

На правах рукописи



Юртаева Лариса Владимировна

**ПОЛУЧЕНИЕ МИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ ИЗ
РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЕЕ В
ПРОИЗВОДСТВЕ КОМПОЗИТОВ**

4.3.4 - Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства

и переработки древесины

Автореферат диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

Красноярск – 2026 г.

Работа выполнена на кафедре «Машин и аппаратов промышленных технологий» в ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», г. Красноярск

Научный консультант: академик РАО, доктор технических наук, профессор
Алашкевич Юрий Давыдович

Официальные оппоненты: **Казаков Яков Владимирович**,
доктор технических наук, профессор, Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, профессор кафедры целлюлозно-бумажных и лесохимических производств

Кряжев Анатолий Максимович,
доктор технических наук

Хакимова Фирдавес Харисовна,
доктор технических наук, профессор, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, профессор кафедры технологии полимерных материалов и порохов

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна», г. Санкт-Петербург

Защита состоится «15» октября 2026 года в 10⁰⁰ ч на заседании диссертационного совета 24.2.403.03 в ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева по адресу: 660049, г. Красноярск, пр. Мира, 82, аудитория Ц-110 (зал заседаний).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписями, заверенными печатью, просим направлять по адресу: 660049, г. Красноярск, пр. Мира, 82, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева, ученому секретарю диссертационного совета. E-mail: us_kai@mail.ru.

В отзыве указывается фамилия, имя, отчество, почтовый адрес, телефон и адрес электронной почты (при наличии), наименование организации и должность лица, представившего отзыв (п. 28 Положения о присуждении ученых степеней).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Сибирского государственного университета науки и технологии имени академика М. Ф. Решетнева, на сайте: <https://www.sibsau.ru/defending/146>

Автореферат разослан « ___ » _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Криворотова Анна Ивановна

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Растущий спрос на натуральные ингредиенты вместе с потребностью в экономически эффективных решениях заставил многих производителей перейти от синтетических ингредиентов к натуральным. Это связано с ужесточением экологических норм, стимулирующих рынок и побуждающих производителей использовать более безопасные, экологические виды сырья, в частности микрокристаллическую целлюлозу (МКЦ). Тем самым создаются благоприятные предпосылки для расширения производственных возможностей предприятий, специализирующихся на выпуске МКЦ, в различных секторах промышленности и здравоохранения. Россия не является крупным производителем МКЦ, большая часть продукции импортируется.

Актуальность производства МКЦ на территории Российской Федерации обусловлена необходимостью импортозамещения и потребностью в развитии отечественного производства. По результатам исследований агентства Discovery Research Group объем мирового рынка МКЦ в 2022 году составил 41,3 млрд руб., и ожидается, что к 2033 году достигнет 170,4 млрд руб. при среднегодовом темпе 6 %. Организация отечественных производств позволит снизить импортозависимость, повысить конкурентоспособность российской продукции, развить новые направления перерабатывающей промышленности и обеспечить устойчивое развитие целлюлозно-бумажной отрасли.

Развитие отечественного производства МКЦ сдерживается двумя проблемами. Первая связана с недостаточной экономической эффективностью, что обусловлено использованием дорогостоящих видов сырья (целлюлозы из деловой древесины или хлопка), и повышенным удельным расходом химических реагентов. Вторая заключается в низком качестве выпускаемой МКЦ, вызванном применением сырья, не полностью отвечающего требованиям к содержанию качества товарной облагороженной технической целлюлозы: содержание α -целлюлозы должно составлять не менее 92 % (в соответствии с ГОСТ 32770-2014), а также должна обеспечиваться высокая химическая чистота, молекулярная однородность, реакционная способность.

Для решения указанных проблем в диссертационной работе предложен новый подход к получению МКЦ, включающий стадию предгидролизного размола волокнистых материалов с использованием различных способов размола. Данный подход обеспечивает деструкцию первичной структуры растительного сырья и увеличение активной поверхности целлюлозных волокон, что способствует более эффективному проникновению гидролизующего агента (кислоты) внутрь волокна. В результате создаются предпосылки для снижения жесткости условий последующего гидролиза (температуры, концентрации кислоты, продолжительности процесса) при сохранении качества целевого продукта. А использование биоповрежденной древесины (хвойных и лиственных пород) и недревесных источников сырья (однолетних растений) позволит снизить зависимость от дорогостоящих видов

сырья и создаст дополнительные возможности формирования сырьевой базы для производства МКЦ.

Изложенные в диссертации результаты исследований получены в ходе выполнения работ по проекту «Разработка технологии производства микрокристаллической целлюлозы из сельскохозяйственных отходов» в рамках государственной программы поддержки развития российских высших учебных заведений «Приоритет 2030» №075-15-2025-067.

Степень научной разработанности темы. Теоретические основы способов получения МКЦ были сформулированы и развиты в многочисленных работах зарубежных и отечественных ученых: Батиста О. А., Филиппа Б., Штеге Х.-Х., Иоеловича М. Я., Азубуйке С. П., Охамафе А. О., Алашкевича Ю. Д, Пена Р. З., Кузнецова Б. Н., Кряжева А. М., Хакимовой Ф. К., Ковернинского И. Н., Уваровой Д. Ю., Махотиной Л. Г., Прусского А. И., Аутлова С. А., Ахметшина И. Р., Момзяковой К. С., Сизова А. И., Щербаковой Т. П., Котельниковой Н. Е., Пименова С. Д., Сарымсакова А. А., Торлопова М. А., Ахмедова М. А. и многих других. Несмотря на значительное количество работ, содержащих практические решения по получению МКЦ, сохраняющаяся импортозависимость РФ в данной области обуславливает необходимость продолжения исследований и разработки эффективных технологических решений на основе более дешёвых и быстро возобновляемых растительных ресурсов, обеспечивающих снижение экологической нагрузки. При этом в литературе отсутствуют количественные зависимости между режимами предгидролизного размола волокнистой массы в водной среде (степенью помола, типом размалывающего оборудования) и кинетическими параметрами гидролиза (константами скорости, энергией активации) при получении МКЦ. Установление этих зависимостей позволят оптимизировать процесс и повысить экономическую эффективность производства МКЦ.

Объект исследований – получение МКЦ в целлюлозно-бумажном производстве.

Предмет исследований – характеристики МКЦ, полученной из целлюлозы биоповрежденной древесины хвойных и лиственных пород и одревесневшей части стебля (костры) технической конопли с предгидролизным размолем в водной среде.

Цель работы – разработать научные основы получения МКЦ с заданными качественными и количественными параметрами из растительных полимеров и применить МКЦ при производстве композитов.

Для решения поставленной цели в диссертационной работе предлагается решение следующих задач:

– изучить целесообразность использования биоповрежденной древесины хвойных и лиственных пород, а также одревесневшей части стебля (костры) технической конопли, как альтернативу деловой древесине при получении МКЦ;

– разработать технологию получения МКЦ с предварительным размолем волокнистых полуфабрикатов в водной среде;

- установить кинетические закономерности протекания реакции гидролиза целлюлозных материалов;
- исследовать влияние способов гидромеханической обработки (предгидролизного размола) волокнистой массы на показатели качества МКЦ, полученной из разных видов сырья;
- разработать технологические режимы процесса гидролиза в зависимости от степени помола, обеспечивающие снижение экономических затрат на химическую обработку; выявить корреляционную зависимость «концентрация кислоты – продолжительность гидролиза – температура процесса – степень помола образца на степени полимеризации и кристалличности»;
- разработать способ получения гидрогеля из МКЦ с разной степенью помола исходного сырья; исследовать влияние степени помола образцов на физико-химические свойства гидрогелей, полученных из МКЦ различного природного происхождения;
- разработать технологические решения по получению композиционных материалов с использованием МКЦ (вулканизируемых резиновых смесей) и гидрогеля МКЦ (бумажных отливок); изучить влияние гидрогеля в виде наполнителя на физико-механические характеристики бумажных отливок;
- провести расчет экономической эффективности технологии получения МКЦ с включением предгидролизного размола волокнистой массы в водной среде из альтернативных деловой древесине источников сырья (биоповрежденной древесины (ель, осина) и одревесневшей части стебля (костры) технической конопли).

Научная новизна работы:

- впервые установлена корреляция между условиями проведения предгидролизного размола волокнистой массы в водной среде и кинетическими параметрами гидролиза для получения МКЦ из одревесневшей части стебля (костры) технической конопли и биоповрежденной древесины;
- впервые получены данные о морфологических свойствах целлюлозы из одревесневшей части стебля (костры) технической конопли, прошедшей предгидролизный размол в водной среде на разных типах размалывающего оборудования;
- разработана математическая модель, описывающая зависимость ключевых характеристик МКЦ – степени полимеризации и степени кристалличности от технологических параметров гидролиза, включая степень помола;
- впервые определены показатели набухающей способности резиновых композитов при введении МКЦ с разной степенью помола исходного сырья;
- впервые установлено влияние предгидролизного размола и его условий на растворимость МКЦ в системе ДМАА/LiCl (диметилацетамид – хлорид лития) и показатели качества гидрогеля различного природного происхождения;

– впервые из одревесневшей части стебля (костры) технической конопли получены бумажные отливки с добавлением гидрогеля МКЦ, что обеспечивает существенное улучшение их физико-механических характеристик, включая прочность на разрыв и сопротивление продавливанию.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость работы заключается в обосновании целесообразности применения стадии размола волокнистой массы в водной среде перед кислотным гидролизом целлюлозных материалов соляной кислотой, что обеспечивает более глубокое и равномерное проникновение кислоты в структуру волокна, интенсифицирует процесс гидролиза и повышает экономическую эффективность производства МКЦ.

Практическая значимость работы:

– разработан и запатентован новый способ получения МКЦ из биоповрежденной древесины и однолетних растений с применением предгидролизного размола в водной среде;

– установлены технологические режимы получения МКЦ с предгидролизным размолом целлюлозы в водной среде;

– усовершенствована и запатентована технология получения гидрогеля различного природного происхождения: снижена скорость растворения МКЦ в системе ДМАА/LiCl;

– получены бумажные отливки из биоповрежденной древесины и однолетних растений с механическими прочностными свойствами близкими к значениям, установленными ГОСТ 11208-82, ГОСТ 8828-89, ГОСТ 8273-75;

– расширен диапазон практического применения МКЦ в химической промышленности (в качестве наполнителя);

– представлены математические модели, описывающие процесс получения МКЦ в зависимости от технологических условий ведения гидролиза (концентрации кислоты, продолжительности, температуры, степени помола);

– приведен расчет экономической эффективности получения МКЦ из биоповрежденной древесины и однолетних растений с применением предгидролизного размола в водной среде.

Результаты работы прошли промышленную апробацию и внедрены в производство на ООО «СК-Полимеры» (г. Красноярск), ООО «Сибирский вкус» (г. Абакан), ООО НПП «СКС» (г. Красноярск), ООО «ЭКСПЕРТРЕМСТРОЙ» (г. Красноярск).

Материалы диссертационного исследования использованы при чтении курсов в учебном процессе при подготовке студентов направления 15.03.02 «Технологические машины и оборудование» направленность образовательной программы «Технологическое оборудование фармацевтических производств» в рамках дисциплин: «Технологическое оборудование гидролизного производства», «Технология фармацевтических препаратов», «Опытно-конструкторские разработки в фармацевтической отрасли», 44.03.04 «Профессиональное обучение (по отраслям)» направленность «Промышленные технологии» в рамках дисциплины

«Оборудование, аппараты и приборы предприятий отрасли» института химических технологий при проведении лекций, практических и лабораторных занятий. Часть результатов диссертационной работы внедрена в учебный процесс перечисленных направлений ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева» при актуализации рабочих программ дисциплин.

