

На правах рукописи



Карелина Александра Александровна

**РАЗМОЛ ВОЛОКНИСТЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ ВЫСОКОЙ
КОНЦЕНТРАЦИИ ИЗ НЕДРЕВЕСНОГО
ЦЕЛЛЮЛОЗОСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ
БУМАЖНОЙ ПРОДУКЦИИ**

4.3.4 – Технологии, машины и оборудование для лесного
хозяйства и переработки древесины

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Красноярск – 2025

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

Научный руководитель: Академик РАО, доктор технических наук, профессор Алашкевич Юрий Давыдович

Официальные оппоненты:

Казаков Яков Владимирович, доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», кафедра Целлюлозно-бумажных и лесохимических производств, профессор

Вураско Алеся Валерьевна, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», кафедра Технологий целлюлозно-бумажных производств и переработки полимеров, профессор

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

Защита состоится «11» июня 2025 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.403.03, созданного на базе ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва» по адресу: 660049, г. Красноярск, пр. Мира 82, Ц - 110

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. Решетнёва, ученому секретарю, e-mail: dissovetsibgtu01@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 библиотеке Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва и на официальном сайте <https://www.sibsau.ru/page/dissertational-advice>

Автореферат разослан « _____ » _____ 20__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Матыгулина Венера Нуруллоевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Бумажная промышленность сталкивается с проблемами нехватки ресурсов, загрязнения окружающей среды и низким уровнем технического оснащения. Одной из главных проблем является дефицит растительного сырья. В России ежегодно образуется более 1,3 млн тонн отходов растениеводства, среди которых выделяются отходы лубяных культур, таких как лён и техническая конопля. Лубяное волокно этих культур является превосходным волокнистым материалом, поскольку такие волокна длиннее древесных, а также содержат больше целлюлозы.

Недревесное целлюлозосодержащее сырьё может стать важной альтернативой для целлюлозно-бумажной промышленности благодаря своей быстрой возобновляемости и разнообразию характеристик. Однако переработка такого сырья, особенно процесс размола, требует внедрения передовых технологий, среди которых перспективу представляет размол волокнистой массы высокой концентрации. Он обладает рядом преимуществ, включая снижение удельного расхода воды и электроэнергии, а также повышение показателей прочности бумаги, но имеет и недостатки, среди которых - затрудненное прохождение массы через зону размола. Для решения этого вопроса необходимо использовать оборудование, обеспечивающее высокую пропускную способность волокнистой массы с преимущественным её фибриллированием. Это позволит улучшить качество продукции и поспособствует развитию отрасли с использованием альтернативных источников сырья.

Степень разработанности темы. Производство бумажной продукции является сложным и капиталоемким процессом. Поэтому особенно важно внедрять различные улучшения в каждый производственный этап.

Одним из важнейших этапов является размол волокнистых полуфабрикатов. Проблемы интенсификации процесса размола рассматривались в работах Матвеева Б.П., Васильева А.А., Алашкевича Ю.Д., Гончарова В.Н., Ковалева В.И., Вихарева С.Н., Ушакова А.В., Керекеса Р. и других. Основными способами решения этой задачи являлись либо модернизация существующего размалывающего оборудования, либо создание принципиально новых устройств и подходов.

Параллельно с этим велись исследования по расширению сырьевой базы. Исследовались особенности обработки нетрадиционного сырья, например, пшеничной и рисовой соломы или хлопка, которые представлены в работах Бейкера К., Пена Р.З., Вураско А.В., Чандра М. и других. Ключевой особенностью этих экспериментов является то, что процесс размола в них отходит на второй план или исследован не в полной мере.

Однако, существует не так много работ (Саини С., Фердоус Т., Чжао В.), в которых одинаковое внимание уделялось как особенностям волокнистого сырья, так и конструктивным параметрам размалывающего оборудования, и процессу размола в целом.

Цель и задачи исследования. Цель: повышение эффективности процесса размола волокнистых полуфабрикатов высокой концентрации из недревесного целлюлозосодержащего сырья за счёт разработки конструкции ножевой

размалывающей гарнитуры дисковой мельницы при получении бумажной продукции.

Для достижения цели были поставлены следующие **задачи**:

1. Анализ литературных источников в области размола недревесного целлюлозосодержащего сырья и обоснование целесообразности его использования для получения готовой продукции в ЦБП.

2. Проведение теоретической разработки конструкции гарнитуры с обоснованием силового воздействия при размоле и влияние углов касательной к режущей кромке на входе в зону размола и выходе из нее с точки зрения улучшения транспортирующей способности, бумагообразующих свойств размалываемых полуфабрикатов и физико-механических характеристик готовой продукции.

3. Проведение анализа результатов эксперимента размола волокнистых полуфабрикатов с учетом влияния основных технологических параметров размольной установки, в числе которых величина межножевого зазора, частота вращения ротора и концентрация размалываемого полуфабриката.

4. Оценка эффективности процесса размола волокнистых полуфабрикатов высокой концентрации из различных видов недревесного целлюлозосодержащего сырья с использованием гарнитуры авторского исполнения и традиционных ножевых гарнитур.

5. Проведение факторного и кластерного анализов для определения общей доли суммарной дисперсии выходных параметров в процессе размола волокнистых полуфабрикатов.

6. Оценка технико-экономической эффективности производства бумажной продукции из недревесного целлюлозосодержащего сырья высокой концентрации без этапа химической обработки.

Объект исследований. Получение готовой продукции из растительного сырья.

Предмет исследований. Процесс размола массы высокой концентрации из недревесного целлюлозосодержащего сырья в целлюлозно-бумажном производстве.

Научная новизна.

1. Впервые разработана новая конструкция размалывающей гарнитуры (патент № 2798559 С1, № 2805266 С1) для размола недревесного целлюлозосодержащего сырья высокой концентрации, создающая повышенное силовое воздействие на волокна, отличающаяся увеличенным значением угла касательной к режущей кромке на входе в зону размола и выходе из неё.

2. Впервые получены зависимости, определяющие вклад каждого исследуемого технологического фактора различных конструкций гарнитур, в том числе её авторского решения в процессе размола недревесного целлюлозосодержащего сырья высокой концентрации с учетом исключения этапа химической обработки.

3. Проведены факторный и кластерный анализы экспериментальных данных, направленные на выявление корреляционных связей между исследуемыми параметрами.

Теоретическая и практическая значимость. Теоретическая значимость работы заключается в разработке и обосновании механизма воздействия ножевой гарнитуры дисковой мельницы в процессе размола, обеспечивающего качественную подготовку волокнистой массы из недревесного целлюлозосодержащего сырья высокой концентрации.

