

На правах рукописи



ПЕТРОВА АНАСТАСИЯ АЛЕКСЕЕВНА

**РАЗМОЛ ВОЛОКНИСТЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМБИНИРОВАННОЙ ГАРНИТУРЫ**

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. Решетнева» на кафедре «Машины и аппараты промышленных технологий», г. Красноярск.

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

Официальные оппоненты: **Вихарев Сергей Николаевич**, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», кафедра технологических машин и технологии машиностроения, профессор

Щербак Наталья Владимировна, кандидат технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», кафедра целлюлозно-бумажных и лесохимических производств, заведующий кафедрой

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет»

Защита состоится «11» июня 2025 г. в 14:00 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. ауд. 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. Решетнева». 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/defending/126/>

Автореферат разослан «_____» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Матыгулина Венера Нурулловна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В целлюлозно-бумажном производстве процесс размола является важнейшей и наиболее энергоемкой технологической операцией, определяющей качество готовой продукции.

Изучению и развитию процесса размола волокнистых полуфабрикатов посвящено большое количество научных работ отечественных и зарубежных ученых, исследования которых направлены на улучшение качественных показателей получаемого продукта.

В процессе размола в ножевых размалывающих машинах волокно разрабатывается в продольном (фибриллирование) и поперечном (рубка) направлениях, вследствие чего улучшаются бумагообразующие свойства волокнистой массы и, впоследствии, физико-механические характеристики готового продукта.

К основным факторам, влияющим на процесс размола, относятся: выбранное сырье, концентрация волокнистой массы, удельное давление в зоне размола (зазор между ножами ротора и статора), частота вращения ротора и конструкция размалывающей гарнитуры. Стоит отметить, что важное влияние на характер процесса размола оказывает гарнитура дисковой мельницы, о чем можно судить по научным изысканиям учеников школы академика РАО Ю. Д. Алашкевича, под руководством которого разработано и испытано большое разнообразие размалывающих гарнитур различных конструкций.

Изменение параметров процесса размола (величины зазора между ножами ротора и статора, концентрации волокнистой массы и рисунка ножевой размалывающей поверхности гарнитуры) при подготовке волокнистых полуфабрикатов позволяет влиять на характеристики получаемого продукта в широком диапазоне. Однако, в данный момент не решен вопрос оперативного изменения рисунка ножевой размалывающей поверхности гарнитуры.

Комбинированная гарнитура дисковой мельницы позволит решить вопрос оперативного изменения рисунка ножевой размалывающей поверхности благодаря ее конструктивным особенностям. Изменение технологических параметров комбинированной гарнитуры (секундной режущей и циклической элементарной длины) за счет возможности поворота отдельных концентрических колец на установленный угол позволит улучшить качественные характеристики готового продукта, повысить производительность размалывающей установки и сократить продолжительность размола.

Степень разработанности темы. Исследованиями, направленными на совершенствование процесса размола волокнистых полуфабрикатов в ножевых размалывающих машинах, занимались российские и зарубежные ученые: Ю. Д. Алашкевич, В. Н. Гончаров, Д. М. Фляте, Н. И. Никитин, С. И. Иванов, Н. П. Перекальский, Я. Г. Хинчин, В. Ф. Пашинский, Н. Г. Чистова, С. Н. Вихарев, А. А. Хлебников, С. С. Легоцкий, А. А. Гаузе, Д. М. Мартинес, В. Батчелор, Дж. Сенгер, Д. Уэллет, Ч. Кросс, Е. Бивен, Х. Швальбе, Дж. Стрейчен, У. Кемпбелл, Ж. Кларк, Д. Пейдж, В. Бэнкс, С. Смит,

Х. Эспенмиллер, Р. Керекес, Ф. Вульш, В. Флucher, В. Брехт, В. Зиверт, Д. Дэнфорт, П. Лейдер, Дж. Рихс, А. Ниссан, П. Сепке, Дж. Лумийнен и др.

Исследования в области процесса размола волокнистых полуфабрикатов позволяют определять требования к размалывающим устройствам и их рабочим органам при разработке инновационных решений и интенсификации технологического процесса. Однако, несмотря на уже имеющиеся решения в этой области, вопросы, связанные с повышением эффективности бумажного производства и улучшением качественных характеристик готовой продукции, требуют дальнейшего изучения.

Цель исследования: совершенствование процесса размола волокнистых полуфабрикатов в ножевых размалывающих машинах с использованием комбинированной конструкции гарнитуры.

Задачи исследования:

1. Теоретически обосновать построение рабочей поверхности гарнитуры дисковой мельницы, обеспечивающей улучшение бумагообразующих показателей при размоле волокнистых полуфабрикатов, качественных характеристик готовых изделий и изменение конструктивных особенностей размалывающей гарнитуры.

2. Разработать механизм регулирования различных рисунков рабочей поверхности гарнитуры за счет установки колец ротора и статора под различными углами для создания комбинированной гарнитуры.

3. Обосновать построение рабочих ножей и геометрию их распределения на поверхности комбинированной гарнитуры с определением зависимости выходного угла β от входного угла α , с дальнейшим определением секундной режущей и циклической элементарной длины.

4. Исследовать влияние основных факторов процесса размола при использовании комбинированной гарнитуры: величины зазора между ножами ротора и статора, концентрации волокнистой массы и изменения рисунка ножевой размалывающей поверхности гарнитуры на бумагообразующие свойства волокнистых полуфабрикатов и физико-механические характеристики готовых бумажных отливок.

5. Провести факторный и кластерный анализ выходных параметров эксперимента для выявления скрытых факторов, влияющих на процесс размола волокнистого полуфабриката.

6. Определить оптимальный режим процесса размола волокнистых полуфабрикатов с использованием комбинированной конструкции гарнитуры дисковой мельницы.

Объект исследования: получение готовой продукции в технологии целлюлозно-бумажного производства.

Предмет исследования: размол волокнистых полуфабрикатов в ножевых размалывающих машинах с использованием комбинированной конструкции гарнитуры.

Научная новизна работы. Впервые для размола волокнистых полуфабрикатов разработана новая конструкция ножевых размалывающих гарнитур, в частности гарнитура комбинированного вида.

Разработан механизм регулирования различных рисунков рабочей поверхности гарнитуры за счет установки колец ротора и статора под различными углами для создания комбинированной гарнитуры.

Впервые для комбинированной гарнитуры дисковой мельницы получены значения параметра циклической элементарной длины в динамике, позволяющие на этапе выбора рисунка ножевой размалывающей поверхности гарнитуры определить предполагаемый характер ее воздействия на волокнистый полуфабрикат.

Впервые получены результаты исследования основных факторов (величины зазора между ножами ротора и статора, концентрации волокнистой массы и конструкции гарнитуры) процесса размола волокнистых полуфабрикатов в дисковой мельнице с использованием комбинированной гарнитуры.

Получены уравнения регрессии, позволяющие определить вклад каждого входного параметра размола (величины зазора между ножами ротора и статора, концентрации волокнистой массы и конструкции гарнитуры) на качественные характеристики исследуемых выходных параметров.

Практическая и теоретическая значимость. С целью повышения эффективности процесса размола волокнистых полуфабрикатов при получении готовой продукции целлюлозно-бумажного производства предложена новая конструкция ножевой размалывающей гарнитуры дисковой мельницы – комбинированная гарнитура, позволяющая изменять параметры размалывающей гарнитуры благодаря ее конструктивным особенностям.

Теоретические и экспериментальные исследования процесса размола с использованием комбинированной гарнитуры дисковой мельницы позволяют:

- прогнозировать качественные показатели получаемой продукции при изменении входных параметров размола (величины зазора между ножами ротора и статора, концентрации волокнистой массы и конструкции гарнитуры) и технологических параметров комбинированной гарнитуры (секундной режущей и циклической элементарной длины) за счет изменения рисунка ножевой размалывающей поверхности;

- путем изменения входных параметров размола и технологических параметров комбинированной гарнитуры получать готовый продукт с необходимыми свойствами.

Определен оптимальный режим размола волокнистых полуфабрикатов с использованием комбинированной конструкции гарнитуры дисковой мельницы для получения готовой продукции с заданными характеристиками.

Методология и методы исследования. Анализ волокон проводился при помощи анализатора волокна *MorFi Neo*, определение физико-механических характеристик готовых бумажных отливок проводилось в соответствии с требованиями, установленными в нормативных документах.

Зависимости изменения секундной режущей длины и размалывающей поверхности получены при помощи пакета прикладных программ *Matlab* и системы проектирования КОМПАС-3D v22.

Обработка экспериментальных данных проводилась с использованием пакетов программ *Microsoft Excel* и *STATISTICA v13*.

Для проведения факторного и кластерного анализов была применена программа *Statgraphics® Centurion 18*.

Положения, выносимые на защиту:

- теоретическое обоснование построения ножевой гарнитуры и геометрии распределения ножей на рабочей поверхности;
- механизм регулирования различных рисунков рабочей поверхности гарнитуры за счет установки колец ротора и статора под различными углами для создания комбинированной гарнитуры;
- результаты экспериментальных исследований размола волокнистого полуфабриката при изменении величины зазора между ножами ротора и статора, концентрации волокнистой массы и конструкции размалывающей поверхности комбинированной гарнитуры;
- оценка бумагообразующих свойств волокнистого полуфабриката и физико-механических характеристик бумажных отливок при использовании комбинированной гарнитуры.

Степень достоверности полученных результатов обусловлена теоретическими и экспериментальными исследованиями с использованием современных средств статистического анализа, программного обеспечения и современного аналитического оборудования.

