

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Сибирский государственный университет науки и технологий имени  
академика М.Ф. Решетнёва»

На правах рукописи



Карелина Александра Александровна

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

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

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
Академик РАО, д-р техн. наук, профессор  
Алашкевич Юрий Давыдович

Красноярск – 2025

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. Аналитический обзор.....	12
1.1 Основные виды недровесного целлюлозосодержащего сырья.....	12
1.2 Оценка пригодности использования недровесного целлюлозосодержащего сырья в целлюлозно-бумажной промышленности.....	16
1.3 Особенности размола волокнистой массы высокой концентрации из недровесного целлюлозосодержащего сырья.....	24
1.4 Конструктивные особенности рабочих органов размалывающих машин для обработки недровесного целлюлозосодержащего сырья при высокой концентрации.....	32
Выводы к первой главе.....	40
ГЛАВА 2. Теоретическая часть.....	41
2.1 Вывод алгоритма угла касательной $\beta_X$ .....	44
2.2 Характер изменения угла $\beta_X$ .....	46
2.3 Характер изменения касательной составляющей $P_\tau^{Ax}$ окружного усилия $P_O^{Ax}$ .....	48
2.4 Сравнение значения касательного усилия $P_\tau^B$ на выходе из зоны размола для различных конструкций гарнитур.....	56
Выводы ко второй главе.....	59
ГЛАВА 3. Экспериментальная часть.....	60
3.1 Описание экспериментальной установки для размола.....	60
3.2 Порядок проведения эксперимента.....	63
3.3 Методика проведения эксперимента.....	64
3.3.1 Методика определения бумагообразующих свойств волокнистой	

массы.....	64
3.3.2 Методика определения физико-механических показателей бумажных отливок.....	67
3.4 Планирование эксперимента.....	69
3.5 Результаты многофакторного эксперимента по размолу технической конопли при использовании гарнитуры с окружной формой ножей.....	72
3.6 Определение оптимального режима размола волокнистой массы при использовании конструкции гарнитуры с окружной формой ножей.....	86
3.7 Оценка эффективности процесса размола недревесного целлюлозосодержащего сырья при использовании различных конструкций гарнитур .....	89
3.8 Оценка эффективности процесса размола различных видов недревесного целлюлозосодержащего сырья с использованием авторской конструкции гарнитуры .....	100
3.9 Факторный и кластерный анализы выходных параметров.....	117
Выводы к третьей главе.....	123
ГЛАВА 4. Оценка технико-экономической эффективности производства бумажной продукции из недревесного целлюлозосодержащего сырья.....	126
4.1 Перспективы применения волокнистого полуфабриката из технической конопли.....	126
4.2 Формирование стоимости готовой продукции.....	129
Выводы к четвертой главе.....	135
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	136
ПРИНЯТЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ.....	138
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	140
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	157
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	159
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	160

ПРИЛОЖЕНИЕ Г.....	163
ПРИЛОЖЕНИЕ Д.....	169
ПРИЛОЖЕНИЕ Е.....	179
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж.....	180
ПРИЛОЖЕНИЕ З.....	181

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Бумага играет важную роль в социальном, экономическом и экологическом развитии любой страны. В связи с постоянно возрастающим спросом целлюлозно-бумажная промышленность всё чаще сталкивается с рядом трудностей, среди которых нехватка ресурсов, загрязнение окружающей среды и уровень технического оснащения. Доминирующим фактором является нехватка растительного сырья.

Согласно данным отраслевой программы «Применение вторичных ресурсов и вторичного сырья из отходов в сфере сельского хозяйства на 2022 - 2030 годы» Министерства сельского хозяйства РФ, ежегодно в России образуется более 1,3 млн тонн отходов растениеводства. К таким отходам относятся растительные компоненты сельскохозяйственных культур: стебли зерновых и технических культур (150 тыс. т), отходы пенькопроизводства (100 тыс. т льна и технической конопли), стержни кукурузных початков (1 тыс. т), отходы сорго (350 тыс. т) и др.

Повышенный интерес возникает к отходам лубяных культур, представленных в России льном и технической коноплей. В них наибольшую ценность представляет лубяное волокно (пенька), составляющее наружную часть стебля. Лубяное волокно является превосходным волокнистым материалом, поскольку такие волокна длиннее древесных, а также содержат больше целлюлозы.

