // Polymers. 2025. Vol. 17, no. 13. Pp. 1783–1799. https://doi.org/10.3390/polym17131783.
44. Shi J., Lu Y., Zhang Y., Cai L., Shi S.Q. Effect of thermal treatment with water, H_2SO_4 and NaOH aqueous solution on color, cell wall and chemical structure of poplar wood // Scientific Reports. 2018. Vol. 8. 17735. https://doi.org/10.1038/s41598-018-36086-9.
45. da Silva M.B., de Lima Araújo R.R., Almeida R.M.R.G., de Farias Silva C.E., Brandão M.R.P., de Menezes Bernardino T., Lôbo L.N., Duarte de Freitas J.M., Duarte de Freitas J. Evaluating Sodium Hydroxide and Hydrogen Peroxide as Chemical Treatment for Cellulose Extraction from Clitoria fairchildiana Pruning Residues // Reactions. 2025. Vol. 6, no. 4. 60. https://doi.org/10.3390/reactions6040060.
46. Mathew I., Otaraku I., Kareem S., Oji A., Ikenyiri P. Delignification of Different Lignocellulosic Biomass Using Hydrogen Peroxide and Acetic Acid (HPAC) // FMDB Transactions on Sustainable Environmental Sciences. 2024. Vol. 1. Pp. 19–30. https://doi.org/10.69888/FTSESS.2024.000145.
47. Barbash V., Yaschenko O. Preparation, properties and use of nanocellulose from non-wood plant materials // Novel Nanomaterials. IntechOpen, 2020. https://doi.org/10.5772/intechopen.94272.
48. Islam M.T., Alam M.M., Patrucco A., Montarsolo A., Zoccola M. Preparation of nanocellulose: A review // AATCC Journal of Research. 2014. Vol. 1, no. 5. Pp. 17–23. https://doi.org/10.14504/ajr.1.5.3.
49. Jonoobi M., Oladi R., Davoudpour Y., Oksman K., Dufresne A., Hamzeh Y., Davoodi R. Different preparation methods and properties of nanostructured cellulose from various natural resources and residues: a review // Cellulose. 2015. Vol. 22, no. 2. Pp. 935–969. https://doi.org/10.1007/s10570-015-0551-0.
50. Baez C., Considine J., Rowlands R. Influence of drying restraint on physical and mechanical properties of nanofibrillated cellulose films // Cellulose. 2014. Vol. 21, no. 1. Pp. 347–356. https://doi.org/10.1007/s10570-013-0159-1.
51. Klemm D., Kramer F., Moritz S., Lindström T., Ankerfors M., Gray D., Dorris A. Nanocelluloses: a new family of nature-based materials // Angewandte Chemie International Edition. 2011. Vol. 50, no. 24. Pp. 5438–5466. https://doi.org/10.1002/anie.201001273.
52. Venkateshaiah A. et al. Nanocellulose: Sustainability and Preparation // Handbook of Nanocelluloses: Classification, Properties, Fabrication, and Emerging Applications. Cham: Springer International Publishing, 2021. Pp. 1–23. https://doi.org/10.1007/978-3-030-89621-8_3.
53. Nair S.S., Zhu J.Y., Deng Y., Ragauskas A.J. Characterization of cellulose nanofibrillation by micro grinding // Journal of Nanoparticle Research. 2014. Vol. 16, no. 4. 2349. https://doi.org/10.1007/s11051-014-2349-7.
54. Spence K.L., Venditti R.A., Rojas O.J., Habibi Y., Pawlak J.J. A comparative study of energy consumption and physical properties of microfibrillated cellulose produced by different processing methods // Cellulose. 2011. Vol. 18, no. 4. Pp. 1097–1111. https://doi.org/10.1007/s10570-011-9533-z.
55. Abdul Khalil H.P.S., Davoudpour Y., Islam M.N., Mustapha A., Sudesh K., Dungani R., Jawaid M. Production and modification of nanofibrillated cellulose using various mechanical processes: A review // Carbohydrate Polymers. 2014. Vol. 99. Pp. 649–665. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.08.069.
56. Hoo D.Y., Low Z.L., Low D.Y.S., Tang S.Y., Manickam S., Tan K.W., Ban Z.H. Ultrasonic cavitation: An effective cleaner and greener intensification technology in the extraction and surface modification of nanocellulose // Ultrasonics Sonochemistry. 2022. Vol. 90. 106176. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.106176.
57. Sofiah A.G.N., Pasupuleti J., Samykano M., Kadirgama K., Koh S.P., Tiong S.K., Pandey A.K., Yaw C.T., Natarajan S.K. Harnessing Nature's Ingenuity: A Comprehensive Exploration of Nanocellulose from Production to Cutting-Edge Applications in Engineering and Sciences // Polymers. 2023. Vol. 15, no. 14. 3044. https://doi.org/10.3390/polym15143044.
58. Messiry M. Morphological analysis of micro-fibrillated cellulose from different raw materials for fiber plastic composites // Journal of Textile Science & Engineering. 2014. Vol. 4, no. 5. 1000166. https://doi.org/10.4172/2165-8064.1000166
59. Onkarappa H.S., Prakash G.K., Pujar G.H., Rajith Kumar C.R., Latha M.S., Betageri V.S. Hevea brasiliensis mediated synthesis of nanocellulose: effect of preparation methods on morphology and properties // International Journal of Biological Macromolecules. 2020. Vol. 160. Pp. 1021–1028. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.05.188.
60. Fu C., Li Y., Lin Y., Zhang W., Yang J., Liu Y., He Z., Hong Y., Shen J., Ni Y., Huang L. Crucial role of fiber swelling in microfibrillated cellulose extraction via ball milling // Industrial Crops and Products. 2024. Vol. 218. 118899. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118899.
61. Nechyporchuk O., Belgacem M.N., Bras J. Production of cellulose nanofibrils: A review of recent advances // Industrial Crops and Products. 2016. Vol. 93. Pp. 2–25. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.02.016.
62. de Lima T.A.M., et al. Extraction and characterization of microfibrillated cellulose (MFC) from Rhododendron ponticum isolated using cryocrush pre-treatment and its potential for mycelium cultivation // International Journal of Biological Macromolecules. 2024. Vol. 279(3). 135284. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.135284.

