

На правах рукописи



Ушаков Александр Васильевич

**РАЗМОЛ ВОЛОКНИСТЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ
ВЫСОКОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ
В ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ**

05.21.03 – Технология и оборудование химической переработки
биомассы дерева; химия древесины

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Красноярск – 2022

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

Вихарев Сергей Николаевич, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», кафедра Технологических машин и технологии машиностроения, профессор

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

Защита состоится «22» сентября 2022 г. в 13:00 часов на заседании диссертационного совета Д212.249.07, 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



Исаева Елена Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В целлюлозно-бумажном производстве размол волокнистых полуфабрикатов в значительной степени определяет качество бумажного продукта. Во время размола в ножевых размалывающих машинах на волокна одновременно действуют усилия, отличающиеся друг от друга по величине, направлению, характеру приложения и воздействию. Соотношение этих одновременно прилагаемых усилий определяет изменения, происходящие с волокнами и, как следствие, бумагообразующие свойства массы и физико-механические показатели готового продукта. Одним из наиболее действенных факторов, регулирующих и определяющих указанное соотношение усилий, является концентрация размалываемой массы. Увеличение концентрации размалываемой массы влечет за собой ряд положительных особенностей, включающих в себя сохранение исходной длины волокна, повышение прочностных свойств бумажного продукта и снижение удельных затрат электроэнергии на размол. Однако существуют отрицательные особенности процесса размола массы высокой концентрации, связанные с недостаточным силовым воздействием со стороны активных режущих кромок на волокнистый полуфабрикат. Это затрудняет его транспортировку в зоне размола и снижает качество помола массы. Одним из способов повышения силового воздействия на волокнистый полуфабрикат высокой концентрации со стороны активных режущих кромок является создание конструкции гарнитуры с окружной формой ножей. Актуальными являются теоретические и экспериментальные исследования влияния конструкции гарнитуры с окружной формой ножей на качество помола массы и физико-механические характеристики бумажного продукта.

Изложенные в диссертации результаты получены в ходе выполнения работ по проекту «Технология и оборудование химической переработки биомассы растительного сырья» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (номер темы FEFE-2020-0016).

Цель исследования. Разработка научных основ процесса размола волокнистых полуфабрикатов высокой концентрации с использованием конструкции гарнитуры с окружной формой ножей.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Выполнение анализа литературных источников в области размола волокнистых полуфабрикатов высокой концентрации в размалывающих машинах.

2. Проведение теоретического анализа силового воздействия со стороны круговых режущих кромок на волокнистую массу высокой концентрации, который включает в себя:

– построение геометрии элементов окружного ножа и его расположение на рабочей поверхности гарнитуры;

– исследование характера изменения угла β_x , образованного между касательной к активной стенке канавки и радиусом r_x , проведенным из центра диска в точку касания;

– определение касательной силы P_τ , зависящей от угла между касательной β_x к активной стенке и радиусом r_x , проведенным из центра диска в точку касания.

3. Исследование влияния основных факторов на процесс размола при использовании конструкции гарнитуры с окружной формой ножей: частота вращения ротора, величина зазора между ножами ротора и статора и концентрация волокнистого полуфабриката. Определение бумагообразующих свойств волокна и физико-механических характеристик бумажных отливок.

4. Оценка эффективности процесса размола растительного волокнистого полуфабриката высокой концентрации при использовании гарнитуры авторского исполнения в сравнении с традиционными ножевыми гарнитурами.

5. Выполнение факторного анализа для определения корреляционных связей между исследуемыми выходными параметрами процесса размола.

6. Оценка технико-экономической эффективности процесса размола с использованием различных конструкций гарнитур.

Объект исследований. Подготовка волокнистых растительных полимеров при глубокой химической переработке биомассы дерева.

Предмет исследований. Размол волокнистых полуфабрикатов при использовании массы высокой концентрации в целлюлозно-бумажном производстве.

Научная новизна работы. Впервые для размола растительных волокнистых материалов высокой концентрации предложено использовать ножевую гарнитуру с окружной формой ножей (патенты РФ № 2761544 С1, № 2761545 С1). Обоснован механизм воздействия гарнитуры с окружной формой ножей на качественные характеристики волокнистой массы высокой концентрации за счет изменения касательной силы P_{τ} , зависящей от угла β_x , образованного между касательной к активной стенке канавки и радиусом r_x , проведенным из центра диска в точку касания.

Получены уравнения, определяющие вклад каждого исследуемого технологического фактора на бумагообразующие свойства волокнистой массы и физико-механические характеристики бумажных отливок.

Экспериментально подтверждено положительное влияние гарнитуры с окружной формой ножей на бумагообразующие свойства волокнистой массы и физико-механические характеристики бумажных отливок.

Теоретическая и практическая значимость.

В производстве готовой продукции целлюлозно-бумажных предприятий особую роль занимает технология процесса размола растительных волокнистых полуфабрикатов из биомассы дерева. В работе представлены результаты и даны рекомендации по размолу растительных волокнистых полуфабрикатов высокой концентрации, позволяющие повысить производительность размольного оборудования, улучшить качественные показатели размалываемой массы и снизить энергозатраты на размол.

Разработана и защищена патентами новая конструкция гарнитуры дисковой мельницы для размола волокнистого полуфабриката высокой концентрации, позволяющая улучшить бумагообразующие свойства волокнистой массы и решить вопросы транспортирования ее в зоне размола.

Представленные в диссертационном исследовании разработки позволяют рекомендовать их к внедрению в целлюлозно-бумажное производство. Отдель-

ные элементы исследования нашли применение в учебном процессе СибГУ им. М.Ф. Решетнева при изучении специальных дисциплин «Теория и конструкции машин и оборудования отрасли» и «Перспективные конструкции оборудования отрасли».

Методология и методы исследования. Анализ бумагообразующих свойств волокнистого полуфабриката и физико-механических характеристик бумажных отливок проводили в соответствии с принятыми в целлюлозно-бумажном производстве стандартами и методами. Планирование и обработка экспериментальных данных проводились с использованием программ *STAT-GRAPHICS® Centurion* и *Microsoft Excel*.

Положения, выносимые на защиту:

- теоретическое обоснование конструкции гарнитуры с окружной формой ножей для размола волокнистых полуфабрикатов высокой концентрации;
- результаты экспериментальных исследований размола массы высокой концентрации при использовании конструкции гарнитуры с окружной формой ножей;
- влияние технологических факторов на процесс размола массы высокой концентрации;
- оценка бумагообразующих свойств волокнистой массы и физико-механических характеристик бумажных отливок;
- результаты сравнительного анализа влияния различных конструкций гарнитур на процесс размола;
- результаты технико-экономической эффективности процесса размола массы высокой концентрации с учетом конструктивных особенностей размалывающих органов.

Достоверность результатов диссертационной работы обеспечена теоретическими и экспериментальными исследованиями с применением современной аналитической техники, а также их согласованностью с известными ранее опубликованными данными.

Соответствие паспорту специальности.

Представленная работа соответствует паспорту специальности 05.21.03 – «Технология и оборудование химической переработки биомассы дерева; химия древесины» (п. 17 – Оборудование, машины, аппараты и системы автоматизации химической технологии биомассы дерева).

Апробация работы.

