

Научная статья
УДК 662.231.39
EDN: KXAXSG
DOI: 10.21285/2227-2925-2023-13-3-392-401



Синтез нитратов целлюлозы из целлюлозы мискантуса гигантского сорта Камис, полученной в условиях опытно-промышленного производства

А.А. Корчагина

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

Аннотация. Работа посвящена исследованию нового национального сырьевого ресурса – мискантуса гигантского сорта Камис, позиционируемого в качестве наиболее перспективного природного источника получения высококачественной целлюлозы с целью ее дальнейшей химической функционализации. В условиях опытно-промышленного производства из исходного сырья с содержанием целлюлозы 50,2% азотнокислым способом выделена опытная партия технической целлюлозы, характеризующаяся высокими значениями массовой доли α -целлюлозы – 92,8% и степени полимеризации – 1200. На основе опытной партии технической целлюлозы получен образец нитратов целлюлозы с основными функциональными свойствами: массовой долей азота 11,18%, вязкостью 48 мПа·с и растворимостью 94%. Синтезированный образец характеризуется предельно высокой растворимостью в ацетоне, что подтверждает получение именно азотнокислых эфиров целлюлозы, и высоким выходом – 150%. Методом ИК-Фурье спектроскопии идентифицированы основные функциональные группы в опытной партии технической целлюлозы (3384, 2902, 1639, 1428, 1370, 1319, 1161, 700–500 см⁻¹) и в образце нитратов целлюлозы (1659, 1278, 834, 746, 683 см⁻¹), установлена соответствующая принадлежность к целлюлозе и азотнокислым эфирам целлюлозы. Методом растровой электронной микроскопии охарактеризованы структурно-морфологические особенности волокон опытной партии технической целлюлозы и образца нитратов целлюлозы. Методами совмещенного термогравиметрического и дифференциально-термического анализов установлены высокие значения температуры начала интенсивного разложения – 197 °С и удельной теплоты разложения – 6,92 кДж/г. Полученные результаты обосновывают способность целлюлозы, выделенной из нового альтернативного источника, к химической функционализации в азотнокислые эфиры целлюлозы с удовлетворительными функциональными свойствами.

Ключевые слова: мискантус гигантский, азотнокислый способ, опытно-промышленное производство, техническая целлюлоза, нитрование, нитраты целлюлозы

Благодарности. Автор выражает благодарность директору ООО «Мастер БРЭНД» Воинскому С.М. за выращивание и поставку образцов мискантуса гигантского сорта Камис.

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

Для цитирования: 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. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2023-13-3-392-401>. EDN: KXAXSG.

PHYSICOCHEMICAL BIOLOGY

Original article

Synthesis of cellulose nitrates from *Miscanthus × giganteus* var. KAMIS cellulose obtained under pilot production conditions

Anna A. Korchagina

Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies SB RAS, Biysk, Russian Federation

Abstract. The work is devoted to the study of a novel national raw material resource *Miscanthus × Giganteus* var. KAMIS, which is positioned as one of the most promising natural sources for obtaining high-quality cellulose for the purpose of its further chemical functionalisation. A batch of technical cellulose isolated from raw materials under pilot production conditions using the nitric acid method having a cellulose content of 50.2% was characterized by

high α -cellulose mass fraction (92.8%) and degree of polymerisation (1200) values. On the basis of the pilot batch of technical cellulose, a sample of cellulose nitrates offering basic functional properties was obtained: mass fraction of nitrogen – 11.18%; viscosity – 48 MPa-s; solubility – 94%. The synthesised sample is characterized by extremely high solubility in acetone, confirming the production of cellulose nitric acid esters, and a high yield of 150%. IR-Fourier spectroscopy was used to identify the main functional groups in the experimental batch of technical cellulose (3384, 2902, 1639, 1428, 1370, 1319, 1161, 700–500 cm^{-1}) and in a sample of cellulose nitrates (1659, 1278, 834, 746, 683 cm^{-1}). A corresponding affiliation to cellulose and cellulose nitric acid esters was established. The structural and morphological features of the fibres of the experimental batch of technical cellulose and a sample of cellulose nitrates were characterised using scanning electron microscopy. Combined methods of thermogravimetric and differential thermal analyses were used to establish high initial temperature (197 °C) and specific heat of decomposition (6.92 kJ/g) values at the beginning of intensive decomposition. The obtained results substantiate the possibility to chemically functionalise cellulose isolated from a new alternative source into cellulose nitric acid esters with satisfactory functional properties.

Keywords: *Miscanthus* × *Giganteus* var. KAMIS, nitric acid method, pilot production, technical cellulose, nitration, cellulose nitrates

Acknowledgements. The author expresses gratitude to the director of ООО “Master BRAND” Voinsky S.M. for the cultivation and supply of samples of biomass of miscanthus giant variety KAMIS.

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

For citation: Korchagina A.A. Synthesis of cellulose nitrates from *Miscanthus* × *giganteus* var. KAMIS cellulose obtained under pilot production conditions. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2023;13(3):392–401. (In Russian). <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2023-13-3-392-401>. EDN: KXAXSG.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время нитраты целлюлозы (НЦ), являющиеся одними из наиболее эффективных высокоэнергетических полимеров, играют значительную роль во многих отраслях промышленности. После своего непреднамеренного открытия НЦ прочно зарекомендовали себя как материал с исключительными свойствами [1, 2]. Наряду с традиционным использованием промышленных марок НЦ в последнее время наметилась тенденция применения их в новых наукоемких областях. Актуальность разработки новых типов НЦ, в основном с массовой долей (м.д.) азота менее 12,2%, определяется также необходимостью расширения номенклатуры и получения конкурентоспособных марок НЦ для изготовления печатных и флексографических красок, пленок, быстросохнущего лака, мембран и целлулоида [3–7]. Кроме того, нитрование целлюлозы как фундаментальный пример химической модификации целлюлозы по-прежнему является предметом многостороннего исследования во всем мире [8].

Наилучшим природным источником сырья с исключительными физико-химическими и структурно-морфологическими свойствами для получения НЦ высокого качества по-прежнему остается хлопковая целлюлоза (ХЦ). Тем не менее с точки зрения мировой науки достойной альтернативой ХЦ могут стать нетрадиционные легковозобновляемые растительные источники, основными преимуществами которых являются доступность, быстрая скорость возобновления и биоразлагаемость. Проведенные в ряде стран исследования показали [9–16], что на основе целлюлозы, выделенной из альтернативных растительных источников, возможно получение широкой номенклатуры НЦ. Следует отметить, что перечень такого рода источников сырья ежегодно пополняется, а способы получения высококачественной целлюлозы для НЦ постоянно совершенствуются.