63. Sharifi Zamani E., Ahadian H., Maloney T. Twin-roll forming, a novel method for producing high-consistency microfibrillated cellulosic films // Cellulose. 2022. Vol. 29, no. 18. Pp. 9627–9636. https://doi.org/10.1007/s10570-022-04884-0.
64. Wei Y., Zhou M., Yao A., Zhu P. Preparation of microfibrillated cellulose from wood pulp through carbamate modification and colloid milling // Applied Sciences. 2020. Vol. 10, no. 6. 1977. https://doi.org/10.3390/app10061977.
65. Hernández-Becerra E., Osorio M., Marín D., Gañán P., Pereira M., Builes D., Castro C. Isolation of cellulose microfibers and nanofibers by mechanical fibrillation in a water-free solvent // Cellulose. 2023. Vol. 30, no. 8. Pp. 4905–4923. https://doi.org/10.1007/s10570-023-05162-3.
66. Khadraoui M., Khiari R., Bergaoui L., Mauret E. Production of lignin-containing cellulose nanofibrils by the combination of different mechanical processes // Industrial Crops and Products. 2022. Vol. 183. 114991. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.114991.
67. Lee H., Mani S. Mechanical pretreatment of cellulose pulp to produce cellulose nanofibrils using a dry grinding method // Industrial Crops and Products. 2017. Vol. 104. Pp. 179–187. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.04.044.
68. Yokota S., Tagawa S., Kondo T. Facile surface modification of amphiphilic cellulose nanofibrils prepared by aqueous counter collision // Carbohydrate Polymers. 2021. Vol. 255. 117342. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117342.
69. Tsuji T., Tsuboi K., Yokota S., Tagawa S., Kondo T. Characterization of an amphiphilic Janus-type surface in the cellulose nanofibril prepared by aqueous counter collision // Biomacromolecules. 2021. Vol. 22, no. 2. Pp. 620–628. https://doi.org/10.1021/acs.biomac.0c01464.
70. Vera-Loor A. et al. Oxidation treatments to convert paper-grade Eucalyptus kraft pulp into microfibrillated cellulose // Carbohydrate Polymers. 2022. Vol. 296. 119946. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119946.
71. Raouf M., Sjöstrand B., Swerin A. Hardwood-derived Cellulose Nanofibrils and MicroFibrillated Cellulose via Fenton Pretreatment: Issues of Fiber Fragmentation and Coating Performance // BioResources. 2026. Vol. 21, no. 1. Pp. 397–419. https://doi.org/10.15376/biores.21.1.397-419.
72. Zhao T., Chen J., Liu J., Yang K., Peng X., Xiao G., Liu W., Xu C., Du X., Yang X., Sun D. Preparation of microfibrillated cellulose by in situ and one step method using calcium hydroxide as swelling and grinding agent // Nordic Pulp & Paper Research Journal. 2024. Vol. 39, no. 3. Pp. 501–516. https://doi.org/10.1515/npprj-2024-0001.
73. Kuznetsov B.N., Sudakova I.G., Garyntseva N.V., Skripnikov A.M., Pestunov A.V., Gnidan E.V. Birch wood biorefinery into microcrystalline, microfibrillated, and nanocrystalline celluloses, xylose, and adsorbents // Wood Science and Technology. 2023. Vol. 57, no. 1. Pp. 173–196. https://doi.org/10.1007/s00226-022-01443-5.
74. Kandhola G., Djioleu A., Rajan K., Labbé N., Sakon J., Carrier D.J., Kim J.W. Maximizing production of cellulose nanocrystals and nanofibers from pre-extracted loblolly pine kraft pulp: a response surface approach // Bioresources and Bioprocessing. 2020. Vol. 7. 19. https://doi.org/10.1186/s40643-020-00302-0.
75. Mnasri A., Khiari R., Dhaouadi H., Halila S., Mauret E. Acidic and alkaline deep eutectic solvents pre-treatment to produce high aspect ratio microfibrillated cellulose // Bioresource Technology. 2023. Vol. 368. 128312. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128312.
76. Kuznetsov B.N., Chudina A.I., Kazachenko A.S., Fetisova O.Y., Borovkova V.S., Vorobyev S.A., Karacharov A.A., Gnidan E.V., Mazurova E.V., Skripnikov A.M., Taran O.P. Fractionation of aspen wood to produce microcrystalline, microfibrillated and nanofibrillated celluloses, xylan and ethanollignin // Polymers. 2023. Vol. 15. 2671. https://doi.org/10.3390/polym15122671.
77. Яценкова О.В., Скрипников А.М., Карачаров А.А., Мазурова Е.В., Воробьев С.А., Кузнецов Б.Н. Новый метод получения микрофибриллированной целлюлозы из древесины ели // Химия растительного сырья. 2020. №1. С. 303–314. https://doi.org/10.14258/jcprm.2020016105.
78. Jonasson S., Bünder A., Niittylä T., Oksman K. Isolation and characterization of cellulose nanofibers from aspen wood using derivatizing and non-derivatizing pretreatments // Cellulose. 2020. Vol. 27. Pp. 185–203. https://doi.org/10.1007/s10570-019-02754-w.
79. Чудина А.И., Фетисова О.Ю., Карачаров А.А., Воробьев С.А., Мазурова Е.В., Кузнецов Б.Н. Физико-химические характеристики и свойства пленок, синтезированных на основе нанофибриллированной целлюлозы сосны и гемицеллюлоз древесины сосны и березы // Журнал Сибирского федерального университета. Химия. 2024. Т. 17, №4. С. 553–564.
80. Thakur V., Guleria A., Kumar S., Sharma S., Singh K. Recent advances in nanocellulose processing, functionalization and applications: a review // Materials Advances. 2021. Vol. 2, no. 6. Pp. 1872–1895. https://doi.org/10.1039/D1MA00049G.
81. Pitcher M.L., Koshani R., Sheikhi A. Chemical structure–property relationships in nanocelluloses // Journal of Polymer Science. 2024. Vol. 62, no. 1. Pp. 9–31. https://doi.org/10.1002/pol.20230558.
82. Tortorella S., Vetri Buratti V., Maturi M., Sambri L., Comes Franchini M., Locatelli E. Surface-Modified Nanocellulose for Application in Biomedical Engineering and Nanomedicine: A Review // International Journal of Nanomedicine. 2020. Vol. 15. Pp. 9909–9937. https://doi.org/10.2147/IJN.S266103.
83. Liu C., Li B., Du H., Lv D., Zhang Y., Yu G., Mu X., Peng H. Properties of nanocellulose isolated from corncob residue using sulfuric acid, formic acid, oxidative and mechanical methods // Carbohydrate Polymers. 2016. Vol. 151. Pp. 716–724. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.06.025.
84. Lee H.V., Hamid S.B.A., Zain S.K. Conversion of lignocellulosic biomass to nanocellulose: structure and chemical process // The Scientific World Journal. 2014. Vol. 2014. 631013. https://doi.org/10.1155/2014/631013.