Практическая значимость заключается в получении результатов использования новой конструкции размалывающей гарнитуры и производстве готовой продукции из недревесного целлюлозосодержащего сырья в ЦБП.

Разработана и защищена патентами новая конструкция гарнитуры дисковой мельницы, создающая преимущественно фибриллирующее воздействие на волокнистую массу высокой концентрации из недревесного целлюлозосодержащего сырья.

Представленные в исследовании данные могут быть использованы при проектировании предприятий по производству упаковочных сортов бумаги из недревесного целлюлозосодержащего сырья.

Методология и методы исследования. При выполнении диссертационной работы использовались методы активного многофакторного эксперимента, а также факторный и кластерный анализы. Бумагообразующие свойства волокнистой массы определялись с помощью современного анализатора волокна *Morfi neo*. Физико-механические характеристики бумажных отливок определялись стандартными методами. Планирование и обработка экспериментальных данных проводились с использованием математической теории планирования экспериментов и программ *STATGRAPHICS® Centurion* и *Microsoft Excel*.

Положения, выносимые на защиту:

1. Теоретические исследования и практические разработки, позволяющие предложить новую конструкцию ножевой размалывающей гарнитуры для размола волокнистой массы из недревесного целлюлозосодержащего сырья высокой концентрации.

2. Зависимость качества готовой продукции от технологических факторов: конструкции ножевой гарнитуры, частоты вращения ротора, величины зазора между ножами ротора и статора, концентрации волокнистой массы, вида обрабатываемого сырья.

3. Закономерности изменения бумагообразующих свойств волокнистой массы и физико-механических характеристик бумажных отливок из недревесного целлюлозосодержащего сырья, с учетом силовых и конструктивных параметров размалывающих гарнитур.

Достоверность результатов диссертационной работы базируется на использовании научно обоснованных методик проведения экспериментальных исследований и обработки информации с применением современных аналитических методов, а также публикацией результатов и их обсуждением на международных и российских конференциях.

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. Результаты работы докладывались на всероссийских и международных конференциях: «Современная целлюлозно-бумажная промышленность. Актуальные задачи и перспективные решения» (Санкт-Петербург, 2022, 2023, 2024), «Лесной и химический комплексы - проблемы и решения» (Красноярск, 2022), «Леса России: политика, промышленность, наука, образование» (Санкт-Петербург, 2022, 2023), «Решетнёвские чтения» (Красноярск, 2022, 2023), «Молодые ученые в решении актуальных проблем науки» (Красноярск, 2023), «Актуальные проблемы лесного хозяйства и деревопереработки» (Казань, 2023), «Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов» (Архангельск, 2023), «BIOAsia-Altai» (2024).

Публикации. По результатам исследований опубликовано 20 печатных работ, из них 3 – в изданиях перечня ВАК, 2 из которых в базе данных Scopus, два патента Российской Федерации на изобретение № 2798559 С1, № 2805266 С1.

Личный вклад автора заключается в сборе и анализе литературных данных, разработке и теоретическом обосновании конструкции гарнитуры с окружной формой ножей, постановке и проведении экспериментальных исследований, обработке полученных результатов, формулировании выводов, подготовке и опубликовании статей, оформлении патентов.

Объем и структура работы: Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка из 137 наименований и 8 приложений. Объем работы составляет 181 страницу машинописного текста, включая, 77 иллюстраций и 29 таблиц.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследования, раскрыты научная новизна и практическая значимость.

Глава 1. Аналитический обзор. В первой главе проведен анализ литературных данных о характеристиках недревесных целлюлозосодержащих растений, а также о возможности их применения в качестве волокнистого сырья при размоле массы высокой концентрации в производстве бумажной продукции.

При оценке пригодности недревесного целлюлозосодержащего сырья для целлюлозно-бумажной промышленности важно учитывать такие характеристики, как содержание целлюлозы, длина и диаметр волокон, микрофибрилярный угол и коэффициент Рункеля.

Установлено, что лубяные волокна (техническая конопля и лён) пригодны в качестве волокнистого полуфабриката в ЦБП, поскольку содержат более 60 % целлюлозы (что позволяет использовать их без химической обработки), имеют большую собственную прочность, чем волокна древесины, а также длиннее их и обладают меньшими значениями микрофибрилярного угла (что способствует отслоению длинных лентообразных фибрилл в процессе размола).

Кроме того, коэффициент Рункеля лубяных волокон конопли и льна <1 , что подтверждает способность растительных волокон к размолу.

Для их эффективной обработки необходимо увеличение силовых нагрузок в зоне размола, обеспечивающих при этом максимальное значение касательных усилий, которое позволит получить хорошо фибриллированный волокнистый полуфабрикат с высокими бумагообразующими характеристиками.

Для создания требующихся условий обработки недревесного растительного сырья необходима разработка новой конструкции размалывающей гарнитуры.

Глава 2. Теоретическая часть. Во второй главе представлено теоретическое обоснование геометрии ножевой размалывающей гарнитуры, которая обеспечит преобладание касательных усилий со стороны активных режущих кромок для минимизации рубки волокна с преимущественным его фибриллированием и предотвращения забивания массой зоны размола.

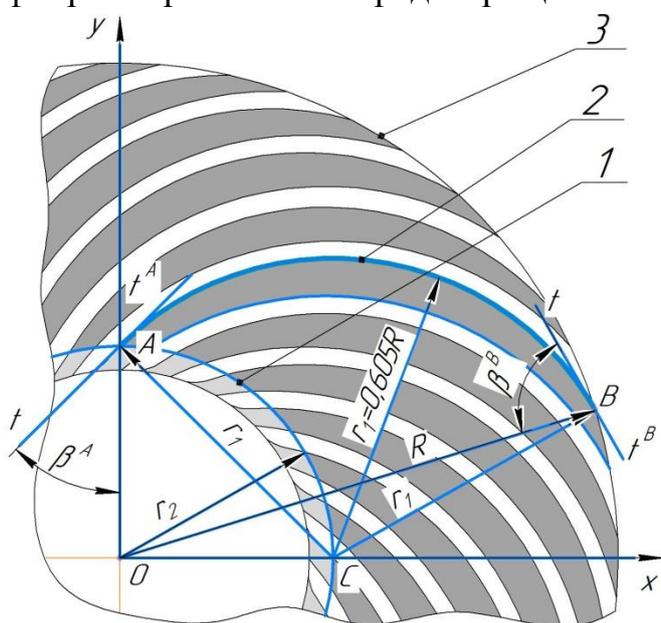


Рисунок 1 – Фронтальная проекция круговой активной кромки r_x единичного кругового ножевого выступа

На рисунке 1 показана фронтальная проекция круговой активной кромки единичного кругового ножевого выступа. Для определения касательных усилий в первую очередь необходимо определить характер изменения угла касательной β_x . Для этого на рисунке 1 обозначим дугу AB с центром кривизны C , расположенным на оси X ; входную круговую кромку 1 в полость размола с радиусом $r_2=OC$; круговую режущую кромку 2 с радиусом $r_1=BC$, проведенным из центра кривизны C , расположенном на оси абсцисс X (центры кривизны C равномерно распределены по круговой кромке 2); круговую выходную кромку 3 из зоны размола с $R=OB$.