На территории нашей страны в настоящее время одним

из перспективных национальных сырьевых ресурсов может быть рассмотрен мискантус (*Miscanthus* × *giganteus*) [17–20], в частности сорт Камис, включенный в государственный селекционный реестр в 2018 году. Данный сорт мискантуса характеризуется высокой продуктивностью начиная со 2–3 года высадки плантации и в среднем составляет около 18–20 т/га год [21]. Однако использование целлюлозы, выделенной из представленного сорта, в качестве объекта химической функционализации в НЦ до настоящего времени в мировой практике не изучено и не описано, за исключением собственных единичных результатов, что обуславливает несомненную актуальность данного исследования.

Целями настоящей работы являлись синтез НЦ из опытной партии технической целлюлозы (ТЦ), выделенной из мискантуса сорта Камис в опытно-промышленных условиях; определение основных функциональных и физико-химических свойств полученного образца НЦ; изучение структурных особенностей опытной партии ТЦ и образца НЦ современными инструментальными методами исследования: ИК-Фурье спектроскопии, растровой электронной микроскопии (РЭМ), совмещенного термогравиметрического (ТГА) и дифференциально-термического (ДТА) анализов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве исходного сырья была использована сухая биомасса мискантуса (*Miscanthus* × *giganteus*) сорта Камис массой 30 кг, предоставленная ООО «Мастер БРЭНД» (пос. Митинка, Калужская область, Россия). Сырье предварительно измельчали на соломорезке и отбирали фракцию размером частиц 2,5–8 мм. Выделение опытной партии ТЦ вели в опытно-промышленных условиях путем последовательной обработки сырья разбавленными растворами азотной кислоты и гидроксида натрия [22]. Процесс обработки проводили в реакторе объемом 250 л при перемешивании. В табл. 1

представлены компонентный состав сырья и опытной партии ТЦ, определенные по общепринятым в мировой практике методам [23] на сертифицированном аналитическом оборудовании.

Синтез НЦ проводили с использованием промышленно доступной серно-азотной кислотной смеси в ранее установленных нами для нетрадиционного растительного сырья условиях [9–11]. Основные функциональные свойства НЦ были определены согласно исследованиям [9–11]. М.д. азота в НЦ определяли ферросульфатным способом [24], который основан на омылении НЦ концентрированной серной кислотой и восстановлении образовавшейся азотной кислоты сульфатом железа (II) до оксида азота (II), которая с избытком последнего образует комплексное соединение $[\text{Fe}(\text{NO})]\text{SO}_4$, окрашивающее раствор в желто-розовый цвет. Растворимость НЦ (1 г) в ацетоне (50 мл) определяли путем фильтрации нерастворимого в ацетоне остатка НЦ с последующим высушиванием и взвешиванием. Вязкость НЦ определяли путем измерения времени истечения 2%-го ацетонового раствора из капиллярного стеклянного вискозиметра ВПЖ-1 (ООО «Экросхим», Россия). Растворимость НЦ устанавливали по методу, основанному на растворении НЦ в спиртоэфирном растворителе при объемном соотношении этилового спирта к диэтиловому эфиру, равном 1:2, с последующей фильтрацией, сушкой и взвешивании нерастворившегося остатка. Выход НЦ рассчитывали по формуле:

$$W = (m_{\text{пр}} \times 100) / m_{\text{исх}},$$

где $m_{\text{пр}}$ – масса синтезированного НЦ, г; $m_{\text{исх}}$ – масса исходной ТЦ, г.

Опытная партия ТЦ и образец НЦ были исследованы методами ИК-Фурье спектроскопии с использованием Фурье-спектрометра ФТ-801 (ООО НПФ «Люмэкс-Сибирь», Россия) в диапазоне частот 4000–500 см^{-1} , РЭМ при помощи сканирующего электронного микроскопа JEOL GSM 840 (Jeol Ltd., Япония). Образец НЦ был исследован совместным ТГА/ДТА на термоанализаторе TGA/DTG-60 (Shimadzu, Япония) в следующих условиях: масса навески – 0,5 мг, скорость нагрева – 10 $^{\circ}\text{C}/\text{мин}$, максимальная температура – 350 $^{\circ}\text{C}$, среда инертная – азот.

Работа выполнена с использованием приборной базы Бийского регионального центра коллективного пользования СО РАН.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В результате выполненных исследований по опреде-

лению компонентного состава мискантуса сорта Камис (см. табл. 1) было установлено, что представленный сорт характеризуется высоким содержанием целлюлозы по Кюршнеру (50,2%) при относительно низких уровнях лигнина (19,5%) и золы (1,63%). М.д. пентозанов составила 21,2%. В целом компонентный состав мискантуса сорта Камис сопоставим с другими сортами *Miscanthus × giganteus* [25, 26].

Согласно данным, представленным в табл. 1, полученная в опытно-промышленных условиях опытная партия ТЦ характеризуется высокими значениями м.д. α -целлюлозы – 92,8% и степени полимеризации (СП) – 1200 с суммарной м.д. нецеллюлозных компонентов 3,13%.

Учитывая требования, предъявляемые к целлюлозе, пригодной для химической переработки (минимальное содержание лигнина, гемицеллюлоз, золы и посторонних включений), т.е. к высококачественной целлюлозе [15], в целом результаты, полученные по качеству опытной партии ТЦ, выделенной азотнокислым способом из мискантуса сорта Камис в опытно-промышленных условиях, не исключают возможности ее успешной химической модификации в высококачественные НЦ.

Анализ мировой литературы в области синтеза НЦ показал, что получение НЦ возможно из целлюлоз, выделенных из широкого многообразия целлюлозо-содержащего растительного сырья (табл. 2). Кроме того, мировыми учеными показана не только принципиальная возможность получения НЦ с широким диапазоном по м.д. азота – 10,80–12,40% [25–28], но и возможность получения НЦ с удовлетворительными функциональными свойствами, включая вязкость и растворимость [13–15, 19–24, 29–31]. Также во многих работах имеется информация об исследованиях НЦ из альтернативного сырья современными инструментальными методами, подтверждающая получение именно азотнокислых эфиров целлюлозы с уникальной морфологией волокна.

В результате анализа мировой литературы в области альтернативных растительных источников целлюлозы, пригодных для синтеза НЦ (табл. 2), установлено, что примеры химической функционализации целлюлозы из мискантуса гигантского сорта Камис в НЦ отсутствуют в мировой практике.