Недревесное целлюлозосодержащее сырье может стать важным альтернативным источником волокнистых полуфабрикатов в ЦБП, благодаря быстрой возобновляемости и широкому спектру характеристик. В связи с этим для обеспечения развития бумажной промышленности целесообразно расширять применение недревесного целлюлозосодержащего сырья. Однако необходимо решать ряд комплексных проблем, связанных с переработкой растительного сырья для получения готового бумажного продукта, среди которых важное место

занимает процесс размола. Важным для этого процесса является внедрение в производство передовых технологий.

Размол волокнистой массы является важным технологическим этапом целлюлозно-бумажного производства. Одним из перспективных направлений повышения эффективности бумажного производства является размол волокнистой массы при высокой концентрации.

Размол массы высокой концентрации (МВК) среди своих преимуществ имеет более низкое энергопотребление в сравнении с размолем массы низкой концентрации (МНК). Среди других преимуществ выделяют: преимущественную сохранность длины волокон, рост удельной поверхности волокон на 30-50 % и, как следствие, усиление межволоконных связей, увеличение внутреннего фибриллирования благодаря многократному скручиванию и изгибающему воздействию, повышение показателей прочности бумаги в среднем на 22-50 %, минимальное обезвоживание массы.

Наряду с преимуществами размол МВК имеет и недостатки, среди которых основными является затрудненное прохождение массы через зону размола и ее высокий нагрев, что приводит к увеличению длительности размола и ухудшению качества готовой продукции.

Для решения этих вопросов необходимо оборудование, имеющее высокую пропускную способность, обеспечивающее незначительный нагрев массы и высокий прирост степени помола с преимущественным фибриллированием волокон.

Эти условия могут быть обеспечены за счёт заданного силового воздействия при разработке конструкции ножевой размалывающей гарнитуры путем варьирования соотношения касательных и нормальных усилий.

Применение размола МВК из недревесного целлюлозосодержащего сырья будет способствовать не только диверсификации сырьевой базы в целлюлозно-бумажном производстве, но и внедрению передовых технологий в производственный процесс.

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

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

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

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

**Цель исследования.** Повышение эффективности процесса размола волокнистых полуфабрикатов высокой концентрации из недревесного целлюлозосодержащего сырья за счёт разработки конструкции ножевой размалывающей гарнитуры дисковой мельницы при получении бумажной продукции.

#### **Задачи исследования.**

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

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

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

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

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

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

**Объект исследований.** Получение готовой продукции из растительного сырья.

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

**Научная новизна** результатов диссертационной работы заключается в следующем:

1. Впервые разработана новая конструкция размалывающей гарнитуры (патент № 2798559 С1, № 2805266 С1) для размола недревесного целлюлозосодержащего сырья высокой концентрации, создающая повышенное

силовое воздействие на волокна, отличающаяся увеличенным значением угла касательной к режущей кромке на входе в зону размола и выходе из нее.

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

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

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

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

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

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

**Методология и методы исследования.** При выполнении диссертационной работы использовались методы активного многофакторного эксперимента, а также факторный и кластерный анализы. Бумагообразующие свойства волокнистой массы определялись с помощью современного анализатора волокна *Morfi neo*. Физико-механические характеристики бумажных отливок определялись стандартными методами. Планирование и обработка

экспериментальных данных проводились с использованием математической теории планирования экспериментов и программ *STATGRAPHICS® Centurion* и *Microsoft Excel*.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

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

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

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

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

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

**Апробация работы.** Результаты работы представлялись на всероссийских и международных конференциях: «Современная целлюлозно-бумажная промышленность. Актуальные задачи и перспективные решения» (Санкт-

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

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

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

# ГЛАВА 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР

## 1.1 Основные виды недровесного целлюлозосодержащего сырья

В настоящее время недровесное целлюлозосодержащее сырье получило обширное распространение в различных отраслях экономики, будь то текстильная, пищевая или медицинская промышленность. Однако существует проблема переработки отходов недровесного сырья.