Методология и методы исследований. При выполнении диссертационной работы использовались методы активного многофакторного эксперимента, а также факторный и кластерный анализы. Планирование и обработка экспериментальных данных проводились с использованием математической теории планирования экспериментов и программ Statgraphics® Centurion и Microsoft Excel. Для контроля процесса размола волокнистой массы, степени полимеризации целлюлозы использовали стандартные лабораторные методы, среди которых измерение степени помола по шкале Шоппер-Риглера, определение вязкости раствора при помощи железовиннонатриевого комплекса. Индекс кристалличности МКЦ определяли на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3. Размерные характеристики полученных образцов МКЦ определены на современном сканирующем микроскопе высокого разрешения SEM Hitachi SU3500.

Достоверность полученных результатов диссертационной работы основывается на применении разнообразных современных физико-механических и физико-химических методов исследования, с использованием современного аттестованного оборудования, проверенных средств измерений и обработкой результатов эксперимента методами математической статистики, а также публикацией результатов и их обсуждением на международных и российских конференциях.

Положения, выносимые на защиту:

1. Теоретические основы и ресурсосберегающая технология получения МКЦ из нетрадиционного растительного сырья с предгидролизным размолотом волокнистой массы.

2. Способ получения МКЦ путем гидролиза целлюлозы биоповрежденной древесины хвойных и лиственных пород, предварительно обработанной до разной степени помола в безножевой размалывающей установке типа «струя-преграда» и центробежном размалывающем аппарате.

3. Способ получения МКЦ из целлюлозы, выделенной из одревесневшей части стебля (костры) технической конопли, прошедшей предгидролизный размол в водной среде на различном размольном оборудовании.

4. Результаты расчёта эффективной энергии активации при получении МКЦ.

5. Способ получения гидрогеля из МКЦ биоповрежденной древесины и костры технической конопли при разных степенях помола.

6. Результаты исследования влияния вида размалывающего оборудования на изменение характеристик МКЦ и гидрогеля.

7. Результаты исследования физико-механических свойств бумажных и вулканизируемых резиновых композитов, полученных на основе МКЦ и гидрогеля по разработанной технологии.

8. Результаты оценки экономической эффективности получения МКЦ при использовании различных способов предгидролизного размола волокнистых материалов.

Личный вклад автора состоит в постановке целей, задач исследований и методологии подхода к их решению, сборе и анализе литературных данных, разработке способов получения МКЦ из альтернативных деловой древесины источников сырья и гидрогелей на ее основе, планировании и непосредственном участии в проведении экспериментальных исследований, интерпретации и обобщении экспериментальных исследований и полученных результатов, формулировании выводов, экономической оценки внедрения результатов разработок, в участии во внедрении разработанного способа получения МКЦ и готового продукта на промышленных предприятиях, в разработке и оформлении заявок на изобретения, подготовке публикаций по выполненной работе.

Соответствие паспорту специальности. Представленная работа соответствует паспорту специальности 4.3.4 – Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и переработки древесины (п. 4 – Технология и продукция в производствах: лесохозяйственном, лесозаготовительном, лесопильном, деревообрабатывающем, целлюлозно-бумажном, лесохимическом и сопутствующих им производствах).

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на международных научно-технических конференциях: «Современная целлюлозно-бумажная промышленность. Актуальные задачи и перспективные решения» (г. С.-Петербург, 2020, 2022), «Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов» (г. Архангельск, 2019, 2021, 2023); международных научно-практических конференциях: «Решетневские чтения» (г. Красноярск, 2017-2023), «Химия и химическая технология в XXI веке» (г. Томск, 2021); международных научных конференциях: «Современные агротехнологии, экологический инжиниринг и устойчивое развитие» (г. Узбекистан, 2023), «ASEDU-II 2021: Перспективы развития науки, инженерии, естественно-научного, технического и цифрового образования» (г. Красноярск, 2020), «APITECH-III - 2021: Прикладная физика, информационные технологии и инжиниринг» (г. Красноярск, 2021); всероссийских научно-практических конференциях: «Лесной и химический комплексы – проблемы и решения» (г. Красноярск, 2003-2022), «Современные тенденции развития химической технологии, промышленной экологии и техносферной безопасности» (г. С.-Петербург, 2020), «Современные тенденции развития химической технологии, промышленной экологии и экологической безопасности» (г. С.-Петербург, 2022), «Актуальные проблемы лесного хозяйства и деревопереработки» (г. Казань, 2023), «Молодые ученые в решении актуальных проблем науки» (г. Красноярск, 2012-2025), «Экология, рациональное

природопользование и охрана окружающей среды» (г. Лесосибирск, 2017-2025); всероссийской конференции «Новые достижения в химии и химической технологии растительного сырья» (г. Барнаул, 2020).

Публикации. По результатам исследований опубликовано 67 работ, в том числе 10 научных статей в журналах из Перечня рецензируемых научных изданий ВАК; 11 публикаций в изданиях Scopus и Web of Science, из которых 2 научные статьи в журнале BioResources, 6 научных статей в журнале Химия растительного сырья, 4 научные статьи в Ядро РИНЦ. Получено 6 патентов Российской Федерации на изобретение.

Структура и объём диссертации.

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, выводов, списка использованных источников из 325 наименований, 7 приложений. Материал изложен на 315 страницах, содержит 106 рисунков и 40 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и поставлены задачи исследования. Показана научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, методы и достоверность исследований. Обозначены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведён аналитический обзор современного состояния проблемы в области получения МКЦ. Отмечено, что в настоящее время отсутствует технология переработки биоповреждённой древесины и одревесневшей части стебля (костры) технической конопли в МКЦ, что существенно ограничивает возможности рециклизации растительных полимеров и негативно влияет на экологическую ситуацию.

Описываются механизмы деструкции растительного сырья в процессе гидролиза целлюлозы, включая разрушение гликозидных связей в аморфных участках полимера под действием кислот. Выявлено, что существующие технологические параметры проведения кислотного гидролиза сталкиваются с комплексом серьёзных ограничений, затрудняющих их промышленное применение. С экономической точки зрения, процессы характеризуются низкой рентабельностью – это обусловлено невысокой производительностью используемого оборудования и значительной себестоимостью конечного продукта. С технологической стороны наблюдаются серьёзные барьеры: сложность точного контроля химических стадий, необходимость проведения длительных циклов кислотного гидролиза, применение растворов с высоким гидромодулем, а также многоэтапность химической обработки, что усложняет масштабирование и автоматизацию процесса. Кроме того, получаемый продукт зачастую не соответствует современным требованиям к качеству: он характеризуется недостаточной химической чистотой, пониженной СК (степенью кристалличности), что негативно влияет на его механических свойствах, и высокой СП (степенью полимеризации), ограничивающей функциональность МКЦ в некоторых областях применения, например, в

фармацевтике и пищевой промышленности.

Отдельное внимание уделяется вопросу создания из МКЦ функциональных гидрогелей. Подробно рассмотрены существующие растворители целлюлозы, применяемые при получении гидрогелей на основе МКЦ, включая систему хлорид лития/*N,N*-диметилацетамид (LiCl/DMAc). Однако, не смотря на высокую эффективность системы LiCl/DMAc, её практическое применение усложняется необходимостью тщательной и многоэтапной подготовки сырья, что увеличивает продолжительность процесса.

На основе анализа способов получения МКЦ установлено, что в современной промышленной практике производства МКЦ отсутствует применение технологической операции предгидролизного размола волокнистых полуфабрикатов. Целесообразность введения стадии предгидролизного размола волокнистой массы обусловлена тем, что предварительная механическая обработка повышает реакционную доступность аморфных участков целлюлозы для последующего кислотного гидролиза. Для создания ресурсосберегающей технологии получения МКЦ из целлюлозы биоповреждённой древесины и одревесневшей части стебля (костры) технической конопли с предгидролизным размолем волокнистой массы необходимо более глубокое изучение воздействия способа размола на структурно-морфологические свойства беленой целлюлозы, полученной из нетрадиционного растительного сырья и показатели качества МКЦ, выявление закономерностей их изменения в зависимости от вида размалывающего оборудования. Все это ставит задачу проведения целого ряда различных по характеру исследований, которые позволят получить необходимые сведения о затронутых аспектах проблемы.

Вторая глава содержит теоретическое обоснование процесса химической обработки целлюлозы, выделенной из растительных полимеров, с применением водных растворов минеральных кислот. Несмотря на большое теоретическое и практическое значение этого процесса, данные о кинетике и механизме гидролиза целлюлозы остаются противоречивыми, отчасти весьма отрывочными и не систематизированными. Для установления взаимосвязи степени деструкции от природы гидролизующего агента и исходного целлюлозосодержащего материала в работе рассмотрена кинетика процесса деструкции целлюлозы в растворе соляной кислоты, исследован и описан процесс деструкции. Использование соляной кислоты (HCl) в качестве катализатора при получении МКЦ методом гидролиза является технологически и экономически целесообразным по ряду причин: HCl практически полностью диссоциирует в воде, обеспечивая высокую концентрацию ионов водорода (H^+); приводит к очень быстрому разрыву β -1,4-гликозидных связей в целлюлозе; хлорид-ионы (Cl^-), которые образуются после нейтрализации кислоты, хорошо растворимы в воде, что позволяет эффективно отмывать полученный продукт от следов кислоты.

В результате анализа механизма кислотного гидролиза целлюлозы выявлено, что кинетика данного процесса с достаточной степенью точности может быть описана кинетическим уравнением первого порядка. Для

определения характера протекания кислотного гидролиза в растворе соляной кислоты при различной степени помола целлюлозы были установлены значения эффективных констант скорости реакции. Вместо концентрации продуктов гидролиза в расчетах использовалась СП, которая легко определяется вискозиметрическим методом и меняется симбатно с концентрацией продуктов. Значения наблюдаемой (эффективной) константы скорости реакции гидролиза на примере МКЦ из беленой целлюлозы биоповрежденной ели приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Константы скорости реакции гидролиза макромолекул целлюлозы биоповрежденной ели

Степень помола по шкале Шоппер-Риглера	Продолжительность гидролиза, мин	lg СП(t)			k, мин ⁻¹		
		80 °С	90 °С	100 °С	80 °С	90 °С	100 °С
15 °ШР	0	3,097	3,097	3,097	0	0	0
	30	2,784	2,755	2,749	0,024	0,026	0,027
	60	2,542	2,473	2,396	0,021	0,024	0,027
	90	2,417	2,260	2,228	0,017	0,021	0,022
	120	2,228	2,161	2,111	0,017	0,018	0,019
50 °ШР	0	3,000	3,000	3,000	0	0	0
	30	2,661	2,609	2,661	0,026	0,030	0,029
	60	2,233	2,173	2,107	0,028	0,032	0,034
	90	2,130	2,090	2,049	0,022	0,023	0,024
	120	2,061	2,017	1,978	0,018	0,019	0,019
85 °ШР	0	2,954	2,954	2,954	0	0	0
	30	2,572	2,597	2,599	0,029	0,028	0,027
	60	2,061	1,954	1,949	0,034	0,038	0,039
	90	2,009	1,940	1,935	0,024	0,026	0,026
	120	1,959	1,924	1,919	0,019	0,019	0,020

Проведённый анализ вычисленных величин эффективных констант скорости реакции гидролиза показал, что они зависят от степени помола волокнистой массы, полученной в результате предгидролизного размола. На основе полученных данных об эффективных константах скорости кислотного гидролиза целлюлозы при различных температурах был проведен расчет эффективной энергии активации реакции по формуле

$$E = \frac{R \cdot T_1 \cdot T_2 \cdot \ln \frac{k_2}{k_1}}{T_2 - T_1} = \frac{R \cdot T_1 \cdot T_2 \cdot \lg \frac{k_2}{k_1}}{0,434 \cdot (T_2 - T_1)}, \quad (1)$$

где R – универсальная газовая постоянная 8,31 Дж/моль·°К,
 k_1, k_2 – константы скорости при температуре T_1, T_2 , мин⁻¹.

