

Научная статья
УДК 661.728.7
EDN: CFKVMO
DOI: 10.21285/achb.1031



Получение чистой целлюлозы из мискантуса с предельно высокой степенью полимеризации

Ю.А. Гисматулина*, П.А. Горбатова***✉, В.В. Будаева*, В.Н. Золотухин*

*Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН, Бийск, Российская Федерация

**Бийский технологический институт (филиал) Алтайского государственного
технического университета им. И.И. Ползунова, Бийск, Российская Федерация

Аннотация. В связи с постоянным расширением областей применения нитратов целлюлозы требуются новые прекурсоры – высоковязкие образцы целлюлозы. Данное направление обусловлено тем, что высокая вязкость целлюлозы обеспечивает возможность получения целого ряда марок нитратов целлюлозы, востребованных различными областями применения в экономике и медицине. Мискантус гигантский является дешевым многолетним сырьем с высоким потенциалом для химической трансформации. В ходе проведенного исследования из образцов мискантуса гигантского с массовой долей целлюлозы 49,4–52,8%, выращенных в Московской, Калужской и Пензенской областях Российской Федерации, выделены образцы целлюлозы со степенью полимеризации в диапазоне 1600–1890. Выход образцов целлюлозы составил 34% в пересчете на сырье или 64% в пересчете на нативную целлюлозу. Полученные образцы целлюлозы характеризуются высоким качеством: массовая доля α -целлюлозы достигает 93,8–96,6%, при этом сумма нецеллюлозных компонентов составляет 2,90–4,22%. Сравнение полученных результатов с опубликованными данными о качестве целлюлозы из различных источников целлюлозосодержащего сырья указывает на лидирующую позицию мискантуса гигантского по степени полимеризации целлюлозы. Таким образом, установлена возможность получения из стеблей мискантуса гигантского качественной целлюлозы с предельно высокой степенью полимеризации 1890. Высокие значения массовой доли α -целлюлозы и степени полимеризации целлюлозы из отечественного мискантуса гигантского могут гарантировать необходимые прочность, термостабильность, пленкообразующую способность и сродство к белкам нитратов целлюлозы, причем аналогично импортной хлопковой целлюлозе.

Ключевые слова: мискантус гигантский, целлюлоза, получение целлюлозы, степень полимеризации, азотно-кислый способ, нитраты целлюлозы

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-13-00107-П, <https://rscf.ru/project/22-13-00107/>.

Для цитирования: Гисматулина Ю.А., Горбатова П.А., Будаева В.В., Золотухин В.Н. Получение чистой целлюлозы из мискантуса с предельно высокой степенью полимеризации // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2026. Т. 16. N 2. С. 198–209. DOI: 10.21285/achb.1031. EDN: CFKVMO.

Pure cellulose with an ultra-high degree of polymerization from miscanthus

Yulia A. Gismatulina*, Polina A. Gorbatova*.*.*✉,
Vera V. Budaeva*, Vladimir N. Zolotukhin*

*Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Biysk, Russia

**Biysk Technological Institute, Polzunov Altai State Technical University, Biysk, Russia

Abstract. The expanding applications of cellulose nitrates require new precursors, such as high-viscosity cellulose materials. High viscosity enables the production of a wide range of cellulose nitrates grades demanded by various sectors in industry and medicine. In this regard, giant miscanthus is considered a low-cost perennial feedstock with high potential for chemical conversion. In this study, cellulose samples with a degree of polymerization of 1600–1890 were isolated from miscanthus (cellulose mass fraction of 49.4–52.8%) cultivated in the Moscow, Kaluga, and Penza regions of the Russian Federation. The yield of cellulose samples was 34% relative to the raw material (64% of native cellulose). The resulting cellulose samples exhibited high quality, with the mass fraction of α -cellulose reaching 93.8–96.6% and the non-cellulosic components accounting for 2.90–4.22%. A comparison with published data on the quality of cellulose from various raw materials indicates that giant miscanthus holds a leading position in terms of the degree of polymerization. Thus, this study demonstrates the feasibility of producing high-quality cellulose with an ultra-high degree of polymerization (up to 1890) from the stems of giant miscanthus. The high α -cellulose content and degree of polymerization of cellulose from domestic giant miscanthus ensure the necessary strength, thermal stability, film-forming ability, and protein affinity of cellulose nitrates, comparable to those of imported cotton cellulose.

Keywords: giant miscanthus, cellulose, cellulose production, degree of polymerization, nitric acid pulping, cellulose nitrates

Funding. The research was carried out at the expense of The Russian Science Foundation financially supported this research (grant no. 22-13-00107-P, <https://rscf.ru/project/22-13-00107/>).

For citation: Gismatulina Yu.A., Gorbatova P.A., Budaeva V.V., Zolotukhin V.N. Pure cellulose with an ultra-high degree of polymerization from miscanthus. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2026;16(2): 198-209. (In Russian). DOI: 10.21285/achb.1031. EDN: CFKVMO.

ВВЕДЕНИЕ

Исследования по переработке растительной биомассы в востребованные и экономически обоснованные продукты в настоящий момент находятся на пике популярности [1–3]. Данный факт обусловлен многочисленными причинами, главенствующая из которых – снижение зависимости от древесных ресурсов с целью сохранения лесов [3].

Мискантус гигантский – это многолетняя злаковая культура, которая является перспективным растительным ресурсом для переработки в ценные продукты ввиду высокой урожайности (до 40 т/га в год) на протяжении 15–25 лет при выращивании на маргинальных землях даже в условиях резко континентального климата [4, 5].

В последние годы мискантус гигантский привлекает особый интерес как популярное промышленное растение с огромным потенциалом для химической и биотехнологической трансформаций [2, 3, 6].

Актуальность приобретают исследования по выделению прекурсоров нитратов целлюлозы из альтернативного целлюлозосодержащего сырья с последующим синтезом нитратов целлюлозы и сравнению экспери-

ментальных нитратов целлюлозы с традиционными хлопковыми нитратами целлюлозы, низковязкими нитратами целлюлозы из микрокристаллической целлюлозы [7, 8] и высоковязкими нитратами бактериальной целлюлозы [9, 10].

Востребованность нитратов целлюлозы в экономике, обороне и медицине обусловлена высокой растворимостью в органических растворителях, химическим сродством к ферментам, пленкообразующей способностью, высокими энергетическими характеристиками, области применения зависят от степени замещения и вязкостных характеристик [11]. Области применения нитратов целлюлозы стремительно расширяются с каждым годом, и сейчас они активно используются для производства мембран, основ для биотестов, типографских красок, компонентов пороха, повязок для открытых ран, лака и клея [12–19], что требует получения прекурсоров целлюлозы в широком диапазоне вязкости.

Есть мнение [20–22], что степень полимеризации целлюлозы является недооцененным показателем, обуславливающим высокую удерживающую способность ультрафильтрационных мембран, прочность целлюлозных

пленок, термостабильность [23] и срок службы бумажной изоляции в силовых трансформаторах.

В соответствии с опубликованными данными степень полимеризации нативной целлюлозы в зарубежном мискантусе находится на уровне 1695–2000 [24, 25]. Известно, что любые методы выделения чистой целлюлозы из растительного сырья сопровождается резким снижением степени полимеризации исходной целлюлозы, поэтому мискантус ввиду его достаточно высокой нативной вязкости можно рассматривать в качестве успешного вида сырья. Однако данные о степени полимеризации целлюлозы из мискантуса гигантского в научной литературе практически отсутствует. Исключение составляют единичные сведения, в частности работа [26], в которой из мискантуса гигантского авторы выделили целлюлозу со степенью полимеризации 1649.

Таким образом, ввиду высокого потенциала мискантуса гигантского для химической трансформации, в частности в прекурсор нитратов целлюлозы, и постоянно растущей потребности в нитратах целлюлозы сформулирована цель исследования – получение чистой целлюлозы из мискантуса с предельно высокой степенью полимеризации.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Объектом исследования данной работы являлся мискантус гигантский различных мест произрастания (Московская, Калужская области и Пензенская область Российской Федерации [4, 5]) и различных лет вегетации (от 3-летнего до 11-летнего возраста). При регистрации образцы сырья были пронумерованы согласно возрасту вегетации. Исследовалось целое растение мискантуса гигантского и стебель отдельно. Массовая доля листа в целом растении была крайне мала, не более 25%.