85. Almeida R.O., Maloney T.C., Gamelas J.A.F. Production of functionalized nanocelluloses from different sources using deep eutectic solvents and their applications // Industrial Crops and Products. 2023. Vol. 199. 116583. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116583.
86. Barbash V.A., Yashchenko O.V. Preparation and application of nanocellulose from non wood plants to improve the quality of paper and cardboard // Applied Nanoscience. 2020. Vol. 10. Pp. 2705–2716. https://doi.org/10.1007/s13204-019-01242-8.
87. Susanto A., Fahma F., Jayanegara A., et al. Effect of isolation method on the properties of nanocellulose: a meta-analysis // Cellulose. 2022. Vol. 29. Pp. 7211–7224. https://doi.org/10.1007/s10570-022-04696-2.
88. Mazega A., Lehrhofer A.F., Aguado R.J. et al. Key insights into TEMPO-mediated oxidation of cellulose: influence of starting material // Cellulose. 2025. Vol. 32. Pp. 5227–5246. https://doi.org/10.1007/s10570-025-06477-z.
89. Gu B.-J., Wang J., Wolcott M.P., Ganjyal G.M. Increased sugar yield from pre-milled Douglas-fir forest residuals with lower energy consumption by using planetary ball milling // Bioresource Technology. 2018. Vol. 251. Pp. 93–98. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.11.103.
90. Zimmermann T., Bordeanu N., Strub E. Properties of nanofibrillated cellulose from different raw materials and its reinforcement potential // Carbohydrate Polymers. 2010. Vol. 79, no. 4. Pp. 1086–1093. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2009.10.045.
91. Mattonai M., Pawcenis D., Del Seppia S., Lojewska J., Ribechini E. Effect of ball-milling on crystallinity index, degree of polymerization and thermal stability of cellulose // Bioresource Technology. 2018. Vol. 270. Pp. 270–277. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.09.029.
92. Duan Y. Cellulose // The Handbook of Paper-Based Sensors and Devices: Volume 1: Materials and Technologies. Cham: Springer Nature Switzerland, 2025. Pp. 73–97. https://doi.org/10.1007/978-3-031-91080-7_4.
93. Isogai A., Saito T., Fukuzumi H. TEMPO-oxidized cellulose nanofibers // Nanoscale. 2011. Vol. 3, no. 1. Pp. 71–85. https://doi.org/10.1039/C0NR00583E.
94. Naderi A., Lindström T., Sundström J., Pettersson T. Microfluidized carboxymethyl cellulose modified pulp: a nanofibrillated cellulose system with some attractive properties // Cellulose. 2015. Vol. 22, no. 2. Pp. 1159–1173. https://doi.org/10.1007/s10570-015-0577-3.
95. Antony Jose S., Cowan N., Davidson M., Godina G., Smith I., Xin J., Menezes P.L. A Comprehensive Review on Cellulose Nanofibers, Nanomaterials, and Composites: Manufacturing, Properties, and Applications // Nanomaterials. 2025. Vol. 15. 356. https://doi.org/10.3390/nano15050356.
96. Wang S., Jiang F., Xu X., Kuang Y., Fu K., Hitz E., Hu L. Super-strong, super-stiff macrofibers with aligned, long bacterial cellulose nanofibers // Advanced Materials. 2017. Vol. 29, no. 35. 1702498. https://doi.org/10.1002/adma.201702498.
97. Mittal N., Ansari F., Gowda V.K., Brouzet C., Chen P., Larsson P.T., Roth S.V., Lundell F., Wågberg L., Kotov N.A., Söderberg L.D. Multiscale control of nanocellulose assembly: transferring remarkable nanoscale fibril mechanics to macroscale fibers // ACS Nano. 2018. Vol. 12, no. 7. Pp. 6378–6388. https://doi.org/10.1021/acsnano.8b01084.
98. Zhang D., Fang Z., Hu S., Qiu X. High aspect ratio cellulose nanofibrils with low crystallinity for strong and tough films // Carbohydrate Polymers. 2024. Vol. 346. 122630. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.122630.
99. Burchett A., Callahan N., Casini T., De Los Reyes A., Dornhoefer J., Antony Jose S., Menezes P.L. Nanocellulose Materials: Processing, Properties, and Application // Nanomaterials. 2026. Vol. 16. 435. https://doi.org/10.3390/nano16070435.
100. Li T., Chen C., Brozena A.H., Zhu J.Y., Xu L., Driemeier C., Dai J., Ong O.J., Chen Y., Wang Y., Wang Y., Hu L. Developing fibrillated cellulose as a sustainable technological material // Nature. 2021. Vol. 590, no. 7844. Pp. 47–56. https://doi.org/10.1038/s41586-020-03167-7.
101. Zambrano-Mite L.F., Villasana Y., Bejarano M.L., Luciani C., Niebieskikwiat D., Álvarez W., Cueva F.D., Aguilera-Pesantes D., Orejuela-Escobar M.L. Optimization of microfibrillated cellulose isolation from cocoa pod husk via mild oxalic acid hydrolysis: A response surface methodology approach // Heliyon. 2023. Vol. 9, no. 6. e17258. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17258.
102. Ilyas R.A., Sapuan S.M., Ishak M.R., Zainudin E.S. Sugar palm nanofibrillated cellulose (Arenga pinnata (Wurmb.) Merr): Effect of cycles on their yield, physic-chemical, morphological and thermal behavior // International Journal of Biological Macromolecules. 2019. Vol. 123. Pp. 379–388. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.11.124.
103. Benselfelt T., Kummer N., Nordenström M., Fall A.B., Nyström G., Wågberg L. The Colloidal Properties of Nanocellulose // ChemSusChem. 2023. Vol. 16, no. 8. e202201955. https://doi.org/10.1002/cssc.202201955.
104. Bhakar K., Nemiwal M., Kumar D. Potential Differences between Cellulose Nanocrystal, Microfibrillated Cellulose, and Hairy Cellulose Nanocrystalloid in Water Purification // Nanocellulose and Its Composites for Water Treatment Applications. CRC Press, 2021. Pp. 63–76. https://doi.org/10.1201/9781003042556.
105. Rashid A.B. et al. Synthesis, properties, applications, and future prospective of cellulose nanocrystals // Polymers. 2023. Vol. 15, no. 20. 4070. https://doi.org/10.3390/polym15204070.
106. Tiwari A., Sanjog J. Nanocellulose from Agricultural waste – A Concise Insight Into Extraction and Applications // Oriental Journal of Chemistry. 2023. Vol. 39, no. 5. Pp. 1279–1287. https://doi.org/10.13005/ojc/390522.
107. Simão C.D. et al. Optical and mechanical properties of nanofibrillated cellulose: Toward a robust platform for next-generation green technologies // Carbohydrate Polymers. 2015. Vol. 126. Pp. 40–46. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.03.032.