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 представлялись на следующих конференциях: «Лесной и химический комплексы – проблемы и решения» (Красноярск, 2021), «Экология, рациональное природопользование и охрана окружающей среды» (Лесосибирск, 2021–2022), «Наука и техника: новые вызовы современности» (Москва, 2022), «Молодежь. Общество. Современная наука, техника и инновации» (Красноярск, 2022), «Экологические аспекты современных технологий в химико-лесном комплексе» (Архангельск, 2022), «Решетневские чтения» (Красноярск, 2022), «Современная целлюлозно-бумажная промышленность. Актуальные задачи и перспективные решения» (Санкт-Петербург, 2022–2023), «Актуальные проблемы лесного хозяйства и деревопереработки» (Казань, 2023), «Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов» (Архангельск, 2023).

Публикации. По результатам исследований опубликовано 16 печатных работ, из них 2 – в издании перечня ВАК, одна из которых входит в издание, индексируемое базой *Scopus*, получен патент Российской Федерации на изобретение № 2811135.

Личный вклад автора. Проведено обоснование разработанных конструктивных параметров комбинированной гарнитуры с представлением вариативности выбора рисунка ножевой поверхности.

Дано теоретическое обоснование построения рабочих ножей и геометрии их распределения на рабочей поверхности комбинированной гарнитуры. Определены основные технологические параметры комбинированной гарнитуры (секундная режущая и циклическая элементарная длина) в зависимости от характера распределения ножей.

В соавторстве предложена новая конструкция комбинированной гарнитуры с волнообразной полостью размола, позволяющая изменять рисунок ножевой размалывающей поверхности (патент РФ № 2811135 С1 (личный вклад 50 %)).

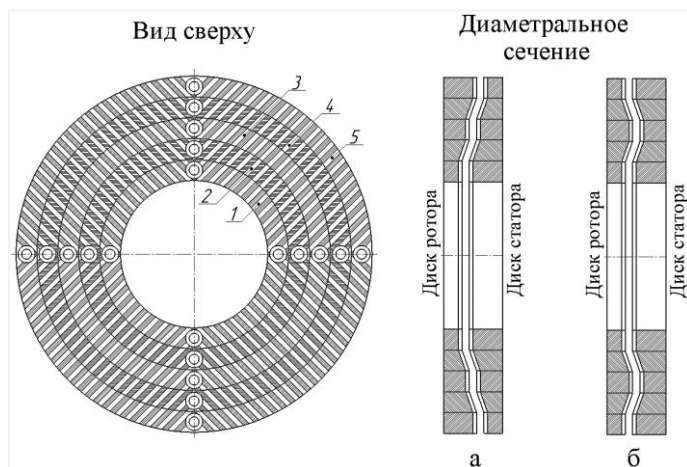
Объем и структура работы: Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов, списка литературы из 111 наименований. Работа изложена на 149 страницах, содержит 19 таблиц, 37 рисунков и 5 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы.

В первой главе диссертационной работы проведен анализ исследований авторов в области размола волокнистых полуфабрикатов в ножевых размалывающих машинах, который показал, что имеющиеся на сегодняшний день представления в этой области исследований являются недостаточными. В частности, не решен вопрос оперативного изменения рисунка ножевой размалывающей поверхности гарнитуры. Установлено, что конструктивные особенности комбинированной гарнитуры позволяют на стадии настройки рисунка ножевой полости размола задать углы пересечения и наклона режущих кромок к радиусу и центру дисков соответственно, что позволит решить вопрос оперативного изменения рисунка ножевой размалывающей поверхности.

Глава 2. Теоретическая часть. *Обоснование геометрии построения ножевой полости размола и рисунка ножевой размалывающей поверхности гарнитуры (рисунок 1).*



а – коническая полость размола; б – волнообразная полость размола;
1 – 5 – порядковый номер концентрических колец

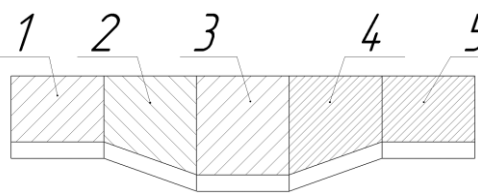
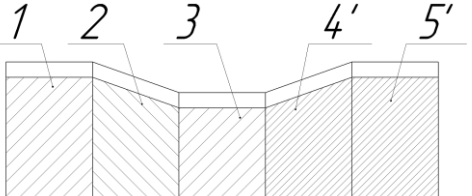
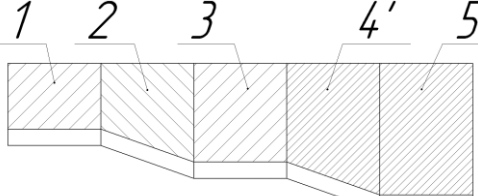
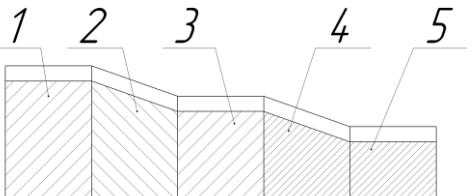
Рисунок 1 – Комбинированная гарнитура дисковой мельницы

Конструкция комбинированной гарнитуры позволяет изменять полость размола на волнообразную или коническую, благодаря сочетанию в ней традиционной плоской (кольца 1, 3 и 5) и конической (кольца 2 и 4) гарнитуры.

Основные конструктивные параметры комбинированной гарнитуры, а также изображения элементов диска ротора и статора для волнообразной и конической полостей размола приведены в таблице 1.

Изменение полости размола на коническую обеспечивается перестановкой колец № 4 и № 5 диска ротора и № 4' и № 5' диска статора. Для каждого кольца гарнитуры приведены угол наклона поверхности кольца к основанию диска $\alpha, ^\circ$ и высота кольца h , мм.

Таблица 1 – Конструктивные параметры комбинированной гарнитуры

Полость	Волнообразная полость размола									
Диск	Элемент диска ротора					Элемент диска статора				
Изображения колец в сечении										
Номер колец	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Угол наклона $\alpha, ^\circ$	0	20	0	20	0	0	20	0	160	0
Высота кольца h , мм	15	15-21	21	21-15	15	27	27-21	21	21-27	27
Полость	Коническая полость размола									
Диск	Элемент диска ротора					Элемент диска статора				
Изображения колец в сечении										
Номер колец	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Угол наклона $\alpha, ^\circ$	0	20	0	20	0	0	20	0	20	0
Высота кольца h , мм	15	15-21	21	21-27	27	27	27-21	21	21-15	15

Благодаря конструктивным особенностям гарнитуры появляется возможность изменять рисунок ножевой размалывающей поверхности путем поворота отдельных концентрических колец. Рабочая зона гарнитуры делится на 4 сектора, нумерация которых определяется по часовой стрелке, угол раствора единичного сектора составляет 90° .

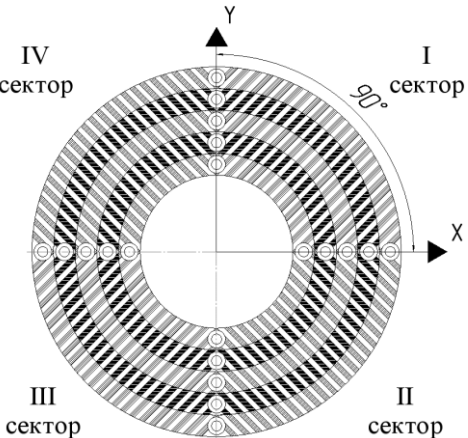
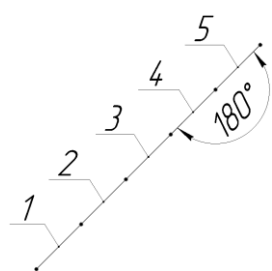
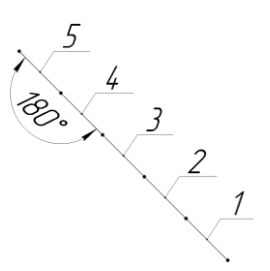
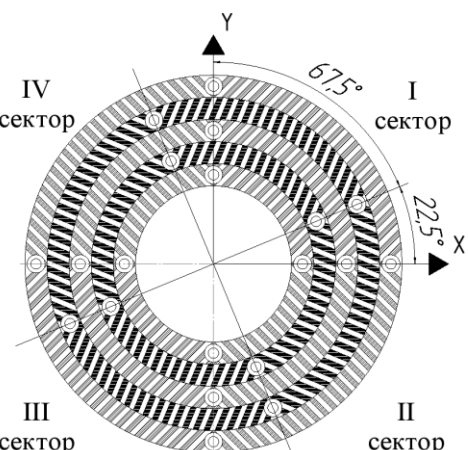
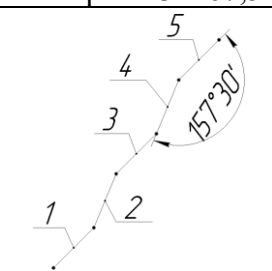
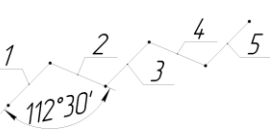
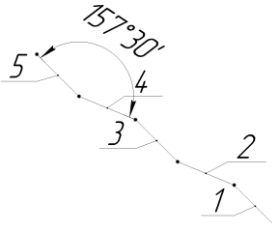
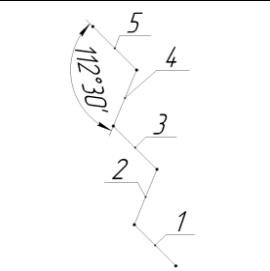
Механизм регулирования различных рисунков рабочей поверхности комбинированной гарнитуры. Для анализа различной геометрии сопряжения ножей, в частности однонаправленных и разнонаправленных по всей длине, целесообразно осуществлять поворот концентрических колец 2 и 4, что позволит создать конструкцию режущей кромки с одинаковыми углами сопряжения

по всей длине. Рассмотрим выбор углов поворота концентрических колец в пределах единичного сектора.