Мискантус (целое растение или стебель) для определения компонентного состава измельчали до размера

фракции 10 мм и сушили на воздухе до влажности не более 8%, далее были использованы стандартные аналитические методы, так называемые «мокрые», основанные на фракционировании сырья и наиболее часто используемые для целлюлозосодержащей биомассы [27].

Определение массовой доли целлюлозы методом Кюршнера (в пересчете на абсолютно сухое сырье (а.с.с.)), массовой доли кислотонерастворимого лигнина (а.с.с.), массовой доли пентозанов (а.с.с.), массовой доли экстрактивных веществ – жировосковой фракции (экстрагент – дихлорметан, а.с.с.), зольности (а.с.с.) проводили по стандартным методикам анализа растительного сырья¹.

Целлюлоза из мискантуса гигантского была выделена азотнокислым способом, заключающимся в последовательной обработке сырья разбавленными растворами азотной кислоты и гидроксида натрия при атмосферном давлении [28, 29].

Массовые доли α-целлюлозы, кислотонерастворимого лигнина, золы, пентозанов и степень полимеризации целлюлозы были определены по стандартным методикам анализа целлюлозы¹.

Экспериментальные результаты получены в трехкратной повторности, статистически обработаны с применением стандартных методов с помощью программы Microsoft Office Excel 2019 и являются достоверными.

Работа выполнена с использованием приборной базы Бийского регионального центра коллективного пользования СО РАН (Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН, г. Бийск, Россия).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В табл. 1 представлен компонентный состав образцов мискантуса гигантского и целлюлозы, полученной из них. Результаты работы свидетельствуют о перспективности мискантуса гигантского в качестве целлюлозосодер-

Таблица 1. Компонентный состав образцов мискантуса гигантского и целлюлозы, полученной из них

Table 1. Compositional profile of *Miscanthus × giganteus* samples and cellulose isolated from them

Наименование образца и указание региона	Массовая доля*, %					Степень полимеризации
	целлюлозы**	лигнина***	пентозанов	жировосковой фракции	золы	
М 3, Калужская обл.	49,4	20,58	22,27	0,50	1,45	-
Ц М 3	94,6	1,36	1,90	-	0,54	1600
М 5, Московская обл.	50,2	19,46	21,16	0,48	1,63	-
Ц М 5	95,6	0,53	2,45	-	0,12	1800
М 6, Московская обл.	51,2	21,27	18,80	0,54	1,60	-
Ц М 6	96,6	0,19	2,68	-	0,03	1760
М 8, Пензенская обл.	50,1	24,99	21,72	0,74	0,96	-
Ц М 8	93,8	0,95	3,25	-	0,44	1700
М 9 стебель, Пензенская обл.	52,8	26,07	19,18	0,51	2,06	-
Ц М 9 стебель	94,0	0,47	3,40	-	0,35	1890

Примечание. М – мискантус гигантский; Ц – азотнокислая целлюлоза; * – в пересчете на абсолютно сухое сырье (а.с.с.);

** – для сырья – массовая доля целлюлозы по Кюршнеру, для целлюлозы – массовая доля α-целлюлозы;

*** – кислотонерастворимый лигнин.

¹ Оболенская А.В., Ельницкая З.П., Леонович А.А. Лабораторные работы по химии древесины и целлюлозы: учеб. пособие. М.: Экология, 1991. 320 с.

жащего сырья: массовая доля целлюлозы по Кюршнеру находится в пределах 49,4–52,8%.

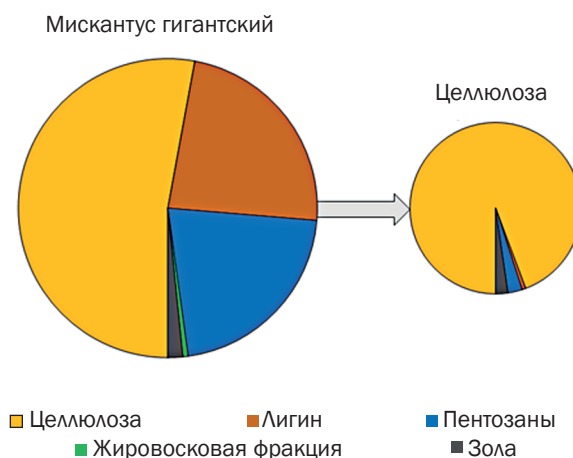
Выход образцов целлюлозы в пересчете на исходное сырье составил 32–36%, в среднем 34%, что соответствует в пересчете на целлюлозу в сырье 64%. При этом делигнификация обеспечивает возрастание массовой доли целлюлозы с 49,4–52,8% в сырье до 93,8–96,6% в готовой целлюлозе. Выделенные образцы целлюлозы из мискантуса гигантского характеризуются высоким качеством, поскольку сумма нецеллюлозных компонентов снижается с 42,21–48,41% в сырье до 2,90–4,22% в целлюлозе с высокими значениями степени полимеризации.

Несмотря на то что мискантус в целом и конкретно мискантус гигантский широко известен в мире в качестве источника целлюлозы, в мировой научной литературе отсутствуют опубликованные данные о показателях качества в полном объеме, что не позволяет сравнить наши экспериментальные данные с аналогичными. Как правило, контролируются другие показатели: длина и толщина волокна, жесткость, формуемость, другие показатели бумагообразующей способности [30–32]. В таких случаях массовая доля α -целлюлозы не превышает 86% [30–32]. В то же время к целлюлозе для химической модификации предъявляются очень высокие требования: наименьшее содержание нецеллюлозных компонентов, высокое содержание α -целлюлозы (более 92%), высокие значения степеней полимеризации или показателей вязкости, высокая смачиваемость [33]. Кроме того, в качестве требования к прекурзору предъявляется такой показатель, как массовая доля непронитрованного остатка после 5 мин нитрации не более 6% (норма первого сорта для целлюлозы из волокна льна-долгунца) и не более 9% (норма второго сорта для той же целлюлозы) [34].

Несмотря на многообразие методов извлечения целлюлозы [35, 36], азотнокислый способ применяется в мировой практике достаточно редко в связи со сложностями использования разбавленных растворов азотной кислоты при температуре, близкой к 100 °С, то есть в условиях кипения при атмосферном давлении. Уникальность воздействия азотной кислоты на недревесные лигнин и гемицеллюлозы заключается в легкости окислительного нитрования лигнина с последующим частичным растворением и гидролиза гемицеллюлоз до растворимых в воде продуктов [29, 30, 37]. Неоспоримым преимуществом данного способа является его проведение при атмосферном давлении и в стандартном оборудовании, а также отсутствие серо- и хлорсодержащих реактивов, ограниченных в связи с экологическими требованиями [28, 29, 38]. Анализ значений степеней полимеризации целлюлозы, приведенных в табл. 1, показывает, что во всех случаях сохраняются высокие значения степеней полимеризации в диапазоне 1600–1890 при низких массовых долях суммы нецеллюлозных компонентов. Эти факты подтверждают обоснованность применения азотнокислого способа для обработки мискантуса с целью выделения высококачественной целлюлозы при максимальном сохранении ее степени полимеризации. Самое высокое значение степени полимеризации 1890 превышает степень полимеризации нативной целлюлозы мискантуса гигантского 1695 [25] на 11%, что обусловлено использованием стеблей вместо растения в целом.

В работе [24] обсуждается степень полимеризации целлюлозы мискантуса гигантского. Авторы сообщают, что в нативном мискантуса гигантском значительная доля (42%) целлюлозы имеет высокую степень полимеризации на уровне 2000, что близко с информацией из другого источника [25] – 1695. Авторы работы [24] отметили, что в процессе обработки мискантуса ионными жидкостями происходит расщепление высокомолекулярных цепей целлюлозы, которое приводит к снижению фракции целлюлозы со степенью полимеризации 2000 и значительному увеличению фракции целлюлозы со степенью полимеризации 100–2000 вплоть до 70%, что позволяет предположить, что усредненные данные значительно уступают результатам нашего исследования.