Одним из перспективных направлений использования недровесного сырья является целлюлозно-бумажная промышленность. Обилие источников, содержащих целлюлозное волокно, а также их морфологическое разнообразие могут позволить диверсифицировать сырьевую базу, снизить нагрузку на традиционные источники сырья и получить дополнительный доход от использования нетрадиционных волокнистых материалов.

Термин «недровесное волокно» охватывает ряд растений со значительно различающимися характеристиками. Недровесные волокна, также называемые «альтернативными волокнами», представляют собой целлюлозные материалы, из которых могут быть получены волокна для производства бумаги. Наиболее широко используемыми недровесными целлюлозосодержащими материалами для производства бумаги являются солома, жмых сахарного тростника, бамбук, кенаф, конопля, джут, сизаль, абака, хлопковый линт и тростник. Большинство недровесных растений являются однолетними растениями, которые развивают полный потенциал волокна в один вегетационный период [1].

Недровесные волокна содержат больше целлюлозы и меньше лигнина. Они используются для производства целлюлозы и бумаги различного качества и прочности. Недровесные волокна можно получить в течение года по сравнению с длительными циклами роста древесины [2].

Различный химический состав недровесных растений зависит от типа почвы, условий выращивания и климатических условий. Недровесные волокна

имеют более высокое содержание силикатов, питательных веществ и гемицеллюлозы, чем волокна древесины. Низкая объемная плотность недровесного целлюлозосодержащего сырья позволяет легко получить доступ к содержащейся целлюлозе по сравнению с древесным сырьем. Химический состав недровесного волокнистого сырья также варьируется в более широком диапазоне, чем у древесины [2].

По своему происхождению недровесные целлюлозосодержащие волокна делятся на три основных типа (рис. 1.1):

- 1) сельскохозяйственные отходы;
- 2) естественно растущие растения;
- 3) технические культуры [3, 4].