Согласно результатам, представленным в табл. 2, полученный при использовании промышленной серно-азотной кислотной смеси образец НЦ из опытной партии ТЦ характеризуется следующими основными функциональными свойствами: м.д. азота – 11,18%, вязкость – 48 мПа·с, растворимость в спиртоэфирной смеси – 94%. Кроме того, предельно высокая 100%-я

Таблица 1. Компонентный состав мискантуса сорта Камис и опытной партии технической целлюлозы, выделенной из него азотнокислым способом в опытно-промышленных условиях

Table 1. Components of *Miscanthus × giganteus* var. KAMIS and of the pilot batch of cellulose pulp isolated therefrom by the nitric acid method under pilot production conditions

Наименование образца	М.д. компонентов*, %				Степень полимеризации
	целлюлоза	лигнин	пентозаны	зола	
Мискантус	50,2±0,5**	19,50±0,5	21,2±0,5	1,63±0,05	–
Техническая целлюлоза из мискантуса	92,8±0,5***	1,10±0,05	1,60±0,05	0,43±0,05	1200

Примечание. * – в пересчете на абсолютно сухое сырье; ** – целлюлоза по Кюршнеру; *** – α -целлюлоза.

Таблица 2. Свойства образцов нитратов целлюлозы из альтернативных растительных источников сырья

Table 2. Properties of cellulose nitrates obtained from alternative plant feedstocks

Источник целлюлозы для синтеза нитратов целлюлозы	Основные функциональные свойства нитратов целлюлозы			ИК	РЭМ	ТГА/ДТА ($T_{\text{нир}}^{\circ}\text{C}$)	Ссылка на источник
	м.д. азота, %	условная вязкость, мПа	растворимость*, %				
Лен-долгунец	8,90–12,40	2–24	–**	–	–	–	15
	10,64–12,41	0,6–15,8	100	+	+	196– 198	16
Лен-долгунец (сорт Мерелин)	12,03	10,6	100	–	–	–	27
	12,10	15,8	100	–	–	–	
Солома льна-межеумка	12,23–12,34	2,7–16,0	95–96	+	–	198	28
	11,99–12,08	8,0–12,0	98	+	+	–	29
Пенька	12,40	4,2	–	+	–	–	30
	12,40	–	–	+	–	–	31
Древесные опилки	11,20–12,40	–	–	–	–	–	32
Ризофора	11,40	–	–	–	–	–	12
Кенаф	11,30	–	–	–	–	–	
Масличная пальма	10,80	–	–	–	–	–	
Стебли табака	11,00–11,50	–	–	–	–	–	13
Стебли горького бамбука	12,50	79	–	+	+	194	14
Плодовые оболочки овса	12,08–12,18	12–15	98	+	–	–	9
	12,12	10	98	+	–	205	10
	11,61	93	91	+	+	–	11
<i>Miscanthus sacchari- florus</i> (Maxim.) сорта Сорановский	11,85	18	97	+	+	201	33
	11,74–12,38	9–35	93–98	+	+	198	34
<i>Miscanthus</i> × <i>giganteus</i> сорта Камис	11,18	48	94	+	+	197	данная работа

Примечание. * – указана растворимость нитратов целлюлозы в спиртоэфирном растворителе; ** – данные отсутствуют в публикации.

растворимость образца НЦ в ацетоне подтверждает получение именно азотнокислых эфиров целлюлозы [35]. Необходимо подчеркнуть, что синтез НЦ характеризуется высоким значением выхода – 150%.

На рис. 1 представлены результаты исследования методом ИК-Фурье спектроскопии [36, 37] опытной партии ТЦ из мискантуса сорта Камис и синтезированного образца НЦ.

В ИК-спектре опытной партии ТЦ (рис. 1, а) выявлено наличие основных функциональных групп (3384, 2902, 1639, 1428, 1370, 1319, 1161, 700–500 cm^{-1}), позволяющих идентифицировать опытную партию ТЦ из мискантуса сорта Камис как целлюлозу, сопоставимую по пикам валентных колебаний с классической целлюлозой [15]. Обнаружено, что в спектре опытной партии ТЦ (см. рис. 1, а) отсутствуют пики валентных колебаний, отвечающие за наличие примесных компонентов: ароматических структур лигнина – около 1500 cm^{-1} и гемицеллюлоз – около 1700 cm^{-1} , что еще раз подтверждает высокое качество ТЦ.

В ИК-спектре НЦ (рис. 1, б) зарегистрированы характеристические частоты, свидетельствующие о получении именно азотнокислого эфира целлюлозы (1659, 1278, 834, 746, 683 cm^{-1}). Интенсивная полоса поглощения

в области 1659 cm^{-1} отвечает за колебания $\nu_a(\text{NO}_2)$ нитратных групп, связанных с CH_2 -группами глюкопиранозных циклов НЦ (положение $\text{C}_{(6)}$). Полоса поглощения в области 1278 cm^{-1} может быть отнесена к валентным симметричным колебаниям нитратных групп. Полосы поглощения в областях 834, 746 и 683 cm^{-1} соответствуют колебаниям нитратных групп: валентному $\nu_a(\text{NO}_2)$, веерному $\nu_w(\text{NO}_2)$ и ножничному $\delta(\text{NO}_2)$ соответственно.

Помимо основных полос поглощения, отвечающих за валентные колебания нитратных групп, в области 3700–3200 cm^{-1} содержатся пики валентных колебаний $\nu(\text{OH})$ в виде широкой полосы сложного контура, что свидетельствует о неполном замещении НЦ. Пики валентных колебаний в данной области принадлежат гидроксильным группам НЦ, участвующим в образовании водородных связей, и являются характерным признаком химической неоднородности сложного эфира. Полученные данные хорошо согласуются с данными для других альтернативных источников НЦ [9–11, 14, 16, 28–31, 38–41].

На рис. 2 представлены микрофотографии (диапазон увеличений $\times 200$ и $\times 50000$ раз) опытной партии ТЦ из мискантуса сорта Камис (рис. 2, а, б) и синтезированного образца НЦ (рис. 2, с, д).