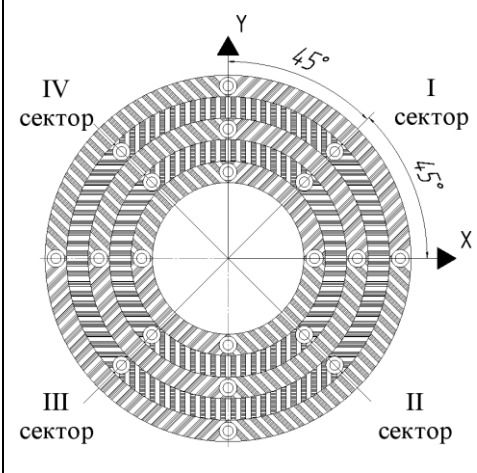
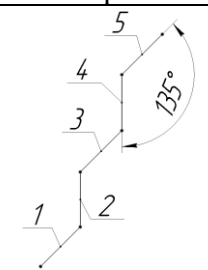
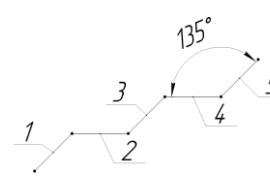
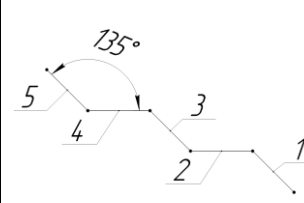
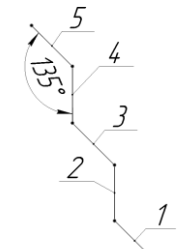
Для создания *однонаправленных* ножей угол поворота выбранных колец составляет 0° . Создание *разнонаправленных* ножей с одинаковыми углами сопряжения режущих кромок на всем секторе обеспечивается поворотом концентрических колец на половину угла раствора – 45° . Для создания *разнонаправленных* ножей с различными углами сопряжения режущих кромок произведем поворот колец на угол α в промежутке $0^\circ < \alpha < 45^\circ$, при этом углы сопряжения режущих кромок на участке сектора, равном данному углу поворота и оставшейся части сектора, будут различны. Для удобства расчетов промежутков от 0° до 45° делим пополам, таким образом угол поворота колец для создания *разнонаправленных* ножей с различными углами сопряжения режущих кромок равен $22,5^\circ$.

Учитывая, что при повороте колец для каждого рисунка гарнитуры наблюдаются разные углы сопряжения кромок ножей, в таблице 2 приведены изображения этих углов.

Таблица 2 – Изменение угла сопряжения кромок ножей при повороте колец

Угол поворота колец	Изображение размалывающей поверхности при повороте колец	Схема расположения сопряжения кромок ножей при повороте колец по секторам	
		Сектор 1 и 3	Сектор 2 и 4
0°			
$22,5^\circ$		Сектор 1 и 3 – $67,5^\circ$	Сектор 1 и 3 – $22,5^\circ$
			
		Сектор 2 и 4 – $67,5^\circ$	Сектор 2 и 4 – $22,5^\circ$
			

Продолжение таблицы 2

Угол поворота колец	Изображение размалывающей поверхности при повороте колец	Схема расположения сопряжения кромок ножей при повороте колец по секторам	
45°		Сектор 1 и 3	Сектор 1 и 3
			
		Сектор 2 и 4	Сектор 2 и 4
			

Как видно из таблицы 2, для всех вариантов одинаковый угол наклона к оси X имеют ножи, расположенные на первом и третьем секторах, а также на втором и четвертом секторах.

Существующая ранее технология конструирования гарнитур, обеспечивающая изменение рисунка гарнитуры, требует в каждом конкретном случае изготовления новых рабочих дисков гарнитур с необходимыми рисунками, что влечет дополнительные серьезные затраты при изготовлении гарнитуры. В разработанной гарнитуре, представленной в данной диссертации (таблицы 1 – 2), технология изменения представленных рисунков обеспечивается без использования новых конструкций дисков.

Обоснование построения ножей и геометрии их распределения на рабочей поверхности комбинированной гарнитуры. Фронтальная проекция размалывающей поверхности единичного сектора комбинированной гарнитуры в плоской системе координат изображена на рисунке 2. Считаем, что:

– размалывающая поверхность диска разделена на четыре сектора (рисунок 1), рисунок ножевой поверхности ротора идентичен рисунку статора, а угол установки режущих кромок ножей к образующей сектора равен 45° , за счет чего в рабочем положении при сопряжении ножевых поверхностей дисков ротора и статора, их режущие кромки всегда наклонены к радиусу в одинаковом направлении;

– на поверхности единичного сектора уместится определенное количество ножей (n_n) и межножевых канавок (n_k) с постоянной шириной по всей длине ножа.

Из n -го количества ножей, расположенных на единичном секторе, часть ножей пересекает входную окружную кромку на участке CF_1 , при этом количество шагов t , уместяющихся на этом участке, будем считать не целым

числом, в связи с симметричностью сектора, а оставшаяся часть ножей пересекает боковые образующие сектора на участках CD и F_1F_2 .

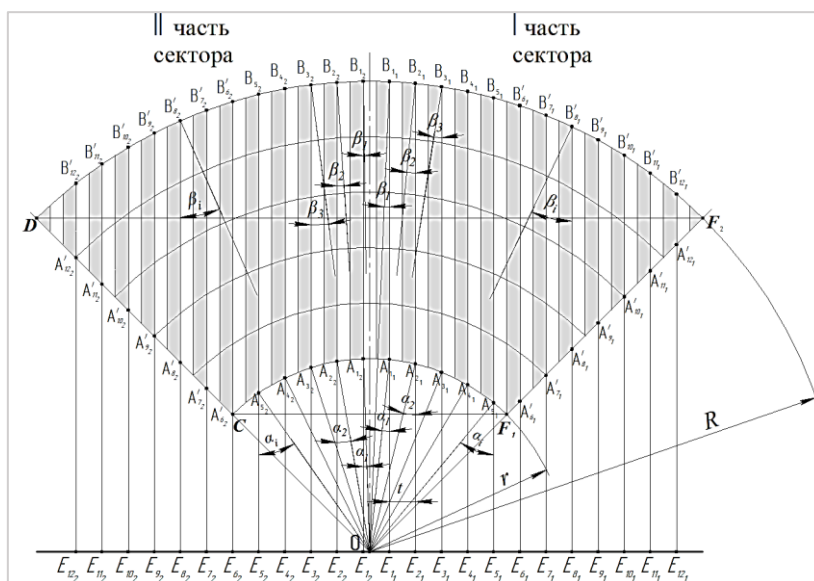


Рисунок 2 – Фронтальная проекция размалывающей поверхности единичного сектора комбинированной гарнитуры

Рассчитана величина шага между режущими кромками ножей, $t = 8,08$ мм, количество шагов, $z = 10,5$, величина межножевых канавок, $s = 4,08$ мм, количество ножей, $Z = 24$, определены зависимости выходного угла β от входного угла α :

$$\beta = \arcsin\left(r \cdot \frac{\sin \alpha}{R}\right), \quad (1)$$

а также произведен расчёт входных углов наклона α режущих кромок ножей единичного сектора к радиусу r (рисунок 2), для первой части сектора:

$$\sin \frac{\varphi'}{2_{i1}} = \frac{i \cdot t - 0,25 \cdot t}{r}, \quad (2)$$

и для второй части сектора:

$$\sin \frac{\varphi'}{2_{i2}} = \frac{i \cdot t - 0,75 \cdot t}{r}. \quad (3)$$

Определена секундная режущая длина:

$$L_c = 16\,961,6 \text{ м/с.}$$

Рассчитана суммарная площадь контакта ножей:

$$F = 2,035 \text{ м}^2.$$

Известно, что в динамике при вращении диска ротора относительно диска статора в доли секунды происходит изменение углов сопряжения ножей ротора с ножами статора, в связи с этим происходят изменения значений секундной режущей длины и размалывающей поверхности, наиболее рельефно это наблюдается не только при сопряжении ножей ротора с ножами статора в процессе одного поворота, но и за счет изменения углов установки концентрических колец комбинированной гарнитуры.

С использованием системы проектирования КОМПАС-3D определена площадь контакта ножей для всех вариантов рисунков комбинированной гарнитуры в динамике (таблица 3).

Таблица 3 – Изменение площади контакта ножей от поворота концентрических колец

Вариант установки колец	Угол поворота колец 2 и 4 на диске ротора	Угол поворота колец 2 и 4 на диске статора	Площадь контакта ножей при изменении угла поворота колец, м ²
№ 1	0°	0°	0,0255
№ 2	0°	22,5°	0,0200
№ 3	0°	45°	0,0198
№ 4	45°	45°	0,0255
№ 5	45°	22,5°	0,0198
№ 6	22,5°	22,5° (против часовой стрелки)	0,0255
№ 7	22,5°	22,5°	0,0200

Как видно из таблицы, численные значения площади контакта изменяются в зависимости от углов поворота концентрических колец, причем при вариантах установки колец № 4, № 5, № 6 и № 7 значения площади контакта повторяются, поэтому для дальнейшего анализа принимаем варианты установки концентрических колец № 1, № 2 и № 3.