Площадь кольцевой размалывающей поверхности ограничена круговыми входной 1 и выходной 3 кромками. Входной угол β^A , образованный касательной, $t - t^A$ и радиусом OA ; выходной угол β^B , образованный касательной $t - t^B$ и радиусом OB .

Используя заданные параметры, определяем, что характер изменения угла касательной β_x будет иметь следующий вид:

$$\beta_x = 90^\circ - \text{Arcsin} \frac{r_2 \cdot \sin C}{\sqrt{r_1^2 + r_2^2 - 2 \cdot r_1 \cdot r_2 \cdot \cos C}} \quad (1)$$

Согласно алгоритму (1), при ширине зоны размола, равной $R-r=(1-0,428)R$ и при $r_1 = 0,605R$, $r_2 = 0,428R$ установлено, что значение угла β_x равномерно

возрастает, от минимального на входе (точка 7) в зону размола до максимального – на выходе (точка 18) из неё (рисунок 2).

Постоянное увеличение значения угла касательной β_x должно содействовать развитию значительных касательных усилий, способствующих как фибрилляции волоконистой массы из недревесного целлюлозосодержащего сырья, так и её транспортированию по зоне размола.

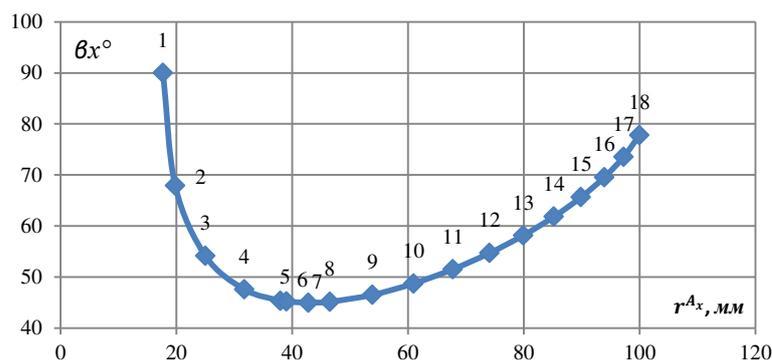


Рисунок 2 – График зависимости угла β_x от роста радиуса r_x

Для подтверждения этой идеи необходимо рассмотреть характер изменения касательной составляющей P_τ^A окружного усилия P_0^A .

При определении характера изменения касательной составляющей необходимо учесть ряд особенностей:

- радиус, проведенный из центра диска в точку входа в зону размола A , увеличивается от минимального до максимального в точке на выходе из зоны размола B ;

- окружная сила, приложенная в этих точках (вдоль касательных $t - t^A$ и $t - t^B$), уменьшается от максимума в точке A до минимума в точке B ;

- крутящий момент постоянен от входа в зону размола в точке A до выхода из нее в точке B ;

- силы трения и ее составляющих постоянны от точки A до точки B ;

- значение окружной силы P_0^B превышает значение силы трения $P_{тр}$;

- значение угла β^B должно превышать значение угла трения материала о стенки межножевых канавок;

- значение касательной составляющей P_τ^A окружного усилия P_0^A должно превышать значение противодействующей силы трения.

При анализе силовых составляющих выяснилось, что зависимость, по которой определяется значение касательного усилия, имеет следующий вид:

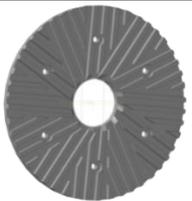
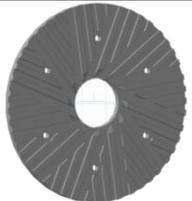
$$P_\tau^B = \frac{M_{кр} \cdot \sin \beta^B}{R} \quad (2)$$

Необходимым и достаточным условием для продвижения волоконистой массы и выброса ее из зоны размола будет такое значение касательных усилий, которое бы превышало силу трения волоконистого материала о стенки ножевых выступов. Значение входного угла β^A также должно превышать значение угла трения материала о стенки канавки и угла трения между волокнами. Принимая во внимание среднюю величину коэффициента трения волоконистого материала 0,1-0,11 получим, что значение угла касательной на входе больше в 7,5, а на выходе больше в 13 раз угла трения волоконистого материала. Таким образом, значения угла на входе и на выходе из зоны размола, а также величина

касательных усилий будет способствовать продвижению волокон по зоне размола от входной окружной кромки к выходной тем больше, чем больше значение угла β^A .

Подтверждая целесообразность применения авторской конструкции размалывающей гарнитуры, приведем сравнение касательных усилий на выходе из зоны размола. Для этого воспользуемся зависимостью (2).

Таблица 2 – Сравнительная характеристика касательных сил для различных конструкций гарнитур

	С окружной формой ножей	Традиционная с углом наклона ножей 20°	Традиционная с углом наклона ножей 35°
Вид гарнитуры			
R , мм	100	100	100
β^A , °	45	23,13	26,45
β^B , °	77,8	7,3	7,5
P^B , Н	124,2	16,57	16,51

Как видно из таблицы 2, отличительной особенностью окружной формы ножей в сравнении с прямолинейными является постепенное увеличение угла касательной β_x вдоль всей режущей кромки от точки входа в зону размола A до точки выхода из зоны размола B . Эта зависимость способствует увеличению касательных усилий вдоль активной режущей кромки ножевого выступа, тем самым увеличивая как фибриллирующее, так и транспортирующее воздействие на волокнистую массу высокой концентрации из недревесного целлюлозосодержащего сырья.

Глава 3. Экспериментальная часть. В 3 главе диссертационной работы был проведен анализ эффективности процесса размола волокнистой массы высокой концентрации из недревесного целлюлозосодержащего сырья.

Представлено описание лабораторной установки, порядок и последовательность проведения эксперимента, методика определения бумагообразующих свойств волокнистой массы и физико-механических характеристик бумажных отливок. В ходе многофакторного эксперимента путем регрессионного анализа были определены бумагообразующие свойства волокнистой массы и физико-механические характеристики бумажных отливок. Размолу подвергалась наружная часть стебля (лубяное волокно) технической конопли южной сорта «Мария» с содержанием целлюлозы 67 % и заострённостью до 5 %. Волокно подвергалось предварительной обработке в дезинтеграторе-дробилке «Рекорд» для придания ему однородности. Начальная степень помола массы составила 15 °ШР. Эксперимент проводился в четыре этапа.