Результаты работы докладывались на всероссийских и международных конференциях: «Лесной и химический комплексы – проблемы и решения» (Красноярск, 2020, 2021), «Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов» (Архангельск, 2021), «Химия и химическая технология в XXI веке» (Томск, 2021), «Экология, рациональное природопользование и охрана окружающей среды» (Лесосибирск, 2019, 2020), «Молодые ученые в решении актуальных проблем науки» (Красноярск, 2020), «Новые достижения в химии и химической технологии растительного сырья» (Барнаул, 2020), «Современная целлюлозно-бумажная промышленность. Актуальные задачи и перспективные решения» (Санкт-Петербург, 2020), «Современные тенденции развития хими-

ческой технологии, промышленной экологии и техносферной безопасности» (Санкт-Петербург, 2020), «Решетневские чтения» (Красноярск, 2020).

Публикации. По результатам исследований опубликовано 17 печатных работ, из них две – в изданиях перечня ВАК, одна в базе данных Scopus, два патента Российской Федерации на изобретение № 2761544, № 2761545.

Личный вклад автора. Создана лабораторная установка для размола волокнистых полуфабрикатов высокой концентрации, обеспечивающая регулировку зазора между ножами ротора и статора, частоты вращения ротора и шнекового питателя. Разработана и теоретически обоснована конструкция гарнитуры с окружной формой ножей, проведены и обработаны экспериментальные исследования, по итогам которых написаны и оформлены публикации в высокорейтинговых журналах.

Объем и структура работы: Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка из 112 наименований. Объем работы составляет 173 страниц машинописного текста, содержит 94 иллюстрации и 17 таблиц

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы.

Глава 1. Аналитический обзор. Проведен анализ литературных источников в области размола волокнистых полуфабрикатов высокой концентрации. Рассмотрено влияние основных технологических факторов процесса размола на качество получаемого полуфабриката. Выявлены и проанализированы достоинства и недостатки процесса размола массы высокой концентрации. Установлено, что немаловажным фактором, определяющим качество помола массы и ее транспортирующую способность в зоне размола, является конструкция гарнитуры с окружной формой ножей, исследованиям которой не уделялось внимания в полной мере.

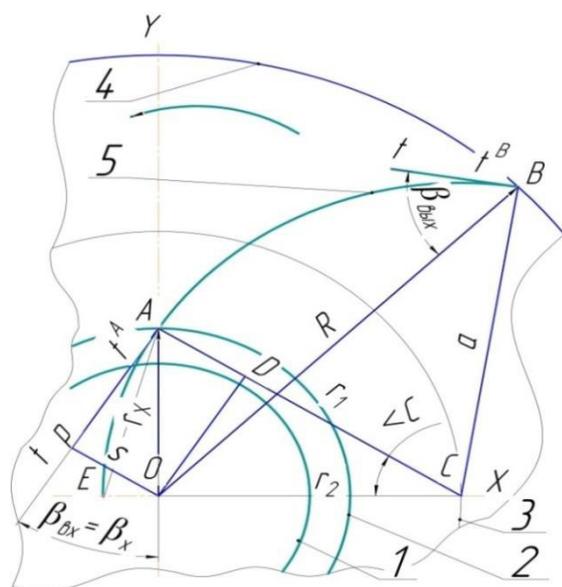


Рисунок 1 - Фронтальная проекция окружного ножа на диске ротора

Глава 2. Теоретическая часть.

Представлено теоретическое обоснование построения окружного ножа на рабочей поверхности гарнитуры. Выявлена касательная сила P_t , зависящая от угла β_x , образованного между касательной к активной стенке канавки и радиусом r_x , проведенным из центра диска в точку касания.

Рассмотрены особенности геометрического построения ножа окружной формы, получено уравнение, характеризующее изменение угла β_x . На рисунке 1 представлена фронтальная проекция окружного ножа на диске ротора. В виде

дуги AB с центром кривизны C , расположенным на оси X , показана круговая активная стенка 5 межножевой канавки. Стрелкой показано направление вращения диска ротора. Площадь кольцевой размалывающей поверхности ограничена

круговыми входной 2 и выходной 4 кромками. Круговая кромка 1 является началом круговой фаски, а круговая кромка 2 является, соответственно, началом входа в кольцевую зону размола. Центр кривизны C режущей кромки 5, расположен на окружности 3, с радиусом $r_2 = OC$, проведенным из центра O диска. Радиус кривизны режущей кромки и круговой активной стенки 5 обозначен r_1 . Касательные $t - t^A$ и $t - t^B$ к дуге AB и радиусы OA и OB образуют, соответственно, входной $\beta_{вх}$ и выходной $\beta_{вых}$ углы. Перпендикуляр Op к касательной $t - t^A$ является эксцентриситетом кромки 5. Установлено, что общая зависимость характера изменения угла β_x будет иметь вид

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

Для определения характера изменения угла β_x необходимо задаться соотношениями значений r , r_1 и r_2 со значением радиуса R круговой кромки 4, диапазоном значений $R - r_x$, ограничивающим зону размола, на которой значение угла β_x , согласно зависимости (1), возрастает.

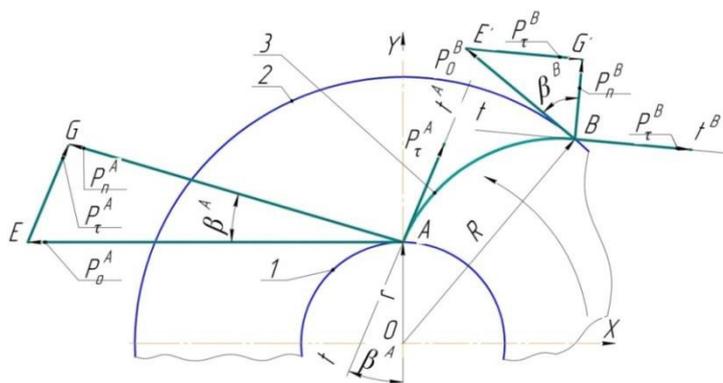


Рисунок 2 - Фрагмент фронтальной проекции кольцевой размалывающей поверхности диска ротора с силовыми составляющими окружного ножа

Определение характера изменения угла β_x , образованного между касательной к активной стенке канавки и радиусом диска r_x , проведенным из центра диска в точку касания. Рассмотрим вариант соотношения значения радиуса кривизны $r_1 = 0,633R$ (патенты РФ № 2761544, № 2761545) и значения радиуса $r_2 = 0,6R$ при $R = 100$ мм. При ширине зоны размола, равной $r_1 - r_2 = (0,633 - 0,6)R$, значение угла β_x , согласно уравнению (1) равномерно возрастает от минимального до максимального. За счёт этого, на волокнистую массу высокой концентрации, заполняющую межножевую канавку, может оказываться силовое воздействие с преимущественным фибриллизированием. Для подтверждения данного вывода необходимо рассмотреть изменение касательной силы P_τ в зависимости от угла β_x .