108. Kopač T., Krajnc M., Ručigaj A. A rheological study of cationic micro-and nanofibrillated cellulose: quaternization reaction optimization and fibril characteristic effects // Cellulose. 2022. Vol. 29, no. 3. Pp. 1435–1450. https://doi.org/10.1007/s10570-021-04365-w.
109. Michelin M. et al. Nanocellulose production: exploring the enzymatic route and residues of pulp and paper industry // Molecules. 2020. Vol. 25, no. 15. 3411. https://doi.org/10.3390/molecules25153411.
110. Hubbe M.A., Tayeb P., Joyce M., Tyagi P., Kehoe M., Dimic-Misic K., Pal L. Rheology of Nanocellulose-rich Aqueous Suspensions: a Review // BioResources. 2017. Vol. 12, no. 4. Pp. 9556–9661. https://doi.org/10.15376/BIORES.12.4.HUBBE.
111. Quennouz N., Hashmi S.M., Choi H.S., Kim J.W., Osuji C.O. Rheology of cellulose nanofibrils in the presence of surfactants // Soft Matter. 2016. Vol. 12, no. 1. Pp. 157–164. https://doi.org/10.1039/C5SM01803J.
112. Afshang M. et al. Characterizing dynamic gelation of thermoresponsive microfibrillated cellulose // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2025. Vol. 64, no. 10. Pp. 5417–5427. https://doi.org/10.1021/acs.iecr.4c04653.
113. Aulin C., Gällstedt M., Lindström T. Oxygen and oil barrier properties of microfibrillated cellulose films and coatings // Cellulose. 2010. Vol. 17, no. 3. Pp. 559–574. https://doi.org/10.1007/s10570-009-9393-y.
114. Belbekhouche S., Bras J., Siqueira G., Chappey C., Lebrun L., Khelifi B., Marais S., Dufresne A. Water sorption behavior and gas barrier properties of cellulose whiskers and microfibrils films // Carbohydrate Polymers. 2011. Vol. 83, no. 4. Pp. 1740–1748. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.10.036.
115. Spence K.L., Venditti R.A., Rojas O.J., Habibi Y., Pawlak J.J. The effect of chemical composition on microfibrillar cellulose films from wood pulps: Water interactions and physical properties for packaging applications // Cellulose. 2010. Vol. 17, no. 4. Pp. 835–848. https://doi.org/10.1007/s10570-010-9424-8.
116. Minelli M., Baschetti M.G., Doghieri F., Ankerfors M., Lindström T., Siró I., Plackett D. Investigation of mass transport properties of microfibrillated cellulose (MFC) films // Journal of Membrane Science. 2010. Vol. 358, no. 1-2. Pp. 67–75. https://doi.org/10.1016/j.memsci.2010.04.030.
117. Tibolla H., Pelissari F.M., Martins J.T., Lanzoni E.M., Vicente A.A., Menegalli F.C., Cunha R.L. Banana starch nanocomposite with cellulose nanofibers isolated from banana peel by enzymatic treatment: In vitro cytotoxicity assessment // Carbohydrate Polymers. 2019. Vol. 207. Pp. 169–179. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.11.079.
118. Solala I., Iglesias M.C., Peresin M.S. On the potential of lignin-containing cellulose nanofibrils (LCNFs): a review on properties and applications // Cellulose. 2020. Vol. 27, no. 4. Pp. 1853–1877. https://doi.org/10.1007/s10570-019-02899-8.
119. Huang P. et al. Structure and properties of cellulose nanofibrils // Nanocellulose: From Fundamentals to Advanced Materials. 2019. Pp. 53–80. https://doi.org/10.1002/9783527807437.ch3.
120. Rashki S., Shakour N., Yousefi Z., Rezaei M., Homayoonfal M., Khabazian E., Atyabi F., Aslanbeigi F., Safaei Lapavandani R., Mazaheri S., Hamblin M.R., Mirzaei H. Cellulose-Based Nanofibril Composite Materials as a New Approach to Fight Bacterial Infections // Frontiers in Bioengineering and Biotechnology. 2021. Vol. 9. 732461. https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.732461.
121. Littunen K., et al. Synthesis of cationized nanofibrillated cellulose and its antimicrobial properties // European Polymer Journal. 2016. Vol. 75. Pp. 116–124. https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2015.12.008.
122. Chen Y., Lin S., Han W., Chen Y., Zhang Q., Hu L., Zhang W., Huang J. Antibacterial and flame-retardant TEMPO-oxidized cellulose nanofibrils/chitosan-based sponge for efficient PM2.5 capture // Carbohydrate Polymers. 2025. Vol. 361. 123642. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2025.123642.

Поступила в редакцию 18 сентября 2026 г.

После переработки 9 октября 2026 г.

Принята к публикации 13 октября 2026 г.

Gnidan E.V.[1,2], Kuznetsov B.N.[1,2], Taran O.P.[1,2]* MICROFIBRILLATED AND NANOFIBRILLATED CELLULOSE FROM WOOD BIOMASS: PREPARATION, STRUCTURE AND PROPERTIES (REVIEW)

[1] Institute of Chemistry and Chemical Technology SB RAS, Krasnoyarsk Scientific Center SB RAS, Akademgorodok, 50/24, Krasnoyarsk, 660036, Russia, gnidan.ev@icct.krasn.ru

[2] Siberian Federal University, ave. Svobodny, 79, Krasnoyarsk, 660041, Russia

The review is devoted to systematizing current data on the synthesis, structure, and properties of microfibrillated and nanofibrillated celluloses obtained from wood raw material. The methods for producing microfibrillated and nanofibrillated celluloses from wood raw materials are multi-stage and include processes of pre‑treatment of the raw material, delignification, bleaching, and mechanical fibrillation. The main factor determining the energy efficiency of the technology and the quality of the resulting nanocelluloses is the selection of the optimal method for pretreating the raw material, which makes it possible to reduce the specific energy consumption during subsequent mechanical fibrillation. Among the chemical pretreatment methods, the most promising are peroxide delignification, TEMPO oxidation, treatment with organic acids, and deep eutectic solvents. For mechanical fibrillation of pretreated wood raw material, methods such as high‑pressure homogenization, disc milling, extrusion, ultrasonic treatment, and cryomilling are used. A comparative analysis was conducted of the physicochemical characteristics of nanocelluloses (morphology, crystallinity, degree of polymerization, mechanical, thermal, rheological, barrier, and optical properties) depending on the method of their production.

Keywords: microfibrillated cellulose, nanofibrillated cellulose, wood raw material, production methods, pretreatment, mechanical fibrillation, structure, properties, dependence of properties on the production method.

For citing: Gnidan E.V., Kuznetsov B.N., Taran O.P. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2026, no. 4, Online First. (in Russ.). https://doi.org/10.14258/jcprm.20260420255.