Значения эффективной энергии активации для МКЦ из целлюлозы биоповрежденной ели снижаются с ростом степени помола, так при

15 °ШР – 9520 Дж/моль, 50 °ШР – 5270 Дж/моль, 85 °ШР – 2400 Дж/моль. При размоле происходит механическое разрушение межмолекулярных связей и фибрилляция волокон. Это приводит к увеличению удельной поверхности целлюлозы и обнажению аморфных областей, которые более реакционноспособны по сравнению с кристаллическими. Аморфные участки содержат гликозидные связи, доступные для гидролиза, что снижает энергетический барьер реакции и подтверждает эффективность предгидролизного размола при получении МКЦ. В результате классические представления о механизме кислотного гидролиза, который осуществляется через образование промежуточного карбокатиона в структурных элементах целлюлозы, подтверждены экспериментальными данными: уменьшением молекулярной массы целлюлозы (снижением СП), закономерностью кинетики реакции (зависимостью скорости реакции от концентрации кислоты и температуры), соответствием кинетических кривых модели реакции первого порядка.

В третьей главе диссертационной работы в целях обеспечения достоверности и воспроизводимости результатов исследования было выполнено планирование эксперимента, предусматривающее обоснованный выбор количества опытов и установление оптимальных условий их проведения в соответствии с поставленными в работе задачами.

На основании анализа литературных данных, представленных в работах Базарновой Н. Г., Хакимовой Ф. Х., Носковой О. А., Сунайт В. Н., Махотиной Л. Г. и других исследователей, установлены ключевые технологические параметры, определяющие эффективность процесса гидролиза. В ходе эксперимента изучалось влияние на величину степени полимеризации следующих факторов: концентрации кислоты, температуры процесса, продолжительности гидролиза и степени помола волокнистой массы. При получении уравнений математического описания процесса, был применен метод полного факторного планирования эксперимента из пакета программ *Statgraphics Centurion*. Зависимости каждого из выходных параметров Y_1 (СП) и Y_2 (СК) от переменных факторов аппроксимировали полиномами второй степени общего вида:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_4 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{33}X_3^2 + b_{44}X_4^2 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{14}X_1X_4 + b_{23}X_2X_3 + b_{24}X_2X_4 + b_{34}X_3X_4. \quad (2)$$

В таблице 2, согласно плану эксперимента, показаны уровни и шаги варьирования исследуемых факторов. При подборе эффективных условий гидролиза целлюлозы, задача оптимизации сводилась к определению значений технологических параметров, обеспечивающих получение МКЦ с наименьшими затратами при условии разумного компромисса по выходным параметрам: выход продукта $\geq 93\%$; степень полимеризации ≤ 300 ; белизна $\geq 80\%$.

Таблица 2 – Уровни и шаги варьирования исследуемых факторов

Фактор	Обозначение		Шаг варьирования фактора	Уровень варьирования фактора		
	натуральное	нормализованное		-1	0	+1
Концентрация кислоты, г/дм ³	С	X ₁	18,23	54,69	72,92	91,15
Температура, °С	t	X ₂	10	80	90	100
Продолжительность гидролиза, мин	T	X ₃	30	60	90	120
Степень помола, °ШР	°ШР	X ₄	35	15	50	85

Исходным сырьем для исследований выступали нетрадиционные виды сырья: биоповрежденная древесина хвойной породы (ель обыкновенная (*Picea abies*)), поврежденная уссурийским полиграфом; биоповрежденная древесина лиственной породы – осина (*Populus tremula*), поврежденная осиновым трутовиком (*Phellinus tremulae*); сельскохозяйственные отходы однолетних растений – внутренняя часть стебля (костра) технической конопли южной (сорт «Мария»). Компонентный состав растительных полимеров представлен в таблице 3.

Таблица 3 – Компонентный состав растительных полимеров

Вид сырья	Содержание, % от а.с.с.		
	целлюлозы	лигнина	зола
Биоповрежденная ель обыкновенная (<i>Picea abies</i>)	41	26	1,1
Биоповрежденная осина (<i>Populus tremula</i>)	42	20	1,0
Костра технической конопли	47	22	3
Ель обыкновенная (<i>Picea abies</i>)	48	28	1,2
Осина (<i>Populus tremula</i>)	50	21	0,9

Варку сырья проводили в лабораторном автоклаве при максимальной температуре 165 °С (для биоповрежденной древесины) продолжительностью 150 мин, костры технической конопли – 160 °С, 120 мин. Основные компоненты варочного раствора гидроксид и сульфид натрия (NaOH и Na₂S), степень сульфидности – 18 %. Промывку и сортирование целлюлозы проводили в лабораторной ссече. Для увеличения содержания α-целлюлозы, снижения лигнина и зольности после варки выполняли отбелку (по ЕСF-технологии) и холодное облагораживание.

Перед проведением размола волокнистой массы в размольных установках беленую целлюлозу подвергали роспуску в гидроразбивателе. При проведении предгидролизного размола использовали полупромышленную дисковую мельницу с традиционной восьмисекторной гарнитурой, с прямолинейной формой ножей и углом наклона к радиусу 22,5°, безножевую установку типа «струя-преграда» (рабочие параметры: давление 13 МПа, расстояние от насадки до преграды 0,2 м, угол конусности насадки 45°), центробежный

размалывающий аппарат (ЦРА) с углом установки ножей на инерционном теле относительно оси 35° , углом наклона ножей к радиусу в размольном барабане 35° .

В процессе получения МКЦ для приготовления растворов гидролизующих агентов использовалась соляная кислота химически чистая. В исследованиях применяли водные растворы соляной кислоты с массовой концентрацией $54,69 \text{ г/дм}^3$, $72,92 \text{ г/дм}^3$ и $91,15 \text{ г/дм}^3$, что соответствует молярной концентрации 1,5 моль/л, 2,0 моль/л и 2,5 моль/л и массовой доле хлороводорода в растворе 5 %, 7 % и 9 % соответственно.

Представлено описание методик проведения отбелки и гидролиза целлюлозы, приготовления раствора из МКЦ в системе ДМАА/LiCl, определения физико-механических характеристик водонабухающих резин, изготовления бумажных отливок, определения морфологических свойств целлюлозы, описание лабораторных установок, порядок и последовательность проведения эксперимента. Для проверки подлинности полученной МКЦ проводилась комплексная проверка, которая включала определение массовой доли основного вещества, СП, рентгеноструктурный анализ, физико-химическое тестирование (рН, зольность, потерю массы при сушке, растворимость вещества) визуальную оценку, микроскопию. Качественную подлинность готового продукта устанавливали реакцией с раствором йодированного хлорида цинка.

Четвертая глава посвящена обсуждению результатов экспериментальных исследований. Для оценки воздействия предгидролизного размола волокнистой массы на процесс получения МКЦ из целлюлозы биоповрежденной древесины и одревесневшей части стебля (костры) технической конопли:

- исследовано влияние вида лигноцеллюлозного сырья и способа предгидролизного размола волокнистой массы на степень его разработки (морфологию волокон) и на показатели качества получаемой МКЦ;

- определены технологические параметры гидролиза беленой целлюлозы, которые варьируются в зависимости от степени помола волокнистой массы;

- разработана математическая модель процесса кислотного гидролиза целлюлозы, которая учитывает влияние ключевых параметров, включая температуру, концентрацию кислоты, время обработки и степень помола волокнистой массы;

- исследовано влияние степени помола образцов на физико-химические свойства гидрогелей, полученных из МКЦ различного природного происхождения;

- получены композиционные материалы с включением МКЦ.

Выход технической целлюлозы после варки биоповрежденной древесины составил $(42 \pm 2) \%$, одревесневшей части стебля (костры) технической конопли 37 %. Выход беленой целлюлозы в зависимости от вида сырья составил 91–95 % от массы небеленой технической целлюлозы. Облагороженную и отбеленную целлюлозу (таблица 4) подвергали гидролизу соляной кислотой.

Таблица 4 – Показатели исходных образцов белой целлюлозы

Показатели белой целлюлозы	Значения показателей		
	Ель	Осина	Костра
Массовая доля в целлюлозе, % от абс.сух.волокна:			
α-целлюлозы	97,00* / 95,30	93,30* / 92,23	94,50
лигнина	0,40* / 0,39	0,27* / 0,24	0,21
зола	0,02* / 0,02	0,06* / 0,07	0,05
Степень полимеризации	1200* / 1100	850* / 800	650
Примечание: *Показатели образцов белой целлюлозы, полученной из деловой древесины			

Проведённые экспериментальные исследования показали, что чем выше температура гидролиза и концентрация деструктирующего раствора, тем интенсивнее идет процесс деструкции целлюлозы, что снижает выход, степень полимеризации и белизну готового продукта (таблица 5).

В зависимости от условий гидролиза выход МКЦ, полученной из целлюлозы костры технической конопли составил $(92,0 \pm 2)$ %, из целлюлозы биоповрежденной осины $(93,0 \pm 2)$ %, из целлюлозы биоповрежденной ели $(95,0 \pm 2)$ %; степень полимеризации снизилась у МКЦ из целлюлозы костры технической конопли с 310 до 110, из целлюлозы биоповрежденной осины с 275 до 105, из целлюлозы биоповрежденной ели с 330 до 115; белизна соответственно 81,3–77,4 %, 90,3–86,4 %, 85,6–81,4 %.

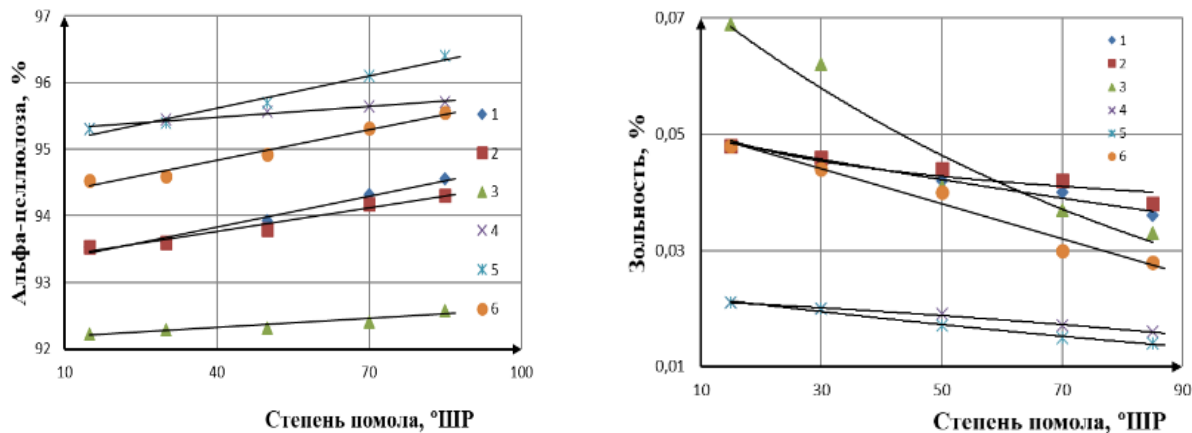
Комплексный анализ полученных образцов МКЦ показал, что обработка соляной кислотой концентрацией $54,69 \text{ г/дм}^3$ приводит к отклонениям от нормативных требований, установленных в технических условиях ТУ 9199-005-12043303-2003 «Целлюлоза микрокристаллическая порошковая», что сказывается на ее функциональных характеристиках и затрудняет применение в пищевой и фармацевтической отраслях. При использовании соляной кислоты повышенной концентрации в процессе получения МКЦ не всегда удается получить продукт однородный по молекулярной массе, из-за неравномерного гидролиза целлюлозных макромолекул, что приводит к снижению его технологических свойств. Таким образом, установленное несоответствие между степенью интенсивности кислотного гидролиза и степенью однородности конечного продукта свидетельствует о необходимости совершенствования технологии получения МКЦ. Для повышения эффективности технологического процесса и качества получаемого продукта, целесообразно включение стадии предгидролизного размола, которая обеспечивает разрушение межмолекулярных связей внутри клеточной стенки, частичную деструкцию и

Таблица 5 – Характеристики образцов МКЦ без предгидролизного размола волокнистой массы

Характеристики МКЦ	Технологические режимы процесса гидролиза					
	концентрация 54,69 г/дм ³ HCl, температура 80 °С, продолжительность 60 мин			концентрация 91,15 г/дм ³ HCl, температура 100 °С, продолжительность 120 мин		
	Костра	Осина	Ель	Костра	Осина	Ель
Выход, %	94	96* / 95	97,5* / 97	90	93* / 91	94* / 93
Насыпная плотность, кг/м ³	294	320* / 302	317* / 303	315	333* / 317	352* / 336
Белизна, %	86,9	91,1* / 90,3	86,5* / 85,6	83,7	87,2* / 86,4	85,1* / 84,4
Водоудерживающая способность, %	315	330* / 318	345* / 320	300	310* / 305	310* / 310
СП	310	253* / 275	315* / 330	110	98* / 105	103* / 115
Индекс кристалличности	0,63	0,65* / 0,64	0,67* / 0,65	0,72	0,79* / 0,77	0,80* / 0,78
Примечание: *Показатели образцов МКЦ, полученной из целлюлозы деловой древесины						

отслоение внешнего слоя (S_1) и вторичной стенки (S_2) волокна, увеличения удельной поверхности и числа свободных гидроксильных групп, что повышает реакционную способность волокна.