Для подтверждения данного вывода необходимо рассмотреть изменение касательной силы P_τ в зависимости от угла β_x . На рисунке 2 представлен фрагмент фронтальной проекции кольцевой размалывающей поверхности диска ротора с силовыми составляющими окружного ножа. Из точки A проведен вектор AE , являющийся эквивалентом окружной силы P_o^A . Сила P_o спроецирована на перпендикуляр AG к касательной $t - t^A$. Образовался силовой прямоугольный треугольник $AEГ$, в котором сторона AG является нормальной составляющей P_n^A силы P_o , сторона EG является касательной составляющей P_τ^A силы P_o . Из точки B проведен вектор BE' , являющийся эквивалентом окружной силы P_o^B . Образовался силовой прямоугольный треугольник $BE'Г'$, в котором сторона $E'Г'$ является касательной составляющей P_τ^B силы P_o^B , сторона $BГ'$ является нормальной составляющей P_n^B силы P_o^B . При анализе си-

ловых составляющих выяснилось, что уравнение, определяющее силовое воздействие в зоне размола за счет касательной составляющей P_{τ}^A и P_{τ}^B , имеет следующий вид:

$$P_{\tau}^B = P_{\tau}^A \cdot \frac{\sin \beta^B \cdot r}{\sin \beta^A \cdot R}. \quad (2)$$

Уравнение (2) определяет движение волокнистой массы в зоне размола за счет касательной составляющей P_{τ}^A и P_{τ}^B , принимая, что при движении массы в зоне размола могут участвовать как нормальные силы, так и центробежные силы. Для решения поставленной задачи эти силы в данном анализе не учитывались. Сравним соотношение P_{τ}^A и P_{τ}^B для гарнитуры с окружной формой ножей, учитывая касательную составляющую уравнения (2). Исходные данные для расчета: $\beta_A = 22,6^{\circ}$, $\beta_B = 54,1^{\circ}$, $r = 38$ мм, $R = 100$ мм. Подставим значения этих параметров в зависимость (2):

$$P_{\tau \text{ ОКР.}}^B = P_{\tau}^A \cdot \frac{0,8220 \cdot 38}{0,3847 \cdot 100} = 0,812 \cdot P_{\tau}^A.$$

Учтя касательную составляющую уравнения (2), сравним соотношение P_{τ}^A и P_{τ}^B для традиционных гарнитур с прямолинейной формой ножей, используемых в эксперименте. Исходные данные для расчета реальной гарнитуры с прямолинейной формой ножей: $\beta_A = 22,6^{\circ}$, $\beta_B = 8,2^{\circ}$, $r = 38$ мм, $R = 100$ мм. Подставив значения этих параметров в зависимость (2), получим

$$P_{\tau \text{ ПРЯМ.}}^B = P_{\tau}^A \cdot \frac{0,1426 \cdot 38}{0,3847 \cdot 100} = 0,141 \cdot P_{\tau}^A.$$

Сравнив значения P_{τ}^B для гарнитуры с окружной и прямолинейной формой ножей, найдем их соотношение:

$$\frac{P_{\tau \text{ ОКР.}}^B}{P_{\tau \text{ ПРЯМ.}}^B} = \frac{0,812 \cdot P_{\tau}^A}{0,141 \cdot P_{\tau}^A} = 5,76.$$

Таким образом, касательные усилия в зоне размола для гарнитуры с окружными ножами в 5,76 раза больше, чем для традиционных гарнитур с прямолинейной формой ножей. На волокнистую массу высокой концентрации оказывается силовое воздействие, достаточное для ее продвижения вдоль активной стенки кругового ножа, с преимущественным фибриллированием волокон.

Глава 3. Экспериментальная часть. Представлено описание экспериментальной установки для размола, а также порядок и последовательность проведения экспериментов, методика определения бумагообразующих свойств волокнистого полуфабриката и физико-механических характеристик бумажных отливок. Исследовались такие свойства волокна, как длина, ширина, грубость, фракционный состав, индекс фибрилляции, водоудерживающая способность. Физико-механические характеристики бумажных отливок определялись согласно ГОСТ 14363.4-89. Размолу подвергалась сульфатная беленая целлюлоза из листовенных пород древесины (полуфабрикат АО «Группы Илим», филиал г. Братск) с начальной степенью помола 15°ШР . Эксперимент был реализован в три этапа.

Первый этап. Исследование влияния конструктивных элементов гарнитуры с окружной формой ножей при варьировании концентрации волокнистой мас-

сы, частоты вращения ротора и величины межножевого зазора на бумагообразующие свойства массы и физико-механические показатели бумажных отливок.

Для этих целей с помощью регрессионного анализа были построены математические модели, описывающие процесс размола. Основные технологические факторы процесса размола, оказывающие влияние на бумагообразующие показатели волокнистой массы, а также физико-механические характеристики бумажных отливок, представлены в виде входных факторов X и выходных параметров Y в таблице 1. Математическая обработка выполнялась с использованием программы *STATGRAPHICS® Centurion*. Зависимость каждого выходного параметра от переменных факторов аппроксимировали полиномами второй степени общего вида:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_{11} X_1^2 + b_{22} X_2^2 + b_{33} X_3^2 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + b_{23} X_2 X_3 \quad (3)$$

Таблица 1 – 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, мм	Li	Y_1
Средняя ширина волокна, мкм	z	Y_2
Индекс фибрилляции, %	Fib	Y_3
Водоудерживающая способность (по Джайме), %	W	Y_4
Грубость волокна, мг/м	k	Y_5
Фракционный состав средней длины волокна		
Фракция от 0,2-0,3 мм, %	fr_1	Y_6
Фракция от 0,3-0,45 мм, %	fr_2	Y_7
Фракция от 0,4-0,6 мм, %	fr_3	Y_8
Фракция от 0,6-1 мм, %	fr_4	Y_9
Фракция от 1-1,5 мм, %	fr_5	Y_{10}
Фракция от 1,5-2 мм, %	fr_6	Y_{11}
Мелочь по площади, %	A	Y_{12}
Изменение физико-механических свойств отливок при размоле волокнистой массы		
Сопротивление излому	U	Y_{13}
Разрывная длина, м	L	Y_{14}
Сопротивление продавливанию, кПа	P_a	Y_{15}
Сопротивление раздиранию, мН	E	Y_{16}

В таблице 2, согласно плану эксперимента, показаны уровни и шаги варьирования исследуемых факторов.

Таблица 2 – Уровни и шаги варьирования исследуемых факторов

Фактор	Обозначение натуральное	Шаг варьирования фактора	Уровень варьирования фактора		
			$y^{(-1)}$	$y^{(0)}$	$y^{(+1)}$
Частота вращения ротора, об/мин	n	250	2000	2250	2500
Межножевой зазор, мм	s	0,5	0,5	1	1,5
Концентрация массы, %	C	5	10	15	20

В контексте задачи исследования представлялось целесообразным выяснить вклад в дисперсию выходных параметров варьирования переменных факторов. Для этих целей были построены поверхности откликов выходных параметров в зависимости от концентрации волокнистой массы, частоты вращения ротора и величины зазора между ножами ротора и статора при разных значениях степени помола.

Второй этап. Проведение однофакторного дисперсионного анализа для выявления влияния на выходные параметры Y конструкции размалывающей гарнитуры при различной концентрации волокнистой массы.

Третий этап. Проведение факторного анализа выходных параметров для объяснения корреляций между выходными параметрами Y путем выделения латентных факторов, скрытых в структуре экспериментальных данных.

Использованный для построения математической модели процесса размола регрессионный анализ показал, что применение разработанной конструкции гарнитуры имеет следующие особенности:

1. С ростом концентрации волокнистой массы от 10-20 % волокно практически не подвергается рубке, что обеспечивает сохранность его исходной длины, частота вращения ротора и величина межножевого зазора не оказывают значительного влияния на длину волокна. Поверхности откликов средней длины волокна показаны на рисунке 3.