На рисунке представлена визуализация компонентных составов сырья и целлюлозы из него (средние значения), а также выхода целлюлозы.



Компонентный состав сырья и целлюлозы из него, а также выход целлюлозы

Compositional profile of the feedstock and its cellulose, and cellulose yield

Средний выход целлюлозы составил 34% в пересчете на сырье или 64% в пересчете на нативную целлюлозу. Рисунок не только отображает высокую эффективность выделения целлюлозы, в котором сырье с содержанием целлюлозы чуть больше половины превратилось в практически чистую целлюлозу, но и показывает потери нативной целлюлозы (примерно 36%), как правило ее аморфной фазы.

В табл. 2 представлены данные о степенях полимеризации образцов целлюлозы из мискантуса гигантского, полученные в ходе текущего исследования, в сравнении с данными о степенях полимеризации образцов целлюлозы из других целлюлозосодержащих источников сырья, взятыми из литературных источников. Значения степени полимеризации целлюлозы из конкретного источника приведены в степени убывания.

Данные в строках таблицы, отмеченные звездочкой, получены авторами и указывают на лидирующую позицию мискантуса гигантского по степени полимеризации целлюлозы как источника целлюлозосодержащего сырья. Как следует из представленных данных, значения степеней полимеризации образцов целлюлозы варьируются

Таблица 2. Степень полимеризации образцов целлюлозы из целлюлозосодержащих источников сырья

Table 2. Polymerization degree of cellulose samples from cellulosic raw materials

Источник целлюлозы	Степень полимеризации	Ссылка
Мискантус гигантский*	1600–1890	Данное исследование
Овсяница тростниковая	1663	
Мискантус гигантский	1649	[26]
Просо	1640	
Кострец безостый	1623	
Мискантус сахароцветковый*	1550	[38]
Плодоножки финиковой пальмы	1264	[39]
Бурые водоросли <i>Saccharina latissima</i>	1140	[40, 41]
Плодовые оболочки овса*	1040	[42]
Бурые водоросли <i>Laminaria digitata</i>	940	[40, 41]
Тростник	850–990	[43]
Эвкалипт	815–1065	
Солома пшеницы	662–908	[44]
Багасса	550–800	
Кукурузные стебли	687–703	[45]
Бурые водоросли <i>Saccharina latissima</i>	555	[46]
Лен-межеумок*	550	[47]
Пеньковая целлюлоза	460	[48]
Апельсиновая корка	344	[49]
Бурые водоросли <i>Ascophyllum nodosum</i>	330	
Бурые водоросли <i>Fucus vesiculosus</i>	180	[40, 41]
Конопляная лузга	131–291	[50]
Рисовая солома	175	
Отходы банановых растений	108	[51]
Солома пшеницы	89	[52]

Примечание. * – образцы целлюлозы выделены и их степени полимеризации определены авторами статьи.

в широком диапазоне в зависимости от вида сырья от 1663 (овсяница тростниковая [26]) до 89 (солома пшеницы [52]) и достигают только нижнего предела диапазона степени полимеризации 1600–1890 целлюлозы мискантуса гигантского.

Аналогична картина среди опубликованных данных по степеням полимеризации целлюлозы из мискантуса: авторы работы [26] получили целлюлозу из мискантуса гигантского со степенью полимеризации 1649, что соответствует нижнему пределу диапазона полученных в текущем исследовании данных – 1600–1890. В статье [53] приведены характеристические вязкости образцов целлюлозы из мискантуса гигантского, соломы пшеницы и промышленной конопли: 687, 663, 539, соответственно, что подтверждает лидирующую позицию мискантуса гигантского по вязкостным характеристикам среди альтернативных целлюлозосодержащих источников сырья.

Важно отметить, что степень полимеризации целлюлозы из мискантуса превосходит не только степень полимеризации недревесных источников целлюлозы, но и древесной целлюлозы. Так, в статье [26] приведены степени полимеризации древесной целлюлозы из сосны и березы (1294 и 1068 соответственно), в работе [54] – белой целлюлозы из лиственных пород древесины (1320), в работе [55] – хвойной целлюлозы (1350), что уступают диапазону степеней полимеризации целлюлозы из мискантуса гигантского – 1600–1890. Известно, что степень полимеризации древесной целлюлозы в бумажной изоляции силовых трансформаторов опре-

деляет срок их службы [22], изначальная степень полимеризации 1200 в процессе работы снижается до 900, критической степенью полимеризации является 250. Можно предположить, что замена древесной целлюлозы на высокомолекулярную целлюлозу мискантуса продлит эксплуатацию отечественных преобразователей энергии.

Перечисленные выше преимущества мискантуса гигантского выявляют его лидирующее положение среди видов сырья для конкретной цели – получения высоковязкой целлюлозы. Данный факт позволяет рекомендовать целлюлозу мискантуса для химической модификации, в частности для нитрования в широком диапазоне вязкости. Несмотря на то что нитрование микрокристаллической целлюлозы в настоящее время приобретает особую актуальность [7, 56–59], высокомолекулярная целлюлоза из мискантуса обеспечивает достижение желаемой термической стабильности будущих нитратов целлюлозы. В подтверждение этого факта авторы работы [23] провели сравнительное исследование поведения микрокристаллической целлюлозы и волокнистой целлюлозы в процессе этерификации и установили, что степень полимеризации является ключевым фактором термической стабильности, поскольку чем выше степень полимеризации целлюлозы, тем больше устойчивость эфиров целлюлозы к термической деградации.

При производстве фильтров высокие значения степени полимеризации целлюлозы или ее эфиров обеспечивают необходимую удерживающую способность ультрафильтрационных мембран и демонстрируют

минимальную адсорбцию белка, что особенно полезно в процессах биофармацевтической очистки [20]. В связи с этим новые отечественные мембраны из нитратов целлюлозы мискантуса могут стать более устойчивым альтернативным материалом в различных соответствующих процессах мембранного разделения, например в приложениях по разделению вирусов и белков. Необходимо учитывать прямую зависимость механических свойств пленок от степени полимеризации целлюлозы или ее эфиров [21], поэтому важно, чтобы степень полимеризации полимера обеспечила высокую прочность на разрыв пленки и длительный срок применения.

Следовательно, высокомолекулярная целлюлоза из мискантуса гигантского является востребованным прекурсором эфиров целлюлозы, в частности нитратов целлюлозы, поскольку соответствует требованиям к целлюлозе для нитрования и характеризуется высокой степенью полимеризации, что указывает на возможность получения термически стабильных нитратов целлюлозы в широком диапазоне свойств.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ компонентного состава мискантуса гигантского различных мест произрастания и различных лет вегетации показывает высокие значения массовой доли целлюлозы по Кюршнеру в диапазоне 49,4–52,8%,

что свидетельствует о целесообразности выделения целлюлозы из данного вида сырья.

Установлено, что с выходом 32–36% в пересчете на сырье, что соответствует в среднем 64% в пересчете на нативную целлюлозу, можно выделить целлюлозу с предельно высокой степенью полимеризации – 1600–1890. Целлюлоза характеризуется высоким качеством, а именно: массовая доля α -целлюлозы достигает 93,8–96,6%, при этом сумма нецеллюлозных компонентов составляет 2,90–4,22%.

Сравнение полученных результатов со сведениями о качестве целлюлозы из различных источников целлюлозосодержащего сырья указывает на лидирующую позицию мискантуса гигантского по степени полимеризации целлюлозы.

Помимо вышеуказанного благодаря высокому качеству целлюлоза из мискантуса может обеспечить не только достижение желаемой термической стабильности будущих нитратов целлюлозы, но и необходимую удерживающую способность ультрафильтрационных мембран с высокой прочностью на разрыв, что требуется в процессах биофармацевтической очистки.