References

1. Kim J.-H., Shim B.S., Kim H.S., Lee Y.-J., Min S.-K., Jang D., Abas Z., Kim J. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 2015, vol. 2, no. 2, pp. 197–213. https://doi.org/10.1007/s40684-015-0024-9.
2. Phanthong P., Reubroycharoen P., Hao X., Xu G., Abudula A., Guan G. *Carbon Resources Conversion*, 2018, vol. 1, no. 1, pp. 32–43. https://doi.org/10.1016/j.crcon.2018.05.004.
3. Thomas B., Raj M.C., Athira K.B., Rubiyah M.H., Joy J., Moores A., Drisko G.L., Sanchez C. *Chemical Reviews*, 2018, vol. 118, no. 24, pp. 11575–11625. https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.7b00627.
4. Osong S.H., Norgren S., Engstrand P. *Cellulose*, 2016, vol. 23, no. 1, pp. 93–123. https://doi.org/10.1007/s10570-015-0798-5.
5. Chinga-Carrasco G. *Nanoscale Research Letters*, 2011, vol. 6, no. 1, 417. https://doi.org/10.1186/1556-276X-6-417.
6. Kalia S., Boufi S., Celli A., Kango S. *Colloid and Polymer Science*, 2014, vol. 292, no. 1, pp. 5–31. https://doi.org/10.1007/s00396-013-3112-9.
7. Ibarra D., Martín-Sampedro R., Wicklein B., Jiménez-López L., Eugenio M.E. *Applied Sciences*, 2021, vol. 11, no. 14, 6445. https://doi.org/10.3390/app11146445.
8. Xue H. et al. *Journal of Polymer Materials*, 2025, vol. 42, no. 2, pp. 379–409. https://doi.org/10.32604/jpm.2025.066695.
9. Lendewig M., Forfora N., Marquez R., Enriquez-Medina I., Franco J., Cordoba Y., Urdaneta F., Morizet-Davis J., Frazier R., Pawlak J., Venditti R., Jameel H., Gonzalez R. *Progress in Materials Science*, 2026, vol. 162, 101731. https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2026.101731.
10. Turbak A.F., Snyder F.W., Sandberg K.R. *Journal of Applied Polymer Science: Applied Polymer Symposium*, 1983, vol. 37, no. 9, pp. 815–827.
11. Mishra R.K., Sabu A., Tiwari S.K. *Journal of Saudi Chemical Society*, 2018, vol. 22, no. 8, pp. 949–978. https://doi.org/10.1016/j.jscs.2018.02.005.
12. Wang L., Li K., Copenhaver K., Mackay S., Lamm M.E., Zhao X., Dixon B., Wang J., Han Y., Neivandt D., Johnson D.A., Walker C.C., Ozcan S., Gardner D.J. *Biomacromolecules*, 2021, vol. 22, no. 10, pp. 4037–4059. https://doi.org/10.1021/acs.biomac.1c00640.
13. Ventura-Cruz S., Tecante A. *Food Hydrocolloids*, 2021, vol. 118, 106771. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106771.
14. Liu M., Tsui T.-H., Zhang L., Jurišić V., Liu R. *Discover Chemical Engineering*, 2026, vol. 6, 30. https://doi.org/10.1007/s43938-026-00133-z.
15. Khunnonkwao P., Thitiprasert S., Jaiaue P., Khumrangsee K., Cheirsilp B., Thongchul N. *Heliyon*, 2024, vol. 10, no. 10, e30830. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e30830.
16. Matsakas L., Raghavendran V., Yakimenko O., Persson G., Olsson E., Rova U., Olsson L., Christakopoulos P. *Bioresource Technology*, 2019, vol. 273, pp. 521–528. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.11.055.
17. Xu X., Wang K., Zhou Y., Lai C., Zhang D., Xia C. *Fuel*, 2023, vol. 338, 127361. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.127361.

* Corresponding author.