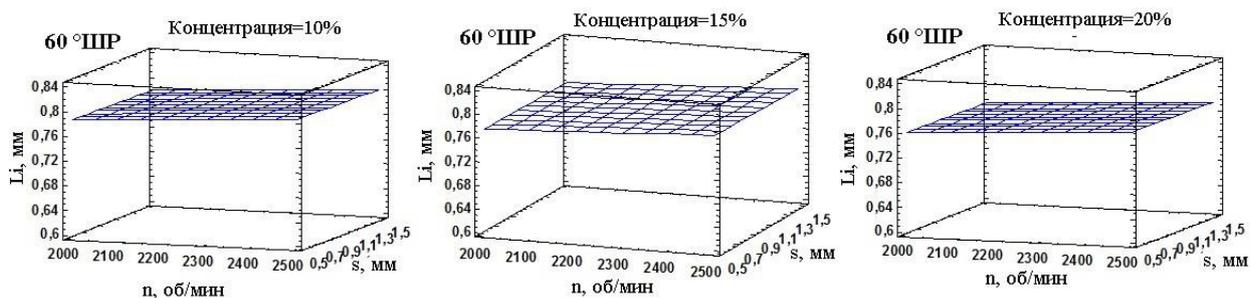


Рисунок 3 – Зависимость средней длины волокна от частоты вращения ротора n , величины межножевого зазора s , концентрации волокнистой массы C при степени помола 60°ШР

Сохранность исходной длины волокна связана прежде всего с тем, что волокнистая масса размалывается при достаточно больших зазорах. В таком случае возрастает межволоконное трение. Волокна, находясь в тесном контакте друг с другом, подвергаются многократным скручивающим и изгибающим воздействиям. В связи с этим происходит их фибриллирование без значительного укорочения. Более точную оценку изменчивости средней длины волокна в процессе размола позволяет дать фракционный состав волокнистой массы. Для наглядного представления изменения процентного содержания фракционного состава представлена гистограмма распределения длины волокон по классам фракций (рисунок 4). Из рисунка видно, что по мере увеличения степени помола, гарнитура авторского исполнения обеспечивает незначительное увеличение процентного содержания коротковолокнистых фракций, таких как $fr3$, $fr2$ и $fr1$, что также свидетельствует о том, что при размоле массы высокой концентрации волокна не подвержены значительной рубке.

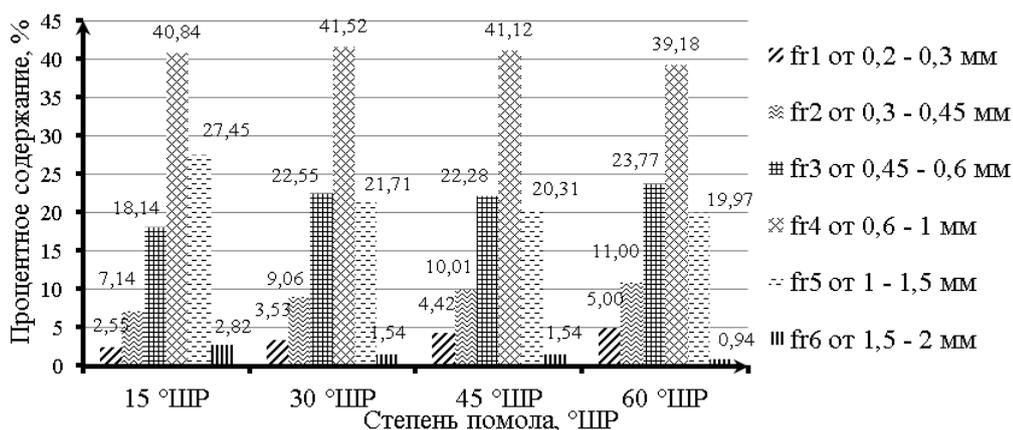


Рисунок 4 – Гистограмма распределения длины волокон по классам фракций при частоте вращения ротора 2000 об/мин, величины зазора между ножами ротора и статора 1,5 мм и концентрации волокнистой массы 10 %

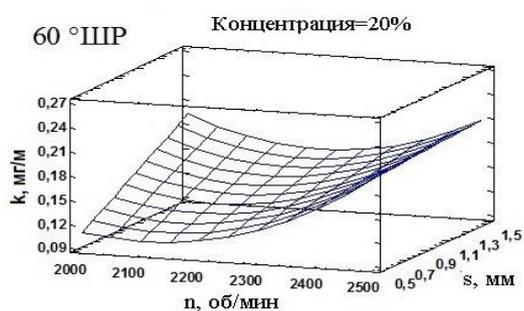


Рисунок 5 – Зависимость грубости волокна от частоты вращения ротора n , величины межножевого зазора s и концентрации волокнистой массы 20 % при степени помола 60 °ШР



Рисунок 6 – Зависимость ширины волокна от частоты вращения ротора n , величины межножевого зазора s и концентрации волокнистой массы 10 % при степени помола 60 °ШР

2. Одним из фундаментальных бумагообразующих свойств, помимо длины волокна, является грубость волокна. Изображения поверхностей откликов грубости волокна (рисунок 5) при концентрации размалываемой массы 20 % показывают, что рост грубости волокна наблюдается с увеличением частоты вращения ротора и величины межножевого зазора. Примерно аналогичная картина наблюдается при концентрации размалываемой массы 10 % и 15 %.

3. С ростом концентрации волокнистой массы в процессе размола от 10 до 20 % ширина волокна незначительно увеличивается. Увеличение ширины волокна при концентрации размалываемой массы 10 % наблюдается при уменьшении частоты вращения ротора и увеличении величины зазора между ножами ротора и статора (рисунок 6). С ростом концентрации размалываемой массы до 15 % и 20 % частота вращения ротора и величина межножевого зазора не оказывают значительного влияния на изменчивость ширины волокна.

4. С увеличением частоты вращения ротора и концентрации волокнистой массы водоудерживающая способность возрастает.

Величина зазора между ножами ротора и статора не вызывает существенного изменения водоудерживающей способности. Наибольшее значение показателя водоудерживающей способности наблюдается при концентрации волокнистой массы 20 % и частоте вращения ротора 2500 об/мин (рисунок 7).

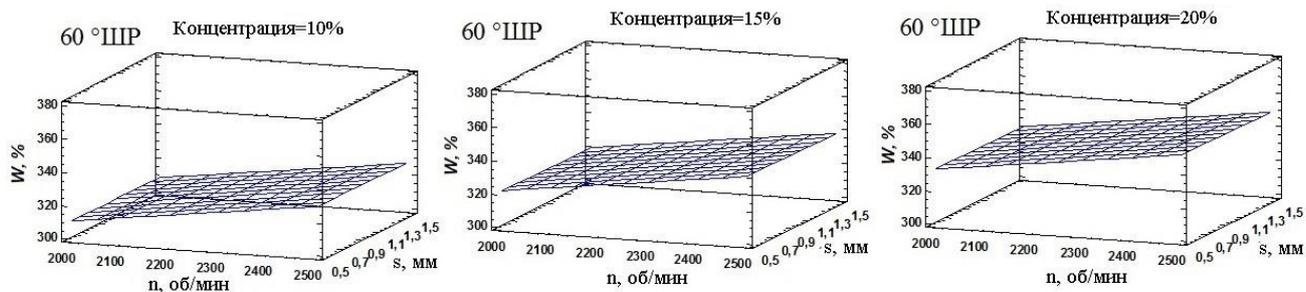


Рисунок 7 – Зависимость водоудерживающей способности от частоты вращения ротора n , величины межножевого зазора s и концентрации волокнистой массы C при степени помола 60° ШР

5. При концентрации волокнистой массы 10 % уменьшение частоты вращения ротора и увеличение межножевого зазора вызывают повышение индекса фибрилляции. Увеличение концентрации волокнистой массы в процессе размола до 20 % приводит к тому, что частота вращения ротора практически не вызывает изменчивости показателя индекса фибрилляции, наблюдается его сохранность (рисунок 8).