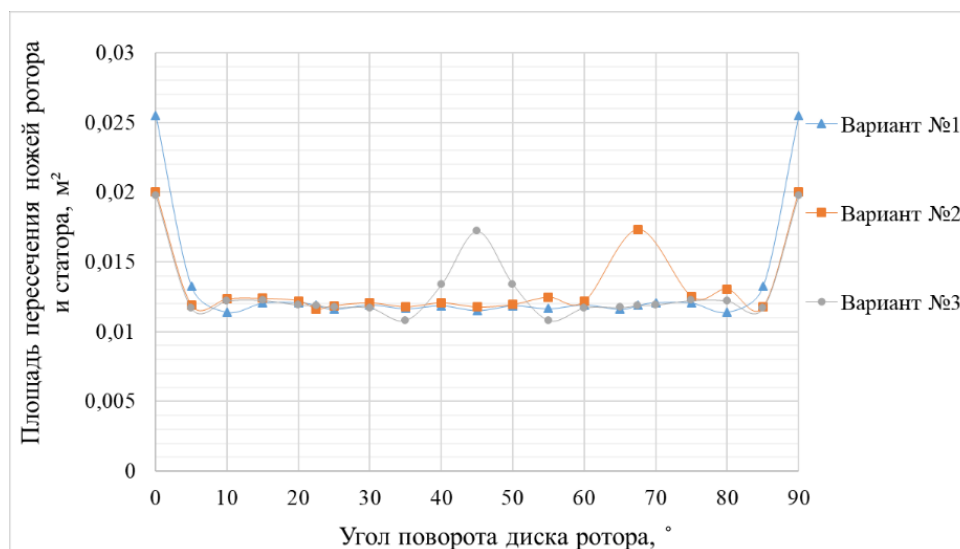


Рисунок 3 – Зависимость изменения площади контакта ножей от угла поворота диска ротора относительно диска статора

Как видно из рисунка 3, для варианта установки колец № 1 (таблица 3) площадь контакта ножей максимальна при углах поворота диска ротора 0° и 90°, что соответствует полному перекрытию ножей статора ножами ротора и составляет 0,0255 м², при дальнейшем повороте диска ротора от 10° до 80° наблюдаются минимальные значения показателя площади контакта в пределах 0,0114 м².

Для вариантов установки колец № 2 и № 3 (таблица 3) максимальные значения площади контакта составляют 0,02 м² и 0,0198 м² соответственно, и достигаются при углах поворота диска ротора 0° и 90°. При дальнейшем повороте диска ротора от 5° до 85° значения данного показателя для обоих вариантов гарнитур снижаются до 0,012 м², при этом наблюдается повышение показателя до 0,017 м² при повороте диска ротора на 67,5° и 45° соответственно, что соответствует моменту полного перекрытия ножей на кольцах 2 и 4.

Более точную оценку эффективности размалывающей гарнитуры при использовании различной конструкции рисунков размалывающей поверхности позволит дать разработанный авторами Алашкевичем Ю.Д. и Набиевой А.А. параметр циклической элементарной длины, характеризующий среднюю длину волокна, «отрезаемую» парой ножей за один оборот диска ротора. Расчёт циклической элементарной длины производили следующим образом:

$$L_{\omega.\text{эл}} = \frac{L_S \cdot 60}{n \cdot t \cdot (2\pi/\psi)}, \quad (4)$$

где L_S – секундная режущая длина, м/с;

n – частота вращения ротора, об/мин;

t – число точек пересечения, шт.;

$2\pi/\psi$ – число секторов на диске гарнитуры, шт.

В соответствии с зависимостью 4 для рассмотренных рисунков гарнитур были построены графические зависимости «циклической элементарной длины» от углов поворота ротора относительно статора, изображенные на рисунке 4.

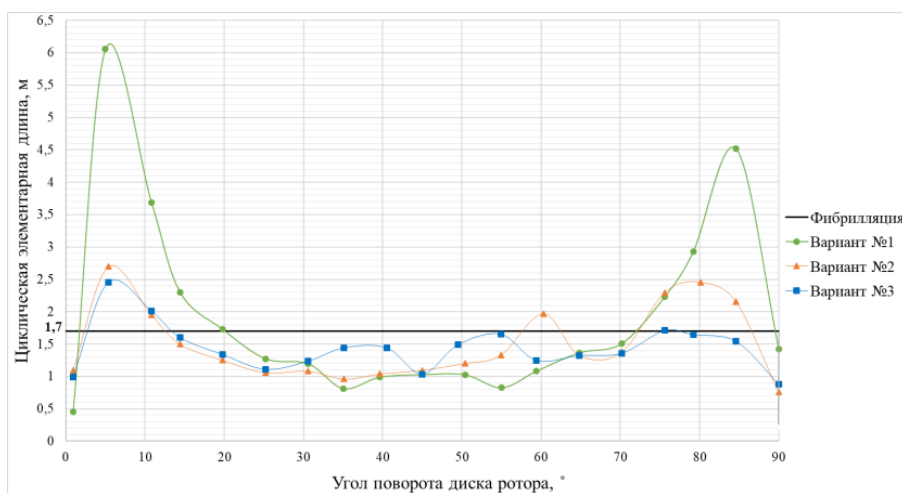


Рисунок 4 – Зависимость циклической элементарной длины от углов поворота ротора относительно статора

Учитывая рекомендации, данные в работе Набиевой А. А., для полупромышленных дисковых мельниц при значении параметра циклической элементарной длины в пределах одного метра характер процесса размола направлен в сторону рубки волокна, при значении от 1,7 до 3 м характер процесса размола носит фибриллирующий эффект.

Как видно из рисунка 4 для варианта установки колец № 1 (таблица 3) при повороте диска ротора от 2° до 20° и от 72° до 90° значения показателя циклической элементарной длины выше данного в рекомендациях значения 1,7 м, что соответствует процессу фибрилляции волокон, при повороте диска ротора от 20° до 72° данные значения ниже и соответствуют рубке волокна.

Для варианта установки колец № 2 (таблица 3) фибриллирующий эффект наблюдается при повороте диска ротора от 2° до 14° и от 72° до 86°, при повороте диска ротора от 14° до 72° характер размола направлен в сторону рубки волокна.

Для варианта установки колец № 3 (таблица 3) при повороте диска ротора от 2° до 14° наблюдается фибриллирующий эффект, на остальном промежутке

от 14° до 90° значения циклической элементарной длины находятся ниже 1,7 м, что говорит о рубке волокна.

Анализируя показатель циклической элементарной длины для выбранных вариантов гарнитур, сделан вывод, что соотношение фибрилляции к рубке волокна для выбранных вариантов гарнитур следующее: *вариант установки колец № 1* имеет соотношение 40 % фибрилляции к 60 % рубки волокна; *вариант установки колец № 2* имеет соотношение 29 % фибрилляции к 71 % рубки волокна; *вариант установки колец № 3* имеет соотношение 13 % фибрилляции к 87 % рубки волокна.

Таким образом, из данных соотношений можно сделать предположение о влиянии изменения рисунка ножевой размалывающей поверхности комбинированной гарнитуры на процесс размола волокнистых полуфабрикатов. Для подтверждения данного предположения необходимо провести многофакторный эксперимент с использованием комбинированной гарнитуры с учетом изменения рисунка ножевой размалывающей поверхности.

Глава 3. Экспериментальная часть. *Представлена методика проведения эксперимента*, которая содержит: описание экспериментальной установки, выбор конструкции комбинированной гарнитуры, характеристики сырья и параметры размола, порядок проведения эксперимента, определение бумагообразующих свойств волокнистого полуфабриката, в числе которых средняя длина и ширина волокон, индекс фибрилляции, грубость, фракционный состав и водоудерживающая способность, определение физико-механических характеристик готовых бумажных отливок, таких, как разрывная длина, сопротивление излому, продавливанию и раздиранию.

Для проведения исследования была использована волнообразная конструкция межножевой полости комбинированной гарнитуры дисковой мельницы, выбор которой осуществлен на основании более высоких значений физико-механических показателей готовых бумажных отливок, полученных при проведении предварительной серии экспериментов. Для подтверждения предположения о влиянии изменения рисунка ножевой размалывающей поверхности комбинированной гарнитуры на процесс размола волокнистых полуфабрикатов использовали варианты установки концентрических колец № 1, № 2 и № 3 (таблица 3).

В качестве сырья для исследований была выбрана белая сульфатная целлюлоза из хвойных пород древесины производства АО «Группа Илим», филиал г. Братск, с начальной степенью помола 10 °ШР. Анализ волокон проводился при помощи анализатора волокна *MorFi Neo*, определение физико-механических характеристик готовых бумажных отливок проводилось в соответствии с требованиями, установленными в нормативных документах.

Планирование эксперимента. Для построения математической модели процесса размола при исследовании влияния величины межножевого зазора, концентрации волокнистой массы и конструкции комбинированной гарнитуры на бумагообразующие показатели волокнистого полуфабриката и физико-механические характеристики готового продукта был использован регрессионный анализ.

Факторы процесса размола, оказывающие основное влияние на бумагообразующие свойства волокнистой массы и физико-механические характеристики готовых бумажных отливок, в виде входных X и выходных Y параметров, представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Входные и выходные параметры эксперимента

Параметр	Обозначение	
	натуральное	нормализованное
Входные параметры		
Межножевой зазор, мм	s	X_1
Концентрация волокнистой массы, %	C	X_2
Угол поворота колец 2 и 4 комбинированной гарнитуры, °	α	X_3
Выходные параметры		
Изменение бумагообразующих показателей при размоле волокнистой массы		
Средняя длина волокна, мм	L_i	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		
Фракция 0,2 – 0,3 мм, %	fr_1	Y_6
Фракция 0,3 – 0,45 мм, %	fr_2	Y_7
Фракция 0,45 – 0,6 мм, %	fr_3	Y_8
Фракция 0,6 – 1 мм, %	fr_4	Y_9
Фракция 1 – 1,5 мм, %	fr_5	Y_{10}
Фракция 1,5 – 2 мм, %	fr_6	Y_{11}
Фракция 2 – 3,5 мм, %	fr_7	Y_{12}
Мелочь по площади, %	A	Y_{13}
Изменение физико-механических свойств готовых отливок		
Сопротивление излому, шт.	U	Y_{14}
Разрывная длина, м	L	Y_{15}
Сопротивление продавливанию, кПа	P_a	Y_{16}
Сопротивление раздиранию, мН	E	Y_{17}

Зависимости каждого из выходных параметров от переменных факторов аппроксимировали полиномами второй степени общего вида:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{33}X_3^2 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 \quad (5)$$

Уровни и шаги варьирования входных параметров эксперимента, согласно составленному плану эксперимента, представлены в таблице 5.