Изменение содержания α -целлюлозы и зольных компонентов в беленой целлюлозе в процессе предгидролизного размола представлены на рисунке 1.



а

б

а – массовая доля α -целлюлозы; б – содержание золы в беленой целлюлозе размол на полупромышленной дисковой мельнице: 1 – целлюлоза из костры технической конопли; размол на ЦРА: 2 – целлюлоза из костры технической конопли, 3 – целлюлоза из биоповрежденной осины, 4 – целлюлоза из биоповрежденной ели; размол на безножевой установке типа «струя-преграда»: 5 – целлюлоза из биоповрежденной ели, 6 – целлюлоза из костры технической конопли

Рисунок 1 – Изменение компонентного состава в целлюлозных волокнах с ростом степени помола волокнистой массы

Анализ характеристик блененой целлюлозы из разных видов сырья показал, что предгидролизный размол волокнистой массы на безножевой установке типа «струя-преграда» (рисунок 2 а) оказал наибольшее влияние на разработку целлюлозного волокна и увеличение массовой доли α -целлюлозы (в 1,2 раза). После предгидролизного размола в ЦРА содержание золы снизилось: у целлюлозы из биоповрежденной ели на 5 %, костры технической конопли – на 14 %, биоповрежденной осины – на 30 %, безножевой установке типа «струя-преграда» – на 7 % и 20 % соответственно (рисунок 2 б). Величина коэффициента линейной корреляции составила $(0,97 \pm 0,01)$, что указывает на достоверность полученных зависимостей. Выявленные закономерности обусловлены разным механизмом воздействия размалывающего оборудования на волокнистый материал. Предгидролизный размол на безножевой установке типа «струя-преграда» обеспечивает преимущественно гидродинамическое воздействие на волокно (кавитацию, удар струи, сдвиговые напряжения), что способствует более эффективному удалению примесей и увеличению содержания α -целлюлозы за счёт щадящего расщепления клеточной стенки без значительного укорочения волокон. Различия в эффективности обработки различных видов сырья на одном и том же оборудовании обусловлены особенностями их анатомического строения и

исходной зольностью.

Рентгеноструктурный анализ полученных образцов МКЦ после предгидролизного размола показал, что качественные характеристики изменения количества сигналов и их разрешений для образцов исследуемых МКЦ носят одинаковый качественный характер, тогда как количественные значения различаются. С ростом степени помола с 15–85 °ШР индекс кристалличности независимо от вида размалывающего оборудования увеличивается. Сравнение количественных значений индексов кристалличности исследуемых образцов показало, что наибольшее значение этого показателя у МКЦ при степени помола 85 °ШР из целлюлозы биоповрежденной ели с использованием предгидролизного размола волокнистой массы на установке типа «струя-преграда» – 0,81; наименьшее значение у МКЦ из целлюлозы костры технической конопли размолотой на ЦРА – 0,69. Высокое значение индекса кристалличности в первом случае объясняется применением гидродинамической установки «струя-преграда», обеспечивающей фибрилляцию волокна с увеличением удельной поверхности и улучшением связеобразующих свойств без значительного повреждения кристаллических областей.

Для установления оптимальных режимов процесса гидролиза беленой целлюлозы после предгидролизного размола волокнистой массы использовался метод обобщенного параметра, позволяющий оптимизировать выходные параметры процесса. Максимальные значения обобщенного параметра оптимизации, найденные по уравнению регрессии, соответствуют следующему технологическому режиму процесса гидролиза: концентрация соляной кислоты 54,69 г/дм³; температура процесса 80 °С; продолжительность гидролиза 60 мин; степень помола 50 °ШР.

В таблице 6 приведены характеристики МКЦ на примере образцов, полученных из целлюлозы костры технической конопли при оптимальных технологических параметрах процесса гидролиза. Качественная реакция готового продукта (для всех видов сырья) на хлорид цинка характеризуется фиолетово-синим окрашиванием, рН раствора составляет 6,0–7,0, содержание зольных компонентов не превышает 0,03 %, потеря массы при высушивании – не более 7,0 %.

Образцы со степенью помола 15 °ШР имели насыпную плотность 294 кг/м³, СП 317, индекс кристалличности 0,63. Выявлено, что тип используемого размалывающего оборудования оказывает влияние на показатели качества МКЦ, полученных в одинаковых условиях гидролиза. Так, у образцов со степенью помола 50 °ШР после предгидролизного размола на безножевой установке типа «струя-преграда» степень полимеризации на 21 % ниже, чем после ЦРА, у образцов со степенью помола 85 °ШР разница составила 24 %. Характеристики образцов МКЦ после предгидролизного размола на дисковой мельнице занимают промежуточное положение между показателями, полученными на установке «струя-преграда» и на ЦРА. Таким образом, для управления характеристиками МКЦ наряду с параметрами гидролиза и

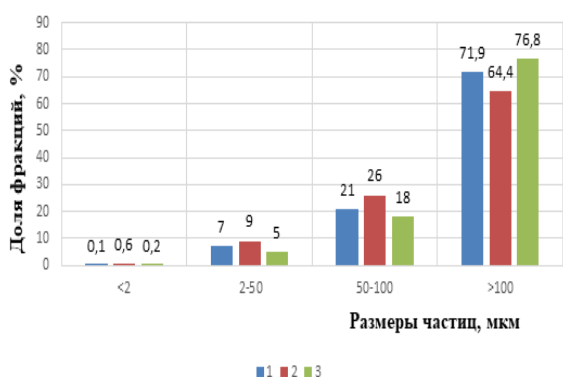
степенью помола важно учитывать вид оборудования для предгидролизного размола.

Таблица 6 – Характеристики образцов МКЦ, полученной из целлюлозы одревеневшей части стебля (костры) технической конопли

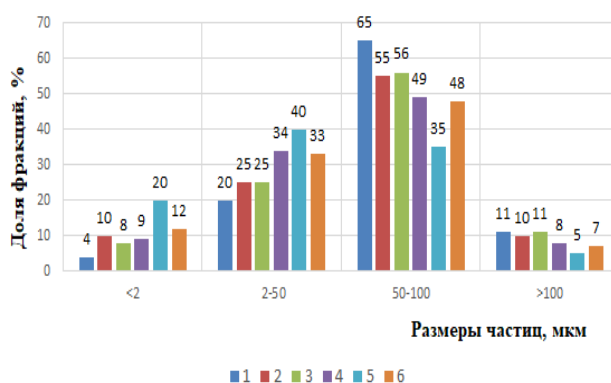
Вид размалывающего оборудования	50 °ШР			85 °ШР		
	Насыпная плотность кг/м ³	СП	Индекс кристалличности	Насыпная плотность кг/м ³	СП	Индекс кристалличности
Полупромышленная дисковая мельница	344	179	0,65	364	115	0,72
Центробежный размалывающий аппарат	309	216	0,64	340	137	0,69
Безножевая установка типа «струя-преграда»	349	171	0,69	370	105	0,75

На рисунке 2 представлены результаты фракционирования по размерам частиц исследуемых образцов МКЦ, полученных при оптимальных параметрах гидролиза. Анализ данных показал, что снижение длины волокна в процессе предгидролизного размола в водной среде и изменение размеров частиц образцов МКЦ, полученной из этой волокнистой массы, имеют не линейный характер. Например, после предгидролизного размола при степени помола 85 °ШР наибольшее снижение значений длины волокна наблюдалось у образцов, обработанных на ЦРА, тогда как после химической обработки доля фракций с размерами частиц от 2 – 50 мкм в наибольшей степени преобладает у образцов, обработанных на безожевой установке типа «струя-преграда» и дисковой мельнице (36 ± 3) %.

степень помола 15 °ШР



степень помола 85 °ШР



предгидролизный размол на ЦРА: 1 – образец МКЦ из биоповрежденной осины, 2 – образец МКЦ из костры технической конопли, 3 – образец МКЦ из биоповрежденной ели;
 предгидролизный размол на безожевой установке типа «струя-преграда»:
 4 – образец МКЦ из биоповрежденной ели, 5 – образец МКЦ из костры технической конопли
 предгидролизный размол на полупромышленной дисковой мельнице:
 6 – образец МКЦ из костры технической конопли

Рисунок 2 – Гистограмма результатов фракционирования МКЦ по размерам частиц

У образцов МКЦ не прошедших предгидролизный размол практически отсутствуют частицы размером менее 2 мкм и превалирует доля фракций свыше 100 мкм от 64 – 77 %. При этом средняя фракция 50 – 100 мкм составила около $(21 \pm 4) \%$, тогда как при степени помола 85 °ШР $(56 \pm 9) \%$. Предгидролизный размол волокнистой массы приводит к трёхкратному увеличению доли коротковолокнистых фракций МКЦ размером 2 – 100 мкм вследствие структурных изменений волокнистой массы. За счет увеличения удельной поверхности волокон возрастает площадь контакта с кислотой в процессе гидролиза, что способствует более быстрому и эффективному протеканию химической реакции.

Для выявления фактора, оказывающего наибольшее влияние на СП и СК в изученной области факторного пространства $54,69 \leq X_1 \leq 91,15$ г/дм³; $80 \leq X_2 \leq 100$ °С; $60 \leq X_3 \leq 120$ мин; $15 \leq X_4 \leq 85$ °ШР, проведён регрессионный анализ с оценкой значимости коэффициентов по t-критерию Стьюдента. Построены поверхности откликов СП (Y_1) и СК (Y_2) в зависимости от температуры и продолжительности гидролиза при разных концентрациях соляной кислоты и степени помола волокнистой массы.