Рисунок 8 – Зависимость индекса фибрилляции от частоты вращения ротора n , величины межножевого зазора s и концентрации волокнистой массы C при степени помола 60° ШР

6. Высокие показатели физико-механических характеристик наблюдаются у бумажных отливок, сформированных из волокнистой массы, имеющей в своем составе достаточно длинные и широкие волокна с высоким индексом фибрилляции. В процессе размола волокнистой массы при концентрации 10 % на изменчивость разрывной длины бумажных отливок оказывает влияние частота вращения ротора и, в меньшей мере, величина зазора между ножами ротора и статора (рисунок 9).

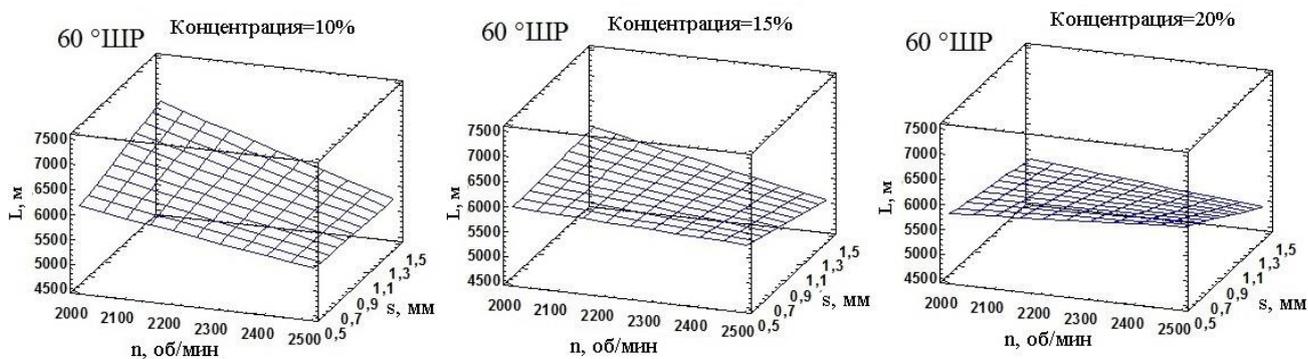


Рисунок 9 – Зависимость разрывной длины от частоты вращения ротора n , величины межножевого зазора s и концентрации волокнистой массы C при степени помола 60° ШР

С уменьшением частоты вращения ротора и увеличением величины зазора между ножами ротора и статора разрывная длина увеличивается. При концен-

трации волокнистой массы 15 % и 20 % наблюдается понижение разрывной длины. Более высокие значения показателя разрывной длины были получены при концентрации размалываемой массы 10 %, частоте вращения ротора 2000 об/мин, величине зазора между ножами ротора и статора 1,5 мм. Примерно аналогичная картина наблюдается для показателей сопротивления продавливанию, излому и раздиранию.

После оптимизации процесса размола волокнистой массы высокой концентрации выяснилось, что конструкция гарнитуры с окружной формой ножей обеспечивает наиболее высокие показатели физико-механических характеристик у бумажных отливок при концентрации волокнистой массы 10 %, частоте вращения ротора 2000 об/мин и величине межножевого зазора 1,5 мм.

Для оценки эффективности использования конструкции гарнитуры авторского исполнения в сравнении с традиционными гарнитурами был проведен их сравнительный анализ на качество помола волокнистой массы и физико-механические характеристики бумажных отливок при оптимальных условиях размола. Сравнивались следующие виды гарнитур: с окружной формой ножей, секторная с прямолинейной формой ножей, с прямолинейными ножами и равномерным их распределением.

На рисунке 10 представлены графики зависимости изменения средней длины волокна от роста степени помола, с учетом конструктивных особенностей размалывающих гарнитур, при различных концентрациях волокнистой массы. С ростом концентрации волокнистой массы от 10 до 20 % в процессе размола наблюдается увеличение средней длины волокна при использовании всех видов конструкций гарнитур. В то же время выяснилось, что с ростом степени помола независимо от конструкции гарнитуры наблюдается небольшое снижение средней длины волокна.

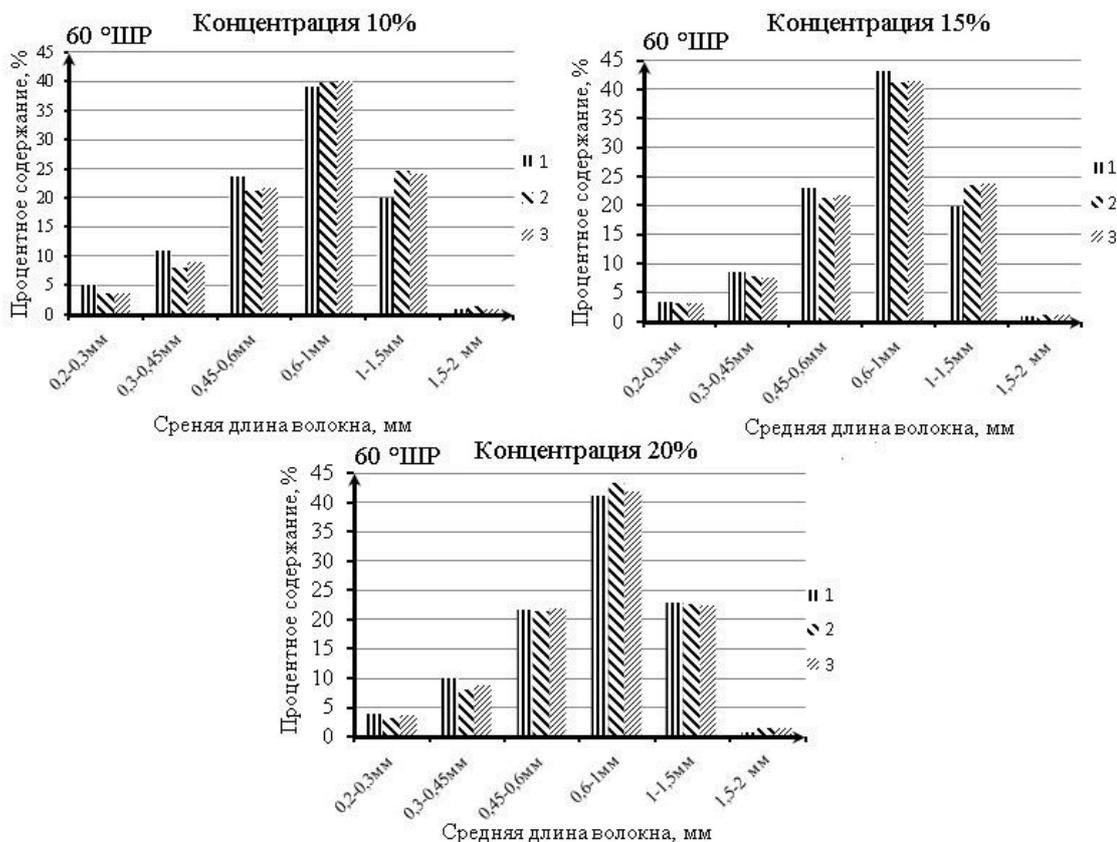


1 – гарнитура с окружной формой ножей, 2 – гарнитура секторная с прямолинейной формой ножей, 3 – гарнитура с прямолинейными ножами и равномерным их распределением

