


Оригинальная статья


DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.1/12>


УДК 676.02/.05



Роль предгидролизного размола при получении микрокристаллической целлюлозы: на примере образцов биоповрежденной древесины *Picea abies*, *Larix sibirica* и *Populus tremula*

Лариса В. Юртаева ✉, 2052727@mail.ru  <https://orcid.org/0009-0002-6045-3442>

Юрий Д. Алашкевич, alashkevichud@sibsau.ru  <https://orcid.org/0009-0005-9894-2630>

Евгений В. Каплёв, kaplyov2017@mail.ru  <https://orcid.org/0009-0005-0235-7630>

Владимир А. Патраков, Patrakov_vo03@mail.ru  <https://orcid.org/0009-0003-4673-0367>

Ева Р. Колосова, eva.kolosova@mail.ru  <https://orcid.org/0009-0004-6863-7822>

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31, г. Красноярск, 660037, Российская Федерация

Способность размалывающего оборудования при производстве микрокристаллической целлюлозы (МКЦ) разделять растительные полимеры на волокна, измельчать и развивать у них определенные свойства можно использовать в случае невозможности минимизировать концентрацию кислоты. Для получения микрокристаллической целлюлозы использовались образцы ($N = 6$) сухостойной древесины *Picea abies* (L.) H.KARST., *Larix sibirica* LEDEB., *Populus tremula* L. Варка образцов проводилась в лабораторном автоклаве, предгидролизный размол – в центробежном размалывающем аппарате при концентрации волокнистой массы 6 % и варьировании степени помола от 15 до 85 градусов Шоппер Риглера (°ШР). Химическая обработка образцов целлюлозы при разной степени помола проводилась при варьировании температуры гидролиза от 80 до 100 °С, концентрации соляной кислоты от 54.75 до 91.25 г/л, времени гидролитической деструкции от 60 до 120 мин. Зависимости степени полимеризации ($R^2 = 0.93$) и степени кристалличности ($R^2 = 0.99$) от этих факторов аппроксимированы уравнениями регрессии второго порядка и визуализированы в виде трехмерных поверхностей отклика. Оптимальные значения переменных факторов гидролиза: концентрация соляной кислоты – 54.75 г/л, время гидролитической деструкции – 60 мин, температура гидролиза – 80 °С, степень помола – 85 °ШР. Наибольшее влияние на количественные значения степени полимеризации и степени кристалличности оказывает степень помола волокнистой массы, наименьшее – температура гидролиза. С увеличением степени помола значительное, в 2,7 раза, снижение степени полимеризации происходит у образцов МКЦ из древесины *P. abies* и *P. tremula*. Увеличение показателей степени кристалличности (17%) и насыпной плотности (20 %) в большей степени наблюдается у образцов МКЦ из древесины *P. abies* и *L. sibirica*. Использование предгидролизного размола целлюлозы в процессе получения МКЦ позволяет сократить расходы на проведение химической обработки в 1,7 раза.

Ключевые слова: микрокристаллическая целлюлоза, *Picea abies* (L.) H.KARST., *Larix sibirica* LEDEB., *Populus tremula* L., предгидролизный размол, степень полимеризации, степень кристалличности

Финансирование: данное исследование не получало внешнего финансирования.

Благодарности: авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.


Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Роль предгидролизного размола при получении микрокристаллической целлюлозы: на примере образцов биоповрежденной древесины *Picea abies*, *Larix sibirica* и *Populus tremula* / Л. В. Юртаева, Ю. Д. Алашкевич, Е. В. Каплёв, В. А. Патраков, Е. Р. Колосова // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 14. – № 1 (53). – С. 203–218. – Библиогр.: с. 212–217 (33 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.1/12>.

Поступила 17.11.2023. Пересмотрена 13.12.2023. Принята 19.12.2023. Опубликована онлайн 20.03.2024.

Article


The role of prehydrolysis refining in obtaining microcrystalline cellulose: case of biodamage wood from *Picea abies*, *Larix sibirica* and *Populus tremula* species

Larisa V. Yurtaeva ✉, 2052727@mail.ru,  <https://orcid.org/0009-0002-6045-3442>

Yuri D. Alashkevich, alashkevichud@sibsau.ru  <https://orcid.org/0009-0005-9894-2630>

Eugene V. Kaplyov, kaplyov2017@mail.ru  <https://orcid.org/0009-0005-0235-7630>

Vladimir A. Patrakov, Patrakov_vo03@mail.ru  <https://orcid.org/0009-0003-4673-0367>

Eva R. Kolosova, eva.kolosova@mail.ru  <https://orcid.org/0009-0004-6863-7822>

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, 660037, Krasnoyarsk, Russian Federation

Abstract

The ability of grinding equipment in the production of microcrystalline cellulose (MCC) to separate plant polymers into fibers, grind and develop certain properties in them can be used if it is impossible to minimize the concentration of acid. To obtain microcrystalline cellulose, samples (N = 6) of dry wood *Picea abies* (L.) H.KARST., *Larix sibirica* LEDEB., *Populus tremula* L. species were used. The samples were cooked in a laboratory autoclave, prehydrolysis grinding was carried out in a centrifugal grinding machine at a fibrous mass concentration of 6% and varying the degree of grinding from 15 to 85 degrees of Schopper Riegler (°SR). Chemical treatment of cellulose samples with different degrees of grinding was carried out with varying hydrolysis temperatures from 80 to 100 °C, hydrochloric acid concentrations from 54.75 to 91.25 g/l, and hydrolytic degradation time from 60 to 120 minutes. The dependences of the degree of polymerization ($R^2 = 0.93$) and the degree of crystallinity ($R^2 = 0.99$) on these factors are approximated by second-order regression equations and visualized as three-dimensional response surfaces. The optimal values of the hydrolysis variables are: hydrochloric acid concentration – 54.75 g/l, hydrolytic degradation time – 60 min, hydrolysis temperature – 80 °C, grinding degree – 85 °C. The degree of grinding of the fibrous mass has the greatest influence on the quantitative values of the degree of polymerization and the degree of crystallinity, the lowest is the temperature of hydrolysis. With an increase in the degree of grinding, a significant 2.7-fold decrease in the degree of polymerization occurs in MCC samples from *P. abies* and *P. tremula* wood. An increase in the degree of crystallinity (17%) and bulk density (20%) is observed to a greater extent in MCC samples from *P. abies* and *L. sibirica* wood. The use of prehydrolysis milling of cellulose in the process of obtaining MCC reduces the cost of chemical treatment by 1.7 times.

Keywords: microcrystalline cellulose, *Picea abies* (L.) H.KARST., *Larix sibirica* LEDEB., *Populus tremula* L., prehydrolysis refining, degree of polymerization, degree of crystallinity

Funding: this research received no external funding.

Acknowledgments: authors thank the reviewers for their contribution to the peer review.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

For citation: Yurtaeva L. V., Alashkevich Yu. D., Kaplyov E. V., Patrakov V. A., Kolosova E. R. (2023). The role of prehydrolysis refining in obtaining microcrystalline cellulose: case of biodamage wood from *Picea abies*, *Larix sibirica* and *Populus tremula* species. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 14, No. 1 (53), pp. 203-218 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.1/12>.

Received 17.11.2023. **Revised** 13.12.2023. **Accepted** 19.12.2023. **Published online** 20.03.2024.

Введение

В настоящее время перспективным направлением развития целлюлозно-бумажной промышленности является производство микрокристаллической целлюлозы (МКЦ). В связи с растущим спросом на альтернативные виды сырья взамен невозобновляемым и дефицитным ископаемым материалам, благодаря своей возобновляемости, нетоксичности, экономической ценности, способности к биологическому разложению, высоким механическим свойствам, биосовместимости микрокристаллическая целлюлоза широко применяется в виде добавки в различных отраслях промышленности и в производстве полимерных композитов. Для удовлетворения растущего спроса на производство новых типов материалов на основе МКЦ в промышленных масштабах и снижения энергоемкости производства, разрабатываются новые способы ее получения.