В качестве примера в автореферате приведены уравнения регрессии для образцов целлюлозы костры технической конопли после предгидролизного размола на полупромышленной дисковой мельнице (уравнения 3, 6), центробежном размалывающем аппарате (уравнения 4, 7), безножевой установке типа «струя-преграда» (уравнения 5, 8):

$$Y_1 = 1042,18 - 3,02 \cdot X_3 - 6,93 \cdot X_4 - 3,88 \cdot X_2 - 7,86 \cdot X_1 + 0,02 \cdot X_3 \cdot X_4 + 0,01 \cdot X_3 \cdot X_1 + 0,02 \cdot X_4^2 + 0,03 \cdot X_4 \cdot X_1 + 0,04 \cdot X_2 \cdot X_1, \quad (3)$$

$$Y_1 = 1091,56 - 7,67 \cdot X_1 - 3,96 \cdot X_2 - 4,59 \cdot X_3 - 6,22 \cdot X_4 + 0,04 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,01 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,03 \cdot X_1 \cdot X_4 + 0,01 \cdot X_3^2 + 0,02 \cdot X_3 \cdot X_4 + 0,01 \cdot X_4^2, \quad (4)$$

$$Y_1 = 734,89 - 4,01 \cdot X_1 - 0,89 \cdot X_2 - 2,94 \cdot X_3 - 6,68 \cdot X_4 + 0,01 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,03 \cdot X_1 \cdot X_4 + 0,02 \cdot X_3 \cdot X_4 + 0,02 \cdot X_4^2, \quad (5)$$

$$Y_2 = 29,63 + 0,20 \cdot X_1 + 0,13 \cdot X_3 + 0,21 \cdot X_3 + 0,30 \cdot X_4 - 0,0009 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,001 \cdot X_1 \cdot X_4 - 0,002 \cdot X_3 \cdot X_4 - 0,001 \cdot X_3 \cdot X_4 + 0,001 \cdot X_4^2, \quad (6)$$

$$Y_2 = 39,14 + 0,08 \cdot X_1 + 0,12 \cdot X_2 + 0,13 \cdot X_3 + 0,22 \cdot X_4 - 0,001 \cdot X_1 \cdot X_4 - 0,002 \cdot X_2 \cdot X_4 - 0,001 \cdot X_3 \cdot X_4 + 0,002 \cdot X_4^2, \quad (7)$$

$$Y_2 = 49,84 + 0,018 \cdot X_1 + 0,20 \cdot X_2 + 0,06 \cdot X_3 + 0,12 \cdot X_4 - 0,002 \cdot X_2 \cdot X_4 + 0,002 \cdot X_4^2. \quad (8)$$

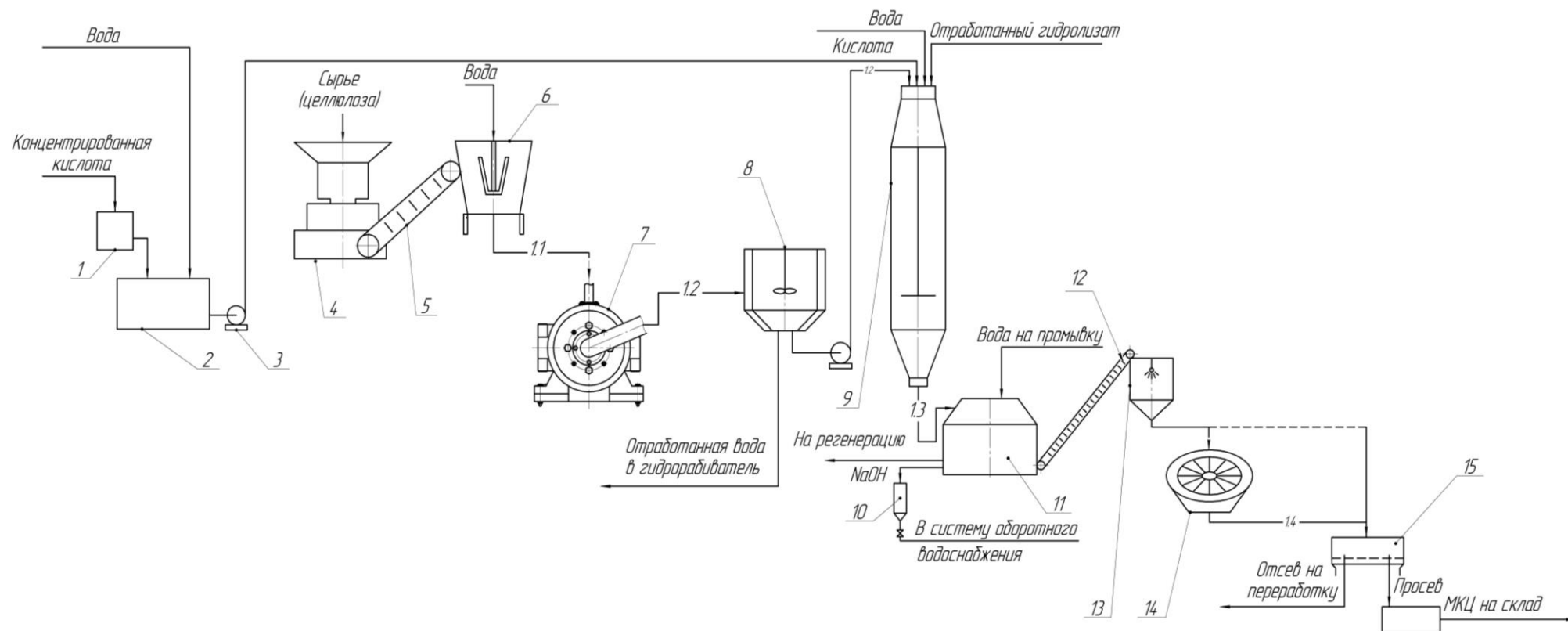
Уравнения для образцов МКЦ из целлюлозы биоповрежденной ели и осины, а также полный регрессионный анализ представлены в диссертационной работе. Оценка значимости основных факторов и их парных взаимодействий проводилась по диаграмме Парето. Факторы, превышающие порог $p = 0,05$, признаны статистически значимыми. Установлено, что степень помола волокнистой массы является ключевым фактором, влияющим на величину СП,

а совместные парные взаимодействия позволяют прогнозировать параметры для проведения гидролиза. Установленный единый оптимальный технологический режим гидролиза, применимый ко всем исследованным в работе видам сырья, позволяет унифицировать производственный процесс получения МКЦ и повысить его энерго- и ресурсоэффективность.

Полученные результаты гидролиза целлюлозы могут служить основой для организации, как самостоятельного предприятия, так и в составе интегрированной технологической схемы МКЦ.

Технология получения МКЦ с предгидролизным размолотом волокнистой массы (из целлюлозы биоповрежденной древесины и костры технической конопли) включает следующие этапы: выделение целлюлозы из растительных полимеров, ее отбелку, размол волокнистой массы на полупромышленной дисковой мельнице в водной среде, отжим, химическую обработку соляной кислотой, отделение гидролизата, промывку, сушку, измельчение МКЦ, рассев на фракционаторе, фасовку и упаковку. Принципиальная технологическая схема производства приведена на рисунке 3.

Концентрированная соляная кислота из дозатора 1 и вода подается в емкость 2 для приготовления кислотного раствора концентрации $54,69 \text{ г/дм}^3$. Беленая целлюлоза из бункера 4 скребковым транспортером 5 подается в гидроразбиватель 6. Процесс роспуска осуществляется якорной мешалкой до получения однородной суспензии в течение 15 мин, затем волокнистая масса подается в полупромышленную дисковую мельницу 7. Размол волокнистой массы осуществляется до степени помола $50 \text{ }^\circ\text{ШР}$. После стадии предгидролизного размолотом волокнистая масса подвергается обезвоживанию на центрифуге 8 до концентрации 20 %. Полученная масса транспортируется насосом по трубопроводу в реактор 9, в который подается раствор соляной кислоты для химической обработки с целью деструкции волокнистых форм целлюлозы. Корпус реактора выполнен из кислотостойкой нержавеющей стали, оснащён водяной рубашкой обогрева и лопастной мешалкой. Скорость вращения лопастной мешалки 75 об/мин. Волокнистая масса выдерживается в растворе соляной кислоты при постоянно работающей мешалке в течение 60 мин при температуре $80 \text{ }^\circ\text{C}$. После гидролиза отработанный гидролизат подвергается нейтрализации NaOH в солеотделителе 10 или возвращается в реактор. Для отделения гидролизата от МКЦ в центрифуге 11 установлены фильтрующие устройства. Удаление из МКЦ оставшейся кислоты проводится путем разбавления ее водой с последующей очисткой промывных вод. Промывка ведется до слабокислой реакции среды (pH 5 – 7). Далее промытую массу по скребковому транспортеру 12 отправляют в распылительную сушилку 13, а полученный порошок на доизмельчение в шаровую мельницу 14, где его измельчают до размера частиц $1 - 350 \text{ мкм}$ с влажностью 3 – 7 %. Фракционный состав продукта регулируется путем подбора сменных протирачных решеток с отверстиями размером от 2×2 до $5 \times 5 \text{ мм}$, что позволяет получать гранулы заданной крупности и, как следствие, управлять насыпной плотностью материала.



1.1 – волокнистая масса, 1.2 – беленая целлюлоза, 1.3 – суспензия МКЦ, 1.4 – МКЦ (порошок)

- 1 – дозатор концентрированной кислоты, 2 – емкость для раствора кислоты, 3 – центробежный кислотный насос, 4 – shredder, 5, 12 – скребковый транспортер, 6 – гидроразбиватель, 7 – полупромышленная дисковая мельница, 8 – сгуститель, 9 – реактор, 10 – солеотделитель, 11 – центрифуга, 13 – распылительная сушилка, 14 – шаровая мельница, 15 – вибросито

Рисунок 3 - Принципиальная технологическая схема получения МКЦ

Затем на вибросите 15 (размер ячеек сит 150–355 мкм), проводится калибровка готового продукта по маркам. МКЦ рекомендуется хранить в крытых, сухих, чистых, хорошо вентилируемых складских помещениях без посторонних запахов и вдали от прямых солнечных лучей при температуре от минус 40 °С до 40 °С и относительной влажности не более 65 %.

Для исследования влияния МКЦ (с разной степенью помола исходной волокнистой массы) на свойства вулканизируемых резиновых композитов её вводили в качестве наполнителя в состав каучука марки СКС-30 АРК (таблица 7).

Таблица 7 – Физико-механические характеристики вулканизируемых резиновых смесей

Образец	Условная прочность при растяжении, МПа	Относительное удлинение при разрыве, %	Удельная работа разрушения, кДж/м ³	Равновесная степень набухания	
				в 23% растворе NaCl, %	в воде, %
Контрольный*	13,06	752,5	51,1	12,3	26,2
15 °ШР					
10 мас. ч. МКЦ	15,03	792,5	68,03	21,2	31,8
30 мас. ч. МКЦ	20,17	987,2	103,17	43,5	50,7
50 °ШР					
10 мас. ч. МКЦ	19,01	901,1	97,01	33,7	45,3
30 мас. ч. МКЦ	26,12	1130	172,06	60,4	64,7

Анализ полученных результатов показал, что введение МКЦ из целлюлозы биоповрежденной осины (полученной из беленой целлюлозы со степенью помола 50 °ШР) в количестве до 30 мас.ч. приводит к повышению физико-механических характеристик вулканизируемых резиновых смесей по сравнению с контрольным образцом: условная прочность при растяжении увеличивается на 100 %; относительное удлинение при разрыве на 50 %; удельная работа разрушения на 230 %; равновесная степень набухания: в 23% растворе NaCl на 49,2 %; в воде на 39,6 %. Выявленные закономерности обусловлены эффективным взаимодействием МКЦ с каучуковой матрицей, формированием дополнительных межфазных связей и ограничением подвижности макромолекул эластомера в присутствии целлюлозного наполнителя.

Методика синтеза гидрогелей на основе МКЦ из нетрадиционных видов сырья с разной степенью помола путем растворения ее в растворе N,N- диметилацетамида/хлорида лития подробно изложена в разделе 4.6.2 диссертационной работы. Выполненные исследования позволили установить, что предварительный гидроразмол беленой целлюлозы снижает затраты на химическую обработку при получении гидрогелей из МКЦ биоповрежденной осины в 2,7 раза, биоповрежденной ели и костры технической конопли в 1,2 раза. Повышение степени помола волокнистой массы с 15 – 85 °ШР приводит к двукратному снижению весового соотношения МКЦ : ДМАА.