Таким образом, высокая степень полимеризации целлюлозы из мискантуса гигантского позволяет использовать ее в качестве прекурсора нитратов целлюлозы в широком диапазоне вязкости аналогично эталонной хлопковой целлюлозе.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Kane J.L., Schartiger R.G., Daniels N.K., Freedman Z.B., McDonald L.M., Skousen J.G., et al. Bioenergy crop *Miscanthus x giganteus* acts as an ecosystem engineer to increase bacterial diversity and soil organic matter on marginal land // *Soil Biology and Biochemistry*. 2023. Vol. 186. P. 109178. DOI: 10.1016/j.soilbio.2023.109178.
2. Шавыркина Н.А., Гладышева Е.К., Зенкова А.А., Скиба Е.А. Биотехнологическая трансформация биомассы мискантуса гигантского в бактериальную наноцеллюлозу // *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2024. Т. 14. N 4. С. 504–513. DOI: 10.21285/achb.947. EDN: PZKEDW.
3. Yu Y., Li M., Yu M., Wang T. Comprehensive analysis of *Miscanthus* NF-YA genes reveals potential involvement in drought stress adaptation // *Plants*. 2025. Vol. 14, no. 19. P. 3100. DOI: 10.3390/plants14193100.
4. Гущина В.А., Лыкова А.С., Остробородова Н.И., Володькин А.А. Применение многоцелевой культуры *Miscanthus giganteus* в ландшафтном фитодизайне // *Нива Поволжья*. 2023. N 1. С. 1010. DOI: 10.36461/NP.2023.65.1.015. EDN: JCAVIC.
5. Гущина В.А., Лыкова А.С., Остробородова Н.И., Володькин А.А., Осипов Е.С. Оценка возможности использования мискантуса гигантского как целлюлозосодержащего сырья в лесостепи Среднего Поволжья // *Нива Поволжья*. 2024. N 3. С. 1002. DOI: 10.36461/NP.2024.71.3.007. EDN: QDCVLM.
6. Sukhikh S., Babich O., Ivanova S., Kriger O., Prosekov A., Noskova S., et al. Production of nanocellulose from miscanthus biomass // *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*. 2024. Vol. 8. P. 100412. DOI: 10.1016/j.crgsc.2024.100412.
7. Tarchoun A.F., Trache D., Abdelaziz A., Bekhouche S., Boukeciat H., Sahnoun N., et al. Making progress towards promising energetic cellulosic microcrystals developed from alternative lignocellulosic biomasses // *Journal of Energetic Materials*. 2022. Vol. 42, no. 1. P. 97–122. DOI: 10.1080/07370652.2022.2032484.
8. Poudel J., Bhattarai S., Nath N., Tanti B. An exclusive review of microcrystalline cellulose: Structure and applications, and limitations // *Materials Today Communications*. 2025. Vol. 45. P. 112247. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2025.112247.
9. Ревин В.В., Кленова Н.А., Редькин Н.А., Белоусова З.П., Тукмаков К.Н., Маркова Ю.А. [и др.]. Получение и изучение свойств композитов на основе бактериальной целлюлозы и поли-*N*, *N*-диметил-3,4-метиленпирролидиний хлорида // *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2017. Т. 7. N 1. С. 102–110. DOI: 10.21285/2227-2925-2017-7-1-102-110. EDN: YINZJF.
10. Gismatulina Y.A., Budaeva V.V. Cellulose nitrates-blended composites from bacterial and plant-based celluloses // *Polymers*. 2024. Vol. 16, no. 9. P. 1183. DOI: 10.3390/polym16091183.
11. Roslan N.J., Jamal S.H., Rashid J.I.A., Norrahim M.N.F., Khim O.K., Yunus W.M.Z.W. Response surface methodology for optimization of nitrocellulose preparation from nata de coco bacterial cellulose for propellant formulation // *Heliyon*. 2024. Vol. 10, no. 4. P. e25993. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e25993.
12. Tang R., Xie M.Y., Li M., Cao L., Feng S., Li Z., et al. Nitrocellulose membrane for paper-based biosensor // *Applied Materials Today*. 2022. Vol. 26. P. 101305. DOI: 10.1016/j.apmt.2021.101305.
13. Tang R., Xie M., Yan X., Qian L., Giesy J.P., Xie Y. A nitrocellulose/cotton fiber hybrid composite membrane for paper-based biosensor // *Cellulose*. 2023. Vol. 30. P. 6457–6469. DOI: 10.1007/s10570-023-05288-4.