Растительные полимеры являются дешевым, доступным, возобновляемым сырьем и идеально подходят для использования во многих отраслях промышленности, таких как целлюлозно-бумажная, строительная, мебельная, фармакологическая, химическая и др. Они обладают высоким соотношением прочности и веса, некоррозионной природой, высокой вязкостью разрушения, возобновляемостью и устойчивостью, что дает им уникальные преимущества перед другими материалами [1].

Целлюлозы является самым распространенным биополимером в природе, который содержится не только в деревьях хвойных и лиственных пород, но и недревесных (однолетних) растениях, отходах сельскохозяйственных культур и другой биомассе. Она состоит из полидисперсных линейных полимерных цепей, которые образуют надмолекулярные структуры с водородными связями. Благодаря этой структуре она нерастворима в воде и большинстве обычных органических жидкостей. Свойства цел-

люлозы и ее способность вступать в реакцию с другими веществами зависят от химического строения и от физической структуры целлюлозы (формы макромолекул, межмолекулярного взаимодействия, надмолекулярной структуры) [2-4].

Это обстоятельство предопределяет повышенный интерес исследователей к применению модифицированной целлюлозы (порошковых целлюлозных материалов) в различных отраслях промышленности. Виды порошковых целлюлозных материалов (ПЦМ): порошковая (ПЦ)/ powdered cellulose (PC), микрокристаллическая (МКЦ)/ microcrystalline cellulose (MCC), микрофибриллярная целлюлоза (МФЦ)/microfibrillated cellulose (MFC), нанокристаллическая (НКЦ)/nanocrystalline cellulose (CNC), нанофибриллярная (НФЦ)/nanofibrillated cellulose (NFC). Установлено, что ПЦМ отличаются высокой прочностью, сверхпластичностью, способны изменять свойства материалов, придавая им качественно и количественно новые характеристики [5-8]. В результате меняются свойства исходного материала [9]. Отличительными особенностями ПЦМ являются строение и размер частиц, степень полимеризации (СП), степень кристалличности (СК).

Наибольший спрос МКЦ наблюдается в фармацевтической, химической, косметической, пищевой промышленности, например в качестве модификаторов реологии, пищевых ингредиентов (загустителей, стабилизаторов эмульсий), фармацевтических препаратов (в качестве вспомогательного средства для таблетирования), хроматографии [10-14].

МКЦ - деполимеризованный очищенный целлюлозный продукт, получаемый из альфа-целлюлозы с использованием минеральных кислот (серной, соляной, азотной и др.). Степень полимеризации находится в диапазоне 100...400; степень кристалличности 0,63...0,90; размер частиц 1... 400 мкм [15-19].

Кроме традиционного способа получения МКЦ существуют и другие способы: паровой взрыв (автогидролиз-взрыв), ультразвуковая обработка, с использованием заморозки при помощи жидкого азота, с экструзионным воздействием [20-23]. Значения выходных параметров МКЦ позволяют оценить дальнейшую пригодность ее в производстве и подобрать условия для переработки.

При предгидролизном размоле происходят структурные изменения волокна: внешнее и внутреннее фибриллирование, укорочение волокна, скручиваемость и высвобождение химических компонентов [28-30].

Анализ литературных данных показал, что несмотря на увеличивающийся спрос использования МКЦ, в настоящее время не существует единой технологии, обеспечивающей промышленный способ ее получения для химической отрасли. Это связано с тем, что все они имеют существенные недостатки как с технологической и с экономической точек зрения, так и с точки зрения экологичности и управляемости процессами производства [24, 25]. Поэтому разработка экологически безопасной, энерго- и ресурсосберегающей технологии производства МКЦ, включающей операции ножевого, так и безножевого размола полуфабрикатов [26, 27] является актуальной.

Цель работы – экспериментально на установке инерционного типа [31, 32] осуществить поиск оптимальных значений факторов предгидролизного размола, влияющих на показатели эффективности процесса – степень полимеризации (СП) и степень кристалличности (СК) макромолекул целлюлозы при разной степени помола образцов из биоповрежденной древесины *Picea abies* (L.) H.KARST., *Larix sibirica* LEDEB. и *Populus tremula* L.

Материалы и методы

Объект и предмет исследования

Объект исследования – процесс получения МКЦ. Предмет исследования – процесс предгидролизного размола волокнистой массы в технологии получения МКЦ.

Дизайн исследования

В качестве сырья выступали целлюлозы, полученные из древесины хвойных пород (ели обыкновенной, *Picea abies* (L.) H.KARST.; лиственницы

сибирской, *Larix sibirica* LEDEB.), поврежденные в 2017 году сибирским шелкопрядом, уссурийским полиграфом, и из древесины лиственной породы (осины, *Populus tremula* L.), поврежденной грибом. Отбор сырья проводился в апреле 2022 года на территории Енисейского района Красноярского края. Содержание остаточного лигнина в целлюлозе, выделенной из биоповрежденной ели – 3,9 %, из биоповрежденной лиственницы – 4,3 %, из биоповрежденной осины – 2,21 %; альфа-целлюлозы – 83-87 %, степень повреждения древесины – 20-25%.

Для контроля процесса размола волокнистой массы и качества образцов МКЦ, полученной из биоповрежденной древесины использовали следующие лабораторные методы:

- определение массовой доли лигнина в целлюлозе по ГОСТ 11960;
- массовую долю альфа-целлюлозы определяли по ГОСТ 6840;
- измерение степени помола в °ШП проводили в соответствии с ISO 5267-1;
- среднюю длину волокна определяли на приборе для измерения показателя средней длины волокон бумажной массы СДВ-Т (Россия);
- определение внешней удельной поверхности целлюлозы по методу Е. Я. Винецкой с помощью фотоэлектрического колориметра КФК-2УХЛ4.2;
- определение степени полимеризации проводилось в соответствии с ГОСТ 9105.
- определение параметров микроструктуры образцов с помощью микроскопа.

Получение целлюлозы из биоповрежденной древесины осуществлялось варочным раствором, основными компонентами которого являлись гидроксид и сульфид натрия (NaOH и Na₂S). Варка проводилась в лабораторном автоклаве при максимальной температуре 170 °С в течение 3 часов, жидкостном модуле – 4,8, степень сульфидности варочного раствора – 18%. Промывку и сортирование целлюлозы проводили в лабораторной сееже. Выход целлюлозы после варки составил 41-43 %.

Размол волокнистой массы (15...85 °ШП) концентрацией 6 % с одновременной отбелкой гипохлоритом натрия при гидромодуле 1:18 проводилась в установке с инерционными телами (ЦРА)

[33], при частоте вращения инерционных тел 228 мин⁻¹, угле установки ножей на инерционном теле относительно оси 0°, угле наклона ножей в разномольном барабане 35°.

После размола образцы целлюлозы (15...85 °ШР) сухостью 93...98 % подвергали гетерогенному гидролизу (химической обработке). Интервалы варьирования: температура $t = 80...100$ °С, концентрация соляной кислоты 54,75...91,25 г/л, время 60...120 мин. Для определения степени полимеризации целлюлозы после гидролиза применяли комплексное соединение гексанатрий тристаратр железа.

Гидролизованную целлюлозу подвергали диспергированию на мельнице марки VLM-2 (Рос-

сия) до мелкодисперсного состояния. Индекс кристалличности микрокристаллической целлюлозы установлен на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3. Излучение Сука, сканирование 1 град/мин, шаг сканирования 0,02 град.

Размеры полученных образцов МКЦ измеряли на сканирующем микроскопе высокого разрешения Hitachi SU3500 (ускоряющее напряжение – 0,3 - 30 кВ, детектор – вторичных и обратно рассеянных электронов).