Наиболее высокие значения исследуемых показателей (таблица 8) выявлены у гидрогелей, синтезированных из МКЦ биоповрежденной ели (имеющих перед гидролизом степень помола 85 °ШР), что свидетельствует о перспективности данного сырья для получения гидрогелей.

Таблица 8 – Основные характеристики образцов гидрогелей

Степень помола, °ШР	Разрывная длина, км	Пористость, %	Процент гелирования, %	Водоудерживающая способность, %
Гидрогель из раствора МКЦ (одревесневшей части стебля (костры) технической конопли)				
15	3,93	87,84	59,21	404
85	17,39	92,56	93,5	710
Гидрогель из раствора МКЦ (ели)				
15	4,54	91,19	74,4	650
85	21,28	93,8	94,3	871

Анализ продолжительности растворения исследуемых образцов МКЦ из целлюлозы биоповрежденной ели, целлюлозы биоповрежденной осины, костры технической конопли в зависимости от способа предгидролизного размола показал, что условия воздействия практически не влияют на продолжительность растворения, тогда как степень помола волокнистой массы оказывает существенное влияние.

В пятой главе выполнены: оценка экологической эффективности включения предгидролизного размола в процесс получения МКЦ; экономическая оценка внедрения готового продукта в виде МКЦ. Применение биоповрежденной древесины в качестве сырья для получения целлюлозы позволяет снизить экологический ущерб от сброса загрязняющих веществ производства МКЦ в водные объекты в 1,3 раза по сравнению с традиционной технологией на основе деловой древесины (таблица 9).

Таблица 9 – Технологические показатели загрязняющих веществ в сбросах в водные объекты, соответствующие НДТ, при производстве 1000 т сульфатной беленой целлюлозы (повышающий коэффициент 1,32)

Технологический показатель	Среднегодовое значение	Ставка платы на 2025 г., руб./т	Сумма платежей, руб./год
Химическое потребление кислорода, кг/т	30,00 / 21,00	30000,00	900000,00 / 630000,00
Биохимическое потребление кислорода, кг/т	1,20 / 0,9	366,93	440,32 / 330,24
Взвешенные вещества, кг/т	1,90 / 1,56	1475,57	2803,58 / 2301,89
Общий азот, кг/т	0,40 / 0,32	1749,59	699,84 / 559,87
Общий фосфор, кг/т	0,04 / 0,03	165,35	6,61 / 4,96
Абсорбируемые галогенорганические соединения, кг/т	0,40 / 0,32	3100,0	1240,00 / 992,00
Примечание: деловая древесина / биоповрежденная древесина			

В таблице 10 приведены результаты сравнительного анализа экономии

затрат на производство 1000 т МКЦ при использовании альтернативных деловой древесине видов сырья (без учета издержек на стадии технологического производства предыдущие варочному процессу). Результаты сопоставлены для различных видов исходного сырья:

1. Деловая древесина ели – повреждённая еловая древесина (85°ШР).
2. Деловая древесина осины – повреждённая осиновая древесина (85°ШР).
3. Деловая древесина осины – костра технической конопли (без предгидролизного размола).
4. Деловая древесина осины – костра технической конопли (85°ШР).

Таблица 10 – Результаты сравнительного анализа экономии затрат на производство 1000 т МКЦ

Наименование сырья	Электроэнергия, тыс.руб.	Материальные, тыс.руб.	Вода, тыс.руб.	Общая, тыс.руб.
Биоповрежденная еловая древесина, 85 °ШР	2126,52	15 654,00	- 760,0	17020,52
Биоповрежденная осиновая древесина, 85 °ШР	1434,45	11 210,55	- 760,0	11885,00
Костра технической конопли, 15 °ШР	931,55	3735,00	0	4666,55
Костра технической конопли, 85 °ШР	2654,05	7800,00	- 760	9694,05

Согласно полученным данным, себестоимость конечного продукта МКЦ (из древесины, имеющей биологические повреждения и одревесневшей части стебля (костры) технической конопли), полученной с предгидролизным размолом, ниже в среднем 1,2 раза товарной МКЦ.

Научные и практические результаты диссертационных исследований подтверждены актами внедрения (прилагаются к диссертации), прошли промышленную апробацию и внедрены в производство на ООО «СК-Полимеры» (г. Красноярск), ООО «Сибирский вкус» (г. Абакан), ООО НПП «СКС» (г. Красноярск), ООО «ЭКСПЕРТРЕМСТРОЙ» (г. Красноярск).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В рамках поставленной цели и сформулированных задач по результатам исследований в диссертационной работе получены следующие основные научные и практические результаты:

1. Доказана целесообразность использования в качестве сырья для производства МКЦ древесины, имеющей биологические повреждения и одревесневшей части стебля (костры) технической конопли.
2. В работе теоретически и экспериментально обоснована эффективность применения предгидролизного размола волокнистой массы в водной среде (с применением ножевых и безножевых размалывающих машин)

при получении МКЦ, позволяющего сократить себестоимость конечного продукта в 1,2 раза.

3. Анализ кинетических характеристик процесса гидролиза показал взаимосвязь между константами скорости реакции первого порядка и степенью помола волокнистой массы исходного материала. Выявлено, что с ростом степени помола повышается реакционная способность целлюлозы, благодаря увеличению количества реакционных центров и снижается эффективная энергия активации, необходимая для инициирования гидролиза. Классические представления о механизме кислотного гидролиза, который осуществляется через образование промежуточного карбокатиона в структурных элементах целлюлозы подтверждены нашими экспериментальными данными.

4. Разработаны математические модели процесса получения МКЦ для ЦБП, позволившие количественно оценить влияние технологических параметров размалывающего оборудования и процесса гидролиза на качество готовой продукции. Установлено, что степень помола волокнистой массы оказывает наиболее существенное влияние на степень полимеризации и индекс кристалличности по сравнению с такими параметрами, как концентрация соляной кислоты, температура и продолжительность гидролиза. Варьирование степенью помола в диапазоне 30 – 85 °ШР и концентрацией соляной кислоты от 54,69 г/дм³ до 91,15 г/дм³ обеспечило получение МКЦ из биоповреждённой ели и осины, отвечающей требованиям пищевой и фармацевтической промышленности, костры технической конопли – косметической и химической отраслей.

5. Определен оптимальный технологический режим получения МКЦ с предгидролизным размолотом целлюлозы в водной среде на дисковой мельнице: концентрация соляной кислоты 54,69 г/дм³; температура процесса 80 °С; продолжительность гидролиза 60 мин; степень помола технической целлюлозы 50 °ШР, применение которого позволяет получать МКЦ с заданными физико-химическими характеристиками (СП 160 – 216, СК 64 – 74) и снизить себестоимость конечного продукта на 20 %.

6. Предложена технология производства гидрогелей природного происхождения, в которой растворение МКЦ в системе ДМАА/LiCl осуществляется без предварительной активации МКЦ.

7. Получены композитные материалы на основе: вулканизируемых резиновых смесей с разной массовой долей МКЦ в качестве наполнителя и бумажных отливок с добавлением гидрогеля МКЦ. При введении МКЦ со степенью помола 50 °ШР количественные значения механических свойств отливок увеличились в среднем на 10 %; физико-механические характеристики вулканизируемой резиновой смеси в среднем на 25 % выше, чем у образцов, полученных смешением с МКЦ из волокнистой массы без предгидролизного размола со степенью помола 15 °ШР.

8. Применение технологии получения МКЦ с включением предгидролизного размола волокнистой массы в водной среде в ЦБП позволит получить экономический эффект при использовании альтернативных деловой

древесине источников сырья: еловой биоповрежденной древесины 17021,0 тыс. руб., осиновой биоповрежденной древесины 11885,0 тыс. руб., одревесневшей части стебля (костры) технической конопли 9694,0 тыс. руб. на 1000 тонн готовой продукции. Экономический эффект обусловлен снижением материальных затрат, температуры и продолжительности процесса гидролиза.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации:

1. Алашкевич, Ю. Д. Влияние характера размола волокнистой массы на качественные характеристики готовых бумажных изделий / Ю. Д. Алашкевич, **Л. В. Юртаева**, Е. В. Каплёв [и др.]. – Текст электронный // СибГУ им. М. Ф. Решетнева – Красноярск, Хвойные бореальной зоны. 2025. Т. XLIII, № 1. – С. 107 – 114, – DOI: 10.53374/1993-0135-2025-1-107-114.

2. Алашкевич, Ю. Д. Роль гидродинамических воздействий при размолё волокнистых растительных полимеров / Ю. Д. Алашкевич, **Л. В. Юртаева**, Р.А. Марченко [и др.]. – Текст электронный // СибГУ им. М. Ф. Решетнева – Красноярск, Хвойные бореальной зоны. 2025. Т. XLIII, № 5. С. 94 – 74. – DOI: 10.53374/1993-0135-2025-5-94-74.

3. **Юртаева, Л.В.** Получение МКЦ из однолетних растений с предгидролизным размолё волокнистой массы / Л. В. Юртаева. – Текст электронный // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2025. Т. 29. № 2. С. 120 – 134. – DOI: 10.18698/2542-1468-2025-2-120-134.

4. 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 [и др.]. – Текст электронный // ФГБОУ ВО «ВГЛУ» – Воронеж, 2024. – Лесотехнический журнал Т.14, №1(53). – С. 203 – 219. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.1/12>.

5. Влияние вида ножевой размалывающей гарнитуры на процесс получения МКЦ/ **Л.В. Юртаева**, Ю.Д. Алашкевич, Е.А. Слизикова [и др.]. – Текст электронный // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2024. № 2 (398). – С. 152-165. – DOI: 10.37482/0536-1036-2024-2-152-165.

6. Технология получения микрокристаллической целлюлозы с предгидролизным размолё на примере образцов биоповрежденной древесины хвойных пород / Е.В. Каплёв, **Л.В. Юртаева**, Ю.Д. Алашкевич [и др.]. – Текст электронный // СибГУ им. М. Ф. Решетнева – Красноярск, Хвойные бореальные зоны, 2024. Т. XLII, № 5. С.66 –73. – DOI:10.53374/1993-0135-2024-5-66-73.

7. **Юртаева, Л.В.** Способ получения микрокристаллической целлюлозы на основе биоповрежденной древесины / Л.В. Юртаева, Ю.Д. Алашкевич. – Текст электронный // СибГУ им. М. Ф. Решетнева – Красноярск, Хвойные бореальные. 2022. – Т. 40, № 2. – С.158 –164. – DOI 10.53374/1993-0135-2022-6-158-163.

8. Конюхова, В. В. Механизм обработки вторичного волокнистого материала хвойных пород древесины при комбинированном способе размола / В. В. Конюхова, **Л.В. Юртаева**, Ю.Д. Алашкевич // СибГУ им. М. Ф. Решетнева – Красноярск, Хвойные бореальные зоны, 2018, № 4. – С.371–374.

9. **Юртаева, Л.В.** Влияние размола однолетних растительных полимеров на процесс получения мелкодисперсной целлюлозы / Л.В. Юртаева, Ю.Д. Алашкевич, Е.В. Каплев [и др.]. – Текст электронный // СибГУ им. М. Ф. Решетнева – Красноярск, Хвойные бореальные зоны, 2023. – Т. 41, № 4. – С. 361 – 368. – DOI: 10.53374/1993-0135-2023-4-361-368.

10. **Кутовая, Л.В.**, Обработка безножевым способом макулатурной массы / Л.В. Кутовая, В.В. Конюхова, Ю.Д. Алашкевич, А.Г. Шведов. – Текст непосредственный // СибГУ им. М. Ф. Решетнева – Красноярск Хвойные бореальной зоны, 2008. Т. 25. № 3 – 4. – С. 359 – 361.