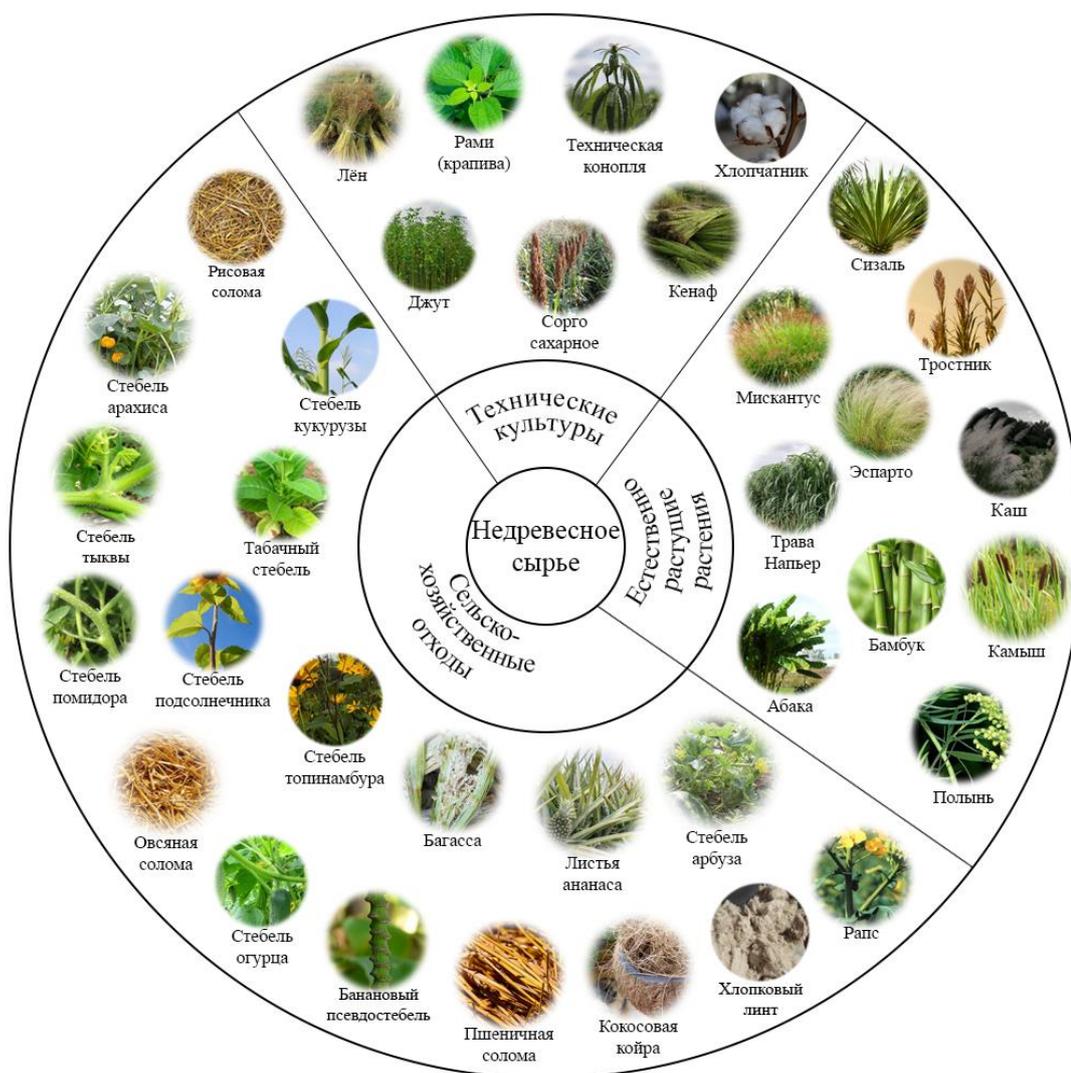


Рисунок 1.1 – Источники недровесного целлюлозосодержащего сырья

В зависимости от положения волокна в растении недревесные целлюлозосодержащие волокна можно разделить на четыре типа, а именно; волокна внутренней и наружной части стебля, волокна листьев и волокна плодов (рис. 1.2) [2, 5, 6].