Анализ данных

Для математической обработки результатов использовали пакет программ Statistica (планирование экспериментов, регрессионный и дисперсионный анализы) (табл. 1, 2).

Таблица 1

Нормализация параметров полнофакторного эксперимента по поиску оптимальных факторов предгидролизного размола, влияющих на показатели эффективности процесса получения МКЦ – степень полимеризации (СП) и степень кристалличности (СК) макромолекул целлюлозы – при разной степени помола образцов из биоповрежденной древесины

Table 1

Normalization of the parameters of a full-factor experiment to search for optimal prehydrolysis grinding factors affecting the efficiency of the MCC production process – the degree of polymerization (DP) and the degree of crystallinity (DC) of cellulose macromolecules – at different degrees of grinding of samples from bio-damaged wood

Параметр Parameter	Обозначение Designation	
	натуральное natural	нормализованное normalized
Входные параметры (управляемые факторы) Input parameters (controlled factors)		
Концентрация кислоты, г/л Acid concentration, g/l	с	X ₁
Температура, °С Temperature, °C	t	X ₂
Длительность гидролиза, мин Duration of hydrolysis, min	τ	X ₃
Степень помола, °ШР The degree of refining, °SR	°ШР	X ₄
Выходные параметры (контролируемые факторы) Output parameters (controlled factors)		
Степень полимеризации Degree of polymerization	СП	Y ₁
Степень кристалличности, % Degree of crystallinity	СК	Y ₂

Таблица 2

Уровни и интервалы варьирования исследуемых факторов

Table 2

Levels and intervals of variation of the studied factors

Фактор Factor	Обозначение Designation		Интервал варьирования фактора The interval of variation of the factor	Уровень варьирования фактора The level of variation of the factor		
	Натуральное Natural	Нормализованное Normalized		-1	0	+1
Концентрация кислоты, г/л Acid concentration, g/l	с	X ₁	18,25	54,75	73	91,25

Деревопереработка. Химические технологии

Фактор Factor	Обозначение Designation		Интервал варьирования фактора The interval of variation of the factor	Уровень варьирования фактора The level of variation of the factor		
	Натуральное Natural	Нормализованное Normalized		-1	0	+1
Температура, °С Temperature, °C	t	X ₂	10	80	90	100
Длительность гидролиза, мин Duration of hydrolysis, min	τ	X ₃	30	60	90	120
Степень помола, °ШП The degree of refining, °SR	°ШП	X ₄	35	15	50	85

Результаты

Гидролиз целлюлозы соляной кислотой проводили до предельной степени полимеризации по наиболее приемлемым режимам. Предварительно

было изучено изменение размеров волокон целлюлозы до и после предгидролизного размола волокнистой массы в ЦРА, полученной из различного вида сырья (табл. 3).

Таблица 3

Экспериментальные данные предгидролизного размола целлюлозы

Table 3

Experimental data of prehydrolysis refining of cellulose mass

Породы древесины Type of wood	Лигнин, % Lignin, %	Альфа-целлюлоза, % Alpha Cellulose, %	Средняя длина волокна, мм Average fiber length, mm	Внешняя удельная поверхность, м ² /г External specific gravity surface, m ² /g
до размола (15 °ШП) before refining (15 °SR)				
Ель Fir	3,9	85,5	2,83	13433
Лиственница Larch	4,3	83,4	2,57	14168
Осина Aspen	2,21	85,0	1,08	11897
после размола (85 °ШП) after refining (85 °SR)				
Ель Fir	3,46	85,5	1,37	16974
Лиственница Larch	3,60	83,4	1,43	17056
Осина Aspen	1,82	85,0	0,49	13970

Источник: собственные вычисления авторов
Source: own calculations

Анализ полученных данных показывает, что с увеличением степени помола происходит снижение остаточного количества лигнина в целлюлозе, длины волокна и увеличение внешней удельной поверхности волокна. Изменение этих показателей интенсивнее происходит у осины: снижение длины волокна - на 55%, увеличение внешней удельной поверхности - в 1,6 раз и количества мелочи - на 4,8%.

Менее интенсивно у лиственницы: длины волокна - 44%, внешней удельной поверхности - 1,2 раза, мелочи - 1,2%.

Для удаления аморфной части и получения микрокристаллической целлюлозы, образцы целлюлозы (ели, лиственницы и осины) со степенью помола 15 °ШП, 35 °ШП, 55 °ШП, 85 °ШП подвергали обработке соляной кислотой.

Для определения приемлемых условий проведения процесса гидролитической деструкции целлюлозы, выделенной из биоповрежденной древесины при жидкостном модуле 1:15 в ходе эксперимента варьировали четыре фактора: X_1 – концентрация кислоты (диапазон варьирования 54,75–91,25 г/л), X_2 – температура (диапазон варьирования 80–100 °С), X_3 – продолжительность гидролиза (60–120 мин), X_4 – степень помола (15–85 °ШР). Результаты этой серии опытов характеризовали двумя выходными параметрами: Y_1 – степень полимеризации, Y_2 – степень кристалличности, %. Четырехфакторный план эксперимента по каждому виду сырья составил 81 режим проведения процесса гидролиза. Задача оптимизации сформулирована следующим образом: в пределах изученной области факторного пространства $54,75 \leq X_1 \leq 91,25$, $80 \leq X_2 \leq 100$, $60 \leq X_3 \leq 120$, $15 \leq X_4 \leq 85$ вычислить какой из факторов оказывает наибольшее влияние на количественные значения Y_1 , Y_2 .

В результате линейные уравнения регрессии (на примере *P. abies*) для определения влияния входных факторов (X_1 , г/л, X_2 , °С, X_3 , мин, X_4 , °ШР) на степень:

- полимеризации имеет вид

$$Y_1 = 1108,03 - 5,92 \cdot X_1 - 3,04 \cdot X_2 - 5,32 \cdot X_3 - 9,31 \cdot X_4 - 0,0055 \cdot X_1^2 + 0,028 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,014003 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,036 \cdot X_1 \cdot X_4 - 0,014 \cdot X_2^2 + 0,014 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,025 \cdot X_2 \cdot X_4 + 0,0042 \cdot X_3^2 + 0,027 \cdot X_3 \cdot X_4 + 0,0079 \cdot X_4^2 \quad (1)$$

- кристалличности имеет вид

$$Y_2 = 67,57 + 0,095 \cdot X_1 - 0,042 \cdot X_2 + 0,045 \cdot X_3 + 0,063 \cdot X_4 - 0,00019 \cdot X_1^2 - 0,00046 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,00006 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,00027 \cdot X_1 \cdot X_4 + 0,00059 \cdot X_2^2 - 0,00018 \cdot X_2 \cdot X_3 -$$

$$0,00017 \cdot X_2 \cdot X_4 - 0,000039 \cdot X_3^2 - 0,00019 \cdot X_3 \cdot X_4 - 0,000006 \cdot X_4^2 \quad (2)$$

Значения выходных параметров МКЦ при планировании эксперимента с образцами биоповрежденной древесины *P. abies*, *L. sibirica* и *P. tremula* представлены в таблице 4, а поверхность отклика СП и СК, зависящая от технологических режимов предгидролизного размола – на рис. 1 и 2.

Уравнения (1) и (2) с достаточной степенью точности аппроксимируют искомые зависимости. Величина коэффициента детерминации составила для уравнений: степени полимеризации 0,93; степени кристалличности 0,98 (уровень значимости $p < 0,05$), что указывает на достоверность коэффициентов полученных уравнений.

Обсуждение

Из уравнений (1) и (2) следует, что при гидролизе целлюлозы наибольшее влияние на степень полимеризации и степень кристалличности оказывает степень помола волокнистой массы, наименьшее – температура.