14. Morris E., Pulham C.R., Morrison C.A. Structure and properties of nitrocellulose: approaching 200 years of research // RSC Advances. 2023. Vol. 13, no. 46. P. 32321–32333. DOI: 10.1039/d3ra05457h.
15. Toader G.A., Nitu F.R., Ionita M. Graphene oxide/nitrocellulose non-covalent hybrid as solid phase for oligo-DNA extraction from complex medium // Molecules. 2023. Vol. 28, no. 12. P. 4599. DOI: 10.3390/molecules28124599.
16. Tarchoun A.F., Trache D., Hamouche M.A., Abdelaziz A., Boukeciat H., Chentir I., et al. Elucidating the characteristics of a promising nitrate ester polysaccharide derived from shrimp shells and its blends with cellulose nitrate // Cellulose. 2023. Vol. 30. P. 4941–4955. DOI: 10.1007/s10570-023-05200-0.
17. Toudjine S., Boukaidid M.K., Trache D., Louafi E., Akbi H., Belkhir S., et al. Synergetic effect of nano and micro titanium dioxide on the thermal decomposition behavior and chemical stability of nitrocellulose // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2023. Vol. 148. P. 6909–6925. DOI: 10.1007/s10973-023-12185-2.
18. Gao H., Chen L., Nan F., Wang B., Cao X., Meng D., et al. The integration of civilian nitrocellulose in propellant with highly improved mechanical property and thermal stability, and study on its combustion behavior // Polymer Degradation and Stability. 2024. Vol. 221. P. 110689. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2024.110689.
19. Aljafree N.F.A., Norrrahim M.N.F., Samsuri A., Yunus W.Z.W. Advancements in nitrated nanocellulose: from structural insights to energetic applications // Cellulose. 2025. Vol. 32. P. 8047–8099. DOI: 10.1007/s10570-025-06724-3.
20. Chen M., Ren M., Zhu M., Zhang H., Chen T., Zhang Y., et al. Effect of degree of polymerization on regenerated cellulose ultrafiltration membrane performance through $ZnCl_2/AlCl_3$ aqueous solvent system // Carbohydrate Polymers. 2024. Vol. 345. P. 122557. DOI: 10.1016/j.carbpol.2024.122557.
21. Fang Z., Li B., Liu Y., Zhu J., Li G., Hou G., et al. Critical role of degree of polymerization of cellulose in super-strong nanocellulose films // Matter. 2020. Vol. 2, no. 4. P. 1000–1014. DOI: 10.1016/j.matt.2020.01.016.
22. Козлов В.К., Сабитов А.Х. Степень полимеризации бумажной изоляции силовых трансформаторов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20. N 9-10. С. 34–38. DOI: 10.30724/1998-9903-2018-20-9-10-34-38. EDN: YUSBID.
23. Tarasova E., Krasnou I., Enkhsaikhan G., Abousharabia I., Nunes C.C.Z., Karthegeesu D., et al. Reactive extrusion of cellulose esters in ionic liquid: exploring properties and performance across different cellulose types and degrees of polymerization // Cellulose. 2024. Vol. 31. P. 10223–10240. DOI: 10.1007/s10570-024-06203-1.
24. Tu W.C., Weigand L., Hummel M., Sixta H., Brandt-Talbot A., Hallett J.P. Characterisation of cellulose pulps isolated from *Miscanthus* using a low-cost acidic ionic liquid // Cellulose. 2020. Vol. 27. P. 4745–4761. DOI: 10.1007/s10570-020-03073-1.
25. Singh S.S., Lim L.-T., Manickavasagan A. Enhanced microfibrillation of *Miscanthus × giganteus* biomass by binary-enzymes pre-treatment // Industrial Crops and Products. 2022. Vol. 177. P. 114537. DOI: 10.1016/j.indcrop.2022.114537.
26. Przybysz K., Małachowska E., Martyniak D., Boruszewski P., Iłowska J., Kalinowska H., et al. Yield of pulp, dimensional properties of fibers, and properties of paper produced from fast growing trees and grasses // BioResources. 2018. Vol. 13, no. 1. P. 1372–1387. DOI: 10.15376/biores.13.1.1372-1387.
27. Rodrigues R.C.L.B., Rodrigues B.G., Canetieri E.V., Martinez E.A., Palladino F., Wisniewski A., et al. Comprehensive approach of methods for microstructural analysis and analytical tools in lignocellulosic biomass assessment – a review // Bioresource Technology. 2022. Vol. 348. P. 126627. DOI: 10.1016/j.biortech.2021.126627.
28. Скиба Е.А., Кашеева Е.И., Золотухин В.Н., Кухленко А.А. Ферментативный гидролиз высококонцентрированных субстратов, полученных из мискантуса гигантского // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2024. Т. 14. N 3. С. 394–405. DOI: 10.21285/achb.933. EDN: YXAMLK.
29. Kashcheyeva E.I., Korchagina A.A., Gismatulina Y.A., Gladysheva E.K., Budaeva V.V., Sakovich G.V. Simultaneous production of cellulose nitrates and bacterial cellulose from lignocellulose of energy crop // Polymers. 2024. Vol. 16, no. 1. P. 42. DOI: 10.3390/polym16010042.
30. Danielewicz D., Surma-Slusarska B. *Miscanthus giganteus* stalks as a potential non-wood raw material for the pulp and paper industry. Influence of pulping and beating conditions on the fibre and paper properties // Industrial Crops and Products. 2019. Vol. 141. P. 111744. DOI: 10.1016/j.indcrop.2019.111744.
31. Yang H., Zhang Y., Kato R., Rowan S.J. Preparation of cellulose nanofibers from *Miscanthus × giganteus* by ammonium persulfate oxidation // Carbohydrate Polymers. 2019. Vol. 212. P. 30–39. DOI: 10.1016/j.carbpol.2019.02.008.
32. Tsalagkas D., Börcsök Z., Pásztor Z., Gogate P., Csóka L. Assessment of the papermaking potential of processed *Miscanthus × giganteus* stalks using alkaline pre-treatment and hydrodynamic cavitation for delignification // Ultrasonics Sonochemistry. 2021. Vol. 72. P. 105462. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2021.105462.
33. Жегров Е.Ф., Милёхин Ю.М., Берковская Е.В. Химия и технология баллистических порохов, твердых ракетных и специальных топлив: монография. В 2 т. М.: Изд-во РИЦ МГУП им. И. Федорова, 2011. Т. 2. Технология. 551 с.
34. Шахмина Е.В., Фатхеева А.П., Ишпаева А.А., Малов И.И., Фахрутдинов М.Р., Леднева Н.Ю. [и др.]. Льняная целлюлоза в производстве высокоэнергетических конденсированных систем // Бултеровские сообщения. 2021. Т. 67. N 9. С. 56–60. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/21-67-9-56. EDN: NJFKNZ.
35. Kälkäjä S., Lappalainen K., Delattre F., Lévêque J.-M. Current status of chemical- or enzyme-assisted ultrasonic pre-treatment processes for lignocellulosic biomass to assess industrialization progress: a review // Current Opinion in Chemical Engineering. 2025. Vol. 48. P. 101124. DOI: 10.1016/j.coche.2025.101124.
36. Chen S., Cao Y., Li F., Ma Z., Zhang K., Xu C., et al. Carbohydrates-first biomass fractionation and valorization: advances, challenges, and future opportunities // Journal of Environmental Management. 2025. Vol. 394. P. 127281. DOI: 10.1016/j.jenvman.2025.127281.
37. Корчагина А.А. Синтез нитратов целлюлозы из целлюлозы мискантуса гигантского сорта Камис, полученной в условиях опытно-промышленного производства // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология.

2023. Т. 13. N 3. С. 392–401. DOI: 10.21285/2227-2925-2023-13-3-392-401. EDN: KXAXSG.

38. Корчагина А.А., Горбатова П.А., Будаева В.В., Золотухин В.Н. Нитрование целлюлозы с высокой степенью полимеризации из мискантуса сорта Сорановский // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Химия. 2024. Т. 17. N 2. С. 268–278. EDN: OWEJVD.

39. Hassan M.L., Bras J., Hassan E.A., Silard C., Mauret E. Enzyme-assisted isolation of microfibrillated cellulose from date palm fruit stalks // *Industrial Crops and Products*. 2014. Vol. 55. P. 102–108. DOI: 10.1016/j.indcrop.2014.01.055.

40. Bogolitsyn K.G., Parshina A.E., Ivanchenko N.L., Bogdanovich N.I., Arkhilin M.A. The capillary and porous structure of the protein-cellulose complexes of Arctic brown algae *Laminaria digitata* and *Saccharina latissima* // *Cellulose*. 2022. Vol. 29. P. 7037–7048. DOI: 10.1007/s10570-022-04707-2.

41. Bogolitsyn K., Parshina A., Mayorova K., Aksenov A., Polomarchuk D., Sinityna O., et al. Enzymatic hydrolysis of cellulose-rich fraction of Arctic seaweeds using *Penicillium*- and *Myceliophthora*-based glycoside hydrolases // *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2025. Vol. 15. P. 30281–30292. DOI: 10.1007/s13399-024-05934-2.

42. Корчагина А.А., Будаева В.В., Алешина Л.А., Люханова И.В., Бычин Н.В., Сакович Г.В. Модификация растительной целлюлозы и ее синтетического аналога в низкотемпературные продукты этерификации // Известия высших учебных заведений. Серия Химия и химическая технология. 2022. Т. 65. N 6. С. 64–74. DOI: 10.6060/ivkkt.20226506.6598. EDN: QGXUCZ.

43. Бабамуратов Б.Э., Джалилов А.Т., Тураев Х.Х., Изучение способа получения целлюлозы из тростника // *Universum: химия и биология*. 2021. N 2. P. 54–57. EDN: GYYWQZ.

44. Hallac B.B., Ragauskas A.J. Analyzing cellulose degree of polymerization and its relevancy to cellulosic ethanol // *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. 2011. Vol. 5, no. 2. P. 215–225. DOI: 10.1002/bbb.269.

45. Hájková K., Jurczyková T., Filipi M., Bouček J. Chemical pulp from corn stalks // *Biotechnology Reports*. 2023. Vol. 37. P. e00786. DOI: 10.1016/j.btre.2023.e00786.

46. Bogolitsyn K., Parshina A., Novoselov N., Muravyev A., Abramova E., Khviuzov S., et al. Physicochemical aspects of hydrogel preparation from algal cellulose // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2025. Vol. 310. P. 143499. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2025.143499.

47. Гисматулина Ю.А. Целлюлоза из соломы льна-межеумка // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Химия. 2022. Т. 15. N 3. С. 377–386. DOI: 10.17516/1998-2836-0301. EDN: IXOCUP.

48. Валишина З.Т., Иванова А.В., Мухаметшин Б.Ф., Александров А.А., Косточко А.В. Исследование свойств азотнокислых эфиров целлюлозы на основе пеньковой целлюлозы // Вестник Технологического университета. 2016. Т. 19. N 18. С. 65–68. EDN: WYBSAT.

49. Bicu I., Mustata F. Cellulose extraction from orange

peel using sulfite digestion reagents // *Bioresource Technology*. 2011. Vol. 102, no. 21. P. 10013–10019. DOI: 10.1016/j.biortech.2011.08.041.

50. Зайцева Л.А., Волкова А.В., Миневиц И.Э. Получение целлюлозного продукта из конопляной лузги // *Ползуновский вестник*. 2023. N 2. С. 174–183. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.02.023. EDN: WCTYHR.

51. Ibrahim M.M., El-Zawawy W.K., Jüttke Y., Koschella A., Heinze T. Cellulose and microcrystalline cellulose from rice straw and banana plant waste: preparation and characterization // *Cellulose*. 2013. Vol. 20. P. 2403–2416. DOI: 10.1007/s10570-013-9992-5.