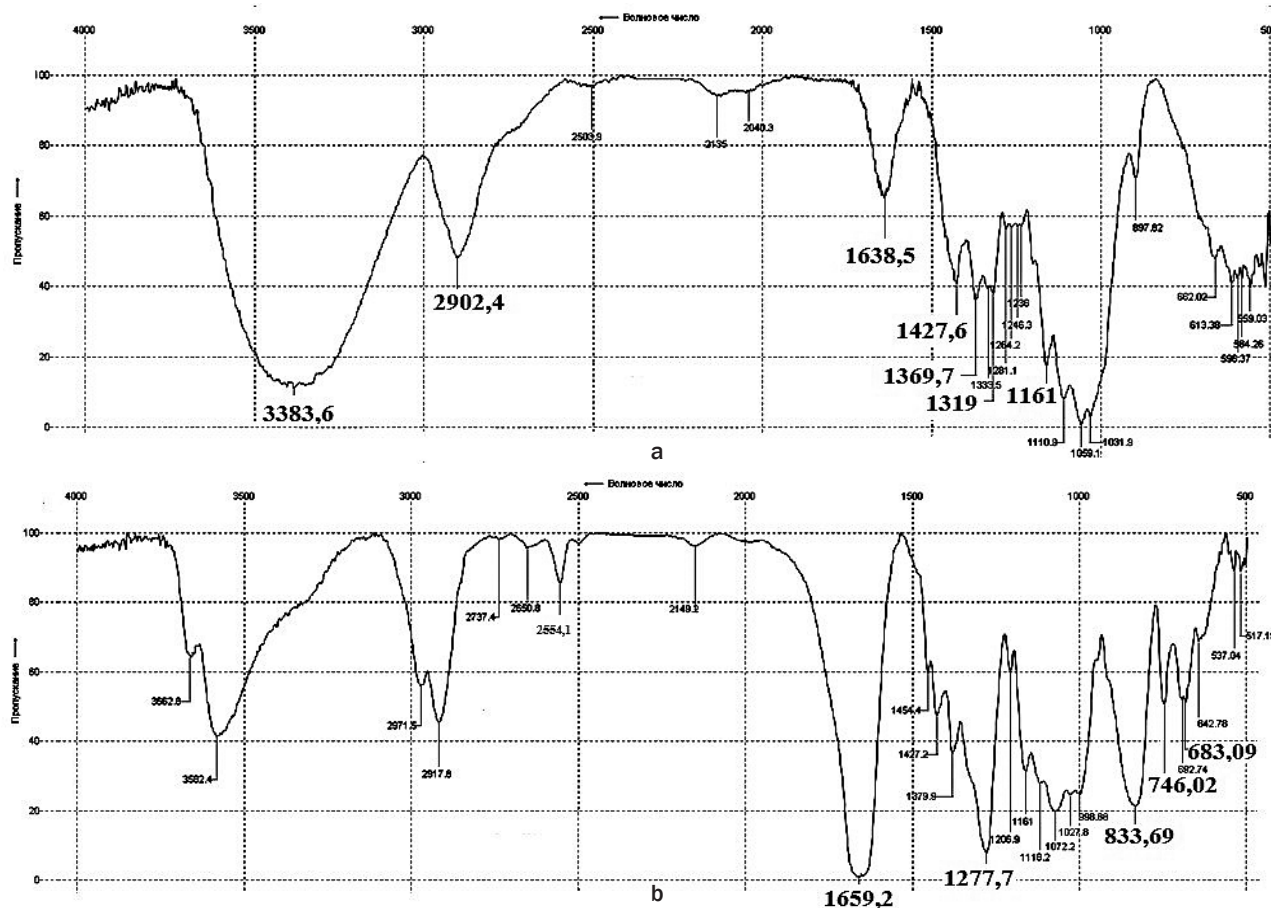


Рис. 1. ИК-спектры: а – опытной партии технической целлюлозы из мискантуса сорта Камис; б – образец нитратов целлюлозы из опытной партии технической целлюлозы мискантуса сорта Камис

Fig. 1. IR spectra: a – pilot batch of cellulose pulp from *Miscanthus* × *giganteus* var. KAMIS; b – cellulose nitrate sample from the pilot batch of cellulose pulp

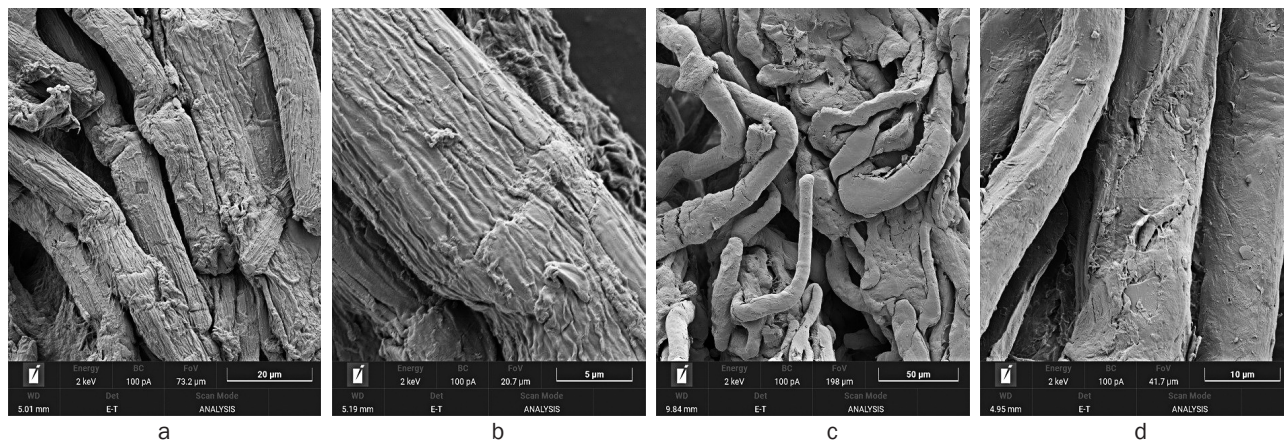


Рис. 2. Микрофотографии опытной партии технической целлюлозы из мискантуса сорта Камис (а, б) и нитратов целлюлозы из опытной партии технической целлюлозы мискантуса сорта Камис (с, д)

Fig. 2. SEM images of pilot batch of cellulose pulp from *Miscanthus* × *giganteus* var. KAMIS (a, b) and cellulose nitrate from the pilot batch of cellulose pulp (c, d)

Электронно-микроскопическое исследование показало, что опытная партия ТЦ (рис. 2, а) представляет собой смесь, состоящую из неоднородных по форме и размерам трубкообразных целлюлозных волокон, поверхность которых характеризуется наличием микрошероховатостей (рис. 2, б). Согласно рис. 2, с, в результате обработки исходной ТЦ сер-

но-азотной кислотной смесью нитратцеллюлозные волокна в основном сохраняют форму волокон исходной ТЦ. Необходимо отметить, что в результате набухания волокон ТЦ в реакционной смеси волокна НЦ становятся более объемными, а их поверхность сглаживается (рис. 2, д). Сравнивая морфологию волокон исходной целлюлозы и морфологию нитрат-

целлюлозных волокон, синтезированных НЦ из других альтернативных источников, можно констатировать их сходство по неоднородности формы и размерам, а также по их видоизменению по окончании нитрования – увеличению в объеме и сглаживанию поверхности [11, 14, 16, 29, 33, 38, 39].

В результате дополнительного исследования синтезированного образца НЦ из опытной партии ТЦ мискантуса сорта Камис методом совмещенного ТГА/ДТА установлены высокие значения температуры начала интенсивного разложения НЦ – 197 °С и удельной теплоты разложения – 6,92 кДж/г. Кроме того, обнаружено, что термическое разложение образца составило 93%. Полученные данные свидетельствуют о высокой химической чистоте синтезированного продукта. В сравнении с данными температуры начала интенсивного разложения НЦ из других источников можно отметить их близкое соответствие [10, 11, 14, 16, 28, 33, 34, 38–41].