Первый этап заключался в планировании и реализации многофакторного эксперимента по B -плану второго порядка. На основании литературных

источников и теоретических расчетов были выявлены основные технологические и конструктивные параметры размольного оборудования, оказывающие наибольшее влияние на процесс размола, качественные показатели волокнистого полуфабриката и физико-механические характеристики готовых отливок. Входные и выходные параметры представлены в виде входных факторов X и выходных параметров Y в таблице 3.

Таблица 3 – Факторы активного многофакторного эксперимента

Параметр	Обозначение	
	Натуральное	Нормализованное
Входные (управляемые факторы)		
Частота вращения ротора, об/мин	n	X_1
Межножевой зазор, мм	S	X_2
Концентрация массы, %	C	X_3
Выходные параметры (контролируемые факторы)		
Изменение бумагообразующих показателей при размоле волокнистой массы		
Средняя длина волокна, мкм	Li	Y_1
Средняя ширина волокна, мкм	z	Y_2
Индекс фибрилляции, %	Fib	Y_3
Грубость волокна, мг/м	k	Y_4
Водоудерживающая способность (по Джайме), %	W	Y_5
Фракционный состав средней длины волокна		
Мелочь по площади, %	A	Y_6
Фракция 200-301 мкм, %	fr_1	Y_7
Фракция 301-684 мкм, %	fr_2	Y_8
Фракция 684-1553 мкм, %	fr_3	Y_9
Фракция 1553-3524 мкм, %	fr_4	Y_{10}
Фракция 3524-5310 мкм, %	fr_5	Y_{11}
Изменение физико-механических свойств отливок при размоле волокнистой массы		
Сопrotивление излому	U	Y_{12}
Разрывная длина, м	L	Y_{13}
Сопrotивление продавливанию, кПа	Pa	Y_{14}
Сопrotивление раздиранию, мН	E	Y_{15}

На основании результатов многочисленных поисковых экспериментов были определены уровни и шаги варьирования входных параметров, которые представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Уровни и шаги варьирования исследуемых факторов

Фактор	Обозначение	Шаг варьирования фактора	Уровень варьирования фактора		
	Натуральное		$y^{(-1)}$	$y^{(0)}$	$y^{(1)}$
Частота вращения ротора, об/мин	n	250	2000	2250	2500
Межножевой зазор, мм	s	0,25	1	1,25	1,5
Концентрация массы, %	C	4	10	14	18

Математическая обработка выполнялась при помощи пакета программы *STATGRAPHICS® Centurion*.

Зависимость каждого выходного параметра от переменных факторов аппроксимировали полиномами второй степени общего вида:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{33}X_3^2 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 \quad (3)$$

Для определения вклада в дисперсию выходных параметров варьирования переменных факторов были построены их поверхности откликов в зависимости от концентрации волокнистой массы, частоты вращения ротора и величины зазора между ножами ротора и статора при разных значениях степени помола.

Проведённый многофакторный эксперимент показал:

При оценке изменения средней длины волокон (рисунок 3) из всех переменных факторов процесса размола влияние величины межножевого зазора возрастает с приростом степени помола. С увеличением степени помола становится заметным воздействие частоты вращения ротора. При увеличении межножевого зазора с одновременным увеличением частоты вращения ротора отмечается большая сохранность исходной длины волокон в процессе размола.

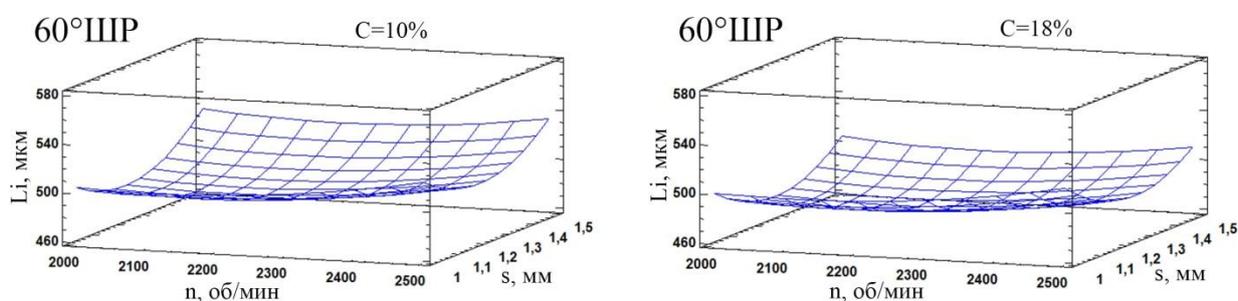


Рисунок 3 – Зависимость средней длины волокон от частоты вращения ротора n , величины межножевого зазора s и концентрации C при степени помола волокнистой массы 60°ШР

С повышением концентрации волокнистой массы средняя длина волокон снижается, при этом данный показатель имеет близкие значения при концентрациях 10 % и 14 %. При концентрации 18 % длина волокон в процессе размола снижается с 696 мкм до 468 мкм.

Анализ поверхностей откликов изменения ширины волокон показывает, что с ростом степени помола ширина волокон увеличивается на 18 %. Максимальный прирост показателя наблюдается на последнем этапе размола до 60°ШР . Наиболее сильное воздействие на изменение показателя оказывает частота вращения ротора. Увеличение концентрации волокнистой массы практически не оказывает влияния на изменение ширины волокон.

Фракционный состав практически однороден при всех концентрациях размалываемого полуфабриката. Однако в волокнистой массе концентрацией 10 % наблюдается несколько большее количество длинноволокнистых фракций и меньшее количество коротковолокнистых по сравнению с волокнистой массой концентрацией 14 % и 18 %.

При этом мелочь интенсивно образуется при величине межножевого зазора 1,25 мм, частоте вращения ротора 2500 об/мин и концентрации волокнистой массы 10 %. Также значительное количество мелочи образуется и при величине межножевого зазора 1,25 мм, частоте вращения ротора

2000 об/мин и концентрации волокнистой массы 18 %. Для исследуемого диапазона концентраций величина межножевого зазора оказывает наибольшее влияние на образование мелочи.

Недревесные волокна считаются более грубыми за счёт большой толщины клеточной стенки. В то же время это увеличивает потенциал их фибриллирования. На рисунке 4 наблюдается снижение грубости волокон с увеличением степени помола.