Рисунок 10 – Зависимость средней длины волокна от степени помола при различной концентрации волокнистой массы

Проанализировав гистограммы распределения процентного содержания длины волокон по классам фракций (рисунок 10), можно отметить, что с ростом концентрации волокнистой массы от 10 до 15 % при использовании гарнитуры с окружной формой ножей наблюдается повышение процентного содержания волокон у фракций размерами от 0,2-1 мм. При дальнейшем росте concentra-

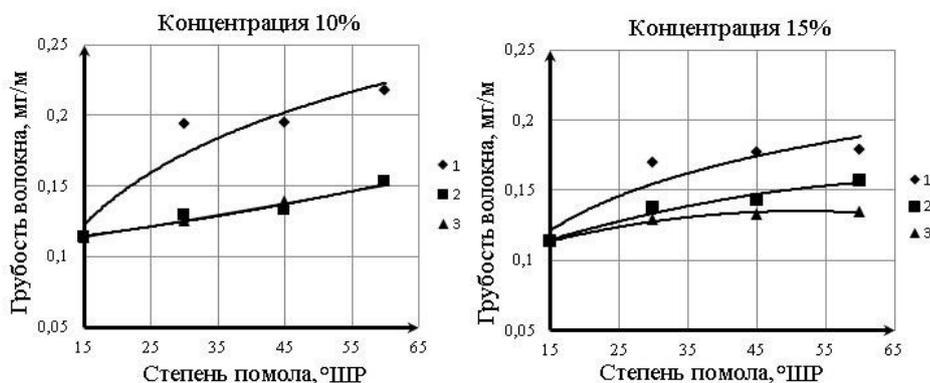
ции волокнистой массы до 20 % не наблюдается существенных отличий фракционного состава для всех видов исследуемых конструкций гарнитур.



1 – гарнитура с окружной формой ножей, 2 – гарнитура секторная с прямолинейной формой ножей, 3 – гарнитура с прямолинейными ножами и равномерным их распределением

Рисунок 10 – Гистограмма распределения длины волокон по классам фракций при различной концентрации волокнистой массы

Графики зависимости грубости волокна от роста степени помола при различной концентрации волокнистой массы, с учетом всех исследуемых конструкций размалывающих гарнитур, представлены на рисунке 11.



1 – гарнитура с окружной формой ножей, 2 – гарнитура секторная с прямолинейной формой ножей, 3 – гарнитура с прямолинейными ножами и равномерным их распределением

Рисунок 11 – Зависимость грубости волокна от степени помола при различной концентрации волокнистой массы

При концентрации размалываемой массы 10 % и 15 % с ростом степени помола до 60 °ШР грубость волокна в среднем на 35 % выше при использова-

нии конструкции гарнитуры с окружной формой ножей, чем у гарнитур с прямолинейной формой ножей. Для всех графиков характерно некоторое понижение грубости волокна с ростом концентрации размалываемой массы.

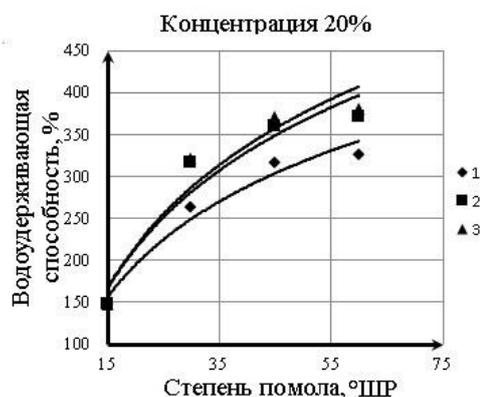
На рисунке 12 показаны графики зависимости изменения ширины волокна от роста степени помола при концентрации волокнистой массы 20 %. Из рисунка видно, что наибольшая ширина волокна с ростом степени помола до 45 °ШР наблюдается при использовании гарнитуры с прямолинейными ножами и равномерным их распределением. Дальнейший рост степени помола до 60 °ШР показывает, что волокна становятся шире при использовании конструкции гарнитуры с окружной формой ножей.

Графики зависимости водоудерживающей способности от роста степени помола концентрации волокнистой массы 20 % представлены на рисунке 13. Водоудерживающая способность увеличивается с ростом степени помола и концентрации размалываемой массы при использовании всех видов исследуемых гарнитур. Что касается количественных зависимостей, то у конструкции гарнитуры с окружной формой ножей они ниже, что положительно должно сказаться при отливе бумаги на сетке бумагоделательной машины.



1 – гарнитура с окружной формой ножей, 2 – гарнитура секторная с прямолинейной формой ножей, 3 – гарнитура с прямолинейными ножами и равномерным их распределением

Рисунок 12 – Зависимость ширины волокна от степени помола при концентрации волокнистой массы 20 %



1 – гарнитура с окружной формой ножей, 2 – гарнитура секторная с прямолинейной формой ножей, 3 – гарнитура с прямолинейными ножами и равномерным их распределением

Рисунок 13 – Зависимость водоудерживающей способности от степени помола при концентрации волокнистой массы 20 %

С увеличением индекса фибрилляции все исследуемые физико-механические характеристики у бумажных отливках возрастают. Графики зависимости индекса фибрилляции от роста степени помола при различной концентрации волокнистой массы представлены на рисунке 14. При размолке волокнистой массы с концентрацией 10 % наблюдается максимальное значение показателя индекса фибрилляции при использовании гарнитуры с окружной формой ножей. Количественные значения индекса фибрилляции при использовании традиционных видов гарнитур с прямолинейной формой ножей и равных степенях помола ниже, чем при использовании гарнитуры с окружной формой ножей. При размолке волокнистой массы с концентрацией 20 % для всех видов ис-

пользуемых гарнитур количественное значение индекса фибрилляции при равных степенях помола совпадает.



1 – гарнитура с окружной формой ножей, 2 – гарнитура секторная с прямолинейной формой ножей, 3 – гарнитура с прямолинейными ножами и равномерным их распределением

Рисунок 14 – Зависимость индекса фибрилляции от степени помола при различной концентрации волокнистой массы

Графики зависимости разрывной длины от роста степени помола при различной концентрации волокнистой массы, с учетом всех исследуемых конструкций размалывающих гарнитур, представлены на рисунке 15. С ростом степени помола до 60 °ШР гарнитура, имеющая окружную форму ножей, при размоле волокнистой массы концентрацией от 10 - 20 % имеет более высокие количественные показатели разрывной длины, в том числе: по сравнению с секторной гарнитурой с прямолинейной формой ножей на 32 %, по сравнению с гарнитурой с прямолинейными ножами и равномерным их распределением на 27 %.