52. Durand K., Daassi R., Rodrigue D., Stevanovic T. Study of purified cellulosic pulp and lignin produced by wheat straw biorefinery // *Macromol*. 2024. Vol. 4, no. 3. P. 650–679. DOI: 10.3390/macromol4030039.

53. Danielewicz D. Nitric acid-alkali two-stage pulping of wheat straw, industrial hemp, and *Miscanthus × giganteus* // *BioResources*. 2023. Vol. 18, no. 4. P. 7629. DOI: 10.15376/biores.18.4.7629-7644.

54. Long L., Tian D., Hu J., Wang F., Saddler J. A xylanase-aided enzymatic pretreatment facilitates cellulose nanofibrillation // *Bioresource Technology*. 2017. Vol. 243. P. 898–904. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.07.037.

55. Гисматулина Ю.А., Будаева В.В., Ситникова А.Е., Бычин Н.В., Гладышева Е.К., Шавыркина Н.А. [и др.]. Композиционная бумага из бактериальной наноцеллюлозы и хвойной целлюлозы // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2021. Т. 11. N 3. С. 460–471. DOI: 10.21285/2227-2925-2021-11-3-460-471. EDN: OEQTVG.

56. Khorasani A.C., Bajestani S.Z., Bajestani A.S. Comparative techno-economic assessment of production of microcrystalline cellulose, microcrystalline nitrocellulose, and solid biofuel for biorefinery of pistachio shell // *Bioresource Technology Reports*. 2023. Vol. 24. P. 101673. DOI: 10.1016/j.biteb.2023.101673.

57. Boukeciat H., Tarchoun A.F., Abdelaziz A., Boustila C., Bouhantala A., Klapotke T., et al. Pyrolysis mechanism and evolved gas analysis of a promising energetic carbamate-functionalized microcrystalline cellulose nitrate // *Fire-PhysChem*. 2024. Vol. 4, no. 4. P. 327–332. DOI: 10.1016/j.fpc.2024.04.002.

58. Khorasani A.C., Bajestani S.Z., Bajestani A.S. Comparative techno-economic assessment of production of microcrystalline cellulose, microcrystalline nitrocellulose, and solid biofuel for biorefinery of pistachio shell // *Bioresource Technology Reports*. 2023. Vol. 24. P. 101673. DOI: 10.1016/j.biteb.2023.101673.

59. Boukeciat H., Tarchoun A.F., Abdelaziz A., Boustila C., Bouhantala A., Klapotke T., et al. Thermal decomposition behavior of ammonium perchlorate/nitrated microcrystalline cellulose carbamate/diethylene glycol dinitrate energetic composite // *FirePhysChem*. 2025. Vol. 5, no. 5. P. 462–470. DOI: 10.1016/j.fpc.2025.02.004.

REFERENCES

1. Kane J.L., Schartiger R.G., Daniels N.K., Freedman Z.B., McDonald L.M., Skousen J.G., et al. Bioenergy crop *Miscanthus × giganteus* acts as an ecosystem engineer to increase bacterial diversity and soil organic matter on marginal land. *Soil Biology and Biochemistry*. 2023;186:109178. DOI: 10.1016/j.soilbio.2023.109178.

2. Shavyrkina N.A., Gladysheva E.K., Zenkova A.A., Skiba E.A. Biotechnological transformation of giant miscanthus biomass into bacterial nanocellulose. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2024;14(4):504-513. (In Russian). DOI: 10.21285/achb.947. EDN: PZKEDW.

3. Yu Y., Li M., Yu M., Wang T. Comprehensive analysis of *Miscanthus* NF-YA genes reveals potential involvement in drought stress adaptation. *Plants*. 2025;14(19):3100. DOI: 10.3390/plants14193100.
4. Gushchina V.A., Lykova A.S., Ostroborodova N.I., Volodkin A.A. Use of the multipurpose crop *Miscanthus giganteus* in landscape phytodesign. *Niva Povolzh'ya*. 2023;1:1010. (In Russian). DOI: 10.36461/NP.2023.65.1.015. EDN: JCAVIC.
5. Gushchina V.A., Lykova A.S., Ostroborodova N.I., Volodkin A.A., Osipov E.S. Assessment of the possibility of using giant *Miscanthus* as a cellulose-based material in the forest-steppe of the middle Volga Region. *Niva Povolzh'ya*. 2024;3:1002. DOI: 10.36461/NP.2024.71.3.007. EDN: QDCVLM.
6. Sukhikh S., Babich O., Ivanova S., Kriger O., Prosekov A., Noskova S., et al. Production of nanocellulose from miscanthus biomass. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*. 2024;8:100412. DOI: 10.1016/j.crgsc.2024.100412.
7. Tarchoun A.F., Trache D., Abdelaziz A., Bekhouche S., Boukeciat H., Sahnoun N., et al. Making progress towards promising energetic cellulosic microcrystals developed from alternative lignocellulosic biomasses. *Journal of Energetic Materials*. 2022;42(1):97-122. DOI: 10.1080/07370652.2022.2032484.
8. Poudel J., Bhattarai S., Nath N., Tanti B. An exclusive review of microcrystalline cellulose: Structure and applications, and limitations. *Materials Today Communications*. 2025;45:112247. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2025.112247.
9. Revin V.V., Klenova N.A., Redkin N.A., Belousova Z.P., Tukmakov K.N., Markova Yu.A., et al. Production and studying properties of composites based on bacterial cellulose and poly-*N*, *N*-dimethyl-3,4-methylenpiperidone chloride. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2017;7(1):102-110. (In Russian). DOI: 10.21285/2227-2925-2017-7-1-102-110. EDN: YINZJF.
10. Gismatulina Y.A., Budaeva V.V. Cellulose nitrates-blended composites from bacterial and plant-based celluloses. *Polymers*. 2024;16(9):1183. DOI: 10.3390/polym16091183.
11. Roslan N.J., Jamal S.H., Rashid J.I.A., Norrahim M.N.F., Khim O.K., Yunus W.M.Z.W. Response surface methodology for optimization of nitrocellulose preparation from nata de coco bacterial cellulose for propellant formulation. *Heliyon*. 2024;10(4):e25993. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e25993.
12. Tang R., Xie M.Y., Li M., Cao L., Feng S., Li Z., et al. Nitrocellulose membrane for paper-based biosensor. *Applied Materials Today*. 2022;26:101305. DOI: 10.1016/j.apmt.2021.101305.
13. Tang R., Xie M., Yan X., Qian L., Giesy J.P., Xie Y. A nitrocellulose/cotton fiber hybrid composite membrane for paper-based biosensor. *Cellulose*. 2023;30:6457-6469. DOI: 10.1007/s10570-023-05288-4.
14. Morris E., Pulham C.R., Morrison C.A. Structure and properties of nitrocellulose: approaching 200 years of research. *RSC Advances*. 2023;13(46):32321-32333. DOI: 10.1039/d3ra05457h.
15. Toader G.A., Nitu F.R., Ionita M. Graphene oxide/nitrocellulose non-covalent hybrid as solid phase for oligo-DNA extraction from complex medium. *Molecules*. 2023;28(12):4599. DOI: 10.3390/molecules28124599.
16. Tarchoun A.F., Trache D., Hamouche M.A., Abdelaziz A., Boukeciat H., Chentir I., et al. Elucidating the characteristics of a promising nitrate ester polysaccharide derived from shrimp shells and its blends with cellulose nitrate. *Cellulose*. 2023;30:4941-4955. DOI: 10.1007/s10570-023-05200-0.
17. Toudjine S., Boulkadid M.K., Trache D., Louafi E., Akbi H., Belkhir S., et al. Synergetic effect of nano and micro titanium dioxide on the thermal decomposition behavior and chemical stability of nitrocellulose. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2023;148:6909-6925. DOI: 10.1007/s10973-023-12185-2.
18. Gao H., Chen L., Nan F., Wang B., Cao X., Meng D., et al. The integration of civilian nitrocellulose in propellant with highly improved mechanical property and thermal stability, and study on its combustion behavior. *Polymer Degradation and Stability*. 2024;221:110689. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2024.110689.
19. Aljafree N.F.A., Norrahim M.N.F., Samsuri A., Yunus W.Z.W. Advancements in nitrated nanocellulose: from structural insights to energetic applications. *Cellulose*. 2025;32:8047-8099. DOI: 10.1007/s10570-025-06724-3.
20. Chen M., Ren M., Zhu M., Zhang H., Chen T., Zhang Y., et al. Effect of degree of polymerization on regenerated cellulose ultrafiltration membrane performance through ZnCl₂/AlCl₃ aqueous solvent system. *Carbohydrate Polymers*. 2024;345:122557. DOI: 10.1016/j.carbpol.2024.122557.
21. Fang Z., Li B., Liu Y., Zhu J., Li G., Hou G., et al. Critical role of degree of polymerization of cellulose in super-strong nanocellulose films. *Matter*. 2020;2(4):1000-1014. DOI: 10.1016/j.matt.2020.01.016.
22. Kozlov V.K., Sabitov A.Kh. The degree of polymerization of power transformers' paper insulation. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2018;20(9-10):34-38. (In Russian). DOI: 10.30724/1998-9903-2018-20-9-10-34-38. EDN: YUSBID.
23. Tarasova E., Krasnou I., Enkhsaikhan G., Abousharabia I., Nunes C.C.Z., Karthegesu D., et al. Reactive extrusion of cellulose esters in ionic liquid: exploring properties and performance across different cellulose types and degrees of polymerization. *Cellulose*. 2024;31:10223-10240. DOI: 10.1007/s10570-024-06203-1.
24. Tu W.C., Weigand L., Hummel M., Sixta H., Brandt-Talbot A., Hallett J.P. Characterisation of cellulose pulps isolated from *Miscanthus* using a low-cost acidic ionic liquid. *Cellulose*. 2020;27:4745-4761. DOI: 10.1007/s10570-020-03073-1.
25. Singh S.S., Lim L.-T., Manickavasagan A. Enhanced microfibrillation of *Miscanthus × giganteus* biomass by binary-enzymes pre-treatment. *Industrial Crops and Products*. 2022;177:114537. DOI: 10.1016/j.indcrop.2022.114537.
26. Przybysz K., Małachowska E., Martyniak D., Boruszewski P., Iłowska J., Kalinowska H., et al. Yield of pulp, dimensional properties of fibers, and properties of paper produced from fast growing trees and grasses. *BioResources*. 2018;13(1):1372-1387. DOI: 10.15376/biores.13.1.1372-1387.
27. Rodrigues R.C.L.B., Rodrigues B.G., Canettieri E.V., Martinez E.A., Palladino F., Wisniewski A., et al. Comprehensive approach of methods for microstructural analysis and analytical tools in lignocellulosic biomass assessment – a review. *Bioresource Technology*. 2022;348:126627. DOI: 10.1016/j.biortech.2021.126627.