Достаточно заметное влияние на СК и СП при получении МКЦ, так же, как и при получении порошковой целлюлозы [7], оказывают технологические режимы предгидролизного размола, определяемые концентрацией кислоты, температурой, длительностью и степенью размола. По разработанным режимам были получены образцы МКЦ (см. табл. 4), полученные в наиболее эффективных условиях проведения гидролиза: концентрация соляной кислоты 54,75 г/л, время гидролитической деструкции 60 мин, температура 80 °С, степень помола 85 °ШР.

Таблица 4

Значения выходных параметров МКЦ

Table 4

Values of MCC output parameters

Породы древесины Type of wood	Выход, % Exit, %	Насыпная плотность, г/мл Bulk density, g/ml	СП Degree of polymerization	СК Degree of crystallinity
до размола (15 °ШР) before refining (15 °SR)				
Ель Fir	97,0	0,303	275	0,65
Лиственница Larch	97,0	0,305	280	0,65
Осина Aspen	95,0	0,325	230	0,63
после размола (85 °ШР) after refining (85 °SR)				
Ель Fir	96,0	0,380	100	0,78
Лиственница Larch	96,0	0,377	124	0,75

Деревопереработка. Химические технологии

Породы древесины Type of wood	Выход, % Exit, %	Насыпная плотность, г/мл Bulk density, g/ml	СП Degree of polymerization	СК Degree of crystallinity
Осина Aspen	94,0	0,370	87	0,80
Avicel стандарт FAO UN MCC 460 i Avicel standard FAO UN MCC 460 i	-	0,280-0,360	265	0,63-0,82

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

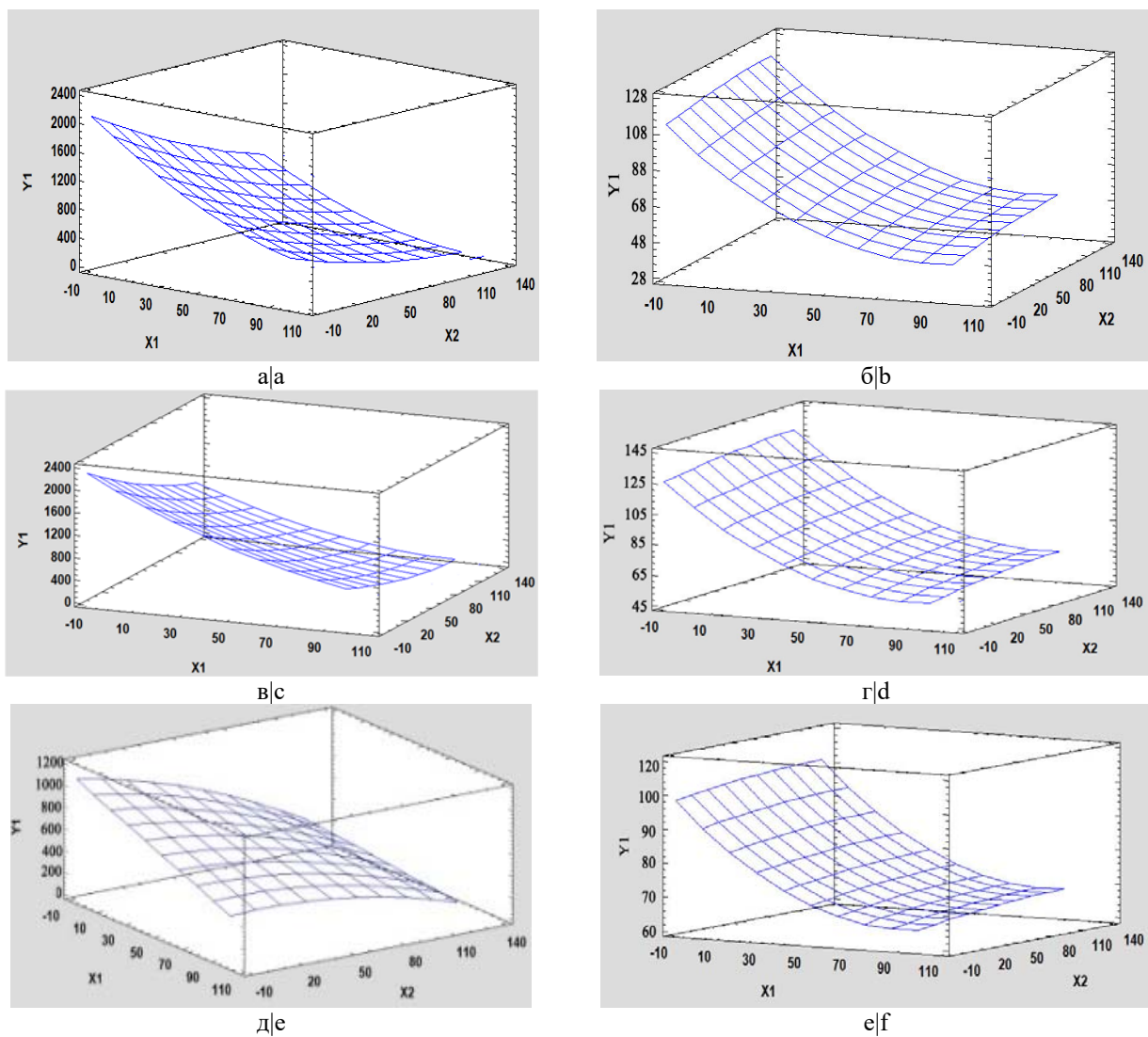


Рисунок 1. Поверхности отклика СП от температуры и продолжительности гидролиза:

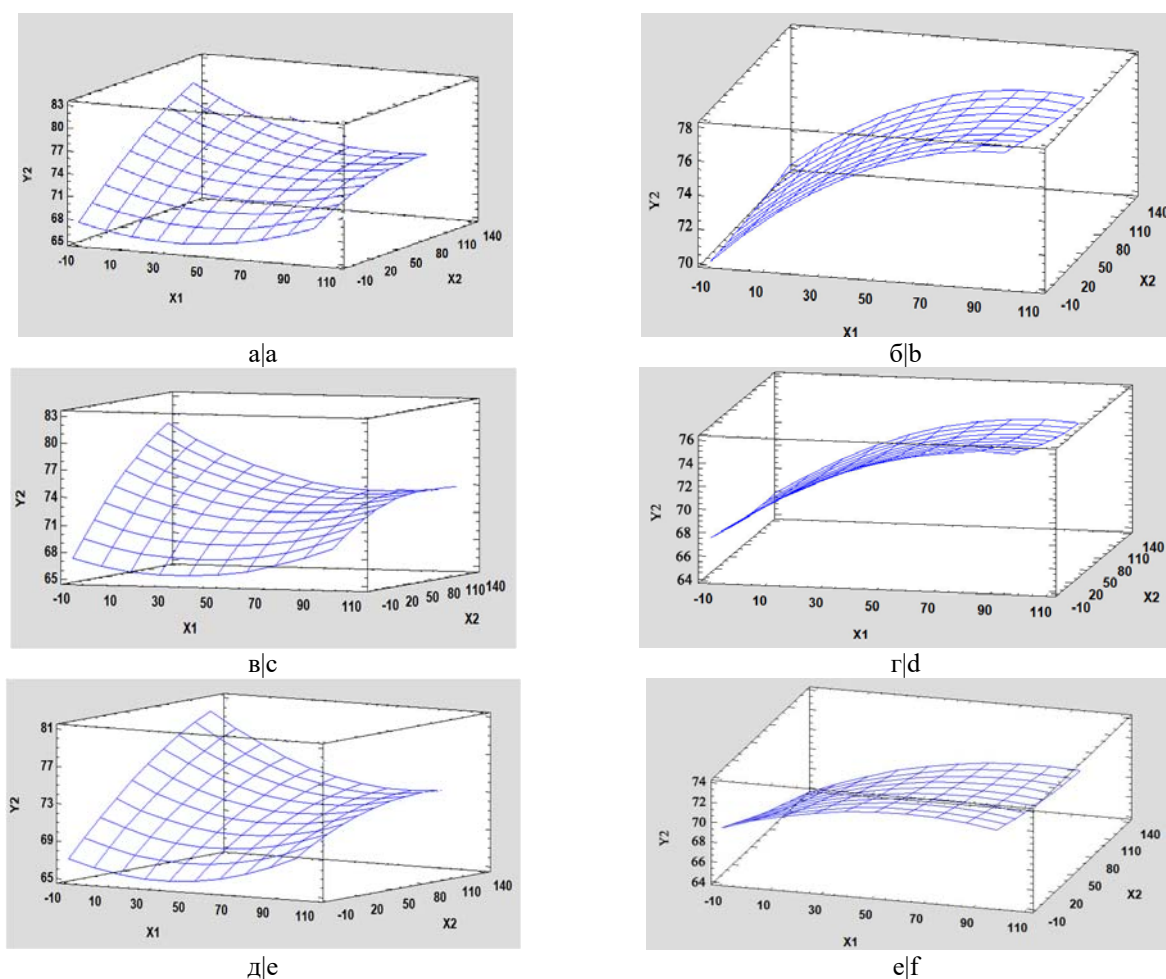
ель а – 15 °ШР, б - 85 °ШР; лиственница в – 15 °ШР, г - 85 °ШР; осина д – 15 °ШР, е - 85 °ШР