ВЫВОДЫ

На основе мискантуса гигантского сорта Камис с содержанием целлюлозы по Кюршнеру 50,2% в условиях опытно-промышленного производства азотнокислым способом выделена опытная партия ТЦ, характеризующаяся высокими значениями м.д. α -целлюлозы – 92,8% и СП – 1200. В результате обработки опытной партии ТЦ промышленной серно-азотной кислотной смесью получен образец НЦ с основными функциональными

свойствами: м.д. азота 11,18%, вязкостью 48 мПа·с и растворимостью 94%. Выявлено, что образец НЦ характеризуется предельно высокой растворимостью в ацетоне – 100% и высоким значением выхода – 150%. Методом ИК-Фурье спектроскопии установлена принадлежность опытной партии ТЦ (3384, 2902, 1639, 1428, 1370, 1319, 1161, 700–500 см⁻¹) к целлюлозе, а образца НЦ на ее основе (1659, 1278, 834, 746, 683 см⁻¹) – к азотнокислому эфиру целлюлозы. Методом РЭМ обнаружено, что опытная партия ТЦ из мискантуса сорта Камис представляет собой смесь, состоящую из неоднородных по форме и размерам трубкообразных волокон, на поверхности которых имеются микрошероховатости. Волокна образца НЦ в основном сохраняют форму волокон исходной ТЦ с незначительным увеличением по объему. Поверхность нитратцеллюлозных волокон в результате обработки реакционной смесью становится более гладкой. Методом совмещенного ТГА/ДТА установлены высокая температура начала интенсивного разложения – 197 °С и удельная теплота разложения – 6,92 кДж/г, что свидетельствует о высокой химической чистоте НЦ. Практическая значимость представленных в данной работе результатов заключается в использовании в качестве сырья для химической функционализации в широко востребованные НЦ нового перспективного альтернативного сырьевого ресурса – мискантуса гигантского сорта Камис.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Misenan M.S.M., Norrrahim M.N.F., Saad M.M., Shaffie A.H., Zulkipli N.A., Farabi M.A. Recent advances in nitrocellulose-based composites // *Synthetic and Natural Nanofillers in Polymer Composites*. 2023. P. 399–415. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-19053-7.00004-4>.
2. Tarchoun A.F., Trache D., Abdelaziz A., Harrat A., Boukecha W.O., Hamouche M.A., et al. Elaboration, characterization and thermal decomposition kinetics of new nanoenergetic composite based on hydrazine 3-nitro-1,2,4-triazol-5-one and nanostructured cellulose nitrate // *Molecules*. 2022. Vol. 27, no. 20. P. 6945. <https://doi.org/10.3390/molecules27206945>.
3. Carter E.A., Swarbrick B., Harrison T.M., Ronai L. Rapid identification of cellulose nitrate and cellulose acetate film in historic photograph collections // *Heritage Science*. 2020. Vol. 8, no. 1. P. 51. <https://doi.org/10.1186/s40494-020-00395-y>.
4. Costa A.M.F., de Aguiar Filho S.Q., Santos T.J., Pereira D.H. Theoretical insights about the possibility of removing Pb²⁺ and Hg²⁺ metal ions using adsorptive processes and matrices of carboxymethyl diethylaminoethyl cellulose and cellulose nitrate biopolymers // *Journal of Molecular Liquids*. 2021. Vol. 331. P. 115730. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.115730>.
5. Gouda A.A., El Sheikh R., Youssef A.O., Gouda N., Gamil W., Khadrajy H.A. Preconcentration and separation of Cd(II), Co(II), Cu(II), Ni(II), and Pb(II) in environmental samples on cellulose nitrate membrane filter prior to their flame atomic absorption spectroscopy determinations // *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*. 2020. Vol. 100, no. 4. P. 364–377. <https://doi.org/10.1080/03067319.2020.1858070>.
6. Roldão É., Parola A.J., Vilarigues M., Lavédrine B., Ramos A.M. Unveiling the colours of cellulose nitrate black and white film-based negatives in colonial photography // *Studies in Conservation*. 2019. Vol. 65, no. 2. P. 1–9. <https://doi.org/10.1080/00393630.2019.1662672>.
7. Ioelovich M.J.I. Study of thermal energy of alternative solid fuels // *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2018. Vol. 8, no. 4. P. 117–124. <http://dx.doi.org/10.21285/2227-2925-2018-8-4-117-124>.
8. Zhang Y., Deng W., Wu M., Rahmaninia M., Xu C., Li B. Tailoring functionality of nanocellulose: current status and critical challenges // *Nanomaterials*. 2023. Vol. 13. P. 1489. <https://doi.org/10.3390/nano13091489>.
9. Korchagina A.A., Budaeva V.V., Kukhlenko A.A. Esterification of oat-hull cellulose // *Russian Chemical Bulletin*. 2019. Vol. 68, no. 6. P. 1282–1288. <https://doi.org/10.1007/s11172-019-2554-8>.
10. Sakovich G.V., Budaeva V.V., Korchagina A.A., Gismatulina Yu.A., Kozyrev N.V., Vakutin A.G. Oat-hull cellulose nitrates for explosive compositions // *Doklady Chemistry*. 2019. Vol. 487, no. 2. P. 221–225. <https://doi.org/10.1134/S0012500819080020>.
11. 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. Vol. 65, no. 6. P. 64–74. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20226506.6598>.
12. Yolhamid M.N.A.G., Ibrahim F., Zarim M.A.U.A.A., Ibrahim R., Adnan S., Yahya M.Z.A. The processing of nitrocellulose from rhizophora, palm oil bunches (EFB) and kenaf fibres as a propellant grade // *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. Vol. 7, no. 4. P. 59–65.