- 28.** Skiba E.A., Kashcheyeva E.I., Zolotukhin V.N., Kukhlenko A.A. Enzymatic hydrolysis of highly concentrated substrates obtained from *Miscanthus giganteus*. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2024;14(3):394-405. (In Russian). DOI: 10.21285/achb.933. EDN: YXAMLK.
- 29.** Kashcheyeva E.I., Korchagina A.A., Gismatulina Y.A., Gladysheva E.K., Budaeva V.V., Sakovich G.V. Simultaneous production of cellulose nitrates and bacterial cellulose from lignocellulose of energy crop. *Polymers*. 2024;16(1):42. DOI: 10.3390/polym16010042.
- 30.** Danielewicz D., Surma-Slusarska B. *Miscanthus giganteus* stalks as a potential non-wood raw material for the pulp and paper industry. Influence of pulping and beating conditions on the fibre and paper properties. *Industrial Crops and Products*. 2019;141:111744. DOI: 10.1016/j.indcrop.2019.111744.
- 31.** Yang H., Zhang Y., Kato R., Rowan S.J. Preparation of cellulose nanofibers from *Miscanthus × giganteus* by ammonium persulfate oxidation. *Carbohydrate Polymers*. 2019;212:30-39. DOI: 10.1016/j.carbpol.2019.02.008.
- 32.** Tsalagkas D., Börcsök Z., Pásztor Z., Gogate P., Csóka L. Assessment of the papermaking potential of processed *Miscanthus × giganteus* stalks using alkaline pre-treatment and hydrodynamic cavitation for delignification. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2021;72:105462. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2021.105462.
- 33.** Zhegrov E.F., Milekhin Yu.M., Berkovskaya E.V. *Chemistry and technology of ballistic powders, solid rocket and special fuels*. In 2 vol. Moscow: Editorial and Publishing Center of the Moscow State University of Printing named after Ivan Fedorov; 2011, vol. 2, 551 p. (In Russian).
- 34.** Shakhmina E.V., Fatkheeva A.P., Ishpaeva A.A., Malov I.I., Fakhruddinov M.R., Ledneva N.Yu., et al. Flax cellulose in production of high energy condensed systems. *Butlerov Communications*. 2021;67(9):56-60. (In Russian). DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/21-67-9-56. EDN: NJFKNZ.
- 35.** Kälkäjä S., Lappalainen K., Delattre F., Lévêque J.-M. Current status of chemical- or enzyme-assisted ultrasonic pre-treatment processes for lignocellulosic biomass to assess industrialization progress: a review. *Current Opinion in Chemical Engineering*. 2025;48:101124. DOI: 10.1016/j.coche.2025.101124.
- 36.** Chen S., Cao Y., Li F., Ma Z., Zhang K., Xu C., et al. Carbohydrates-first biomass fractionation and valorization: advances, challenges, and future opportunities. *Journal of Environmental Management*. 2025;394:127281. DOI: 10.1016/j.jenvman.2025.127281.
- 37.** Korchagina A.A. Synthesis of cellulose nitrates from *Miscanthus × giganteus* var. KAMIS cellulose obtained under pilot production conditions. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2023;13(3):392-401. (In Russian). DOI: 10.21285/2227-2925-2023-13-3-392-401. EDN: KXAXSG.
- 38.** Korchagina A.A., Gorbatova P.A., Budaeva V.V., Zolotukhin V.N. Nitration of *Miscanthus* var. Soranovskii cellulose with a high degree of polymerization. *Journal of Siberian Federal University. Chemistry*. 2024;17(2):268-278. (In Russian). EDN: OWEJVD.
- 39.** Hassan M.L., Bras J., Hassan E.A., Silard C., Mauret E. Enzyme-assisted isolation of microfibrillated cellulose from date palm fruit stalks. *Industrial Crops and Products*. 2014;55:102-108. DOI: 10.1016/j.indcrop.2014.01.055.
- 40.** Bogolitsyn K.G., Parshina A.E., Ivanchenko N.L., Bogdanovich N.I., Arkhilin M.A. The capillary and porous structure of the protein-cellulose complexes of Arctic brown algae *Laminaria digitata* and *Saccharina latissima*. *Cellulose*. 2022;29:7037-7048. DOI: 10.1007/s10570-022-04707-2.
- 41.** Bogolitsyn K., Parshina A., Mayorova K., Aksenov A., Polomarchuk D., Sinitsyna O., et al. Enzymatic hydrolysis of cellulose-rich fraction of Arctic seaweeds using *Penicillium*- and *Myceliophthora*-based glycoside hydrolases. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2025;15:30281-30292. DOI: 10.1007/s13399-024-05934-2.
- 42.** Korchagina A.A., Budaeva V.V., Aleshina L.A., Lyukhanova I.V., Bychin N.V., Sakovich G.V. Modification of plant cellulose and its synthetic analogue into low-substituted esterification products. *ChemChemTech* 2022;65(6):64-74. (In Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20226506.6598. EDN: QGXUCZ.
- 43.** Babamuratov B., Djalilov A., Turayev H. Studying the method of obtaining cellulose from cane. *Universum: khimiya i biologiya*. 2021;2:54-57. (In Russian). EDN: GYYWQZ.
- 44.** Hallac B.B., Ragauskas A.J. Analyzing cellulose degree of polymerization and its relevancy to cellulosic ethanol. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. 2011;5(2):215-225. DOI: 10.1002/bbb.269.
- 45.** Hájková K., Jurczyková T., Filipi M., Bouček J. Chemical pulp from corn stalks. *Biotechnology Reports*. 2023;37:e00786. DOI: 10.1016/j.btre.2023.e00786.
- 46.** Bogolitsyn K., Parshina A., Novoselov N., Muravyev A., Abramova E., Khviuzov S., et al. Physicochemical aspects of hydrogel preparation from algal cellulose. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2025;310:143499. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2025.143499.
- 47.** Gismatulina Yu.A. Intermediate flax straw-derived cellulose. *Journal of Siberian Federal University. Chemistry*. 2022;15;3:377-386. (In Russian). DOI: 10.17516/1998-2836-0301. EDN: IXOCUP.
- 48.** Valishina Z.T., Ivanova A.V., Mukhametshin B.F., Alexandrov A.A., Kostochko A.V. Investigation of properties of cellulose nitric acid esters based on hemp cellulose. *Herald of Technological University*. 2016;19;18:65-68. (In Russian). EDN: WYBSAT.
- 49.** Bicu I., Mustata F. Cellulose extraction from orange peel using sulfite digestion reagents. *Bioresource Technology*. 2011;102(21):10013-10019. DOI: 10.1016/j.biortech.2011.08.041.
- 50.** Zaitseva L.A., Volkova A.V., Minevich I.E. Extraction of cellulose fibers from hemp husk. *Polzunovskiy vestnik*. 2023;2:174-183. (In Russian). DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.02.023. EDN: WCTYHR.
- 51.** Ibrahim M.M., El-Zawawy W.K., Jüttke Y., Koschella A., Heinze T. Cellulose and microcrystalline cellulose from rice straw and banana plant waste: preparation and characterization. *Cellulose*. 2013;20:2403-2416. DOI: 10.1007/s10570-013-9992-5.
- 52.** Durand K., Daassi R., Rodrigue D., Stevanovic T. Study of purified cellulosic pulp and lignin produced by wheat straw biorefinery. *Macromol*. 2024;4(3):650-679. DOI: 10.3390/macromol4030039.
- 53.** Danielewicz D. Nitric acid-alkali two-stage pulping of wheat straw, industrial hemp, and *Miscanthus × giganteus*. *BioResources*. 2023;18(4):7629. DOI: 10.15376/biores.18.4.7629-7644.
- 54.** Long L., Tian D., Hu J., Wang F., Saddler J. A xylanase-aided enzymatic pretreatment facilitates cellulose nano-