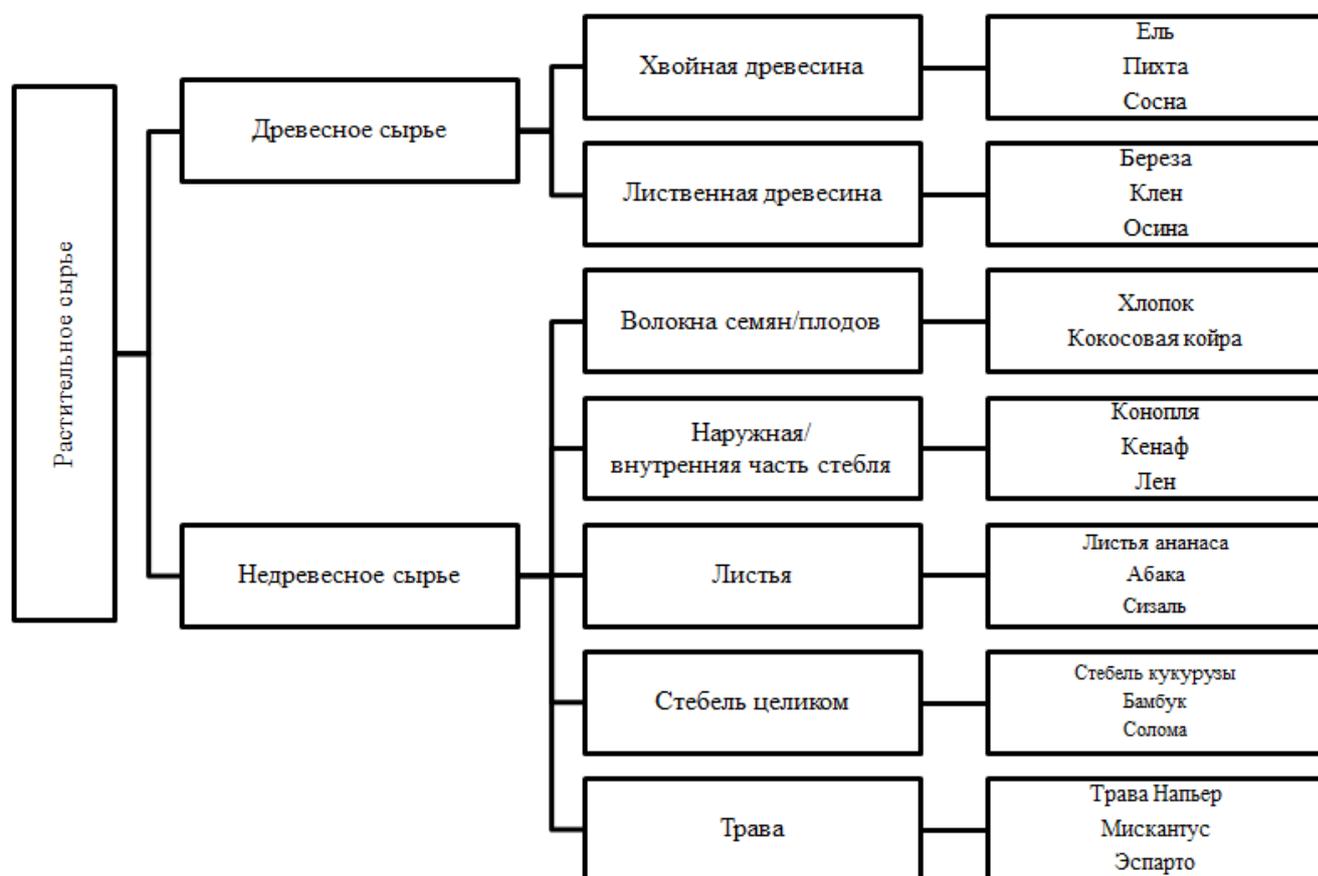


Рисунок 1.2 – Источники растительных волокон

Существует около 2000 видов растений, используемых в качестве источника натуральных волокон, но лишь немногие из них имеют коммерческое значение, составляя около 90 % натуральных волокон в мире. Основные из них представлены в таблице 1.1 [2, 6-16].

Таблица 1.1 – Характеристика недревесного целлюлозосодержащего сырья

Вид растения	Длина волокна, мм	Диаметр волокна, мкм	Урожайность, т/га	Выход целлюлозы, т/га	Содержание целлюлозы, %	Относительное удлинение при разрыве, %	Микрофибриллярный угол, °	Коэффициент Рункеля	Модуль Юнга, ГПа
Конопля техническая	20	22	12	6,7	73-77	1,6-4,5	2	0,27-1,34	27-128
Багасса (отходы сахарного тростника)	1,5-1,7	81-390	9	4,2	30,2	1-3	15	0,317	–
Мискантус	0,45	20-25	10-16	8	28-43	1,8	–	–	–
Бамбук	1,36-4,03	8-30	4	1,6	26-43	2	2-10	0,4	11-30
Кенаф	2,74	20	15	6,5	51,8	2,7-6,9	12	–	53
Эспарто	1,10	20-25	25-40	–	62-71	–	–	–	–
Джут	1,06	26	1,8	–	–	1,5-3,1	8	1,71	13-26,5
Сизаль	3,03	17	1	–	–	1,9-3	20	–	9,4-22
Хлопковый линт	3,5	21	–	–	90-96	–	20-45	–	5-13
Абака	60	20	0,6	–	66,43	–	23	–	–
Стебли кукурузы	1,5	18	1,7-4,5	–	70-95	22,7	–	0,33	–
Рисовая солома	1,4	9	3	1,2	39,2	–	10	0,56	1,21-1,25
Пшеничная солома	1,4	15	2,5	1,9	30-45	–	–	0,65	–
Тростник	1,2	15	9	–	29-42	–	–	–	–
Рапи (крапива)	120	5-6	1,5	–	68,6-76,2	2-4	8	–	61,4-128
Лен	28	21	2-2,5	–	75-82	1,2-3	10	0,3-1,3	27-85
Трава Напьер	0,75	–	40	5,7	–	–	–	–	–
Каш	1,52	16	–	–	–	–	–	–	–
Банановый псевдостебель	2-12	16-32	–	–	49,33	3-10	11	0,27	–
Листья ананаса	30-750	10-205	–	–	66,2	1-3	8-14	1,08	34,5-82,5
Сорго сахарное	1,38-16	–	20-30	–	40-50	–	16	–	–
Капок	18	30-36	–	–	35-65	3	–	–	–
Рапс	0,8-2,2	12-31	5-10	–	17,8-43,2	–	–	–	–
Подсолнечник	9-40	3,28-10,77	2,47-14,83	–	20-45	–	–	–	–