13. Muvhiwa R., Mawere E., Moyo L.B., Tshuma L. Utilization of cellulose in tobacco (*Nicotiana tabacum*) stalks for nitrocellulose production // *Heliyon*. 2021. Vol. 7, no. 7. P. e07598. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07598>.
14. Duan X., Li Z., Shi X., Pe C. Giant panda feces: potential raw material in preparation of nitrocellulose for propellants // *Cellulose*. 2023. Vol. 30. P. 3127–3140. <https://doi.org/10.1007/s10570-023-05054-6>.
15. Торгун И.Н., Никишов В.П., Бучнев И.И., Куценко Г.В., Ибрагимов Н.Г., Иванова И.П. [и др.]. Лен в пороховой промышленности: монография. М.: ФГУП «ЦНИИХМ», 2012. 248 с. EDN: SJIEYB.
16. Бобков С.А., Никишов В.П. Перспективы использования льняного сырья в интересах Министерства обороны Российской Федерации // *Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук*. 2019. N 3. С. 38–43. EDN: NEULDA.
17. Витебская А.В., Остроглядова О.И. Развитие потенциала Калининградской области за счет возобновляемых альтернативных источников энергии // *Бизнес. Образование. Право*. 2023. Т. 62. N 1. С. 159–162. <https://doi.org/10.25683/VOLBI.2023.62.576>. EDN: JBIRLM.
18. Капустянич С.Ю., Якименко В.Н. Мискантус – перспективная сырьевая, энергетическая и фитомелиоративная культура (литературный обзор) // *Почвы и окружающая среда*. 2020. Т. 3. N 3. С. 1–14. <https://doi.org/10.31251/pos.v3i3.126>. EDN: TAOQSK.
19. Gushchina V.A., Volodkin A.A., Ostroborodova N.I., Lykova A.S. The key aspects of the production process of *Miscanthus giganteus* under the conditions of the Middle Volga region // *Volga Region Farmland*. 2020. Vol. 4, no. 8. P. 32–37. <https://doi.org/10.26177/VRF.2020.8.4.007>.
20. Шавыркина Н.А., Гисматулина Ю.А., Будаева В.В. Перспективы химической и биотехнологической переработки мискантуса // *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2022. Т. 12. N 3. С. 383–393. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2022-12-3-383-393>. EDN: VAZQGS.
21. Gismatulina Y.A., Budaeva V.V., Kortusov A.N., Kashcheyeva E.I., Gladysheva E.K., Mironova G.F., et al. Evaluation of chemical composition of *Miscanthus giganteus* raised in different climate regions in Russia // *Plants*. 2022. Vol. 11, no. 20. P. 2791. <https://doi.org/10.3390/plants11202791>.
22. Gismatulina Yu.A., Budaeva V.V. Chemical composition of five *Miscanthus sinensis* harvests and nitric-acid cellulose therefrom // *Industrial Crops and Products*. 2017. Vol. 109. P. 227–232. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.08.026>.
23. Ovchinnikova E.V., Mironova G.F., Banzarsaeva S.P., Skiba E.A., Budaeva V.V., Kovgan M.A., et al. Bioprocessing of oat hulls to ethylene: Impact of dilute HNO₃- or NaOH pretreatment on process efficiency and sustainability // *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2021. Vol. 9, no. 49. P. 16588–16596. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.1c05112>.
24. Gensh K.V., Kolosov P.V., Bazarnova N.G. Quantitative analysis of cellulose nitrates by Fourier transform infrared spectroscopy // *Russian Journal of Bioorganic Chemistry*. 2011. Vol. 37, no. 7. P. 814–816. <https://doi.org/10.1134/S1068162011070077>.
25. Гисматулина Ю.А., Кортусов А.Н., Будаева В.В., Сакович Г.В. Исследование химического состава промышленно значимой для России культуры – мискантуса гигантского – урожаев 2019–2021 гг. // *Экология и промышленность России*. 2022. Т. 26. N 11. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2022-11-55-59>. EDN: LELATM.
26. Wang C., Kong Y., Hu R., Zhou G. Miscanthus: a fast-growing crop for environmental remediation and biofuel production // *GCB Bioenergy*. 2021. Vol. 13, no. 1. P. 58–69. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12761>.
27. Пономарев Б.А., Русин Д.А., Серегин В.В., Леонова Е.В., Беликова Т.А. Получение нитратов целлюлозы из льняной целлюлозы с учетом экономических и экологических факторов // *Успехи в химии и химической технологии*. 2011. Т. 25. N 12. С. 40–44. EDN: RARWVR.
28. Gismatulina Yu.A., Budaeva V.V., Sakovich G.V. Cellulose nitrates from intermediate flax straw // *Russian Chemical Bulletin*. 2016. Vol. 65, no. 12. P. 2920–2924. <https://doi.org/10.1007/s11172-016-1678-3>. EDN: XNEZVS.
29. Сакович Г.В., Будаева В.В., Корчагина А.А., Гисматулина Ю.А. Перспективы нитратов целлюлозы из нетрадиционного сырья для взрывчатых составов // *Химия растительного сырья*. 2019. N 1. С. 259–268. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2019014336>. EDN: ZACFML.
30. 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.
31. Валишина З.Т., Александров А.А., Хакимзянова Р.И., Косточко А.В. Исследование кинетики этерификации пеньковой целлюлозы // *Вестник технологического университета*. 2017. Т. 20. N 23. С. 13–16. EDN: YLCTQL.
32. Adekunle I.M. Production of cellulose nitrate polymer from sawdust // *Journal of Chemistry*. 2010. Vol. 7, no. 3. P. 709–716. <https://doi.org/10.1155/2010/807980>.
33. Gismatulina Yu.A., Budaeva V.V., Sakovich G.V. Nitrocellulose synthesis from miscanthus cellulose // *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. 2018. Vol. 43. P. 96–100. <https://doi.org/10.1002/prep.201700210>.
34. Gismatulina Yu.A., Budaeva V.V., Sakovich G.V. Nitric acid preparation of cellulose from miscanthus as a nitrocellulose precursor // *Russian Chemical Bulletin*. 2015. Vol. 64, no. 12. P. 2949–2953. <https://doi.org/10.1007/s11172-015-1252-4>.
35. Liu J. Nitrate esters chemistry and technology. Singapore: Springer Nature, 2019. P. 469–580.
36. Кушнир Е.Ю., Шахова А.Г., Базарнова Н.Г., Кымбатбекова М.К., Афанасенкова И.В. Делигнификация растительного сырья под воздействием микроволнового излучения. ИК-спектры и индексы упорядоченности целлюлозы // *Химия растительного сырья*. 2020. N 4. С. 101–107. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2020048962>. EDN: QBVPHI.

37. Михаилиди А.М., Котельникова Н.Е., Геньш К.В., Кушнир Е.Ю., Базарнова Н.Г. Состав и свойства древесины и целлюлозы тропических пород растений // Химия растительного сырья. 2013. N 1. С. 15–28. EDN: RCYJXT.

38. Trache D., Khimeche K., Mezroua A., Benziane M. Physicochemical properties of microcrystalline nitrocellulose from Alfa grass fibres and its thermal stability // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2016. Vol. 124, no. 3. P. 1485–1496. <https://doi.org/10.1007/s10973-016-5293-1>.

39. Tarchoun A.F., Trache D., Klapötke T.M., Chelouche S., Derradji M., Bessa W., et al. A promising energetic polymer from *Posidonia oceanica* brown algae: synthesis, characterization, and kinetic modeling // Macromolecular Chemistry and Physics. 2019.

Vol. 220, no. 22. P. 1900358.

<https://doi.org/10.1002/macp.201900358>.

40. Tarchoun A.F., Trache D., Klapötke T.M., Belmerabet M., Abdelaziz A., Derradji M., et al. Synthesis, characterization, and thermal decomposition kinetics of nitrogen-rich energetic biopolymers from aminated giant reed cellulosic fibers // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2020. Vol. 59, no. 52. P. 22677–22689. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.0c05448>.