18. Khakimova F.Kh., Sinyayev K.A., Zhulanova A.Ye., Khakimov R.R. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Khimicheskaya tekhnologiya i biotekhnologiya*, 2016, no. 4, pp. 70–79. https://doi.org/10.15593/2224-9400/2016.4.05. (in Russ.).
19. Pen R.Z., Shapiro I.L., Karetnikova N.V. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2022, no. 2, pp. 299–305. https://doi.org/10.14258/jcprm.20220210688. (in Russ.).
20. Pen R.Z., Shapiro I.L., Ambrosovich Yu.A., Pen V.R. *Khvoynyye boreal'noy zony*, 2022, vol. 40, no. 2, pp. 168–172. (in Russ.).
21. Sudakova I.G., Garyntseva N.V., Chudina A.I., Kuznetsov B.N. *Kataliz v promyshlennosti*, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 67–75. https://doi.org/10.18412/1816-0387-2020-1-67-75. (in Russ.).
22. Szabó L., Milotskyi R., Sharma G., Takahashi K. *Green Chemistry*, 2023, vol. 25, no. 14, pp. 5338–5389. https://doi.org/10.1039/D2GC04730F.
23. Haron G.A.S., Mahmood H., Noh M.H., Alam M.Z., Moniruzzaman M. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2021, vol. 9, no. 3, pp. 1008–1034. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c06409.
24. Tang Z., Lin X., Yu M., Mondal A.K., Wu H. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, vol. 259(1), 129081. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.129081.
25. Wang S., Zhang L., Khan K.A., Ullah M.W., Fan Y., Wang Z. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 2025, vol. 165, 101025. https://doi.org/10.1016/j.mser.2025.101025.
26. El Hage P., El Hage R., Segovia C., Liao J., Mendoza-Castillo D.I., Brosse N., Vahabi H. *Fibers*, 2026, vol. 14, no. 7, 79. https://doi.org/10.3390/fib14070079.
27. Tanpichai S., Witayakran S., Boonmahitthisud A. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2019, vol. 7, no. 1, 102836. https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.102836.
28. Abdel Hakim A., Mourad R. *Russian Chemical Reviews*, 2023, vol. 92, no. 4, RCR5076. https://doi.org/10.57634/rcr5076.
29. Wan Ishak W.H., Ahmad I., Ramli S., Mohd Amin M.C.I. *Nanomaterials*, 2018, vol. 8, no. 10, 749. https://doi.org/10.3390/nano8100749.
30. Haldar D., Purkait M.K. *Process Biochemistry*, 2020, vol. 89, pp. 110–133. https://doi.org/10.1016/j.procbio.2019.10.001.
31. Ogura I., Moriyama A., Iizumi Y., Endoh S., Fujita K., Horie M., Okazaki T., Matsuzawa T. *Journal of Wood Science*, 2025, vol. 71, 37. https://doi.org/10.1186/s10086-025-02215-y.
32. Dash C., Bisoyi D.K. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2022, vol. 591, 121706. https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2022.121706.
33. Tong X., He Z., Zheng L., Pande H., Ni Y. *Carbohydrate Polymers*, 2023, vol. 299, 120199. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.120199.
34. Seck I. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2023, vol. 62, no. 33, pp. 12969–12988. https://doi.org/10.1021/acs.iecr.3c01231.
35. Sun S. et al. *Bioresource Technology*, 2023, vol. 367, 128208. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128208.
36. Levanič J., Svedström K., Liljeström V. et al. *Cellulose*, 2022, vol. 29, no. 17, pp. 9121–9142. https://doi.org/10.1007/s10570-022-04845-7.
37. Park J., Lee D., Hwang K., Lee J., Lee Tai-J., Kim Y., Kim H. J., Lee J., Youe Won-J., Chun Sang-J., Gwon J. *RSC Adv*., 2024, vol. 14, no. 45, pp. 32852–32862. https://doi.org/10.1039/d4ra04948a.
38. Mołoń M., Szlachcikowska D., Stępień K., Kielar P., Galiniak S. *Biochimica et biophysica acta. Molecular cell research*, 2023, vol. 1870, no. 2, 119412. https://doi.org/10.1016/j.bbamcr.2022.119412.
39. Xu H., Sanchez-Salvador J.L., Blanco A., Balea A., Negro C. *Carbohydrate Polymers*, 2023, vol. 319, 121168, https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.121168.
40. Shaohuang C., Ning Y., Mei C., Penkova A., Renliang H., Wei Q., Zhimin H., Rongxin S. *Carbohydrate Polymers*, 2022, vol. 294, 119803. https://doi.org/ 10.1016/j.carbpol.2022.119803.
41. Ortega-Córdova R., Blanco-Gutiérrez G., Quiñonez-Angulo P., Flores-Ruiz F.J., Sánchez-Carrillo K., Armando Soltero-Martínez J.F., Pérez-García M.G., Juarez-Moreno K., Mota-Morales J.D. *Langmuir*, 2026, vol. 42, no. 24, pp. 17658–17671. https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.6c02021.
42. Mariño M.A., Paredes M.G., Martinez N., Millan D., Tapia R.A., Ruiz D., Isaacs M., Pavez P. *Frontiers in chemistry*, 2023, vol. 11, 1233889. https://doi.org/10.3389/fchem.2023.1233889.
43. Gladysheva E.K. *Polymers*, 2025, vol. 17, no. 13, pp. 1783–1799. https://doi.org/10.3390/polym17131783.
44. Shi J., Lu Y., Zhang Y., Cai L., Shi S.Q. *Scientific Reports*, 2018, vol. 8, 17735. https://doi.org/10.1038/s41598-018-36086-9.
45. da Silva M.B., de Lima Araújo R.R., Almeida R.M.R.G., de Farias Silva C.E., Brandão M.R.P., de Menezes Bernardino T., Lôbo L.N., Duarte de Freitas J.M., Duarte de Freitas J. *Reactions*, 2025, vol. 6, no. 4, 60. https://doi.org/10.3390/reactions6040060.
46. Mathew I., Otaraku I., Kareem S., Oji A., Ikenyiri P. *FMDB Transactions on Sustainable Environmental Sciences*, 2024, vol. 1, pp. 19–30. https://doi.org/10.69888/FTSESS.2024.000145.
47. Barbash V., Yaschenko O. *Novel Nanomaterials*. IntechOpen, 2020. https://doi.org/10.5772/intechopen.94272.
48. Islam M.T., Alam M.M., Patrucco A., Montarsolo A., Zoccola M. *AATCC Journal of Research*, 2014, vol. 1, no. 5, pp. 17–23. https://doi.org/10.14504/ajr.1.5.3.

49. Jonoobi M., Oladi R., Davoudpour Y., Oksman K., Dufresne A., Hamzeh Y., Davoodi R. *Cellulose*, 2015, vol. 22, no. 2, pp. 935–969. https://doi.org/10.1007/s10570-015-0551-0.
50. Baez C., Considine J., Rowlands R. *Cellulose*, 2014, vol. 21, no. 1, pp. 347–356. https://doi.org/10.1007/s10570-013-0159-1.
51. Klemm D., Kramer F., Moritz S., Lindström T., Ankerfors M., Gray D., Dorris A. *Angewandte Chemie International Edition*, 2011, vol. 50, no. 24, pp. 5438–5466. https://doi.org/10.1002/anie.201001273.
52. Venkateshaiah A. et al. *Handbook of Nanocelluloses: Classification, Properties, Fabrication, and Emerging Applications*. Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 1–23. https://doi.org/10.1007/978-3-030-89621-8_3.
53. Nair S.S., Zhu J.Y., Deng Y., Ragauskas A.J. *Journal of Nanoparticle Research*, 2014, vol. 16, no. 4, 2349. https://doi.org/10.1007/s11051-014-2349-7.
54. Spence K.L., Venditti R.A., Rojas O.J., Habibi Y., Pawlak J.J. *Cellulose*, 2011, vol. 18, no. 4, pp. 1097–1111. https://doi.org/10.1007/s10570-011-9533-z.
55. Abdul Khalil H.P.S., Davoudpour Y., Islam M.N., Mustapha A., Sudesh K., Dungani R., Jawaid M. *Carbohydrate Polymers*, 2014, vol. 99, pp. 649–665. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.08.069.
56. Hoo D.Y., Low Z.L., Low D.Y.S., Tang S.Y., Manickam S., Tan K.W., Ban Z.H. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2022, vol. 90, 106176. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.106176.
57. Sofiah A.G.N., Pasupuleti J., Samykano M., Kadirgama K., Koh S.P., Tiong S.K., Pandey A.K., Yaw C.T., Natarajan S.K. *Polymers*, 2023, vol. 15, no. 14, 3044. https://doi.org/10.3390/polym15143044.
58. Messiry M. *Journal of Textile Science & Engineering*, 2014, vol. 4, no. 5, 1000166. https://doi.org/10.4172/2165-8064.1000166
59. Onkarappa H.S., Prakash G.K., Pujar G.H., Rajith Kumar C.R., Latha M.S., Betageri V.S. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, vol. 160, pp. 1021–1028. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.05.188.
60. Fu C., Li Y., Lin Y., Zhang W., Yang J., Liu Y., He Z., Hong Y., Shen J., Ni Y., Huang L. *Industrial Crops and Products*, 2024, vol. 218, 118899. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118899.
61. Nechyporchuk O., Belgacem M.N., Bras J. *Industrial Crops and Products*, 2016, vol. 93, pp. 2–25. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.02.016.
62. de Lima T.A.M. et al. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, vol. 279(3), 135284. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.135284.
63. Sharifi Zamani E., Ahadian H., Maloney T. *Cellulose*, 2022, vol. 29, no. 18, pp. 9627–9636. https://doi.org/10.1007/s10570-022-04884-0.
64. Wei Y., Zhou M., Yao A., Zhu P. *Applied Sciences*, 2020, vol. 10, no. 6, 1977. https://doi.org/10.3390/app10061977.
65. Hernández-Becerra E., Osorio M., Marín D., Gañán P., Pereira M., Builes D., Castro C. *Cellulose*, 2023, vol. 30, no. 8, pp. 4905–4923. https://doi.org/10.1007/s10570-023-05162-3.
66. Khadraoui M., Khiari R., Bergaoui L., Mauret E. *Industrial Crops and Products*, 2022, vol. 183, 114991. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.114991.
67. Lee H., Mani S. *Industrial Crops and Products*, 2017, vol. 104, pp. 179–187. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.04.044.
68. Yokota S., Tagawa S., Kondo T. *Carbohydrate Polymers*, 2021, vol. 255, 117342. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117342.
69. Tsuji T., Tsuboi K., Yokota S., Tagawa S., Kondo T. *Biomacromolecules*, 2021, vol. 22, no. 2, pp. 620–628. https://doi.org/10.1021/acs.biomac.0c01464.
70. Vera-Loor A. et al. *Carbohydrate Polymers*, 2022, vol. 296, 119946. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119946.
71. Raouf M., Sjöstrand B., Swerin A. *BioResources*, 2026, vol. 21, no. 1, pp. 397–419. https://doi.org/10.15376/biores.21.1.397-419.
72. Zhao T., Chen J., Liu J., Yang K., Peng X., Xiao G., Liu W., Xu C., Du X., Yang X., Sun D. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 2024, vol. 39, no. 3, pp. 501–516. https://doi.org/10.1515/npprj-2024-0001.
73. Kuznetsov B.N., Sudakova I.G., Garyntseva N.V., Skripnikov A.M., Pestunov A.V., Gnidan E.V. *Wood Science and Technology*, 2023, vol. 57, no. 1, pp. 173–196. https://doi.org/10.1007/s00226-022-01443-5.
74. Kandhola G., Djioleu A., Rajan K., Labbé N., Sakon J., Carrier D.J., Kim J.W. *Bioresources and Bioprocessing*, 2020, vol. 7, 19. https://doi.org/10.1186/s40643-020-00302-0.
75. Mnasri A., Khiari R., Dhaouadi H., Halila S., Mauret E. *Bioresource Technology*, 2023, vol. 368, 128312. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128312.
76. Kuznetsov B.N., Chudina A.I., Kazachenko A.S., Fetisova O.Y., Borovkova V.S., Vorobyev S.A., Karacharov A.A., Gnidan E.V., Mazurova E.V., Skripnikov A.M., Taran O.P. *Polymers*, 2023, vol. 15, 2671. https://doi.org/10.3390/polym15122671.
77. Yatsenkova O.V., Skripnikov A.M., Karacharov A.A., Mazurova Ye.V., Vorob'yev S.A., Kuznetsov B.N. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2020, no. 1, pp. 303–314. https://doi.org/10.14258/jcprm.2020016105. (in Russ.).
78. Jonasson S., Bünder A., Niittylä T., Oksman K. *Cellulose*, 2020, vol. 27, pp. 185–203. https://doi.org/10.1007/s10570-019-02754-w.
79. Chudina A.I., Fetisova O.Yu., Karacharov A.A., Vorob'yev S.A., Mazurova Ye.V., Kuznetsov B.N. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Khimiya*, 2024, vol. 17, no. 4, pp. 553–564. (in Russ.).
80. Thakur V., Guleria A., Kumar S., Sharma S., Singh K. *Materials Advances*, 2021, vol. 2, no. 6, pp. 1872–1895. https://doi.org/10.1039/D1MA00049G.