Figure 1. Response surfaces of the degree of polymerization on the temperature and duration of hydrolysis:

fir а – 15 °SR, б - 85 °SR; larch в – 15 °SR, г - 85 °SR; aspen д – 15 °SR, е - 85 °SR

Источник: собственные композиции авторов

Source: the author's composition



ель а – 15 °ШР, б - 85 °ШР; лиственница в – 15 °ШР, г - 85 °ШР; осина д – 15 °ШР, е - 85 °ШР;
 Рисунок 2. Поверхности отклика СК от температуры и продолжительности гидролиза:
 ель а – 15 °ШР, б - 85 °ШР; лиственница в – 15 °ШР, г - 85 °ШР; осина д – 15 °ШР, е - 85 °ШР;
 fir а – 15 °SR, b - 85 °SR; larch в – 15 °SR, d - 85 °SR; aspen е – 15 °SR, f - 85 °SR

Figure 2. Response surfaces of the degree of crystallinity on the temperature and duration of hydrolysis

Источник: собственные вычисления автора

Source: the author's composition

Полученные уравнения регрессии для СП (1) и СК (2) позволяют спрогнозировать степень полимеризации и кристалличности при выбранных технологических параметрах проведения химической обработки целлюлозы. Включение предгидролизного размола в процесс получения микрокристаллической целлюлозы сократит расходы на проведение химической обработки волокнистой массы (концентрация кислоты, время обработки и температура проведения гидролиза) в 1,7 раза.

В дальнейшем планируется исследовать физико-механические свойства и остаточную деформацию после сжатия у водонефтенабухающих резин

при включении в их состав МКЦ с разной степенью полимеризации.

Заключение

Биоповрежденная древесина является полноценным сырьем для получения микрокристаллической целлюлозы.

С увеличением степени помола до 83 °ШР, независимо от вида целлюлозы, степень полимеризации микрокристаллической целлюлозы снижается: у образцов биоповрежденной древесины ели обыкновенной (*P. abies*) – в 2,8 раза; лиственницы сибирской (*L. sibirica*) – в 2,3 раза; осины (*P. tremula*)

– 2,6 раза, степень кристалличности повышается соответственно - на 17, 14 и 22 % соответственно, что положительно сказывается на качественных показателях МКЦ.

Образцы биоповрежденной древесины *P. tremula*, подвергнутые для выработки МКЦ предгидролизному размолу на установке инерционного типа, демонстрируют наименьшую степень полимеризации по сравнению с образцами биоповрежденной древесины *P. abies* и *L. Sibirica*.

После размола волокнистой массы в ЦРА до 83 °ШР количественные изменения бумагообразующих показателей происходят наиболее интенсивнее у образцов из биоповрежденной древесины осины (*P. tremula*): длина волокна снижается на 55 %, внешняя удельная поверхность и доля мелочи увеличиваются соответственно в 1,6 раза и на 4,8 %.

Список литературы

1. Биоразлагаемые материалы на основе растительных полисахаридов для упаковки пищевых продуктов. Часть 1 / И. Ю. Потороко, А. В. Малинин, А. В. Цатуров, Удей Багале // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии. 2020; № 2: С. 21-28. – DOI: <http://doi.org/10.14529/food200203>. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42951866>.
2. Вшивков, С. А. Реологические свойства жидкокристаллических растворов производных целлюлозы / С. А. Вшивков, Е. В. Русинова, А. С. А. Салех // Высокомолекулярные соединения. Серия А. 2021; № 4: С. 243-248. – DOI 10.31857/S2308112021040088. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45795102>.
3. Tan W. Y., Gopinath S. C. B., Anbu P., Velusamy P., Gunny A. A. N., Chen Y., Subramaniam S. Generation of microcrystalline cellulose from cotton waste and its properties // BioResources. 2023; 8(3): 4884-4896. DOI: <http://doi.org/10.15376/biores.18.3.4884-4896>.
4. García Hernández M. A., Marure A. L., Neira Velázquez M. G., Mariano Torres J. A., Galvan A. A. Microcrystalline cellulose isolation – Proposed mechanism: Enhanced coupling // BioResources. 2023; 18(1): 1788-1802. DOI: <http://doi.org/10.15376/biores.18.1.1788-1802>.
5. Мартакова, Ю. В. Гидрогели на основе растительных целлюлоз и их композиты с наночастицами серебра : дис. ... канд. хим. наук : 02.00.06 / Мартакова Юлия Владимировна. – Ин-т высокомолекуляр. соединений. - Сыктывкар, 2018. - 153 с. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54451226>.
6. Момзякова, К. С. Совершенствование технологии получения целлюлозы из травянистых растений : дис. ... канд. техн. наук: 05.17.06 / Момзякова Ксения Сергеевна. – Казань, 2021. – 150 с. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54419808>.
7. Влияние ножевого способа размола волокнистой массы на процесс получения порошковой целлюлозы / Ю. Д. Алашкевич, Л. В. Юртаева, Н. С. Решетова, Р. А. Марченко // Химия растительного сырья. 2020; № 4: С. 493-499. – DOI: <http://doi.org/10.14258/jcprm.2020048121>. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/vmyzac>.
8. Переработка поврежденной древесины как фактор рационального использования природных ресурсов / Е. Р. Колосова, В. А. Патраков, Е. В. Каплев, Д. С. Таразеев // Молодые ученые в решении актуальных проблем науки : сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (с Международным участием), Красноярск, 21–22 апреля 2022 года. – Красноярск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева", 2022; 194-196. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49759509>.
9. Малова, А. С. Использование порошковых целлюлозных материалов в производстве бумаги и картона / А. С. Малова, В. Н. Сунайт // Современная целлюлозно-бумажная промышленность. Актуальные задачи и перспективные решения : Материалы II Международной научно-технической конференции молодых учёных и специалистов ЦБП, Санкт-Петербург, 23 ноября 2020 года. Том I. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, 2020; 46-51. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46185815>.