41. Tarchoun A.F., Trache D., Klapötke T.M., Selmani A., Saada M., Chelouche S., et al. New insensitive high-energy dense biopolymers from giant reed cellulosic fibers: their synthesis, characterization, and non-isothermal decomposition kinetics // New Journal of Chemistry. 2021. Vol. 45, no. 11. P. 5099–5113. <https://doi.org/10.1039/d0nj05484d>.

REFERENCES

1. Misenan M.S.M., Norrrahim M.N.F., Saad M.M., Shaffie A.H., Zulkipli N.A., Farabi M.A. Recent advances in nitrocellulose-based composites. *Synthetic and Natural Nanofillers in Polymer Composites*. 2023;399–415. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-19053-7.00004-4>.

2. Tarchoun A.F., Trache D., Abdelaziz A., Harrat A., Boukecha W.O., Hamouche M.A., et al. Elaboration, characterization and thermal decomposition kinetics of new nanoenergetic composite based on hydrazine 3-nitro-1, 2, 4-triazol-5-one and nanostructured cellulose nitrate. *Molecules*. 2022;27(20):6945. <https://doi.org/10.3390/molecules27206945>.

3. Carter E.A., Swarbrick B., Harrison T.M., Ronai L. Rapid identification of cellulose nitrate and cellulose acetate film in historic photograph collections. *Heritage Science*. 2020;8(1):51. <https://doi.org/10.1186/s40494-020-00395-y>.

4. Costa A.M.F., de Aguiar Filho S.Q., Santos T.J., Pereira D.H. Theoretical insights about the possibility of removing Pb²⁺ and Hg²⁺ metal ions using adsorptive processes and matrices of carboxymethyl diethylaminoethyl cellulose and cellulose nitrate biopolymers. *Journal of Molecular Liquids*. 2021;331:115730. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.115730>.

5. Gouda A.A., El Sheikh R., Youssef A.O., Gouda N., Gamil W., Khadrajy H.A. Preconcentration and separation of Cd(II), Co(II), Cu(II), Ni(II), and Pb(II) in environmental samples on cellulose nitrate membrane filter prior to their flame atomic absorption spectroscopy determinations. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*. 2020;100(4):364–377. <https://doi.org/10.1080/03067319.2020.1858070>.

6. Roldão É., Parola A.J., Vilarigues M., Lavédrine B., Ramos A.M. Unveiling the colours of cellulose nitrate black and white film-based negatives in colonial photography. *Studies in Conservation*. 2019;65(2):1–9. <https://doi.org/10.1080/00393630.2019.1662672>.

7. Ioelovich M.J.I. Study of thermal energy of alternative solid fuels. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2018;8(4):117–124. <http://dx.doi.org/10.21285/2227-2925-2018-8-4-117-124>.

8. Zhang Y., Deng W., Wu M., Rahmaninia M., Xu C., Li B. Tailoring functionality of nanocellulose: current status and critical challenges. *Nanomaterials*. 2023;13:1489. <https://doi.org/10.3390/nano13091489>.

9. Korchagina A.A., Budaeva V.V., Kukhlenko A.A. Esterification of oat-hull cellulose. *Russian Chemical Bulletin*. 2019;68(6):1282–1288.

<https://doi.org/10.1007/s11172-019-2554-8>.

10. Sakovich G.V., Budaeva V.V., Korchagina A.A., Gismatulina Yu.A., Kozyrev N.V., Vakutin A.G. Oat-hull cellulose nitrates for explosive compositions. *Doklady Chemistry*. 2019;487(2):221–225. <https://doi.org/10.1134/S0012500819080020>.

11. 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.

<https://doi.org/10.6060/ivkkt.20226506.6598>.

12. Yolhamid M.N.A.G., Ibrahim F., Zarim M.A.U.A.A., Ibrahim R., Adnan S., Yahya M.Z.A. The processing of nitrocellulose from rhizophora, palm oil bunches (EFB) and kenaf fibres as a propellant grade. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018;7(4):59–65.

13. Muvhiwa R., Mawere E., Moyo L.B., Tshuma L. Utilization of cellulose in tobacco (*Nicotiana tabacum*) stalks for nitrocellulose production. *Heliyon*. 2021;7(7):e07598. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07598>.

14. Duan X., Li Z., Shi X., Pe C. Giant panda feces: potential raw material in preparation of nitrocellulose for propellants. *Cellulose*. 2023;30:3127–3140.

<https://doi.org/10.1007/s10570-023-05054-6>.

15. Torgun I.N., Nikishov V.P., Buchnev I.I., Kutsenko G.V., Ibragimov N.G., Ivanova I.P., et al. *Flax in the powder industry: monograph*. Moscow: FGUP “TsNIIKhM”; 2012. 248 p. (In Russian). EDN: SJIEYB.

16. Bobkov S.A., Nikishov V.P. Prospects for the use of flax raw materials for the Ministry of defence of the Russian Federation. *Izvestiya Rossiiskoi akademii raketnykh i artilleriiskikh nauk*. 2019;(3):38–43. (In Russian). EDN: NEULDA.

17. Vitebskaya A.V., Ostroglyadova O.I. Developing the potential of the Kaliningrad region through renewable alternative energy sources. *Biznes. Obrazovanie. Pravo = Business. Education. Right*. 2023;62(1):159–162. (In Russian).

<https://doi.org/10.25683/VOLBI.2023.62.576>. EDN: JBIRLM.

18. Kapustyanchik S.Yu., Yakimenko V.N. Miscanthus is promising raw material, energy and phytomeliorative

crop. *Pochvy i okruzhayushchaya sreda = The Journal of Soils and Environment*. 2020;3(3):1-14. (In Russian). <https://doi.org/10.31251/pos.v3i3.126>. EDN: TAOQSK.

19. Gushchina V.A., Volodkin A.A., Ostroborodova N.I., Lykova A.S. The key aspects of the production process of *Miscanthus giganteus* under the conditions of the Middle Volga region. *Volga Region Farmland*. 2020;4(8):32-37. <https://doi.org/10.26177/VRF.2020.8.4.007>.

20. Shavyrkina N.A., Gismatulina Yu.A., Budaeva V.V. Prospects for chemical and biotechnological processing of miscanthus. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2022;12(3):383-393. (In Russian). <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2022-12-3-383-393>. EDN: VAZQGS.

21. Gismatulina Y.A., Budaeva V.V., Kortusov A.N., Kashcheyeva E.I., Gladysheva E.K., Mironova G.F., et al. Evaluation of chemical composition of *Miscanthus giganteus* raised in different climate regions in Russia. *Plants*. 2022;11(20):2791. <https://doi.org/10.3390/plants11202791>.