*Публикации в научных журналах, индексируемых в базах данных
Scopus и Web of Science*

11. **Юртаева, Л.В.** Влияние предгидролизного размола волокнистой массы на качественные характеристики МКЦ / **Л.В. Юртаева**, Ю.Д. Алашкевич, М.С. Товбис. – Текст электронный // Химия растительного сырья. 2025. № 4. – С.407 – 415. – electronic text. – DOI: org/10.14258/jcprm.20250417354.

12. Industrial hemp hurd processing for microcrystalline cellulose production and its usage as a filler in paper/ **L. V. Yurtayeva**, Yu. D. Alashkevich, E. V. Kaplyov E. A. Slizikova and R. A. Marchenko. // BioResources. – 2024. 19(2), 2811 – 2825. – electronic text. – DOI: 10.15376/biores.19.2.2811-2825.

13. Obtaining microcrystalline cellulose based on biodamaged wood as a way to improve the sanitary and forest pathological state of forests / E. V. Kaplyov, **L. V. Yurtayeva**, R. A. Marchenko and Yu. D. Alashkevich. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2023. – Vol. 1231, No. 1. – P. 012031. – electronic text. – DOI: 10.1088/1755-1315/1231/1/012031.

14. Obtaining fine-dispersed cellulose from annual plants / **L. V. Yurtayeva**, Yu. D. Alashkevich, R. A. Marchenko [et al.]. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2023. Т. 1231. № 1. – С. 012030. – electronic text. – DOI 10.1088/1755-1315/1231/1/012030.

15. Bio-damaged wood for MCC / **L. V. Yurtayeva**, Yu. D. Alashkevich, E. V. Kaplyov [et al.]. // BioResources, 2023, Vol.18(4), p.8284 – 8295. – electronic text. – DOI: 10.15376/biores.18.4.8284-8295.

16. **Юртаева, Л.В.** Анализ движения потока волокнистой суспензии в размалывающей установке при получении мелкодисперсной целлюлозы / Л.В. Юртаева, Ю.Д. Алашкевич, Е.В. Каплев [и др.]. – Текст : электронный // Химия растительного сырья. 2023. №3. – С. 317 – 327. – DOI: 10.14258/jcprm.20230312008.

17. Investigation of the influence of the pattern of a disc mill set on the process

of obtaining powdered pulp / D. Yu. Vasilyeva, **L. V. Yurtaeva**, R. A. Marchenko [et al.]. // Journal of Physics: Conference Series, Krasnoyarsk, Russia, Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Vol. Volume 2094. – Krasnoyarsk, Russia: IOP Publishing Ltd, 2021. – P. 42069. – electronic text. – DOI: 10.1088/1742-6596/2094/4/042069.

18. Parameters affecting the mechanical refining process of plant raw materials a jet-impingement method / **L. V. Yurtayeva**, Yu. D. Alashkevich, R. A. Marchenko [et al.]. // BioResources – 2021. Vol. 16, No. 2. – P. 4212-4220. – electronic text. – DOI: 10.15376/biores.16.2.4212-4220.

19. Investigation of the possibility of obtaining powdered cellulose using a non-knife method of grinding fibrous semi-finished products/ E. V. Kaplyov, **L. V. Yurtaeva**, R. A. Marchenko [et al.]. // Journal of Physics: Conference Series / Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Vol. Volume 2094. – Krasnoyarsk, Russia: IOP Publishing Ltd, 2021. – P. 42069. – electronic text. – DOI: 10.1088/1742-6596/2094/4/042069.

20. Получение аналитической зависимости прочностных свойств бумаги от бумагообразующих показателей волокнистой массы / **Л. В. Юртаева**, Н. С. Решетова, Ю. Д. Алашкевич [и др.]. – Текст : электронный // Химия растительного сырья. 2020. № 4. – С. 501 – 509. – DOI: 10.14258/jcprn.2020048121.

21. Алашкевич, Ю.Д. Влияние ножевого способа размола волокнистой массы на процесс получения порошковой целлюлозы / Ю.Д. Алашкевич, **Л.В. Юртаева**, Н.С. Решетова, Р.А. Марченко. – Текст : электронный // Химия растительного сырья. 2020. № 4. – С. 493 – 499. – DOI: 10.14258/jcprn.2020048121.

Монографии:

22. **Кутовая, Л.В.**, Обобщающий параметр безножевого способа обработки волокнистых полуфабрикатов: Монография/ **Л.В. Кутовая**, Ю.Д. Алашкевич // М-во образования Рос. Федерации. Сиб. гос. технол. ун-т. - Красноярск : Сиб. гос. технол. ун-т, 2001. - 123 с. – Текст : непосредственный.

Основные объекты интеллектуальной собственности:

23. Патент № 2853961 С1 Российская Федерация, МПК D21С 1/04. Способ получения микрокристаллической целлюлозы: № 2025129132 : заявл. 23.10.2025 : опубл. 26.12.2025 / Ю. Д. Алашкевич, **Л. В. Юртаева**, Е. В. Каплев [и др.] ; заявитель ФГБОУ ВО «Сибирский гос. ун-т науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва». – Текст : непосредственный.

24. Патент № 2828592 С1 Российская Федерация, МПК С08L 1/00, С08К 3/06, С08К 3/10. Вулканизируемая резиновая смесь : № 2024114780 : заявл. 30.05.2024 : опубл. 14.10.2024 / Ю. Д. Алашкевич, **Л. В. Юртаева**, Е. В. Каплев [и др.] ; заявитель ФГБОУ ВО «Сибирский гос. ун-т науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва». – Текст : непосредственный.

25. Патент 2803626 С1 Российская Федерация, МПК D21C 1/04. Способ получения МКЦ: №2023103933 : заявл. 20.02.2023 : опубл. 18.09.2023 / Ю. Д. Алашкевич, В. И. Ковалев, **Л. В. Юртаева** [и др.] ; заявитель ФГБОУ ВО «Сибирский гос. ун-т науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва». – Текст : непосредственный.

26. Патент № 2855483 С1 Российская Федерация, МПК А21D 8/02, А21D 2/36. Способ приготовления теста для кексов : № 2025110823 : заявл. 25.04.2025 : опубл. 02.02.2026 / Ю. Д. Алашкевич, **Л. В. Юртаева**, Е. В. Каплев [и др.] ; заявитель ФГБОУ ВО «Сибирский гос. ун-т науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва». – Текст : непосредственный.

27. Патент 2813723 С1 Российская Федерация, МПК С08В 15/00, D21C 1/04, D21C 3/00, D21C 9/00, С08L 101/16. Способ получения гидрогеля МКЦ: №2023113733 : заявл. 24.05.2023: опубл. 15.02.2024 / Ю. Д. Алашкевич, **Л. В. Юртаева**, Е. В. Каплев [и др.] ; заявитель ФГБОУ ВО «Сибирский гос. ун-т науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва». – Текст : непосредственный.

28. Патент 2797202 С1 Российская Федерация, МПК D21C 1/04, С08В 15/00. Способ получения микрокристаллической целлюлозы: №2022132617 : заявл. 13.12.2022 : опубл.31.05.2023 / Ю. Д. Алашкевич, В. И. Ковалев, **Л. В. Юртаева** [и др.] ; заявитель ФГБОУ ВО «Сибирский гос. ун-т науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва». – Текст : непосредственный.

Публикации в других изданиях и материалах конференций:

29. Пожаркова С.А., Сравнительный анализ технологий изготовления МКЦ/ С.А. Пожаркова, **Л.В. Юртаева** – Текст : непосредственный // Решетневские чтения. материалы XXIX Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика Михаила Федоровича Решетнева: в 2-х частях. – Красноярск : СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2025. С. 965 – 967.

30. Пожаркова, С.А. Влияние условий варки на свойства целлюлозы / С.А. Пожаркова, **Л.В. Юртаева**. – Текст : непосредственный // Решетневские чтения: сб. XXVIII Междунар. науч. практ. конф., посвященной 100-летию со Дня рождения генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева. – Красноярск : СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2024. – С. 904 – 906.

31. Исследование физико-механических характеристик готовых отливок из биоповрежденной древесины хвойных пород / Ю.Д. Алашкевич, **Л.В. Юртаева**, Е.В. Каплёв [и др.]. – Текст : непосредственный // Лесной и химический комплексы - проблемы и решения: сб. XXX Всерос. науч. практ. конф. – Красноярск : СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2024. С. 164 – 167.

32. Пожаркова, С.А. Получение МКЦс предгидролизным размолом волокнистой массы / С.А. Пожаркова, **Л.В. Юртаева**. – Текст : непосредственный // Молодые ученые в решении актуальных проблем науки: сб. Всерос. науч. практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых (с междунар. уч.). – Красноярск : СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2024. –

С. 177 – 179.

33. Пожаркова, С.А., Влияние рисунка размалывающей гарнитуры на процесс получения МКЦ/ С.А. Пожаркова, **Л.В. Юртаева**. – Текст : непосредственный // Молодые ученые в решении актуальных проблем науки: сб. Всерос. науч. практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых (с междунар. уч.). – Красноярск: СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2024. – С. 180 – 182.

34. Слизикова, Е.А. Роль процесса размола при получении МКЦ/ Е.А. Слизикова, **Л.В. Юртаева**. – Текст : непосредственный // Молодые ученые в решении актуальных проблем науки: сб. Всерос. науч. практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых (с междунар. уч.). – Красноярск: СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2024. – С. 188 – 190.

35. **Юртаева**, Л.В. Способы получения МКЦиз однолетних растений / Л.В. Юртаева, Е.А. Слизикова, С.А. Пожаркова, [и др.]. – Текст : непосредственный // Лесной и химический комплексы - проблемы и решения: сб. XXX Всерос. науч. практ. конф. Красноярск: СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2024. – С. 232 – 236.

36. **Юртаева**, Л. В. Влияние размола на процесс получения МКЦ/ Л. В. Юртаева, Е. В. Каплёв, Д. Ю. Васильева – Текст : непосредственный // Лесной и химический комплексы - проблемы и решения : сб. Всерос. науч. практ. конф. Красноярск: СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2023. – С. 328 – 332.

37. **Юртаева**, Л. В., Алашкевич, Ю. Д., Каплёв, Е. В. Безножевой размол растительных полимеров при получении мелкодисперсной целлюлозы / Л. В. Юртаева, Ю. Д. Алашкевич, Е. В. Каплёв – Текст : непосредственный // Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов : сб. VII Междунар. науч. техн. конф. им. проф. В.И. Комарова. Архангельск Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, 2023. – С. 380 – 384.

38. Каплёв, Е. В. Исследование влияния конструктивных параметров безножевой размалывающей установки на процесс размола / Е. В. Каплёв, Ю. Д. Алашкевич, **Л. В. Юртаева** – Текст : непосредственный // Решетневские чтения : материалы XXVII Международной научно-практической конференции, посвящённой памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева : в 2 ч. – Красноярск : СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2023. – С. 814 – 816.

39. Каплёв, Е. В. Способ получения порошковой целлюлозы с использованием размалывающего оборудования / Е. В. Каплёв, **Л. В. Юртаева**, Д. Ю. Васильева, Ю. Д. Алашкевич // Современная целлюлозно-бумажная промышленность. Актуальные задачи и перспективные решения : материалы IV Международной научно-технической конференции молодых учёных и специалистов ЦБП. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, 2023. – С. 25 – 30.

40. **Юртаева**, Л. В. Исследование влияния безножевого способа размола

растительных полимеров на процесс получения мелкодисперсной целлюлозы / Л. В. Юртаева, Е. В. Каплёв, Ю. Д. Алашкевич – Текст : непосредственный // Актуальные проблемы лесного хозяйства и деревопереработки : материалы Всероссийской научно-практической конференции. – Казань : Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2023. – С. 177–181.

41. Пожаркова, С. А. Использование ножевого способа размола при получении МКЦ/ С. А. Пожаркова, Л. В. Юртаева, Ю. Д. Алашкевич, В. А. Патраков [и др.]. – Текст : непосредственный // Современная целлюлозно-бумажная промышленность. Актуальные задачи и перспективные решения : материалы V Международной научно-технической конференции молодых учёных и специалистов ЦБП. – Санкт-Петербург, 2023. – С. 11 – 16.