10. Queiroz A. L. P., Kerins B. M., Yadav J. et al. Investigating microcrystalline cellulose crystallinity using Raman spectroscopy. *Cellulose*. 2021; № 28: 8971–8985. <https://doi.org/10.1007/s10570-021-04093-1>.
11. Hermawan, D., Lai, T. K., Jafarzadeh, S. J., Gopakumar, D. A., Hasan, M., Owolabi, F. A. T., Sri Aprilia, N. A., Rizal, S., and Abdul Khalil, H. P. S. Development of seaweed-based bamboo microcrystalline cellulose films intended for sustainable food packaging applications. *BioRes.* 2019; 14 (2): 3389-3410. DOI: <http://doi.org/10.15376/biores.14.2.3389-3410>.
12. Hou, W., Ling, C., Shi, S., and Yan, Z. Preparation and characterization of microcrystalline cellulose from waste cotton fabrics by using phosphotungstic acid // *Int. J. Biol. Macromol.* 2019; № 123: 363-368. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.11.112>.
13. Kale, R. D., Bansal, P. S., and Gorade, V. G. Extraction of microcrystalline cellulose from cotton sliver and its comparison with commercial microcrystalline cellulose, *J. Polym. Environ.* 2018; № 26: 355-364. DOI: <http://doi.org/10.1007/S10924-017-0936-2>.
14. Болтовский, В. С. Способы получения микрокристаллической целлюлозы / В. С. Болтовский // Труды БГТУ. Серия 2: Химические технологии, биотехнология, геоэкология. 2021; № 1(241): С. 40-50. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44888935>.
15. Топтунов, Е. А., Севастьянова, Ю. В. Порошковые целлюлозные материалы: обзор, классификация, характеристики и области применения // *Химия растительного сырья*. 2021; № 4: С. 31-45. DOI: <http://doi.org/10.14258/jcprm.2021049186>. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47446186>.
16. Vanhatalo, K. A new manufacturing process for microcrystalline cellulose (MCC): A doctoral dissertation for the degree of Doctor of Science (Technology). Helsinki, 2019. 73 p. DOI: <http://doi.org/10.1134/S1070427209030276>.
17. Barud, H, Silva R, Barud H, Tercjak A, Guttierrez J, Lustri W, et al. A multipurpose natural and renewable polymer in medical applications: Bacterial cellulose. *Carbohydrate Polymers*. 2018; № 153: 406-420. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.07.059>.
18. Piyas, R.A., Sapuan S.M., Ishak M.R., Zainudin E.S., Atikah M.S. Characterization of sugar palm nanocellulose and its potential for reinforcement with a starch-based composite. In: *Sugar Palm Biofibers, Biopolymers, and Biocomposites*. 1st ed. Boca Raton, FL: CRC Press/Taylor & Francis Group; 2018; №1: pp. 189-220. DOI: <http://doi.org/10.1201/9780429443923-10>.
19. Делигнификация растительного сырья под воздействием микроволнового излучения. Ик-спектры и индексы упорядоченности целлюлозы / Е. Ю. Кушнир, А. Г. Шахова, Н. Г. Базарнова [и др.] // *Химия растительного сырья*. 2020; № 4: С. 101-107. – DOI: <http://doi.org/10.14258/jcprm.2020048962>. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44529529>.
20. Получение микрокристаллической целлюлозы из древесины осины под воздействием микроволнового излучения / Т. С. Геньш, Е. Ю. Кушнир, П. В. Колосов, К. В. Геньш // *Мой выбор - наука! : сборник материалов VI Региональной молодежной конференции, XLVI научной конференции студентов, магистрантов, аспирантов и учащихся лицейных классов, Барнаул, 17–27 апреля 2019 года.* – Барнаул: Алтайский государственный университет. 2020; С. 1256-1261. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43841476>.
21. Получение гидролизованной целлюлозы из древесины осины и сосны под воздействием микроволнового излучения / Е. Ю. Кушнир, Н. Г. Базарнова, Т. С. Геньш, К. В. Геньш // *Новые достижения в химии и химической технологии растительного сырья : Матер. VIII Всерос. конференции с международным участием, Барнаул, 05–09 октября 2020 года / под ред. Н. Г. Базарновой, В. И. Маркина.* – Барнаул: Алтайский государственный университет. 2020; С. 43-45. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44188333>.
22. Сравнительные исследования физико-химических свойств и структуры хлопковой целлюлозы и ее модифицированных форм / А. А. Атаханов, Б. Мамадиеров, М. Кузиева [и др.] // *Химия растительного сырья*. 2019; № 3: С. 5-13. – DOI: <http://doi.org/10.14258/jcprm.2019034554>. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41311613>.
23. Патент № 2804640 С2 Российская Федерация, МПК С08В 15/02. Способ непрерывного получения микрокристаллической целлюлозы : № 2022106827 : заявл. 15.03.2022 : опубл. 03.10.2023 / А. И. Сизов,

А. А. Добровольский, А. В. Мухамедшин, С. Д. Пименов ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "Кристалл". – 7 с. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54674742>.

24. Получение порошковой микрокристаллической целлюлозы из древесной целлюлозы и исследование ее свойств / О. А. Носкова, Ф. Х. Хакимова, Р. Р. Хакимов, Е. А. Катаев // Наука и технологии: модернизация, инновации, прогресс : Сборник научных трудов по материалам X Международной научно-практической конференции, Анапа, 27 декабря 2022 года. – Анапа: Общество с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский центр экономических и социальных процессов» в Южном Федеральном округе. 2022; С. 62-67. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50338313>.

25. Каплев, Е. В. Способы получения порошковых целлюлозных материалов / Е. В. Каплев, Л. В. Юртаева // Состояние окружающей среды, проблемы экологии и пути их решения : Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Усть-Илимск, 20–21 декабря 2021 года. – Иркутск: Байкальский государственный университет. 2022; с. 79-85. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48215448>.

26. Влияние ножевого и безножевого способов размола на волокнистый материал / А. В. Гончаров, О. Н. Федорова, Р. А. Марченко, Ю. Д. Алашкевич // Лесной и химический комплексы - проблемы и решения : Сборник матер. по итогам Всерос. науч.-практ. конференции, Красноярск, 02–04 сентября 2019 года. – Красноярск, 2019. – С. 315-317. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41219738>.

27. Марченко, Р. А. Безножевая обработка вторичного волокнистого сырья в ЦБП / Р. А. Марченко, В. И. Шуркина, А. А. Муравицкая // Решетневские чтения : Материалы XXIII Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева. В 2-х частях, Красноярск, 11–15 ноября 2019 года / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова. Ч. 2. – Красноярск, 2019. – С. 98-99. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41824511>.

28. Получение аналитической зависимости прочностных свойств бумаги от бумагообразующих показателей волокнистой массы / Л. В. Юртаева, Н. С. Решетова, Ю. Д. Алашкевич [и др.] // Химия растительного сырья. 2020; № 4: с. 501-509. – DOI: <http://doi.org/10.14258/jcprgm.2020048583>. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44529573>.

29. Каплев, Е. В. Влияние режима размола на физико-механические свойства сульфатной беленой целлюлозы / Е. В. Каплев, Л. В. Юртаева, Ю. Д. Алашкевич // Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов : Матер. V Междунар. науч.-техн. конференции, посвященной памяти профессора В.И. Комарова, Архангельск, 11–14 сентября 2019 года. – Архангельск: Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова. 2019; с. 87-92. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42408660>.

30. Размол лиственной целлюлозы с использованием гарнитуры с криволинейной формой ножей / Е. М. Батракевич, В. И. Шуркина, Р. А. Марченко, Н. Е. Шумарина // Решетневские чтения : Материалы XXV Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева. В 2-х частях, Красноярск, 10–12 ноября 2021 года / Под общей редакцией Ю.Ю. Логинова. Ч. 2. – Красноярск, 2021. – С. 88-89. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47712294>.

31. Воронин, И. А. Механизм размола на ножевом центробежно-размалывающем аппарате / И. А. Воронин, Ю. Д. Алашкевич, В. А. Кожухов // Химия растительного сырья. 2020; № 4: С. 485-492. – DOI: <http://doi.org/10.14258/jcprgm.2020048164>. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44529571>.