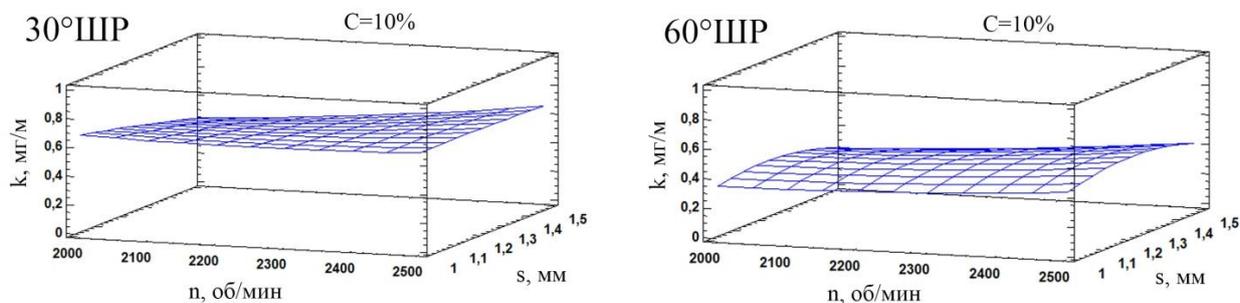


Рисунок 4 – Зависимость грубости волокон от частоты вращения ротора n , величины межножевого зазора s и степени помола волокнистой массы при концентрации 10 %

При этом наибольшие значения грубости, при размоле до 60 °ШР, определены при концентрации 14 % и составляют 0,530 мг/м. Уменьшение грубости на 42,6 % отмечается для концентрации волокнистой массы 10 % и частоте вращения ротора 2000 об/мин и составляет 0,304 мг/м. Частота вращения ротора снижает свой вклад с приростом степени помола, тогда как влияние величины межножевого зазора возрастает.

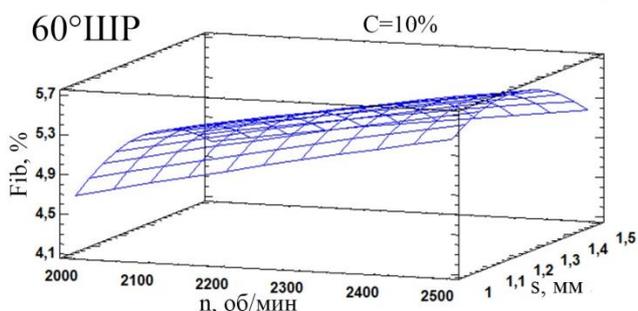


Рисунок 5 – Зависимость индекса фибрилляции волокон от частоты вращения ротора n , величины межножевого зазора s и концентрации C при степени помола волокнистой массы 60 °ШР

фабриката 10 % и составляют 5,6 %. При этом с увеличением концентрации волокнистой массы при степени помола 60 °ШР отмечается снижение воздействия частоты вращения.

Водоудерживающая способность волокнистого полуфабриката равномерно возрастает с увеличением степени помола и достигает 419 %. С увеличением частоты вращения ротора водоудерживающая способность снижается. Величина межножевого зазора и концентрация волокнистой массы значительного влияния не оказывают.

Изменение индекса фибрилляции (рисунок 5) в большей степени зависит от частоты вращения ротора, это объясняется тем, что грубые и толстостенные недревесные волокна требуют приложения больших усилий для разрушения наружных слоев клеточной стенки.

Максимальные значения фибриллирования волокон получены при 2500 об/мин, зазоре 1,25 мм и концентрации волокнистого полу-

Одним из ключевых показателей при оценке качества получаемой продукции является показатель разрывной длины (рисунок 6).

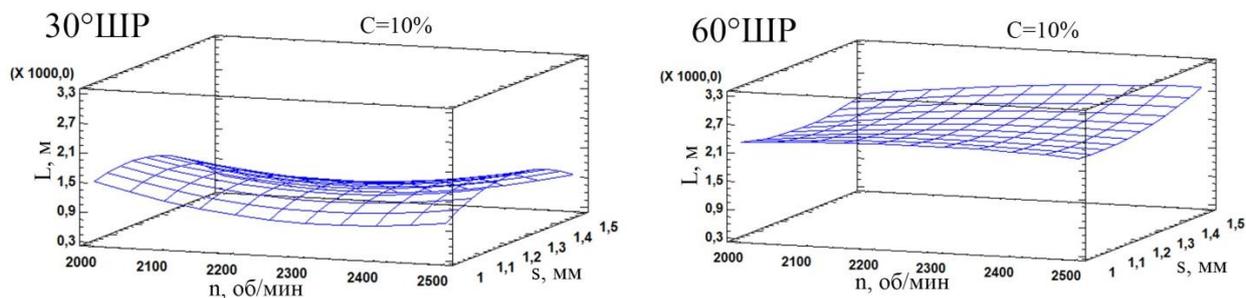


Рисунок 6 – Зависимость разрывной длины от частоты вращения ротора n , величины межножевого зазора s и степени помола волокнистой массы при концентрации 10%

Важную роль в изменении разрывной длины играет величина межножевого зазора. Однако с увеличением степени помола вклад этого фактора снижается. Частота вращения ротора не оказывает статистически значимого воздействия. Наибольшие значения разрывной длины достигаются при концентрации волокнистой массы 10 %, частоте вращения ротора 2500 об/мин и величине зазора между ножами ротора и статора 1,5 мм и составляют 3136 м, что соответствует показателям ГОСТ 8273-75 для оберточной бумаги. Вместе с тем увеличение концентрации волокнистой массы не вызывает значительного изменения показателя разрывной длины.

По аналогичным зависимостям изменяются показатели сопротивления излому, продавливанию и раздиранию.

Для установления оптимальных режимов размола волокнистого полуфабриката был использован метод обобщенного параметра оптимизации выходных параметров. Выяснилось, что при размоле массы высокой концентрации с использованием окружной размалывающей гарнитуры оптимальные бумагообразующие свойства волокнистой массы и физико-механические характеристики бумажных отливок были достигнуты при концентрации волокнистой массы 10 %, частоте вращения ротора 2500 об/мин, величине межножевого зазора 1,5 мм.