Эксперимент проводился при постоянной частоте вращения ротора 2000 об/мин, выбор которой основан на анализе исследований авторов, занимающихся вопросом ножевого размола волокнистых полуфабрикатов, в которых определено, что увеличение частоты вращения ротора способствует уменьшению времени размола и повышению прочностных характеристик готового продукта.

Таблица 5 – Уровни и шаги варьирования исследуемых факторов

Фактор	Обозначение		Шаг варьирования фактора	Уровень варьирования фактора		
	натуральное	нормализованное		$y^{(-1)}$	$y^{(0)}$	$y^{(+1)}$
Межножевой зазор, мм	s	X_1	0,05	0,10	0,15	0,20
Концентрация волокнистой массы, %	C	X_2	1	1	2	3
Угол поворота колец 2 и 4 комбинированной гарнитуры, °	α	X_3	22,5	0	22,5	45

В рамках проводимого исследования представлялось целесообразным выявить вклад каждого из коэффициентов регрессии в дисперсию выходных параметров.

По результатам экспериментальных исследований были построены поверхности отклика для бумагообразующих показателей волокнистого полуфабриката и физико-механических особенностей готового продукта. Полученные поверхности отклика отображают изменения исследуемых показателей в зависимости от величины межножевого зазора (s), концентрации волокнистой массы (C) (таблица 5) и конструкции гарнитуры (варианта установки колец), меняющейся за счет поворота концентрических колец на определенный угол, согласно таблице 3, при изменении степени помола полуфабриката до 30, 50 и 70 °ШР.

При анализе поверхностей откликов была выявлена следующая закономерность: для всех рассматриваемых вариантов установки колец качественные зависимости изменения бумагообразующих показателей волокнистого полуфабриката и физико-механические характеристики готового продукта зависят от величины степени помола, причем в пределах одной степени помола конструкция гарнитуры (вариант установки колец) не влияет на изменение качественных зависимостей, вместе с тем изменение количественных зависимостей наблюдается при изменении степени помола и варианта установки колец. Данная закономерность свидетельствует о влиянии комбинированной гарнитуры на качественные характеристики волокнистого полуфабриката и готовой продукции за счет изменения рисунка ножевой размалывающей поверхности.

По результатам проведенного регрессионного анализа можно сделать следующие выводы о влиянии рассмотренных в работе входных параметров размол, в числе которых величина зазора между ножами ротора и статора, концентрация волокнистой массы и конструкция комбинированной гарнитуры, на бумагообразующие показатели волокнистого полуфабриката и физико-механические характеристики готового продукта:

1. Увеличение количества затрачиваемого на размол времени наблюдается при приросте степени помола, увеличении величины зазора между ножами ротора и статора от 0,08 до 0,22 мм, при этом максимальное количество затрачиваемого на размол времени требуется при использовании варианта

установки колец № 1, минимальное – при использовании варианта установки колец № 2, а изменение концентрации волокнистой массы не оказывает значительного влияния на количество затрачиваемого на размол времени (рисунок 5).

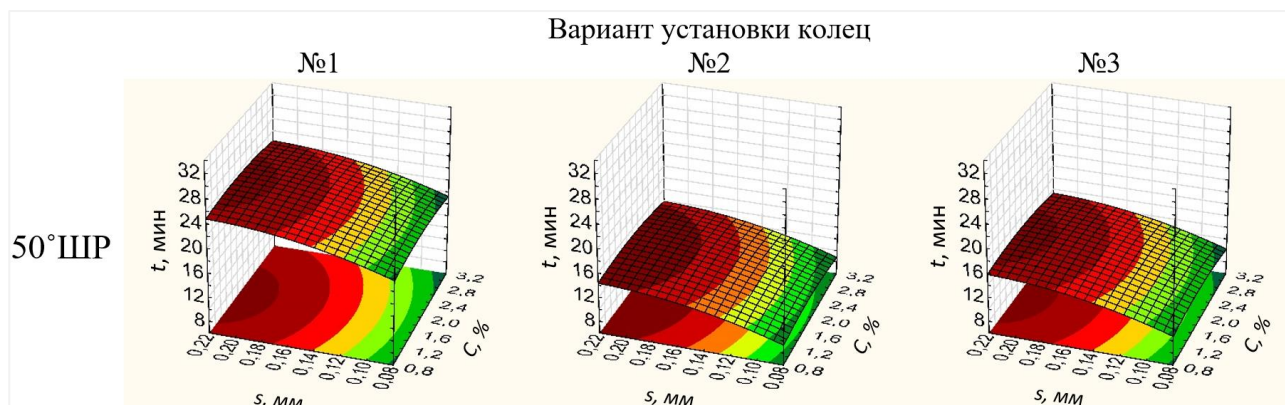


Рисунок 5 – Изменение времени размола волокнистого полуфабриката при регулировании конструкции рабочих органов

2. При увеличении межножевого зазора от 0,08 до 0,22 мм и концентрации волокнистой массы от 0,8 до 2 % наблюдается сохранение длины волокна, при этом при варианте установки колец № 1 средняя длина волокон сокращается менее интенсивно по сравнению с вариантами установки колец № 2 и № 3 (рисунок 6).

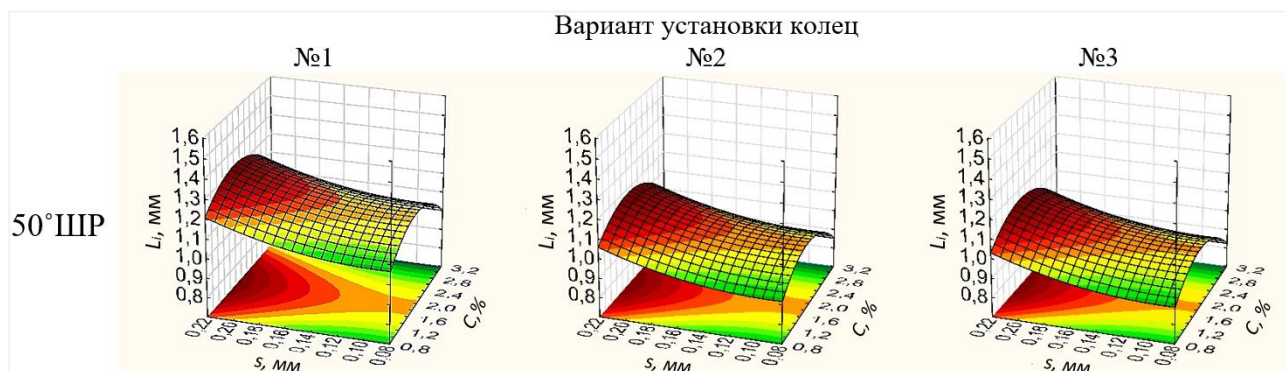


Рисунок 6 – Изменение средней длины волокна L_i при регулировании конструкции рабочих органов

3. При варианте установки колец № 1 с изменением степени помола волокнистой массы наблюдается прирост процентного содержания волокон фракций $fr1 - fr4$ с небольшим сокращением длиноволокнистых фракций $fr6$ и $fr7$ и незначительным приростом мелочи, A , % (рисунок 7 а).

При варианте установки колец № 2 с изменением степени помола волокнистой массы до 70 °ШР наблюдается снижение процентного содержания длиноволокнистых фракций $fr6$ и $fr7$, при этом наблюдается увеличение содержания фракций $fr1 - fr5$ и мелочи A , % (рисунок 7 б).

При варианте установки колец № 3 с изменением степени помола волокнистой массы до 70 °ШР наблюдается увеличение процентного содержания фракций $fr1 - fr3$ и незначительное увеличение содержания фракций $fr4 - fr5$ и мелочи A , %. При этом содержание длиноволокнистых фракций $fr6$ и $fr7$ снижается (рисунок 7 в).