## **1.2 Оценка пригодности использования недревесного целлюлозосодержащего сырья в целлюлозно-бумажной промышленности**

Использование недревесного целлюлозосодержащего сырья в России может показаться неактуальным, поскольку страна занимает лидирующие позиции по лесным запасам. Однако высокий рыночный спрос на бумажную продукцию, экологические проблемы, возникающие в результате широкого использования древесины, увеличение дефицита доступного древесного сырья создали запрос на поиск более быстрорастущих видов высококачественного волокна и более экологически безопасных процессов производства.

При выборе сырья для изготовления бумаги необходимо оценивать различные факторы, такие как источник сырья, процесс получения волокнистой массы и желаемые свойства бумаги, на которые влияют морфологические характеристики волокон (длина, диаметр волокна и диаметр люмена, толщина клеточных стенок) [17]. Морфологические параметры волокна являются важными факторами качества, влияющими как на свойства волокнистой массы, так и на характеристики готовой продукции и имеют важное значение для прогнозирования прочностных свойств производимой бумаги [18, 19].

Характеристики волокон колеблются в зависимости от географического положения, способа посева семян, зрелости, положения в растении, условий выращивания, способа сбора урожая и методов обработки [20].

Для производства целлюлозы и бумаги предпочтительны длинные волокна, но не превышающие 2 мм, поскольку такие волокна имеют тенденцию к флокуляции, что приводит к плохому формованию бумажного листа. Кроме того, содержание целлюлозы в волокне должно быть больше 34%. Более высокое содержание целлюлозы в растительном материале обеспечит стабильность и высокую прочность производимой бумаги. Увеличение содержания целлюлозы обеспечивает увеличение жесткости и прочности волокна [21-23].

Большая часть видов сырья, представленных на рисунке 1.1, не произрастает на территории России из-за климатических условий или

распространена в очень малом количестве. В связи с этим целесообразно обратить внимание на доступные растения, которые представлены в основном лубяными культурами, крупяными и хлебными злаками. На территории России обширное распространение получили такие растения как лен, техническая конопля, пшеница, рапс, подсолнечник. Наибольший интерес из них представляют прядильные культуры, поскольку они имеют прочное и длинное волокно, а также большое количество целлюлозы.

Среди всего многообразия недревесного целлюлозосодержащего сырья наиболее ценными являются отходы прядильных и масличных культур, в особенности технической конопли.

Конопля (*Cannabis sativa*) – род однолетних травянистых растений семейства коноплевых порядка коноплевых [24]. Конопля возникла в Азии и считается одной из старейших одомашненных культур, известных человеку. Растение может вырасти от 1 до 6 м в высоту в зависимости от таких факторов как сорт, экологические и агрономические условия. В течение вегетационного периода растение образует жесткие деревянистые стебли диаметром 2,5–5 см. Растение конопли обычно двудомное. Вегетационный период составляет 90-160 суток. Урожай – 12-14 т сухого вещества/год с га. В виде волокнистой массы можно собрать около 10-12 тонн сухого вещества/год с га. Около 30% от массы – длинные лубяные волокна и 70% – короткие сердцевинные волокна (костра) [25-28].

Основными элементами анатомического строения стеблей конопли являются кора, одревесневшее ядро (костра) и сердцевина. Кора состоит из кожуры (эпидермиса) и луба (флоэмы). Пучки первичных лубяных волокон расположены в наружной части стебля, а пучки вторичных волокон расположены ближе к древесно-сердцевинной части. Первичные волокна значительно длиннее вторичных и содержат меньше лигнина. Лубяные волокна, в отличие от костры, представляют собой многоклеточные образования, построенные из большого количества элементарных волокон. Они имеют округло-многоугольную внешнюю форму, неправильную и неравномерную по длине волокна, а также варьируются

от одного волокна к другому. Центральная полость может быть узкой, округлой или эллиптической, ее диаметр зависит от зрелости растения. Клеточная стенка представляет собой смесь целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина. В среднем элементарное лубяное волокно конопли имеет длину от 15 до 55 мм, диаметр может варьироваться от 0,016 до 0,22 мкм [4, 25-33].