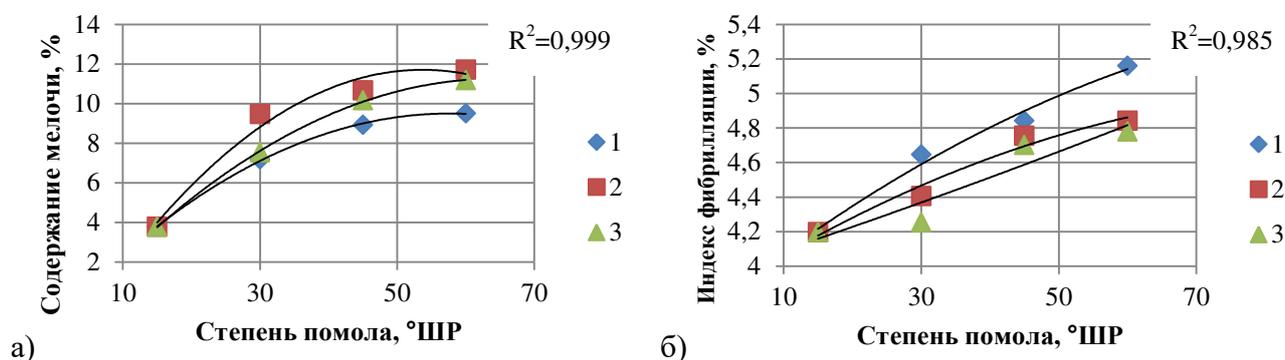
Вторым этапом стало проведение однофакторного дисперсионного анализа для сравнения воздействия разработанной конструкции гарнитуры с традиционными гарнитурами с углом наклона ножей 35° и 20° при оптимальных параметрах процесса размола (таблица 2).

На рисунке 7 представлены графики изменения содержания мелочи (а) и индекса фибрилляции (б) в процессе размола.

Выявлено, что традиционные размалывающие гарнитуры оказывают более интенсивное рубящее воздействие, вследствие которого содержание мелочи (рисунок 7а) в волокнистой массе больше на 19 %, чем при размоле с использованием окружной конструкции гарнитуры.

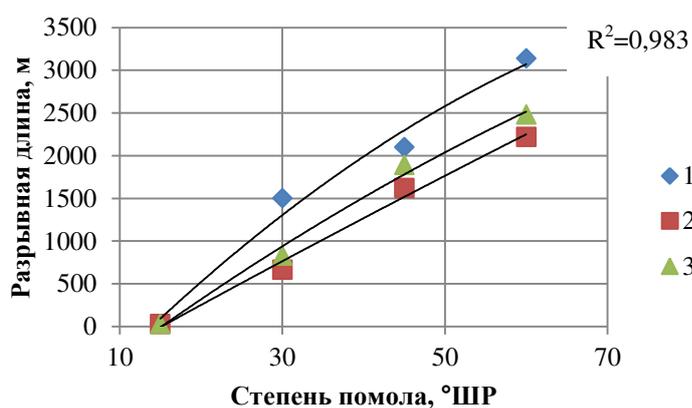
Характер изменения индекса фибрилляции (рисунок 7б) при использовании всех видов гарнитур близок к линейному. При этом использование конструкции гарнитуры с окружной формой оказывает наиболее

сильное фибриллирующее воздействие, превышающее значение индекса фибрилляции при размоле традиционными гарнитурами и составляет 5,2 % против 4,8 %.



1 – гарнитура с окружной формой ножей; 2 – традиционная гарнитура 20°;
3 – традиционная гарнитура 35°

Рисунок 7 – Зависимость содержания мелочи (а) и индекса фибрилляции (б) от степени помола при использовании различных конструкций гарнитур



1 – гарнитура с окружной формой ножей;
2 – традиционная гарнитура 20°;
3 – традиционная гарнитура 35°

Рисунок 8 – Зависимость разрывной длины от степени помола при использовании различных конструкций гарнитур

Разрывная длина бумажных отливок из технической конопли растет вне зависимости от конструкции используемой размалывающей гарнитуры (рисунок 8).

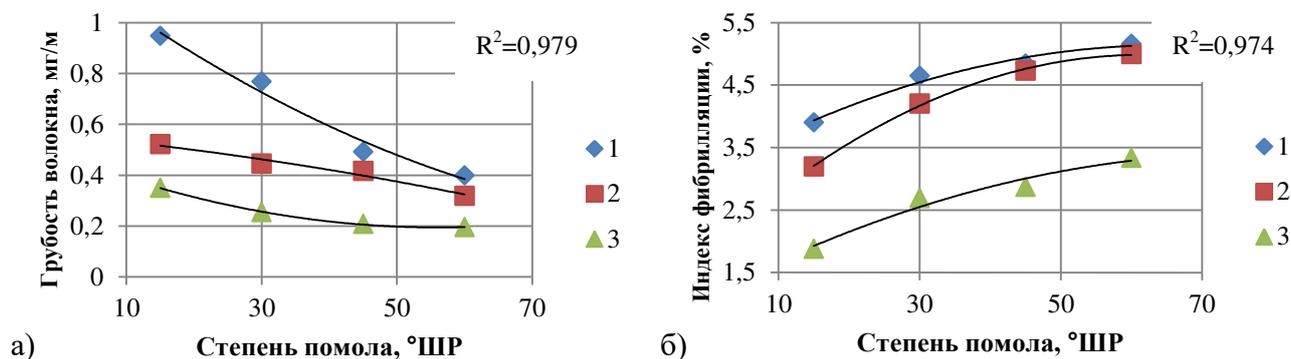
Однако наибольший рост значений показателя отмечен при использовании авторской конструкции гарнитуры и составляет 3136 м, против 2480 м и 2217 м для традиционной гарнитуры с углом наклона ножей 35° и 20° соответственно.

Третий этап заключался в оценке эффективности процесса размолы различных видов недревесного целлюлозосодержащего сырья с использованием авторской конструкции гарнитуры.

Размолу подвергались лубяные волокна технической конопли и льна с заострённостью до 5 % и содержанием целлюлозы 67 % и 76 % соответственно. Волокна хлопкового линта с содержанием целлюлозы 92 % были выбраны, как один из самых широко применяемых источников недревесной целлюлозы, в том числе для получения ценных бумаг высокого качества.

Установлено, что для конопляных волокон значения показателя грубости (рисунок 9а) в процессе размолы снижаются на 57 %, для льняных – на 38 %,

для хлопковых - на 31 %. Это указывает на приобретение волокнами значительной гибкости.

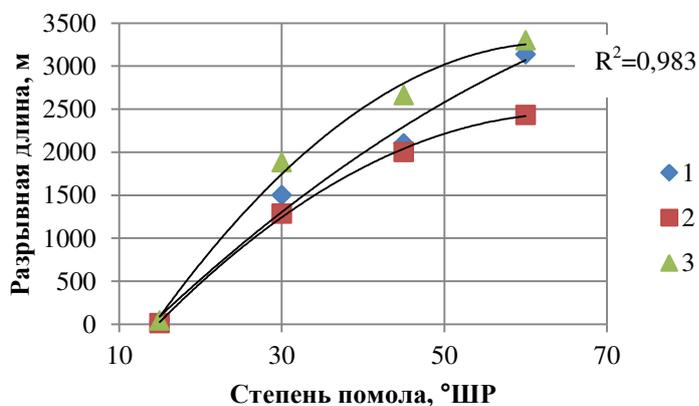


1 – техническая конопля; 2 – лён; 3 – хлопковый линт

Рисунок 9 – Зависимость грубости волокна (а) и индекса фибриляции (б) от степени помола при использовании различных видов сырья

Значение индекса фибриляции (рисунок 9б) для волокон хлопкового линта в процессе размола увеличивается до 3,3 %, тогда как для волокон льна этот показатель составляет 4,9 %, а для конопляных волокон – 5,2 %. Значительный рост показателя для различных по структуре материалов подтверждает эффективность воздействия гарнитуры с окружными ножами, позволяющей создавать в большей степени касательные усилия в зоне размола.