32. Влияние размола однолетних растительных полимеров на процесс получения мелкодисперсной целлюлозы / Л. В. Юртаева, Ю. Д. Алашкевич, Е. В. Каплев, Е. А. Слизилова // Хвойные бореальной зоны. 2023; № 4: 361-368. – DOI: <http://doi.org/10.53374/1993-0135-2023-4-361-368>. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54398267>.

33. Патент № 2803626 С1 Российская Федерация, МПК D21C 1/04. Способ получения микрокристаллической целлюлозы : № 2023103933 : заявл. 20.02.2023 : опубл. 18.09.2023 / Ю. Д. Алашкевич, В. И. Ковалев, Л. В. Юртаева, Е. В. Каплёв, Е. А. Слизилова; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва". – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54659924>.

References

1. Biodegradable materials based on plant polysaccharides for food packaging. Part 1 / I. Y. Potoroko, A. V. Malinin, A. V. Tsaturov, Uday Bakale // *Bulletin of the South Ural State University. Series: Food and Biotechnology*. 2020; No. 2: pp. 21-28. – DOI: <http://doi.org/10.14529/food200203>. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42951866>.
2. Vshivkov, S. A. Rheological properties of liquid crystalline solutions of cellulose derivatives / S. A. Vshivkov, E. V. Rusinova, A. S. A. Salekh // *High molecular weight compounds. Series A*. 2021; No. 4: pp. 243-248. – DOI 10.31857/S2308112021040088. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45795102>.
3. Tan W. Y., Gopinath S. C. B., Anbu P., Velusamy P., Gunny A. A. N., Chen Y., Subramaniam S. Generation of microcrystalline cellulose from cotton waste and its properties // *BioResources*. 2023; 8(3): 4884-4896. DOI: <http://doi.org/10.15376/biores.18.3.4884-4896>.
4. García Hernández M. A., Marure A. L., Neira Velázquez M. G., Mariano Torres J. A., Galvan A. A. Microcrystalline cellulose isolation – Proposed mechanism: Enhanced coupling // *BioResources*. 2023; 18(1): 1788-1802. DOI: <http://doi.org/10.15376/biores.18.1.1788-1802>.
5. Martakova, Yu. V. Hydrogels based on plant celluloses and their composites with silver nanoparticles : dis. ... candidate of Chemical Sciences : 02.00.06 / Martakova Julia Vladimirovna. – In-t high molecular weight. connections. Syktyvkar, 2018. - 153 p. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54451226>.
6. Momzyakova, K. S. Improving the technology of obtaining cellulose from herbaceous plants : Dis. ... candidate of Technical Sciences: 05.17.06 / Momzyakova Ksenia Sergeevna. - Kazan, 2021. - 150 p. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54419808>.
7. The influence of the knife method of grinding fibrous mass on the process of obtaining powdered cellulose / Yu. D. Alashkevich, L. V. Yurtayeva, N. S. Reshetova, R. A. Marchenko // *Chemistry of vegetable raw materials*. 2020; No. 4: Pp. 493-499. – DOI 10.14258/jcprm.2020048121.
8. Processing of damaged wood as a factor of rational use of natural resources / E. R. Kolosova, V. A. Patrakov, E. V. Kaplev, D. S. Tarazeev // *Young scientists in solving urgent problems of science : a collection of materials of the All-Russian scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists (with International participation)*, Krasnoyarsk, April 21-22, 2022. Krasnoyarsk, 2022; pp.194-196. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49759509>.
9. Malova, A. S. The use of powdered cellulose materials in the production of paper and cardboard / A. S. Malova, V. N. Sunait // *Modern pulp and paper industry. Current tasks and promising solutions : Materials of the II International Scientific and Technical Conference of Young Scientists and Specialists of the Central Bank, St. Petersburg, November 23, 2020. Vol. I*. – St. Petersburg : St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, 2020; pp. 46-51. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46185815>.
10. Queiroz A. L. P., Kerins B. M., Yadav J. et al. Investigating microcrystalline cellulose crystallinity using Raman spectroscopy. *Cellulose*. 2021; № 28: 8971–8985. <https://doi.org/10.1007/s10570-021-04093-1>.
11. Hermawan D., Lai T. K., Jafarzadeh S. J., Gopakumar D. A., Hasan M., Owolabi F. A. T., Sri Aprilia N. A., Rizal S., Abdul Khalil H. P. S. Development of seaweed-based bamboo microcrystalline cellulose films intended for sustainable food packaging applications *BioRes*. 2019; 14 (2): 3389-3410. DOI: <http://doi.org/10.15376/biores.14.2.3389-3410>.
12. Hou W., Ling C., Shi S., Yan Z. Preparation and characterization of microcrystalline cellulose from waste cotton fabrics by using phosphotungstic acid // *Int. J. Biol. Macromol*. 2019; № 123: 363-368. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.11.112>.
13. Kale R. D., Bansal P. S., Gorade V. G. Extraction of microcrystalline cellulose from cotton sliver and its comparison with commercial microcrystalline cellulose, *J. Polym. Environ*. 2018; № 26: 355-364. DOI: <http://doi.org/10.1007/S10924-017-0936-2>.
14. Boltovsky V. S. Methods of obtaining microcrystalline cellulose / V. S. Boltovsky // *Proceedings of BSTU. Series 2: Chemical technologies, biotechnology, geocology*. 2021; No. 1(241): pp. 40-50. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44888935>.

15. Toptunov, E. A., Sevastyanova, Yu. V. Powdered cellulose materials: review, classification, characteristics and applications // Chemistry of vegetable raw materials. 2021; No. 4: pp. 31-45. DOI: <http://doi.org/10.14258/jcprm.2021049186>. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47446186>.

16. Vanhatalo, K. A new manufacturing process for microcrystalline cellulose (MCC): A doctoral dissertation for the degree of Doctor of Science (Technology). Helsinki, 2019. 73 pp. DOI: <http://doi.org/10.1134/S1070427209030276>.

17. Barud, H, Silva R, Barud H, Tercjak A, Gutierrez J, Lustri W, et al. A multipurpose natural and renewable polymer in medical applications: Bacterial cellulose. Carbohydrate Polymers. 2018; № 153: 406-420. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.07.059>.

18. Ilyas, R.A., Sapuan S.M., Ishak M.R., Zainudin E.S., Atikah M.S. Characterization of sugar palm nanocellulose and its potential for reinforcement with a starch-based composite. In: Sugar Palm Biofibers, Biopolymers, and Biocomposites. 1st ed. Boca Raton, FL: CRC Press/Taylor & Francis Group; 2018; №1: pp. 189-220. DOI: <http://doi.org/10.1201/9780429443923-10>.

19. Delignification of plant raw materials under the influence of microwave radiation. IR spectra and indices of cellulose ordering / E. Y. Kushnir, A. G. Shakhova, N. G. Bazarnova [et al.] // Chemistry of vegetable raw materials. 2020; No. 4: pp. 101-107. – DOI: <http://doi.org/10.14258/jcprm.2020048962>. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44529529>.

20. Production of microcrystalline cellulose from aspen wood under the influence of microwave radiation / T. S. Gensh, E. Y. Kushnir, P. V. Kolosov, K. V. Gensh // My choice is science! : collection of materials of the VI Regional Youth Conference, XLVI scientific conference of students, undergraduates, postgraduates and students of lyceum classes, Barnaul, April 17-27, 2019. Barnaul: Altai State University. 2020; pp. 1256-1261. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43841476>.