1 – гарнитура с окружной формой ножей, 2 – гарнитура секторная с прямолинейной формой ножей, 3 – гарнитура с прямолинейными ножами и равномерным их распределением

Рисунок 15 – Зависимость разрывной длины от степени помола при различной концентрации волокнистой массы

Графики зависимости сопротивления раздиранию от роста степени помола, при различной концентрации волокнистой массы, с учетом всех исследуемых конструкций размалывающих гарнитур, представлены на рисунке 16. При концентрации размалываемой массы 10 % и 15 % показатель сопротивления раздиранию при использовании гарнитуры с окружной формой ножей в сравнении с прямолинейными ножами имеет более высокое значение. При концентрации размалываемой массы 20 % конструкция гарнитуры с окружными ножами обеспечивает более высокие значения показателя сопротивления раздиранию при степени помола 60 °ШР.



1 – гарнитура с окружной формой ножей, 2 – гарнитура секторная с прямолинейной формой ножей, 3 – гарнитура с прямолинейными ножами и равномерным их распределением

Рисунок 16 – Зависимость сопротивления разди­ра­нию от степени помола при различ­ной концентрации волокнистой массы



1 – гарнитура с окружной формой ножей, 2 – гарнитура секторная с прямолинейной формой ножей, 3 – гарнитура с прямолинейными ножами и равномерным их распределением

Рисунок 17 – Зависимость сопротивления продав­ли­ва­нию от степени помола при концентрации волокнистой массы 10 %

Графики зависимости сопротивления продав­ли­ва­нию от роста степени помола при концентрации волокнистой массы 10 %, с учетом всех исследуемых конструкций размалывающих гарнитур, представлены на рисунке 17. При концентрации размалываемой массы 10 % гарнитура с окружными ножами в сравнении с традиционными гарнитурами с прямолинейной формой ножей при равных степенях помола обеспечивает более высокие значения показателя сопротивления продав­ли­ва­нию. Аналогичная картина наблюдается при концентрации размалываемой массы 15 %. При размоле волокнистой массы с концентрацией 20 % для всех видов исследуемых гарнитур показатель сопротивления продав­ли­ва­нию с ростом степени помола количественно равен.

Проведенный на предмет корреляционных связей между выходными параметрами факторный анализ показал, что только два

скрытых фактора определяют существенную долю суммарной дисперсии анализируемых показателей. Первый из выделенных факторов обуславливает около 72 % дисперсии у наблюдавшихся показателей, второй – около 11 %. Природа первого фактора может быть связана со степенью фибриллирования волокон. Природу второго фактора сложно интерпретировать, поскольку он обуславливает 11 % изменчивости от общей дисперсии у наблюдавшихся показателей. Можно сделать предположение, что природа данного фактора связана с морфологическими свойствами волокна, однако данное предположение нуждается в дальнейшем подтверждении.

ГЛАВА 4. Оценка технико-экономической эффективности процесса размола для различных конструкций гарнитур. Дана оценка экономической эффективности процесса размола с использованием гарнитуры авторского ис-

полнения в сравнении с традиционными гарнитурами. На рисунке 18 представлены графики зависимости удельного расхода электроэнергии от роста степени помола для всех исследуемых конструкций гарнитур при различных концентрациях волокнистой массы, в том числе для оптимальных условий размола.



1 – гарнитура с окружной формой ножей, 2 – гарнитура секторная с прямолинейной формой ножей, 3 – гарнитура с прямолинейными ножами и равномерным их распределением

Рисунок 18 – Зависимость удельного расхода энергии от степени помола при различной концентрации волокнистой массы

Использование конструкции гарнитуры с окружными ножами при оптимальных условиях размола позволяет снизить удельные затраты электроэнергии по сравнению с традиционной секторной гарнитурой с прямолинейной формой ножей на 10 %, по сравнению с традиционной гарнитурой с прямолинейными ножами и равномерным их распределением на 12 %.

Заключение

1. Анализ литературных источников в области размола волокнистых полуфабрикатов высокой концентрации в ножевых размалывающих машинах показал недостаточное рассмотрение вопросов, связанных с влиянием конструкции гарнитуры с окружной формой ножей на бумагообразующие свойства массы и физико-механические характеристики бумажных отливок. Вместе с тем, по мнению некоторых исследователей, окружная форма ножа может повысить транспортирующую способность гарнитуры в зоне размола, что благоприятно скажется на качестве помола массы и прочности бумажного полотна. Однако теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение данного предположения было исследовано не в полной мере.

2. Проведенное в настоящей работе теоретическое обоснование конструкции гарнитуры с окружной формой ножей доказывает, что окружной нож при размоле массы высокой концентрации может обеспечивать ее оптимальную транспортировку в зоне размола с преимущественно фибриллирующим воздействием на волокно. Данное условие выполняется в том случае, когда у окружного ножа со стороны активных режущих кромок преобладает касательная составляющая силы, которая более чем в 5 раз выше, чем у прямолинейных ножей. Для этого необходимо, чтобы у окружного ножа угол между касательной к режущей кромке и радиусом, проведенным из центра диска в точку касания, равномерно возрастал по всей линии соприкосновения режущей кромки.

3. Проведенный многофакторный эксперимент с использованием гарнитуры авторского исполнения показал, что при концентрации размалываемой массы от 10 до 20 % с ростом частоты вращения от 2000 до 2500 об/мин волокно практически не подвергается рубке, в отдельных случаях наблюдается незначительное увеличение коротковолокнистых фракций. Одновременно с этим наблюдается повышение водоудерживающей способности массы и грубости волокна. Величина зазора между ножами ротора и статора оказывает влияние на индекс фибрилляции волокна и его ширину. При концентрации размалываемой массы 10 % с увеличением межножевого зазора индекс фибрилляции возрастает, а волокна становятся шире. При этом наблюдается рост физико-механических характеристик бумажных отливок.

4. Сравнительный анализ гарнитуры авторского исполнения и традиционных гарнитур с прямолинейной формой ножей подтвердил теоретические предположения о роли касательной силы окружного ножа в процессе размола массы высокой концентрации. Значения индекса фибрилляции и ширины волокна при всех прочих равных условиях выше при использовании конструкции гарнитуры с окружной формой ножей. При этом наблюдается тесная корреляция индекса фибрилляции и физико-механических характеристик бумажных отливок.

5. Проведенный факторный анализ, направленный на выявление корреляционных связей между исследуемыми выходными параметрами, показал, что большая часть наблюдаемых показателей (среди которых степень помола, длина волокна, фракционный состав, индекс фибрилляции, ширина волокна, водоудерживающая способность и физико-механические характеристики бумажных отливок) на 72 % зависят от степени фибрилляции волокон.

6. Оценка технико-экономической эффективности процесса размола показала, что с ростом концентрации волокнистой массы время, затрачиваемое на размол до 60 °ШР, при использовании гарнитуры авторского исполнения по сравнению с традиционными гарнитурами с прямолинейной формой ножей в среднем ниже на 30 %. Это позволяет снизить удельный расход электроэнергии на 10 - 15 %. При этом с ростом концентрации волокнистой массы удельный расход электроэнергии снижается.

Основные материалы диссертации изложены в следующих работах:

Статьи в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК:

1. Современное состояние и перспективы совершенствования процесса размола волокнистых полуфабрикатов высокой концентрации (обзор) / А. В. Ушаков, Ю. Д. Алашкевич, В. А. Кожухов, В. И. Ковалев // Химия растительного сырья. – 2020. – № 4. – С. 315-329. – DOI 10.14258/jcprgm.2020048251. (0,937 п.л., авт. – 0,47 п.л.)