Выявлено, что с ростом степени помола отмечается увеличение разрывной длины отливок (рисунок 10).



1 – техническая конопля; 2 – лён; 3 – хлопковый линт

Рисунок 10 – Зависимость разрывной длины от степени помола при использовании различных видов сырья

для конопляных отливок и 2433 м для льняных отливок.

Четвертый этап – проведение факторного и кластерного анализов выходных параметров для объяснения корреляции между выходными параметрами путем выделения латентных факторов, скрытых в структуре экспериментальных данных.

При этом наблюдается некоторое отличие в качественном изменении данного показателя между отливками из технической конопля и льна. Так, при размолу льняной волокнистой массы с 45 °ШР до 60 °ШР прирост прочности менее интенсивен, чем при размолу конопляной массы. Количественные значения, достигнутые при размолу, составляют 3312 м для хлопковых отливок, 3136 м

Исследуемые свойства распределены между двумя латентными факторами (рисунок 11). Первый фактор, обуславливающий 57,8 % суммарной дисперсии, связан с изменением грубости волокон. Недревесные волокна в процессе размола становятся более гибкими, что позволяет им лучше прилегать друг к другу, таким образом, улучшая связеобразование при формировании бумажного листа.

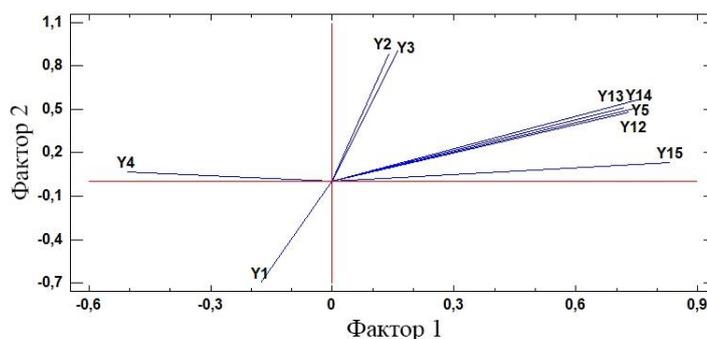


Рисунок 11 – Расположение контролируемых показателей в пространстве двух скрытых факторов

Второй фактор, обуславливающий 13,4 % суммарной дисперсии, можно отождествить с фибрилляцией волокон. Возникновение «резки» и фибрилляции в процессе размола тесно связаны между собой. Считается, что «резка» происходит не за счёт разрубания волокон режущими кромками размалывающей гарнитуры, а из-за снижения собственного сопротивления клеточной стенки, которое вызвано её разрывом при растяжении.

Общая доля суммарной дисперсии обсуждаемых выходных параметров, обусловленная изменением величин двух латентных факторов, составляет 71,1 %.

Глава 4. Оценка технико-экономической эффективности производства бумажной продукции из недревесного целлюлозосодержащего сырья. Расчет технико-экономической эффективности осуществлен на примере технической конопли, так как по результатам экспериментов бумажные отливки из такого сырья имеют наиболее оптимальные физико-механические характеристики при среднем удельном расходе электроэнергии.

В России около 100 предприятий занимаются заготовкой технической конопли. Использование технической конопли в качестве сырья для производства бумажной продукции позволит им получить дополнительную прибыль.

Для определения дополнительной прибыли необходимо осуществить плановую калькуляцию затрат исходя из производительности 1000 тонн в год.

Для этого необходимо определить сумму капитальных вложений, которая складывается из стоимости оборудования, стоимости строительно-монтажных работ, проектных и изыскательских работ, прочих затрат и дополнительных расходов и рассчитывается по формуле:

$$KB = KO + СМР + ПР + ПЗ + ДР \quad (3)$$

Затем определяем себестоимость продукции на 1000 т/год, которая складывается из материальных затрат, затрат на оплату труда, затрат на подготовку и освоение производства, амортизации, общепроизводственных и общехозяйственных затрат и рассчитывается по формуле:

$$C = MЗ + ЗОТ + З_{\text{ПОП}} + А + ОПЗ + ОХЗ \quad (4)$$

Таким образом, себестоимость продукции составит 101 203 305 рублей, а тонна продукции имеет стоимость 101 203 рублей.

При реализации продукции по стоимости 120 000 рублей за 1 тонну, дополнительная прибыль составит:

$$\Delta\Pi = 120\,000\,000 - 101\,203\,305 = 18\,796\,695 \text{ рублей}$$

при капитальных вложениях 78 364 210 руб. В этом случае срок окупаемости составит 6 лет, а рентабельность будет равняться 11%.

Заключение

1. Анализ литературных данных показал, что, среди всего многообразия растений особый интерес представляют лубяные культуры, такие как техническая конопля и лён, обладающие малыми значениями микрофибрилярного угла и высокой прочностью. Одним из наиболее перспективных способов обработки недревесного целлюлозосодержащего сырья является размол волокнистой массы при высокой концентрации. Учитывая высокую грубость лубяных волокон, необходимо создавать механическое воздействие с преобладанием касательных усилий, что позволит разрушать наружный слой волокон. Такая обработка возможна при использовании размалывающей гарнитуры с окружной формой ножей.

2. Во второй главе диссертационной работы теоретически обоснована геометрия окружного ножа размалывающей гарнитуры для недревесного целлюлозосодержащего сырья. Доказано, что увеличение угла касательной β_x способствует увеличению касательных усилий, которые, в свою очередь, обеспечивают значительное фибриллирование волокон и обеспечивают необходимую транспортирующую способность в зоне размола.

3. В ходе многофакторного эксперимента путем регрессионного анализа было исследовано влияние основных факторов процесса размола волокнистой массы из недревесного сырья при высокой концентрации с применением авторской конструкции гарнитуры на бумагообразующие свойства волокнистой массы и физико-механические характеристики бумажных отливок. Выявлено, что наибольшее значение длинноволокнистой фракции образуются при размолу массы с концентрацией 10 %. Одновременно с этим достигается наибольшее снижение грубости волокон и увеличение индекса фибрилляции. Вместе с тем наибольший рост значений физико-механических характеристик бумажных отливок наблюдается при величине межножевого зазора 1,5 мм, частоте вращения ротора 2500 об/мин и концентрации 10 %.