81. Pitcher M.L., Koshani R., Sheikhi A. *Journal of Polymer Science*, 2024, vol. 62, no. 1, pp. 9–31. https://doi.org/10.1002/pol.20230558.
82. Tortorella S., Vetri Buratti V., Maturi M., Sambri L., Comes Franchini M., Locatelli E. *International Journal of Nanomedicine*, 2020, vol. 15, pp. 9909–9937. https://doi.org/10.2147/IJN.S266103.
83. Liu C., Li B., Du H., Lv D., Zhang Y., Yu G., Mu X., Peng H. *Carbohydrate Polymers*, 2016, vol. 151, pp. 716–724. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.06.025.
84. Lee H.V., Hamid S.B.A., Zain S.K. *The Scientific World Journal*, 2014, vol. 2014, 631013. https://doi.org/10.1155/2014/631013.
85. Almeida R.O., Maloney T.C., Gamelas J.A.F. *Industrial Crops and Products*, 2023, vol. 199, 116583. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116583.
86. Barbash V.A., Yashchenko O.V. *Applied Nanoscience*, 2020, vol. 10, pp. 2705–2716. https://doi.org/10.1007/s13204-019-01242-8.
87. Susanto A., Fahma F., Jayanegara A. et al. *Cellulose*, 2022, vol. 29, pp. 7211–7224. https://doi.org/10.1007/s10570-022-04696-2.
88. Mazega A., Lehrhofer A.F., Aguado R.J. et al. *Cellulose*, 2025, vol. 32, pp. 5227–5246. https://doi.org/10.1007/s10570-025-06477-z.
89. Gu B.-J., Wang J., Wolcott M.P., Ganjyal G.M. *Bioresource Technology*, 2018, vol. 251, pp. 93–98. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.11.103.
90. Zimmermann T., Bordeanu N., Strub E. *Carbohydrate Polymers*, 2010, vol. 79, no. 4, pp. 1086–1093. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2009.10.045.
91. Mattonai M., Pawcenis D., Del Seppia S., Lojewska J., Ribechini E. *Bioresource Technology*, 2018, vol. 270, pp. 270–277. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.09.029.
92. Duan Y. *The Handbook of Paper-Based Sensors and Devices: Volume 1: Materials and Technologies*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2025, pp. 73–97. https://doi.org/10.1007/978-3-031-91080-7_4.
93. Isogai A., Saito T., Fukuzumi H. *Nanoscale*, 2011, vol. 3, no. 1, pp. 71–85. https://doi.org/10.1039/C0NR00583E.
94. Naderi A., Lindström T., Sundström J., Pettersson T. *Cellulose*, 2015, vol. 22, no. 2, pp. 1159–1173. https://doi.org/10.1007/s10570-015-0577-3.
95. Antony Jose S., Cowan N., Davidson M., Godina G., Smith I., Xin J., Menezes P.L. *Nanomaterials*, 2025, vol. 15, 356. https://doi.org/10.3390/nano15050356.
96. Wang S., Jiang F., Xu X., Kuang Y., Fu K., Hitz E., Hu L. *Advanced Materials*, 2017, vol. 29, no. 35, 1702498. https://doi.org/10.1002/adma.201702498.
97. Mittal N., Ansari F., Gowda V.K., Brouzet C., Chen P., Larsson P.T., Roth S.V., Lundell F., Wågberg L., Kotov N.A., Söderberg L.D. *ACS Nano*, 2018, vol. 12, no. 7, pp. 6378–6388. https://doi.org/10.1021/acsnano.8b01084.
98. Zhang D., Fang Z., Hu S., Qiu X. *Carbohydrate Polymers*, 2024, vol. 346, 122630. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.122630.
99. Burchett A., Callahan N., Casini T., De Los Reyes A., Dornhoefer J., Antony Jose S., Menezes P.L. *Nanomaterials*, 2026, vol. 16, 435. https://doi.org/10.3390/nano16070435.
100. Li T., Chen C., Brozena A.H., Zhu J.Y., Xu L., Driemeier C., Dai J., Ong O.J., Chen Y., Wang Y., Wang Y., Hu L. *Nature*, 2021, vol. 590, no. 7844, pp. 47–56. https://doi.org/10.1038/s41586-020-03167-7.
101. Zambrano-Mite L.F., Villasana Y., Bejarano M.L., Luciani C., Niebieskikwiat D., Álvarez W., Cueva F.D., Aguilera-Pesantes D., Orejuela-Escobar M.L. *Heliyon*, 2023, vol. 9, no. 6, e17258. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17258.
102. Ilyas R.A., Sapuan S.M., Ishak M.R., Zainudin E.S. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, vol. 123, pp. 379–388. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.11.124.
103. Benselfelt T., Kummer N., Nordenström M., Fall A.B., Nyström G., Wågberg L. *ChemSusChem*, 2023, vol. 16, no. 8, e202201955. https://doi.org/10.1002/cssc.202201955.
104. Bhakar K., Nemiwal M., Kumar D. *Nanocellulose and Its Composites for Water Treatment Applications*. CRC Press, 2021, pp. 63–76. https://doi.org/10.1201/9781003042556.
105. Rashid A.B. et al. *Polymers*, 2023, vol. 15, no. 20, 4070. https://doi.org/10.3390/polym15204070.
106. Tiwari A., Sanjog J. *Oriental Journal of Chemistry*, 2023, vol. 39, no. 5, pp. 1279–1287. https://doi.org/10.13005/ojc/390522.
107. Simão C.D. et al. *Carbohydrate Polymers*, 2015, vol. 126, pp. 40–46. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.03.032.
108. Kopač T., Krajnc M., Ručigaj A. *Cellulose*, 2022, vol. 29, no. 3, pp. 1435–1450. https://doi.org/10.1007/s10570-021-04365-w.
109. Michelin M. et al. *Molecules*, 2020, vol. 25, no. 15, 3411. https://doi.org/10.3390/molecules25153411.
110. Hubbe M.A., Tayeb P., Joyce M., Tyagi P., Kehoe M., Dimic-Misic K., Pal L. *BioResources*, 2017, vol. 12, no. 4, pp. 9556–9661. https://doi.org/10.15376/BIORES.12.4.HUBBE.
111. Quennouz N., Hashmi S.M., Choi H.S., Kim J.W., Osuji C.O. *Soft Matter*., 2016, vol. 12, no. 1, pp. 157–164. https://doi.org/10.1039/C5SM01803J.
112. Afshang M. et al. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2025, vol. 64, no. 10, pp. 5417–5427. https://doi.org/10.1021/acs.iecr.4c04653.
113. Aulin C., Gällstedt M., Lindström T. *Cellulose*, 2010, vol. 17, no. 3, pp. 559–574. https://doi.org/10.1007/s10570-009-9393-y.