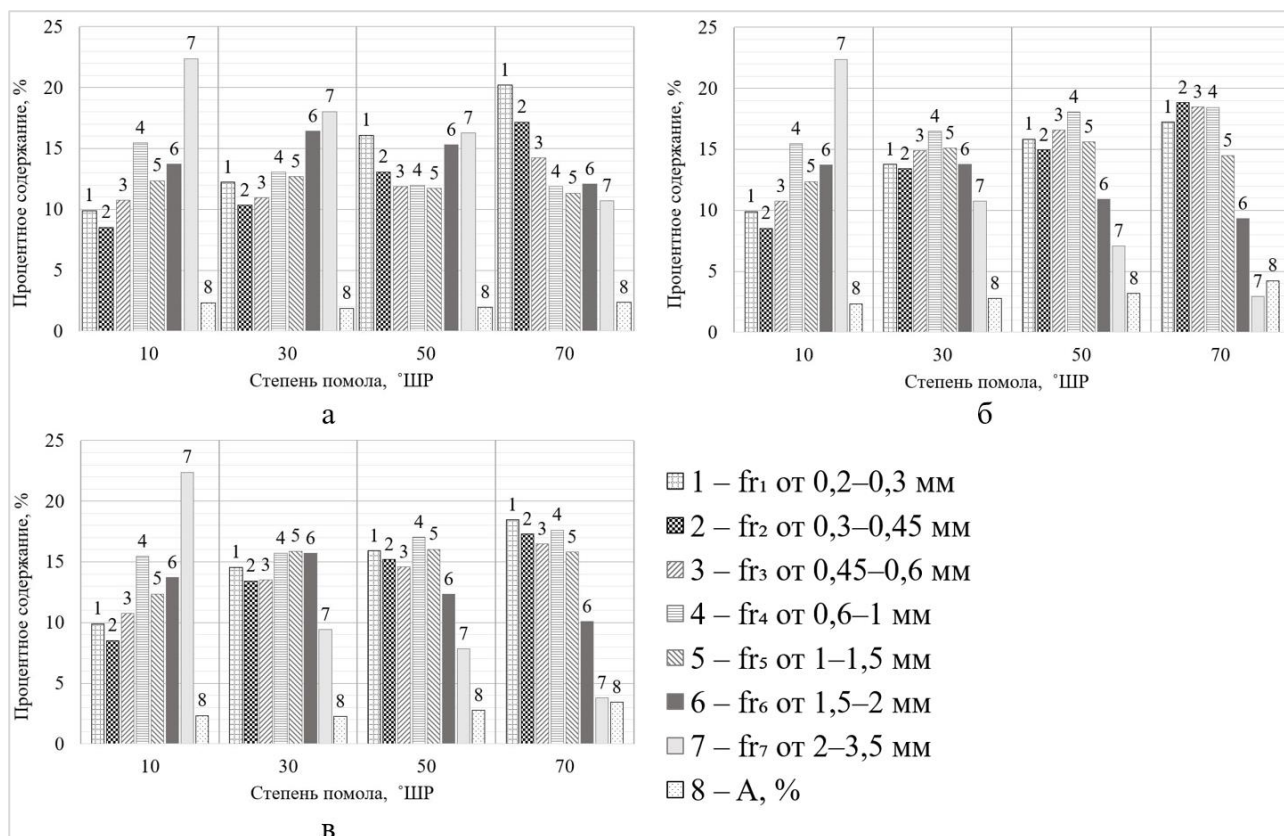


Рисунок 7 – Гистограммы распределения фракционного состава при величине межножевого зазора 0,15 мм, концентрации волокнистой массы 2% и вариантах установки колец: а – № 1, б – № 2, в – № 3

Анализ распределения процентного содержания фракционного состава показал, что в зависимости от конструкции гарнитуры (варианта установки колец) процентное содержание отдельных фракций отличается. В дальнейшем это позволит получать готовый продукт с различными физико-механическими характеристиками при использовании одной гарнитуры.

4. С приростом степени помола волокнистой массы влияние концентрации волокнистой массы и величины зазора между ножами ротора и статора на показатель ширины волокна возрастает, при этом наибольшие значения данного показателя наблюдаются при варианте установки колец № 3 (рисунок 8).

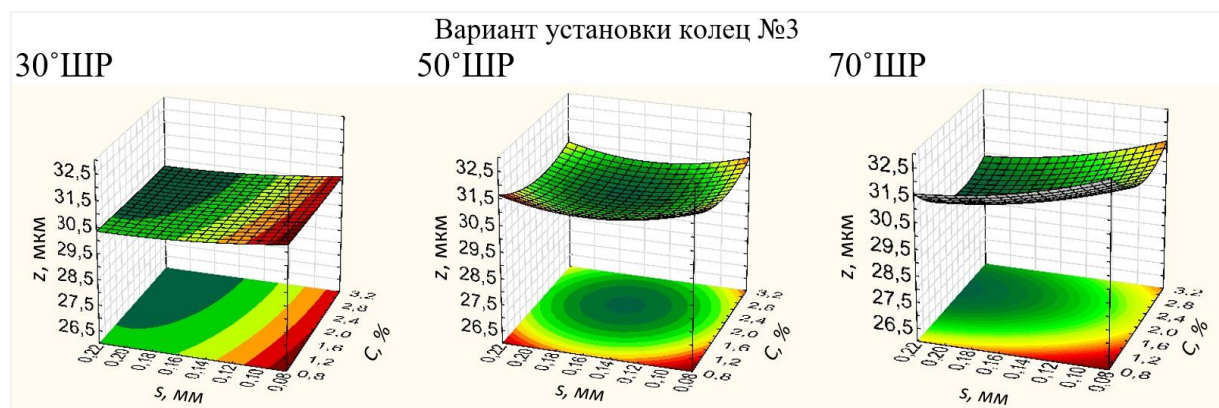


Рисунок 8 – Изменение ширины волокна Z

5. Увеличение показателя индекса фибрилляции происходит с приростом степени помола волокнистой массы, уменьшением зазора между ножами ротора

и статора от 0,22 до 0,08 мм и увеличением концентрации от 2 до 3,2 % или ее уменьшением от 2 до 0,8 %, при этом наибольшие значения показателя индекса фибрилляции наблюдаются при варианте установки колец № 3 (рисунок 9).

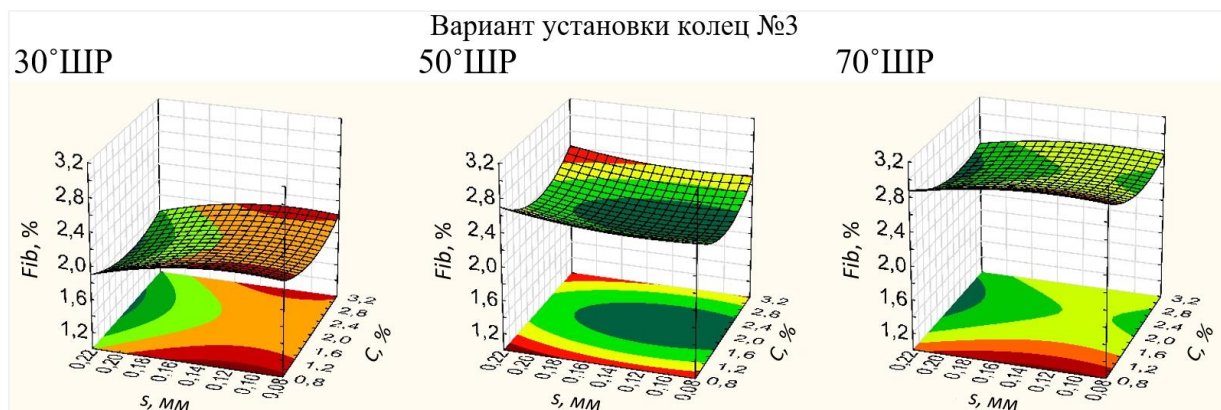


Рисунок 9 – Изменение индекса фибрилляции Fib

6. Для достижения минимальных значений показателя грубости волокна оптимальными параметрами размола являются зазор между ножами ротора и статора 0,14 мм, концентрация волокнистой массы 0,8 % и 3,2 % и вариант установки колец № 1 (рисунок 10).

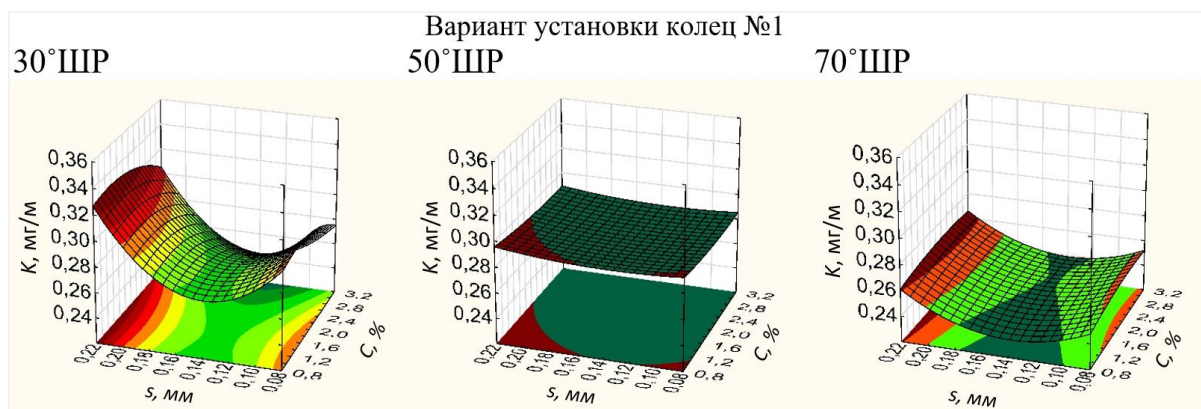


Рисунок 10 – Изменение грубости волокна K

7. Увеличение показателя разрывной длины наблюдается с приростом степени помола волокнистой массы, увеличением зазора между ножами ротора и статора и концентрацией волокнистой массы равной 2 %, при этом наибольшие значения данного показателя наблюдаются при варианте установки колец № 3 (рисунок 11).

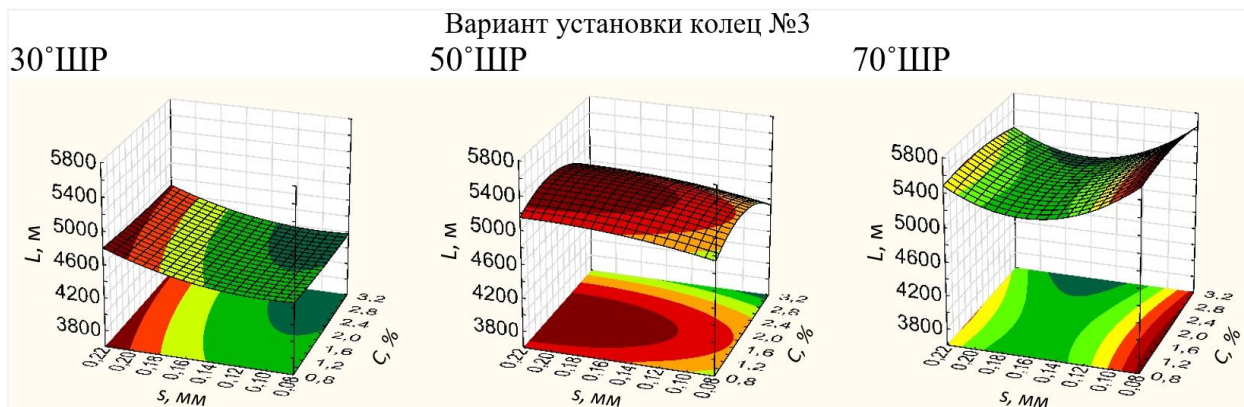


Рисунок 11 – Изменение разрывной длины L

8. Максимальные значения показателей сопротивления продавливанию, излому и раздиранию достигаются при увеличении зазора между ножами ротора и статора от 0,08 до 0,22 мм и концентрации волокнистой массы равной 2 %, при этом наибольшие значения данного показателя наблюдаются при варианте установки колец № 1 (рисунок 12).