42. Юртаева, Л. В. Способы получения мелкодисперсной целлюлозы (обзор) / Л. В. Юртаева, Ю. Д. Алашкевич, Р. В. Бандура, В. С. Овчинников [и др.]. – Текст : непосредственный // Лесной и химический комплексы — проблемы и решения : сборник материалов по итогам Всероссийской научно-практической конференции. – Красноярск : СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2023. – С. 324 – 327.

43. Юртаева, Л. В. Влияние ножевого способа размола на процесс получения МКЦ из однолетних растений / Л. В. Юртаева, Ю. Д. Алашкевич, Е. А. Слизикова, Е. Р. Колосова [и др.]. – Текст : непосредственный // Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов : материалы VII Международной научно-технической конференции имени профессора В. И. Комарова. – Архангельск : САФУ им. М. В. Ломоносова, 2023. – С. 385 – 390.

44. Юртаева, Л. В. Исследование влияния рисунка ножевой гарнитуры на процесс получения мелкодисперсной целлюлозы / Л. В. Юртаева, Е. А. Слизикова, Ю. Д. Алашкевич, В. И. Яровая [и др.]. – Текст : непосредственный // Актуальные проблемы лесного хозяйства и деревопереработки : материалы Всероссийской научно-практической конференции. – Казань, 2023. – С. 387 – 391.

45. Юртаева, Л. В. Виды сырья для получения МКЦ/ Л. В. Юртаева, Е. А. Слизикова, Е. Р. Колосова, С. А. Пожаркова [и др.]. – Текст : непосредственный // Решетневские чтения : материалы XXVII Международной научно-практической конференции, посвящённой памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева : в 2 ч. – Красноярск : СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2023. – С. 868 – 870.

46. Колосова, Е. Р. Способы получения волокнистой массы из древесного сырья / Е. Р. Колосова, В. А. Патраков, Л. В. Юртаева – Текст : непосредственный // Лесной и химический комплексы – проблемы и решения : сборник материалов по итогам Всероссийской научно-практической конференции. – Красноярск : СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2022. – С. 377–380.

47. Колосова, Е. Р. Факторы, влияющие на механическую прочность бумаги / Е. Р. Колосова, Д. Ю. Васильева, Л. В. Юртаева – Текст : непосредственный // Решетневские чтения : материалы XXVI Международной

научно-практической конференции, посвящённой памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева. – Красноярск : СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2022. – С. 823 – 825.

48. Каплёв, Е. В. Исследование механических прочностных свойств целлюлозы, полученной из биоповреждённой древесины / Е. В. Каплёв, **Л. В. Юртаева**, Ю. Д. Алашкевич, Д. С. Таразеев – Текст : непосредственный // Современные тенденции развития химической технологии, промышленной экологии и экологической безопасности : материалы III Всероссийской научно-практической конференции с участием молодых учёных. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, 2022. – С. 25 – 28.

49. Каплёв, Е. В. Гидрогели на основе МКЦ/ Е. В. Каплёв, Д. Ю. Васильева, Р. А. Марченко, **Л. В. Юртаева** – Текст : непосредственный // Лесной и химический комплексы – проблемы и решения : сборник материалов по итогам Всероссийской научно-практической конференции. – Красноярск : СибГУ им. академика М. Ф. Решетнева, 2022. – С. 370 – 373.

50. Каплёв, Е. В. Способы получения порошковых целлюлозных материалов / Е. В. Каплёв, **Л. В. Юртаева** – Текст : непосредственный // Состояние окружающей среды, проблемы экологии и пути их решения : материалы Всероссийской научно-практической конференции. – Усть-Илимск – Иркутск : Байкальский государственный университет, 2022. – С. 79 – 85.

51. Зырянов, Д. Е. Влияние процесса размола волокнистой массы на получение порошковой целлюлозы / Д. Е. Зырянов, Д. Ю. Васильева, Е. В. Каплёв, **Л. В. Юртаева** [и др.]. – Текст : непосредственный // Современные тенденции развития химической технологии, промышленной экологии и техносферной безопасности : материалы II Всероссийской научно-практической конференции студентов и молодых учёных. – Санкт-Петербург : Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД, 2021. – С. 236 – 240.

52. Васильева, Д. Ю. Исследование влияния способа размола волокнистой массы на процесс получения порошковой целлюлозы / Д. Ю. Васильева, Ю. Д. Алашкевич, **Л. В. Юртаева**, Р. А. Марченко [и др.]. – Текст : непосредственный// Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов : материалы VI Международной научно-технической конференции, посвящённой памяти профессора В. И. Комарова. – Архангельск : САФУ им. М. В. Ломоносова, 2021. – С. 266 – 272.

53. Васильева, Д. Ю. Влияние вида сырья на бумагообразующие свойства волокнистой массы / Д. Ю. Васильева, Р. А. Марченко, **Л. В. Юртаева**, В. И. Шуркина, Е. В. Каплёв. [и др.]. – Текст : непосредственный // Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов : материалы VI Международной научно-технической конференции, посвящённой памяти профессора В. И. Комарова. – Архангельск : САФУ им. М. В. Ломоносова, 2021. – С. 303 – 307.

54. Васильева, Д. Ю. Влияние вида сырья на физико-механические

характеристики готовых отливок / Д. Ю. Васильева, **Л. В. Юртаева**. – Текст : непосредственный // Лесной и химический комплексы – проблемы и решения : сборник материалов по итогам Всероссийской научно-практической конференции. – Красноярск : СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2021. – С. 321–325.

55. Каплёв, Е. В. Роль безножевого способа размола волокнистых полуфабрикатов в получении порошковой целлюлозы / Е. В. Каплёв, **Л. В. Юртаева**, Ю. Д. Алашкевич, Р. А. Марченко. – Текст : непосредственный // Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов : материалы VI Международной научно-технической конференции, посвящённой памяти профессора В. И. Комарова. – Архангельск : САФУ им. М. В. Ломоносова, 2021. – С. 308 – 312.

56. Каплёв, Е. В. Влияние режима размола на физико-механические свойства сульфатной белёной целлюлозы / Е. В. Каплёв, **Л. В. Юртаева**. – Текст : непосредственный // Лесной и химический комплексы – проблемы и решения : сборник материалов по итогам Всероссийской научно-практической конференции. – Красноярск : СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2021. – С. 339 – 343.

57. Каплёв, Е. В. Получение порошковой целлюлозы с использованием безножевого способа размола волокнистых полуфабрикатов / Е. В. Каплёв, **Л. В. Юртаева**. – Текст : непосредственный // Решетневские чтения : материалы XXV Международной научно-практической конференции, посвящённой памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева : в 2 т. Т. 2. – Красноярск : СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2021. – С. 102 – 104.

58. Каплёв, Е. В. Влияние кавитации на разработку волокнистой суспензии при безножевом размоле / Е. В. Каплёв, **Л. В. Юртаева**. – Текст : непосредственный // Молодые учёные в решении актуальных проблем науки : сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. – Красноярск : СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2020. – С. 145 – 147.

59. Каплёв, Е. В. Параметры турбулентности потока волокнистой суспензии / Е. В. Каплёв, **Л. В. Юртаева**, А. С. Фролов. – Текст : непосредственный // Новые достижения в химии и химической технологии растительного сырья : материалы VIII Всероссийской конференции с международным участием. – Барнаул : Алтайский государственный университет, 2020. – С. 223 – 226.

60. Каплёв, Е. В. Влияние конструктивных параметров турбины на физико-механические показатели готовых отливок / Е. В. Каплёв, **Л. В. Юртаева**, Ю. Д. Алашкевич. – Текст : непосредственный // Современная целлюлозно-бумажная промышленность. Актуальные задачи и перспективные решения : материалы II Международной научно-технической конференции молодых учёных и специалистов ЦБП : в 2 т. Т. 1. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, 2020. – С. 21 – 25.

61. Васильева, Д. Ю. Влияние длины волокна на физико-механические

показатели волокнистой массы / Д. Ю. Васильева, Е. В. Зверькова, **Л. В. Юртаева**. – Текст : непосредственный // Новые достижения в химии и химической технологии растительного сырья : материалы VIII Всероссийской конференции с международным участием. – Барнаул : Алтайский государственный университет, 2020. – С. 276 – 278.

62. Алашкевич, Ю. Д. Процесс размола волокнистых полуфабрикатов в получении порошковой целлюлозы / Ю. Д. Алашкевич, **Л. В. Юртаева**, Д. Ю. Васильева, Н. С. Решетова [и др.]. – Текст : непосредственный // Новые достижения в химии и химической технологии растительного сырья : материалы VIII Всероссийской конференции с международным участием. – Барнаул : Алтайский государственный университет, 2020. – С. 278 – 280.

63. Васильева, Д. Ю. Влияние ножевого способа размола волокнистой массы на процесс получения готовой продукции / Д. Ю. Васильева, Д. Е. Зырянов, Н. С. Решетова, **Л. В. Юртаева**. – Текст : непосредственный // Современная целлюлозно-бумажная промышленность. Актуальные задачи и перспективные решения : материалы II Международной научно-технической конференции молодых учёных и специалистов ЦБП. – Санкт-Петербург, 2020. – С. 16–20.

64. Васильева, Д. Ю. Роль процесса размола волокнистых полуфабрикатов в получении МКЦ/ Д. Ю. Васильева, **Л. В. Юртаева**, Ю. Д. Алашкевич. – Текст : непосредственный // Современные тенденции развития химической технологии, промышленной экологии и техносферной безопасности : материалы Всероссийской научно-практической конференции студентов и молодых учёных. – Санкт-Петербург : Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД, 2020. – С. 22 – 24.

65. Васильева, Д. Ю. Влияние способа размола на фибрилляцию волокнистой массы / Д. Ю. Васильева, **Л. В. Юртаева**. – Текст : непосредственный // Молодые учёные в решении актуальных проблем науки : материалы Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. – Красноярск : СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2019. – С. 137 – 139.

66. Васильева, Д. Ю. Отдельные бумагообразующие свойства волокна при безножевом способе размола / Д. Ю. Васильева, **Л. В. Юртаева**, Ю. Д. Алашкевич. – Текст : непосредственный // Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов : материалы V Международной научно-технической конференции, посвящённой памяти профессора В. И. Комарова. – 2019. – С. 81 – 86.

67. Васильева, Д. Ю. Основные бумагообразующие свойства волокнистых полуфабрикатов в процессе размола волокнистых материалов / Д. Ю. Васильева, **Л. В. Юртаева**. – Текст : непосредственный // Молодые учёные в решении актуальных проблем науки : материалы Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. – Красноярск : СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2018. – С. 55 – 57.

Автор выражает искреннюю благодарность к.ф.-м.н., Шабанову Александру Васильевичу, ведущему научному сотруднику Института физики СО РАН, за помощь в организации проведения исследований методами электронной микроскопии и сотрудникам Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М.Ф.Решетнева: к.т.н., доценту Марченко Роману Александровичу за помощь в обработке экспериментальных исследований; к.т.н., доценту Каретниковой Наталье Викторовне за консультацию по определению режимов варки целлюлозы; Коркиной Милии Александровне, учебному мастеру, за оказанную помощь в подготовке отдельных химических реагентов; д.х.н., доценту Ворончихину Дмитрию Васильевичу и к.т.н., доценту Баяндину Михаилу Андреевичу за содействие в проведении исследований в области резиновых вулканизируемых смесей

Подписано в печать 24.06.2026
Формат 60*84/16. Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ №3699
Отпечатано в редакционно-издательском центре
СибГУ им. М.Ф. Решетнева
660049, г. Красноярск, пр. Мира, 82
тел. (391)222-73-28