114. Belbekhouche S., Bras J., Siqueira G., Chappey C., Lebrun L., Khelifi B., Marais S., Dufresne A. *Carbohydrate Polymers*, 2011, vol. 83, no. 4, pp. 1740–1748. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.10.036.
115. Spence K.L., Venditti R.A., Rojas O.J., Habibi Y., Pawlak J.J. *Cellulose*, 2010, vol. 17, no. 4, pp. 835–848. https://doi.org/10.1007/s10570-010-9424-8.
116. Minelli M., Baschetti M.G., Doghieri F., Ankerfors M., Lindström T., Siró I., Plackett D. *Journal of Membrane Science*, 2010, vol. 358, no. 1-2, pp. 67–75. https://doi.org/10.1016/j.memsci.2010.04.030.
117. Tibolla H., Pelissari F.M., Martins J.T., Lanzoni E.M., Vicente A.A., Menegalli F.C., Cunha R.L. *Carbohydrate Polymers*, 2019, vol. 207, pp. 169–179. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.11.079.
118. Solala I., Iglesias M.C., Peresin M.S. *Cellulose*, 2020, vol. 27, no. 4, pp. 1853–1877. https://doi.org/10.1007/s10570-019-02899-8.
119. Huang P. et al. *Nanocellulose: From Fundamentals to Advanced Materials*, 2019, pp. 53–80. https://doi.org/10.1002/9783527807437.ch3.
120. Rashki S., Shakour N., Yousefi Z., Rezaei M., Homayoonfal M., Khabazian E., Atyabi F., Aslanbeigi F., Safaei Lapavandani R., Mazaheri S., Hamblin M.R., Mirzaei H. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2021, vol. 9, 732461. https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.732461.
121. Littunen K. et al. *European Polymer Journal*, 2016, vol. 75, pp. 116–124. https://doi.org/10.1016/j.europolymj.2015.12.008.
122. Chen Y., Lin S., Han W., Chen Y., Zhang Q., Hu L., Zhang W., Huang J. *Carbohydrate Polymers*, 2025, vol. 361, 123642. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2025.123642.

Received September 18, 2026

Revised October 9, 2026

Accepted October 13, 2026

Сведения об авторах

Гнидан Елена Васильевна – кандидат педагогических наук, научный сотрудник лаборатории физико-химических методов исследования материалов, доцент кафедры органической и аналитической химии, gnidan.ev@icct.krasn.ru

Кузнецов Борис Николаевич – доктор химических наук, руководитель научного направления, профессор кафедры органической и аналитической химии, bnk-icct@yandex.ru

Таран Оксана Павловна – доктор химических наук, заведующая лабораторией каталитических превращений возобновляемых ресурсов, заведующая кафедрой органической и аналитической химии, taran.op@icct.krasn.ru

Information about authors

Gnidan Elena Vasilievna – Candidate of Pedagogical Sciences, researcher at the Laboratory of Physical and Chemical Methods for Materials Research, Associate Professor of the Department of Organic and Analytical Chemistry, gnidan.ev@icct.krasn.ru

Kuznetsov Boris Nikolaevich – Doctor of Chemical Sciences, head of the scientific direction, professor of the Department of Organic and Analytical Chemistry, bnk-icct@yandex.ru

Taran Oksana Pavlovna – Doctor of Chemical Sciences, Head of the Laboratory of Catalytic Transformations of Renewable Resources, Head of the Department of Organic and Analytical Chemistry, taran.op@icct.krasn.ru