22. Gismatulina Yu.A., Budaeva V.V. Chemical composition of five *Miscanthus sinensis* harvests and nitric-acid cellulose therefrom. *Industrial Crops and Products*. 2017;109:227-232. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.08.026>.

23. Ovchinnikova E.V., Mironova G.F., Banzarktsaeva S.P., Skiba E.A., Budaeva V.V., Kovgan M.A., et al. Bioprocessing of oat hulls to ethylene: Impact of dilute HNO₃ or NaOH pretreatment on process efficiency and sustainability. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2021;9(49):16588-16596. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.1c05112>.

24. Gensh K.V., Kolosov P.V., Bazarnova N.G. Quantitative analysis of cellulose nitrates by Fourier transform infrared spectroscopy. *Russian Journal of Bioorganic Chemistry*. 2011;37(7):814-816. <https://doi.org/10.1134/S1068162011070077>.

25. Gismatulina Yu.A., Kortusov A.N., Budaeva V.V., Sakovich G.V. Study of chemical composition of an industrial crop for Russia – *Miscanthus giganteus* harvested in 2019-2021. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii = Ecology and Industry of Russia*. 2022;26(11):55-59. (In Russian). <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2022-11-55-59>. EDN: LELATM.

26. Wang C., Kong Y., Hu R., Zhou G. Miscanthus: a fast-growing crop for environmental remediation and biofuel production. *GCB Bioenergy*. 2021;13(1):58-69. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12761>.

27. Ponomarev B.A., Rusin D.L., Seregin V.V., Leonova E.V., Belikova T.A. Obtaining cellulose nitrates from flax pulp, taking into account economic and environmental factors. *Uspekhi v khimii i khimicheskoi tekhnologii*. 2011;25(12):40-44. (In Russian). EDN: RARWVR.

28. Gismatulina Yu.A., Budaeva V.V., Sakovich G.V. Cellulose nitrates from intermediate flax straw. *Russian Chemical Bulletin*. 2016;65(12):2920-2924. <https://doi.org/10.1007/s11172-016-1678-3>. EDN: XNEZVS.

29. Sakovich G.V., Budaeva V.V., Korchagina A.A., Gismatulina Yu.A. Prospects of cellulose nitrates from unconventional feedstocks for use in composite explosives. *Khimiya rastitelnogo syrya*. 2019;(1):259-268. (In Russian).

<https://doi.org/10.14258/jcpm.2019014336>. EDN: ZACFML.

30. Valishina Z.T., Ivanova A.V., Mukhametshin B.F., Aleksandrov A.A., Kostochko A.V. Study of properties of cellulose nitrate esters based on hemp cellulose. *Vestnik tehnologicheskogo universiteta*. 2016;19(18):65-68. (In Russian). EDN: WYBSAT.

31. Valishina Z.T., Alexandrov A.A., Khakimzyanova R.I., Kostochko A.V. Study of the esterification kinetics of hemp cellulose. *Vestnik tehnologicheskogo universiteta*. 2017;20(23):13-16. (In Russian). EDN: YLCTQL.

32. Adekunle I.M. Production of cellulose nitrate polymer from sawdust. *Journal of Chemistry*. 2010;7(3):709-716. <https://doi.org/10.1155/2010/807980>.

33. Gismatulina Yu.A., Budaeva V.V., Sakovich G.V. Nitrocellulose synthesis from miscanthus cellulose. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. 2018;43:96-100. <https://doi.org/10.1002/prep.201700210>.

34. Gismatulina Yu.A., Budaeva V.V., Sakovich G.V. Nitric acid preparation of cellulose from miscanthus as a nitrocellulose precursor. *Russian Chemical Bulletin*. 2015;64(12):2949-2953. <https://doi.org/10.1007/s11172-015-1252-4>.

35. Liu J. *Nitrate esters chemistry and technology*. Singapore: Springer Nature; 2019, p. 469-580.

36. Kushnir E.Yu., Shakhova A.G., Bazarnova N.G., Kymbatbekova M.K., Afanasenkova I.V. Delignification of plant raw materials under microwave irradiation. IR spectra and ordering indices of the cellulose. *Khimiya rastitelnogo syrya*. 2020;(4):101-107. (In Russian). <https://doi.org/10.14258/jcpm.2020048962>. EDN: QBVPHI.

37. Mihailidi A.M., Kotelnikova N.E., Gen'sh K.V., Kushnir E.Ju., Bazarnova N.G. The composition and properties of wood and cellulose of tropical plant species. *Khimiya rastitelnogo syrya*. 2013;(1):15-28. (In Russian). EDN: RYJXT.

38. Trache D., Khimeche K., Mezroua A., Benziene M. Physicochemical properties of microcrystalline nitrocellulose from Alfa grass fibres and its thermal stability. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2016;124(3):1485-1496. <https://doi.org/10.1007/s10973-016-5293-1>.

39. Tarchoun A.F., Trache D., Klapötke T.M., Chelouche S., Derradji M., Bessa W., et al. A promising energetic polymer from *Posidonia oceanica* brown algae: synthesis, characterization, and kinetic modeling. *Macromolecular Chemistry and Physics*. 2019;220(22):1900358. <https://doi.org/10.1002/macp.201900358>.

40. Tarchoun A.F., Trache D., Klapötke T.M., Belmerabet M., Abdelaziz A., Derradji M., et al. Synthesis, characterization, and thermal decomposition kinetics of nitrogen-rich energetic biopolymers from aminated giant reed cellulosic fibers. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2020;59(52):22677-22689. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.0c05448>.

41. Tarchoun A.F., Trache D., Klapötke T.M., Selmani A., Saada M., Chelouche S., et al. New insensitive high-energy dense biopolymers from giant reed cellulosic fibers: their synthesis, characterization, and non-isothermal decomposition kinetics. *New Journal of Chemistry*. 2021;45(11):5099-5113. <https://doi.org/10.1039/d0nj05484d>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Корчагина Анна Александровна,
к.т.н., научный сотрудник,
Институт проблем химико-энергетических
технологий СО РАН,
659322, г. Бийск, ул. Социалистическая, 1,
Российская Федерация,
yakusheva89_21.ru@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3633-2392>

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад
в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта
интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный
вариант рукописи.*

Информация о статье

Поступила в редакцию 20.06.2023.
Одобрена после рецензирования 18.07.2023.
Принята к публикации 31.08.2023.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Anna A. Korchagina
Cand. Sci. (Engineering), Researcher,
Institute for Problems of Chemical and Energetic
Technologies of the Siberian Branch SB RAS,
1, Sotsialisticheskaya St., 659322, Biysk,
Russian Federation,
yakusheva89_21.ru@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3633-2392>

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

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 20.06.2023.
Approved after reviewing 18.07.2023.
Accepted for publication 31.08.2023.