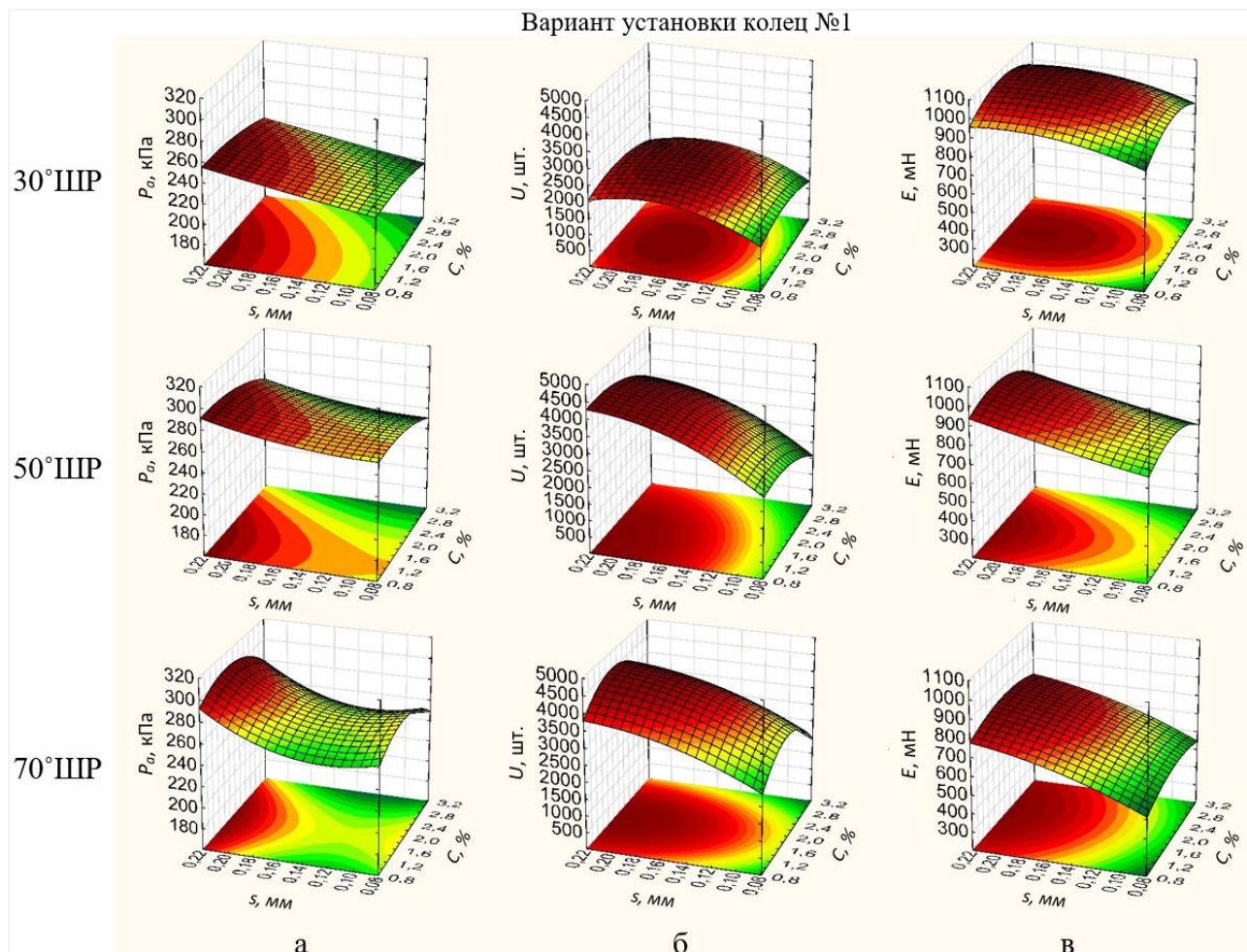


Рисунок 12 – Изменение сопротивления: а–продавливанию; б–излому; в–раздиранию

Таким образом, анализ влияния конструкции комбинированной гарнитуры дисковой мельницы на бумагообразующие свойства волокнистых полуфабрикатов и физико-механические характеристики готовых бумажных отливок подтверждает предположение о влиянии изменения рисунка ножевой размалывающей поверхности комбинированной гарнитуры на процесс размола.

Кластерный и факторный анализ выходных параметров эксперимента. Для изучения структуры корреляционных связей между выходными параметрами размола был проведен кластерный анализ (рисунок 15), выполненный методом Варда. По результатам кластерного анализа условно можно разделить выходные параметры размола на две группы.

Для выявления скрытых факторов, влияющих на процесс размола волокнистого полуфабриката, проведен факторный анализ выходных параметров процесса размола с использованием комбинированной гарнитуры дисковой мельницы. По результатам проведенного факторного анализа (Рисунок 16) условно можно разделить выходные параметры на две группы.

В первую группу входят средняя длина волокна, показатели сопротивления излому, продавливанию и раздиранию, которые имеют наибольшую корреляцию с фактором 2. Вторую группу составляют средняя ширина волокна, индекс фибрилляции, грубость волокна, водоудерживающая способность и показатель разрывной длины, которые сильнее всего коррелируют с фактором 1. Статистическая значимость с доверительной вероятностью не менее 95 % установлена для двух латентных факторов, ответственных за 70,78 % суммарной дисперсии всех девяти выходных параметров, в том числе на долю первого фактора, определяемого степенью внешней разработанности волокон, приходится 46,28 % этой дисперсии, на долю второго фактора, определяемого длиной волокон – 24,50 %.

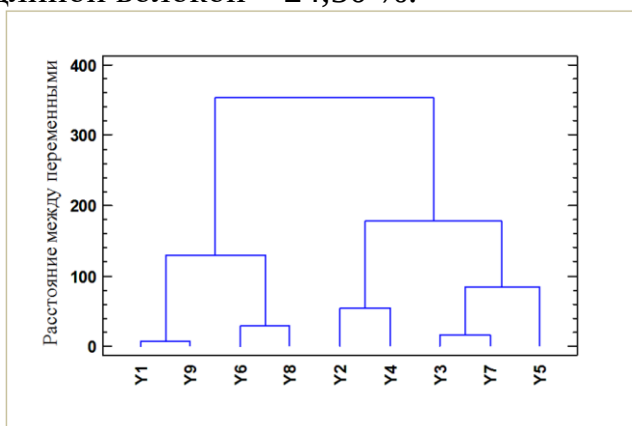


Рисунок 15 – Дендрограмма классификации выходных параметров

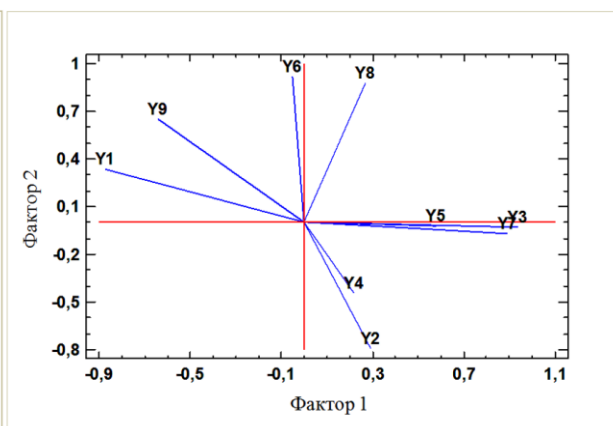


Рисунок 16 – Распределение выходных параметров в двухмерном факторном пространстве

Глава 4. Определение оптимального режима размола. Определение оптимального режима процесса размола волокнистого полуфабриката с учетом конструкции исследуемой гарнитуры производилось при помощи метода обобщенного параметра оптимизации выходных показателей размола. Получено уравнение регрессии для обобщенного параметра оптимизации при помощи которого были вычислены оптимальные значения входных параметров размола, при которых обобщенный параметр оптимизации является максимальным: зазор между ножами ротора и статора (s) равен 0,2 мм; концентрация волокнистой массы (C) равна 2,8 %; угол установки колец 2 и 4 комбинированной гарнитуры равен 0°.

При определении экономической эффективности процесса размола проводилось сравнение разработанной комбинированной гарнитуры с традиционной восьмисекторной гарнитурой при степени помола волокнистой массы 30 °ШР и режиме с входными параметрами размола, наиболее близкими к полученным оптимальным значениям.

Оценка эффективности процесса размола волокнистых полуфабрикатов показала, что при использовании комбинированной конструкции гарнитуры по сравнению с традиционной восьмисекторной гарнитурой затраты на электроэнергию снизятся на 32,7 %, что в натуральном выражении составит 39156,3 тысяч рублей в год.

Выводы

По результатам теоретических и экспериментальных исследований процесса размола волокнистого полуфабриката ножевым способом с использованием комбинированной гарнитуры получены следующие результаты:

1. Проведено теоретическое обоснование построения рабочей поверхности гарнитуры дисковой мельницы, обеспечивающей улучшение бумагообразующих показателей при размоле волокнистых полуфабрикатов, качественных характеристик готовых изделий и изменение конструктивных особенностей размалывающей гарнитуры. Представлены характеристики и варианты исполнения рисунка ножевой размалывающей поверхности комбинированной гарнитуры.

2. Разработан механизм регулирования различных рисунков рабочей поверхности гарнитуры, позволяющий, за счет установки колец ротора и статора под различными углами, создавать различную геометрию сопряжения ножей, в частности однонаправленных и разнонаправленных по всей длине режущей кромки.