2. Размол волокнистых материалов высокой концентрации в дисковой мельнице / А. В. Ушаков, Ю. Д. Алашкевич, В. А. Кожухов, Р. А. Марченко // Хвойные бореальной зоны. – 2019. – Т. 37, № 6. – С. 471-474. (0,25 п.л., авт. - 0,125 п.л.)

Статьи, опубликованные в журналах, входящих в базу данных Scopus:

3. Effect of pulp consistency during refining on physical and mechanical characteristics of handsheets / A. V. Ushakov, Y. D. Alashkevich, V. A. Kozhukhov, R. A. Marchenko // Journal of Physics: Conference Series, Krasnoyarsk, 2021. DOI 10.1088/1742-6596/2094/5/052035. (0,312 п.л., авт. - 0,156 п.л.)

Патенты:

4. Патент № 2761545 С1 Российская Федерация, МПК D21D 1/30, B02C 7/00. Размалывающая гарнитура: № 2021112036: заявл. 26.04.2021: опубл. 09.12.2021 / Ю. Д. Алашкевич, В. И. Ковалев, В. А. Кожухов, А. В. Ушаков; заявитель ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева». (0,5 п.л., авт. - 0,125 п.л.)

5. Патент № 2761544 С1 Российская Федерация, МПК D21D 1/30, B02C 7/12. Размалывающая гарнитура: № 2020138309: заявл. 23.11.2020: опубл. 09.12.2021 / Ю. Д. Алашкевич, В. И. Ковалев, В. А. Кожухов, А. В. Ушаков; заявитель ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева». (0,625 п.л., авт. - 0,156 п.л.)

Труды в прочих изданиях:

6. Влияние концентрации волокнистой массы на время размола / А. В. Ушаков, Ю. Д. Алашкевич, В. А. Кожухов, К. А. Хохлов // Лесной и химический комплексы - проблемы и решения: сб. материалов Всеросс. науч.-практ. конф. – СибГУ им.акад. М.Ф. Решетнева. - Красноярск, 2021. – С. 411-413. (0,187 п.л., авт. - 0,093 п.л.)

7. Влияние концентрации при размолу волокнистых полуфабрикатов на прочностные показатели готовой продукции / А. В. Ушаков, Ю. Д. Алашкевич, В. А. Кожухов, К. А. Хохлов // Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов: материалы VI Междунар. науч.-техн. конф., посвященной памяти профессора В.И. Комарова. - Архангельск, 2021. – С. 165-170. (0,312 п.л., авт. - 0,156 п.л.)

8. Влияние углов наклона ножей при размолу массы высокой концентрации / А. В. Ушаков, Ю. Д. Алашкевич, В. А. Кожухов, К. А. Хохлов // Лесной и химический комплексы - проблемы и решения: сб. материалов по итогам Всеросс. науч.-практ. конф. - Красноярск, 2020. – С. 354-356. (0,187 п.л., авт. - 0,093 п.л.)

9. Повышение прочностных свойств биоразлагаемой упаковки из бумажного сырья / А. В. Ушаков, Ю. Д. Алашкевич, В. А. Кожухов, К. А. Хохлов // Химия и химическая технология в XXI веке: материалы XXII Междунар. науч.-практ. конф. студентов и молодых ученых имени выдающихся химиков Л. П. Кулёва и Н. М. Кижнера. - Томск, 2021. - С. 164-165. (0,125 п.л., авт. - 0,062 п.л.)

10. Ушаков, А. В. Equipment for knife beating of fibre high concentration semi-products / А. В. Ушаков, В. А. Кожухов // Молодежь. Общество. Современная наука, техника и инновации. – 2020. – № 19. – Р. 339-342. (0,25 п.л., авт. - 0,125 п.л.)

11. Ушаков, А. В. Влияние межножевого зазора на размол волокнистых полуфабрикатов высокой концентрации / А. В. Ушаков, В. А. Кожухов, К. А. Хохлов // Экология, рациональное природопользование и охрана окружающей среды: сб. ст. по материалам X Всеросс. науч.-практ. конф. - Лесосибирск, 2020. – С. 153-155. (0,187 п.л., авт. - 0,093 п.л.)

12. Ушаков, А. В. Перспективы процесса размола волокнистых материалов высокой концентрации / А. В. Ушаков, В. А. Кожухов // Молодые ученые в решении актуальных проблем науки: сб. материалов Всеросс. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых СибГУ им. М.Ф. Решетнева. - Красноярск, 2020. – С. 167-169. (0,187 п.л., авт. - 0,093 п.л.)

13. Ушаков, А. В. Отдельные особенности процесса размола массы высокой концентрации / А. В. Ушаков, Ю. Д. Алашкевич, В. А. Кожухов // Новые достижения в химии и химической технологии растительного сырья: материалы VIII Всеросс. конф. с междунар. участием. - Барнаул, 2020. – С. 210-212. (0,187 п.л., авт. - 0,093 п.л.)

14. Факторы процесса размола волокнистых полуфабрикатов высокой концентрации / А. В. Ушаков, Ю. Д. Алашкевич, В. А. Кожухов [и др.] // Современная целлюлозно-бумажная промышленность. Актуальные задачи и перспективные решения: материалы II Междунар. науч.-техн. конф. молодых учёных и специалистов ЦБП. - Санкт-Петербург, 2020. – С. 73-78. (0,312 п.л., авт. - 0,156 п.л.)

15. Ушаков, А. В. Возможность размола волокнистых полуфабрикатов высокой концентрации в дисковой мельнице / А. В. Ушаков, Ю. Д. Алашкевич, В. А. Кожухов // Сове-

менные тенденции развития химической технологии, промышленной экологии и техносферной безопасности: Всеросс. науч.-практ. конф. студентов и молодых ученых. - Санкт-Петербург, 2020. - С. 270-272. (0,187 п.л., авт. - 0,093 п.л.)

16. Ушаков, А. В. Особенности транспортировки массы высокой концентрации в зону размола дисковой мельницы / А. В. Ушаков, Ю. Д. Алашкевич, В. А. Кожухов // Решетневские чтения: материалы XXIV Междунар. науч.-практ. конф., посвященной академику М. Ф. Решетневу. - Красноярск, 2020. – С. 124-126. (0,187 п.л., авт. - 0,093 п.л.)

17. Ушаков, А. В. Размол волокнистых материалов высокой концентрации / А.В. Ушаков, В.А. Кожухов // Экология, рациональное природопользование и охрана окружающей среды: сб. ст. по материалам IX Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием школьников, студентов, аспирантов и молодых ученых. – Лесосибирск, 2019. - С. 360-362. (0,187 п.л., авт. - 0,093 п.л.)

Благодарности

Автор выражает глубокую благодарность доцентам кафедры машин и аппаратов промышленных технологий СибГУ им. М.Ф. Решетнева Виктору Анатольевичу Кожухову и Валерию Ивановичу Ковалеву за оказанную помощь при обсуждении отдельных положений диссертационной работы

Подписано в печать 11.07.2022. Формат 60*84 1/16.

Объем 1,0 п.л. Тираж 100 экз.

Заказ № 3219.

Отпечатано в редакционно-издательском центре

СибГУ им. М.Ф. Решетнева

660049, г. Красноярск, просп. Мира, 82

Тел. (391) 222-73-28