fibrillation. *Bioresource Technology*. 2017;243:898-904. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.07.037.

55. Gismatulina Y.A., Budaeva V.V., Sitnikova A.E., Bychin N.V., Gladysheva E.K., Shavyrkina N.A., Mironova G.F., Sevastyanova Y.V. Bacterial nanocellulose and softwood pulp for composite paper. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2021;11(3):460-471. (In Russian). DOI: 10.21285/2227-2925-2021-11-3-460-471. EDN: OEQTVG.

56. Khorasani A.C., Bajestani S.Z., Bajestani A.S. Comparative techno-economic assessment of production of microcrystalline cellulose, microcrystalline nitrocellulose, and solid biofuel for biorefinery of pistachio shell. *Bioresource Technology Reports*. 2023;24:101673. DOI: 10.1016/j.biteb.2023.101673.

57. Boukeciat H., Tarchoun A.F., Abdelaziz A., Boustila C., Bouhantala A., Klapotke T., et al. Pyrolysis mechanism and evolved gas analysis of a promising energetic carbamate-functionalized microcrystalline cellulose nitrate. *FirePhysChem*. 2024;4(4):327-332. DOI: 10.1016/j.fpc.2024.04.002.

58. Khorasani A.C., Bajestani S.Z., Bajestani A.S. Comparative techno-economic assessment of production of microcrystalline cellulose, microcrystalline nitrocellulose, and solid biofuel for biorefinery of pistachio shell. *Bioresource Technology Reports*. 2023;24:101673. DOI: 10.1016/j.biteb.2023.101673.

59. Boukeciat H., Tarchoun A.F., Abdelaziz A., Boustila C., Bouhantala A., Klapotke T., et al. Thermal decomposition behavior of ammonium perchlorate/nitrated microcrystalline cellulose carbamate/diethylene glycol dinitrate energetic composite. *FirePhysChem*. 2025;5(5):462-470. DOI: 10.1016/j.fpc.2025.02.004.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гисматулина Юлия Александровна,

к.т.н., старший научный сотрудник,
Институт проблем химико-энергетических
технологий СО РАН,
659322, г. Бийск, ул. Социалистическая, 1,
Российская Федерация,
julja.gismatulina@rambler.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5480-7449>

Горбатова Полина Алексеевна,

лаборант,
Институт проблем химико-энергетических
технологий СО РАН,
659322, г. Бийск, ул. Социалистическая, 1,
Российская Федерация,
магистрант,
Бийский технологический институт (филиал)
Алтайского государственного технического
университета им. И.И. Ползунова,
659305, г. Бийск, ул. Трофимова, 27,
Российская Федерация,
✉ 1402plngorbatova@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0009-6599-1582>

Будаева Вера Владимировна,

к.х.н., доцент, заведующий лабораторией,
ведущий научный сотрудник,
Институт проблем химико-энергетических
технологий СО РАН,
659322, г. Бийск, ул. Социалистическая, 1,
Российская Федерация,
budaeva@ipcet.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1628-0815>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yuliya A. Gismatulina,

Cand. Sci. (Engineering), Senior Researcher,
Institute for Problems of Chemical
and Energetic Technologies, Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences,
1, Sotsialisticheskaya St., Biysk, 659322,
Russian Federation,
julja.gismatulina@rambler.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5480-7449>

Polina A. Gorbatova,

Laboratory Assistant,
Institute for Problems of Chemical
and Energetic Technologies, Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences,
1, Sotsialisticheskaya St., Biysk, 659322,
Russian Federation,
Master's Student,
Biysk Technological Institute,
Polzunov Altai State Technical University,
27, Trofimov St., Biysk, 659305,
Russian Federation,
✉ 1402plngorbatova@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0009-6599-1582>

Vera V. Budaeva,

Cand. Sci. (Chemistry), Associate Professor,
Head of the Laboratory, Leading Researcher,
Institute for Problems of Chemical
and Energetic Technologies, Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences,
1, Sotsialisticheskaya St., Biysk, 659322,
Russian Federation,
budaeva@ipcet.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1628-0815>

Золотухин Владимир Николаевич,
к.т.н., старший научный сотрудник,
Институт проблем химико-энергетических
технологий СО РАН,
659322, г. Бийск, ул. Социалистическая, 1,
Российская Федерация,
zolotukhin_vn@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9630-6332>

Vladimir N. Zolotukhin,
Cand. Sci. (Engineering), Senior Researcher,
Institute for Problems of Chemical
and Energetic Technologies, Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences,
1, Sotsialisticheskaya St., Biysk, 659322,
Russian Federation,
zolotukhin_vn@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9630-6332>

Вклад авторов

Ю.А. Гисматулина – разработка концепции, проведение исследования, валидация результатов, написание черновика рукописи.
П.А. Горбатова – проведение исследования, визуализация.
В.В. Будаева – курирование данных, административное руководство исследовательским проектом, научное руководство, редактирование рукописи.
В.Н. Золотухин – разработка методологии, проведение исследования.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Поступила в редакцию 07.11.2025.
Одобрена после рецензирования 15.12.2025.
Принята к публикации 10.04.2026.

Contribution of the authors

Yuliya A. Gismatulina – conceptualization, investigation, validation, writing – original draft.
Polina A. Gorbatova – investigation, visualization.
Vera V. Budaeva – data curation, project administration, supervision, editing.
Vladimir N. Zolotukhin – methodology, investigation.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 07.11.2025.
Approved after reviewing 15.12.2025.
Accepted for publication 10.04.2026.