3. Проведено обоснование построения ножей и геометрии их распределения на рабочей поверхности комбинированной гарнитуры. Рассчитана величина шага между режущими кромками ножей, величина межножевых канавок и количество шагов. Произведен расчет входных углов наклона α режущих кромок ножей единичного сектора к радиусу r , для первой и второй частей единичного сектора комбинированной гарнитуры. Определены зависимости выходного угла β от входного угла α режущей кромки ножей комбинированной гарнитуры. Рассчитан показатель секундной режущей длины, с определением суммарной длины режущих кромок ножей и суммарной длины контакта режущих кромок ножей ротора с режущими кромками ножей статора. С использованием современных компьютерных технологий рассчитан показатель секундной режущей длины в зависимости от характера распределения ножей на рабочей поверхности комбинированной гарнитуры. Рассчитаны значения параметра циклической элементарной длины для комбинированной гарнитуры в динамике, которые могут говорить о направленности процесса размола в сторону рубки или фибрилляции, в зависимости от конструкции гарнитуры.

4. Многофакторный эксперимент с использованием комбинированной гарнитуры дисковой мельницы показал, что при размоле волокнистой массы с увеличением зазора между ножами ротора и статора, использованием варианта установки ножей № 1 и увеличением концентрации волокнистой массы до 2 % наблюдается сохранение *средней длины* волокон и уменьшение их *грубости*, при этом происходит рост таких физико-механических характеристик готового продукта, как *сопротивление продавливанию, раздиранию и излому*, а продолжительность размола увеличивается. При использовании вариантов установки колец № 2 и № 3 наблюдается увеличение показателей *средней ширины волокна*, его *грубости* и *индекса фибрилляции*, при этом показатель

разрывной длины увеличивается, а его максимальные значения достигаются при варианте установки колец № 3.

5. При проведении факторного и кластерного анализов выходных параметров размола установлена статистическая значимость для двух латентных факторов, ответственных за 70,78 % суммарной дисперсии. На долю первого фактора, определяемого степенью внешней разработанности волокон, приходится 46,28 % этой дисперсии. На долю второго фактора, определяемого длиной волокон, приходится 24,50 %.

6. Определен оптимальный режим процесса размола волокнистого полуфабриката при использовании комбинированной гарнитуры. Экономическая эффективность при использовании комбинированной гарнитуры за счет снижения затрат на электроэнергию составит 39156,3 тысяч рублей в год.

Основные материалы диссертации изложены в следующих работах:

Статьи в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК:

1. Влияние концентрации волокнистой массы на свойства готового продукта при использовании комбинированной гарнитуры / **А. А. Петрова**, Ю. Д. Алашкевич, И. А. Воронин, Н. С. Решетова // Хвойные бореальной зоны. – 2024. – Т. 42, № 4. – С. 101-106. – DOI 10.53374/1993-0135-2024-4-101-106 (ВАК К 2)

2. **Петрова, А. А.** Влияние рисунка комбинированной гарнитуры дисковой мельницы на отдельные бумагообразующие свойства волокнистых полуфабрикатов и физико-механические характеристики готового продукта / **А. А. Петрова**, Ю. Д. Алашкевич, И. А. Воронин // Химия растительного сырья. – 2023. – № 4. – С. 429-435. – DOI 10.14258/jcprm.20230412552 (Scopus Q 4, ВАК)

Патенты:

3. Патент № 2811135 С1 Российская Федерация, МПК D21D 1/30, B02C 7/12. Размалывающая гарнитура дисковой мельницы: № 2023125074: заявл. 29.09.2023; опубл. 11.01.2024 / Ю. Д. Алашкевич, **А. А. Петрова**, И. А. Воронин, В. И. Ковалев; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва». – 11 с.

Публикации в других изданиях:

4. **Петрова, А. А.** Исследование физико-механических характеристик готового продукта при изменении полости размола комбинированной гарнитуры дисковой мельницы / **А. А. Петрова**, И. А. Воронин, Ю. Д. Алашкевич // Актуальные проблемы лесного хозяйства и деревопереработки: Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Казань, 24–28 апреля 2023 года / Под редакцией Ю.М. Казакова [и др.]. – Казань: Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2023. – С. 245-249.

5. **Петрова, А. А.** Влияние рисунка комбинированной гарнитуры дисковой мельницы на физико-механические показатели готовых бумажных отливок / **А. А. Петрова**, И. А. Воронин, Ю. Д. Алашкевич // Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов: Материалы VII Международной научно-

технической конференции имени профессора В.И. Комарова, Архангельск, 14–16 сентября 2023 года / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова». – RUS: Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, 2023. – С. 98-103.

6. **Петрова, А. А.** Особенности размола волокнистой массы при использовании комбинированной гарнитуры с различными рисунками ножевой полости / А. А. Петрова, И. А. Воронин, Ю. Д. Алашкевич // Современная целлюлозно-бумажная промышленность. Актуальные задачи и перспективные решения: Материалы V Международной научно-технической конференции молодых учёных и специалистов ЦБП, Санкт-Петербург, 13–14 ноября 2023 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, 2023. – С. 27-31.

7. **Петрова, А. А.** Размалывающая гарнитура дисковой мельницы с оригинальными геометрическими характеристиками ножевой поверхности / А. А. Петрова, И. А. Воронин, Ю. Д. Алашкевич // Лесной и химический комплексы - проблемы и решения: Сборник материалов по итогам Всероссийской научно-практической конференции, Красноярск, 29 октября 2021 года. – Красноярск: ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», 2022. – С. 390-393.

8. **Петрова, А. А.** Влияние характера полости размола ножевой гарнитуры с пространственным расположением ножей на градус помола волокнистой массы / А. А. Петрова // Наука и техника: новые вызовы современности: Сборник статей IV Международной научно-практической конференции, Москва, 31 января 2022 года. – г. Москва: ИП Емельянов Н. В., 2022. – С. 88-94.

9. **Petrova, A. A.** Using a knife headset with a spatial arrangement of knives for grinding fibrous mass / A. A. Petrova, I. A. Voronin // Молодежь. Общество. Современная наука, техника и инновации. – 2022. – №. 21. – С. 287-289.

10. Зависимость физико-механических показателей бумаги от вида ножевой поверхности гарнитуры / **А. А. Петрова**, И. А. Воронин, Ю. Д. Алашкевич, Д. Е. Зырянов // Решетневские чтения: материалы XXVI Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева, Красноярск, 09–11 ноября 2022 года. Том Часть 1. – Красноярск: ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», 2022. – С. 828-830.

11. Влияние профиля наборной гарнитуры дисковой мельницы на размол хвойной целлюлозы / Д. Е. Зырянов, Н. С. Решетова, **А. А. Петрова**, Ю. Д. Алашкевич // Решетневские чтения: материалы XXVI Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева, Красноярск, 09–11 ноября 2022 года. Том Часть 1. – Красноярск: ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», 2022. – С. 806-808.

12. Влияние рисунка наборной гарнитуры на процесс размола волокнистого полуфабриката / **А. А. Петрова**, И. А. Воронин, Ю. Д. Алашкевич [и др.] // Современная целлюлозно - бумажная промышленность. Актуальные задачи и перспективные решения: Материалы IV Международной научно-технической конференции молодых учёных и специалистов ЦБП, Санкт-Петербург, 14–15 ноября 2022 года / Отв. редактор О.В. Фёдорова. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, 2023. – С. 57-62.

13. **Петрова, А. А.** Влияние размалывающей поверхности ножевой гарнитуры на процесс размола хвойной целлюлозы / Д. Е. Зырянов, А. А. Петрова // Экология, рациональное природопользование и охрана окружающей среды: сборник статей по материалам XII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием школьников, студентов, аспирантов и молодых ученых. – Лесосибирск: филиал СибГУ в г. Лесосибирске, 2022. - С. 115-117.

14. **Петрова, А. А.** Влияние полости размола наборной гарнитуры на физико-механические показатели готовых отливок / А. А. Петрова // Экология, рациональное природопользование и охрана окружающей среды: сборник статей по материалам XII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием школьников, студентов, аспирантов и молодых ученых. – Лесосибирск: филиал СибГУ в г. Лесосибирске, 2022. - С. 225-228.

15. **Петрова, А. А.** Размол волокнистых полуфабрикатов с использованием комбинированной конструкции гарнитуры / А. А. Петрова, Ю. Д. Алашкевич, И. А. Воронин // Экологические аспекты современных технологий в химико-лесном комплексе: Сборник научных материалов I и II научно-практических конференций: Электронный ресурс, Архангельск, 16-17 мая 2022 года. – Архангельск: Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. акад. Н.П. Лаврова УрО РАН, 2024. – С. 96-100.

16. **Петрова, А. А.** Использование оригинальных геометрических характеристик ножевой поверхности размалывающей гарнитуры дисковой мельницы / А. А. Петрова // Экология, рациональное природопользование и охрана окружающей среды: сборник статей по материалам XI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием школьников, студентов, аспирантов и молодых ученых. – Красноярск: филиал СибГУ в г. Лесосибирске, 2021. - С. 201-203.

Благодарности

Автор выражает благодарность сотрудникам кафедры машин и аппаратов промышленных технологий СибГУ им. М.Ф. Решетнева Воронину Ивану Андреевичу и Пену Роберту Зусьевичу за оказанную помощь при обсуждении отдельных положений диссертационной работы, Ковалеву Валерию Ивановичу за оказанную помощь в подготовке и публикации патента.

Подписано в печать Формат 60x84 1/16.
Объем 1,0 п.л. Тираж 100 экз.
Заказ № _____

Отпечатано в редакционно-издательском центре
СибГУ им. М.Ф. Решетнева
660049, г. Красноярск, просп. Мира, 82
Тел. (391) 222-73-28