4. Сравнение эффективности процесса размола гарнитуры авторского исполнения с традиционными гарнитурами показало, что за счет преобладания касательных усилий наблюдается увеличение индекса фибрилляции и ширины волокон, масса получается более длинноволокнистой, снижение грубости волокон при размолу на окружной гарнитуре происходит более интенсивно. Также наблюдается значительное увеличение основных физико-механических показателей бумажных отливок в диапазоне от 22 % до 51 %, что позволяет обеспечивать качество получаемой продукции, соответствующей требованиям стандарта на упаковочные сорта бумаги. Вместе с тем выявлено, что авторская конструкция размалывающей гарнитуры благодаря требуемому силовому

воздействию обеспечивает эффективную обработку волокон, имеющих как высокие прочностные свойства, так и сложную морфологическую структуру.

5. Факторный и кластерный анализы, проведенные по результатам эксперимента, показали, что общая доля суммарной дисперсии обсуждаемых выходных параметров, обусловленная изменением величин двух латентных факторов, составляет 71,1 %. На первый фактор, который отождествляется со степенью гибкости волокон, приходится 57,8 %. Вклад второго фактора оценивается в 13,4 % и определяется степенью фибриллирования волокон.

6. Оценка технико-экономической эффективности производства бумажной продукции из растительного сырья выявила, что применение разработанного метода переработки растительных целлюлозосодержащих волокон, представленных отходами заготовки технической конопли, позволит получить дополнительную прибыль в размере 18,8 млн рублей при производстве упаковочных сортов бумаг за счёт исключения этапа химической обработки и снижению удельного расхода воды. Срок окупаемости производства составит 6 лет, а рентабельность – 11 %.

Основные материалы диссертации изложены в следующих работах:

Статьи в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК:

1. Карелина, А. А. Недревесное сырье как источник целлюлозных волокон. Перспективы использования, проблемы и решения (обзор) / А. А. Карелина, Ю. Д. Алашкевич, В. А. Кожухов // Химия растительного сырья. – 2024. – № 2. – С. 55-75. – DOI 10.14258/jcprm.20240213401.

2. Алашкевич, Ю. Д. Взаимосвязь отдельных бумагообразующих свойств и коэффициента динамической вязкости при размоле волокнистой массы / Ю. Д. Алашкевич, А. А. Фомкина, А. А. Карелина // Химия растительного сырья. – 2022. – № 4. – С. 371-376. – DOI 10.14258/jcprm.20220411374.

3. Карелина, А. А. Размол волокнистых полуфабрикатов высокой концентрации в размалывающих машинах / А. А. Карелина, Ю. Д. Алашкевич, А. В. Ушаков // Хвойные бореальной зоны. – 2022. – Т. 40, № 6. – С. 544-551. – DOI 10.53374/1993-0135-2022-6-544-551.

Патенты:

4. Патент № 2805266 С1 Российская Федерация, МПК В02С 7/12, D21D 1/30. размалывающая гарнитура: № 2022127576: заявл. 24.10.2022: опубл. 13.10.2023 / Ю. Д. Алашкевич, В. И. Ковалев, В. А. Кожухов, А. В. Ушаков, А. А. Карелина; заявитель - ФГБОУ ВО "Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва".

5. Патент № 2798559 С1 Российская Федерация, МПК D21D 1/30. Размалывающая гарнитура: № 2022135058: заявл. 29.12.2022: опубл. 23.06.2023 / Ю. Д. Алашкевич, В. И. Ковалев, В. А. Кожухов, А. А. Карелина; заявитель - ФГБОУ ВО "Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва".

Некоторые труды в прочих изданиях:

6. Использование вторичных волокон лубяных культур для получения экологичной бумажной упаковки / А. А. Карелина, Ю. Д. Алашкевич, В. А.

Кожухов, К. А. Хохлов // BIOAsia Altai 2024: материалы IV Междунар. биотехнол. форума. – Барнаул: АлтГУ, 2024. – С. 552-554.

7. Влияние процесса размола недревесного сырья на отдельные бумагообразующие свойства волокнистого полуфабриката / А. А. Карелина, Ю. Д. Алашкевич, В. А. Кожухов, А. В. Ушаков. // Современная целлюлозно-бумажная промышленность. Актуальные задачи и перспективы решения: материалы VI Междунар. науч.-техн. конф. молодых учёных и специалистов ЦБП. – Санкт-Петербург : СПбГУПТД, 2024. – С. 44-48.

8. Влияние концентрации волокнистой массы из технической конопли на физико-механические характеристики готовой продукции / А. А. Карелина, Ю. Д. Алашкевич, В. А. Кожухов, К. А. Хохлов // Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов: материалы VII Междунар. науч.-техн. конф. им. проф. В.И. Комарова. – Архангельск: САФУ им. М.В. Ломоносова, 2023. – С. 116-121.

9. Карелина, А. А. Влияние концентрации волокнистой массы на разрывную длину бумажной продукции / А. А. Карелина, В. А. Кожухов, К. А. Хохлов // Молодые ученые в решении актуальных проблем науки: сб. материалов Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых (с междунар. участием). – Красноярск: СибГУ им. ак. М.Ф. Решетнева, 2023. – С. 218-220.

10. Использование однолетних растений в целлюлозно-бумажной промышленности / А. А. Карелина, К. А. Хохлов, Ю. Д. Алашкевич, В. А. Кожухов // Актуальные проблемы лесного хозяйства и деревопереработки: материалы Всерос. науч.-практ. конф. – Казань: КНИТУ, 2023. – С. 286-289.

11. Размол массы высокой концентрации из растительного сырья в ЦБП / А. А. Карелина, Ю. Д. Алашкевич, В. А. Кожухов, К. А. Хохлов // Современная целлюлозно - бумажная промышленность. Актуальные задачи и перспективные решения: материалы IV Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых и специалистов ЦБП. – Санкт-Петербург: СПбГУПТД, 2023. – С. 31-36.

12. Влияние концентрации волокнистой массы на водоудерживающую способность / А. А. Карелина, Ю. Д. Алашкевич, В. А. Кожухов, К. А. Хохлов // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: материалы VIII Всерос. науч.-техн. конф. – Санкт-Петербург: СПбГЛТУ им. С.М. Кирова, 2023. – С. 467-469.

Благодарности

Автор выражает глубокую благодарность сотрудникам кафедры машин и аппаратов промышленных технологий СибГУ им. М.Ф. Решетнёва: Виктору Анатольевичу Кожухову, Валерию Ивановичу Ковалеву и Александру Васильевичу Ушакову за оказанную помощь при обсуждении отдельных положений диссертационной работы.