21. Obtaining hydrolyzed cellulose from aspen and pine wood under the influence of microwave radiation / E. Y. Kushnir, N. G. Bazarnova, T. S. Gensh, K. V. Gensh // New achievements in chemistry and chemical technology of plant raw materials : Materials of the VIII All-Russian conference with international participation, Barnaul, 05-09 October 2020 / Edited by N.G. Bazarnova, V.I. Markin. Barnaul: Altai State University. 2020; pp. 43-45. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44188333>.

22. Comparative studies of the physico-chemical properties and structure of cotton cellulose and its modified forms / A. A. Atakhanov, B. Mamadievov, M. Kuzieva [et al.] // Chemistry of vegetable raw materials. 2019; No. 3: pp. 5-13. – DOI: <http://doi.org/10.14258/jcprm.2019034554>. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41311613>.

23. Patent No. 2804640 C2 Russian Federation, IPC C08B 15/02. Method of continuous production of microcrystalline cellulose : No. 2022106827 : application 03.03.2022 : publ. 03.10.2023 / A. I. Sizov, A. A. Dobrovolsky, A.V. Mukhamedshin, S. D. Pimenov ; applicant Limited Liability Company "Kristacel". – 7 s. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54674742>.

24. Obtaining powdered microcrystalline cellulose from wood pulp and the study of its properties / O. A. Noskova, F. H. Khakimova, R. R. Khakimov, E. A. Kataev // Science and technology: modernization, innovation, progress : A collection of scientific papers based on the materials of the X International Scientific and Practical Conference, Anapa, December 27, 2022. – Anapa: Limited Liability Company "Scientific Research Center of Economic and Social Processes" in the Southern Federal District. 2022; pp. 62-67. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50338313>.

25. Kaplev, E. V. Methods of obtaining powdered cellulose materials / E. V. Kaplev, L. V. Yurtayeva // The state of the environment, environmental problems and ways to solve them : Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference, Ust-Ilimsk, December 20-21, 2021. – Irkutsk: Baikal State University. 2022; pp. 79-85. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48215448>.

26. The influence of knife and non-knife grinding methods on fibrous material / A.V. Goncharov, O. N. Fedorova, R. A. Marchenko, Yu. D. Alashkevich // Forest and chemical complexes - problems and solutions : A collection of materials based on the results of the All-Russian scientific and practical conference, Krasnoyarsk, 02-04 September 2019. – Krasnoyarsk: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Siberian State University of Science and Technology named after Academician M.F. Reshetnev". 2019; pp. 315-317. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41219738>.

27. Marchenko, R. A. Knife-free processing of secondary fibrous raw materials in the pulp and paper mill / R. A. Marchenko, V. I. Shurkina, A. A. Muravitskaya // Reshetnev readings : Materials of the XXIII International Scientific and Practical Conference dedicated to the memory of the General designer of rocket and Space Systems, Academician M.F. Reshetnev. In 2 parts, Krasnoyarsk, November 11-15, 2019 / Under the general editorship of Yu.Yu. Loginov. Volume Part 2. – Krasnoyarsk: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Siberian State University of Science and Technology named after Academician M.F. Reshetnev". 2019; pp. 98-99. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41824511>.

28. Obtaining the analytical dependence of the strength properties of paper on the paper-forming parameters of the fibrous mass / L. V. Yurtayeva, N. S. Reshetova, Yu. D. Alashkevich [et al.] // Chemistry of vegetable raw materials. 2020; No. 4: pp. 501-509. – DOI: <http://doi.org/10.14258/jcprm.2020048583>. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44529573>.

29. Kaplev, E. V. The influence of the grinding regime on the physico-mechanical properties of bleached sulfate cellulose / E. V. Kaplev, L. V. Yurtayeva, Yu. D. Alashkevich // Problems of mechanics of pulp and paper materials : Materials of the V International Scientific and Technical Conference dedicated to the memory of Professor V.I. Komarov, Arkhangelsk, September 11-14, 2019. Arkhangelsk: M.V. Lomonosov Northern (Arctic) Federal University. 2019; pp. 87-92. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42408660>.

30. Grinding of deciduous cellulose using a headset with a curved shape of knives / E. M. Batrakevich, V. I. Shurkina, R. A. Marchenko, N. E. Shumarina // Reshetnev readings : Materials of the XXV International Scientific and Practical Conference dedicated to the memory of the General designer of rocket and Space Systems, Academician M.F. Reshetnev. In 2 parts, Krasnoyarsk, November 10-12, 2021 / Under the general editorship of Yu.Yu. Loginov. Volume Part 2. – Krasnoyarsk: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Siberian State University of Science and Technology named after Academician M.F. Reshetnev". 2021; pp. 88-89. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47712294>.

31. Voronin, I. A. The mechanism of grinding on a knife centrifugal grinding machine / I. A. Voronin, Yu. D. Alashkevich, V. A. Kozhukhov // Chemistry of vegetable raw materials. 2020; No. 4: Pp. 485-492. – DOI: <http://doi.org/10.14258/jcprm.2020048164>. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44529571>.

32. The effect of grinding annual plant polymers on the process of obtaining finely dispersed cellulose / L. V. Yurtayeva, Yu. D. Alashkevich, E. V. Kaplev, E. A. Slizikova // Coniferous boreal zones. 2023. No. 4. pp. 361-368. – DOI: <http://doi.org/10.53374/1993-0135-2023-4-361-368>. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54398267>.

33. Patent No. 2803626 C1 Russian Federation, IPC D21C 1/04. Method for obtaining microcrystalline cellulose : No. 2023103933 : application 20.02.2023 : publ. 18.09.2023 / Yu. D. Alashkevich, V. I. Kovalev, L. V. Yurtayeva, E. V. Kaplev, E. A. Slizikova; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Siberian State University The University of Science and Technology named after Academician M.F. Reshetnev". – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54659924>.

Сведения об авторах

✉ *Юртаева Лариса Владимировна* – кандидат техн. наук, доцент, доцент кафедры машин и аппаратов промышленных технологий, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31, г. Красноярск, Российская Федерация, 660037, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-6045-3442>, e-mail: 2052727@mail.ru.

Алашкевич Юрий Давыдович – академик РАО, доктор техн. наук, профессор кафедры машин и аппаратов промышленных технологий, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31, г. Красноярск, Российская Федерация, 660037, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9894-2630>, e-mail: alashkevichud@sibsau.ru.

Каплёв Евгений Вячеславович – аспирант, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31, г. Красноярск, Российская Федерация, 660037, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0235-7630>, e-mail: kaplyov2017@mail.ru.

Патраков Владимир Андреевич – сотрудник студенческого конструкторского бюро «Промышленные технологии», ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31, г. Красноярск, Российская Федерация, 660037, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4673-0367>, e-mail: Patrakov_vo03@mail.ru.

Колосова Ева Романовна – сотрудник студенческого конструкторского бюро «Промышленные технологии», ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31, г. Красноярск, Российская Федерация, 660037, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6863-7822>, e-mail: eva.kolosova@mail.ru.

Information about the authors

✉ *Larisa V. Yurtayeva* – Cand. Sci. (Techn.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Machines and Devices of Industrial Technologies, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russian Federation, 660037, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-6045-3442>, e-mail: 2052727@mail.ru.

Yuri D. Alashkevich – Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Techn.), Professor of the Department of Machines and Applications of Industrial Technologies, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russian Federation, 660037, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9894-2630>, e-mail: alashkevichud@sibsau.ru.

Eugene V. Kaplyov – postgraduate student, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russian Federation, 660037, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0235-7630>, e-mail: kaplyov2017@mail.ru.

Vladimir A. Patrakov – employee of the student design bureau "Industrial Technologies", Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russian Federation, 660037, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4673-0367>, e-mail: Patrakov_vo03@mail.ru.

Eva R. Kolosova – employee of the student design bureau "Industrial Technologies", Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russian Federation, 660037, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0235-7630>, e-mail: kaplyov2017@mail.ru.

✉ – Для контактов | Corresponding author