Лубяное волокно конопли является подходящим альтернативным сырьем для ЦБП по следующим причинам:

- вегетационный период технической конопли составляет 90-160 суток [34];
- содержание целлюлозы в лубяном волокне достигает 77% [35];
- гектар конопли формирует около 5-6 тонн целлюлозы в год – это в несколько раз больше, чем годовой прирост гектара леса [36];
- благодаря высокой длине волокон, количество циклов переработки конопляной бумаги может быть увеличено вдвое по сравнению с бумагой из древесины [27];
- растение конопли является природным фитомедиатором и позволяет восстанавливать баланс питательных веществ в почве;
- конопляное волокно является одним из самых прочных природных волокон, что позволяет изготавливать большое количество разных видов бумаг [35].

Несмотря на разнообразие недревесных культур, все они имеют общую микроструктуру (рис. 1.3) [20].

Каждое волокно имеет сложное слоистое строение, состоящее из тонкой первичной стенки, которая является первым слоем, откладываемым во время роста клеток и окружающим вторичную стенку. Вторичная стенка состоит из трех слоев, из которых слой *S2* является самым толстым и определяет механические свойства волокна. Слой *S2* содержит аморфные участки лигнина и гемицеллюлозы, перемешанные с микрофибриллами целлюлозы, расположенными по спирали [9].

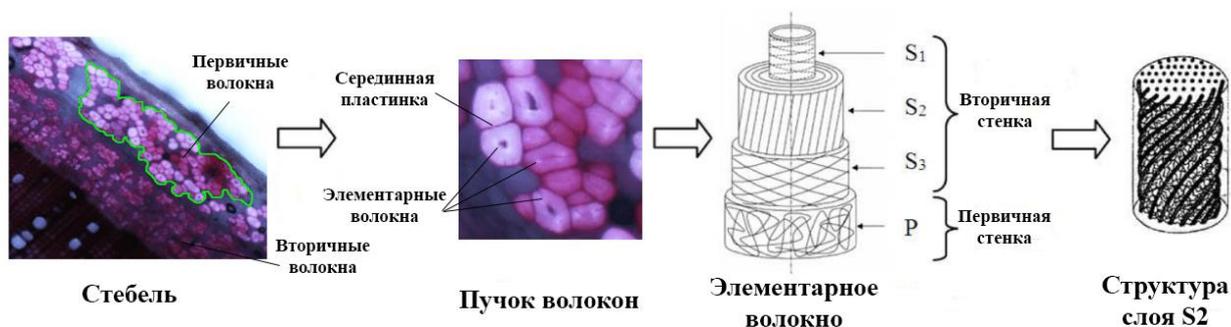
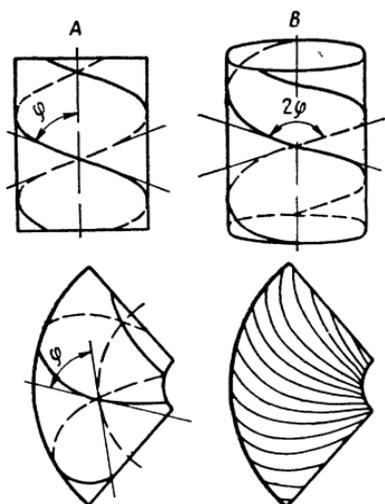


Рисунок 1.3 – Структура волокна на примере конопли

Микрофибриллы состоят из цепочек целлюлозы. В первичной стенке микрофибриллы расположены хаотично, во вторичной стенке микрофибриллы расположены штопорообразно (спирально), наматываясь вокруг продольной оси волокна. В слоях  $S_1$ ,  $S_2$  и  $S_3$  вторичной стенки микрофибриллы могут скручиваться в разных направлениях. Эта винтовая ориентация микрофибрилл обнаруживается в самой толстой области вторичной стенки (слое  $S_2$ ), что используется для обозначения общей ориентации фибрилл волокна как Z- или S-направление (правое или левое волокно). Спиральный угол доминирующего слоя известен как микрофибрилярный угол (МФУ) ( $\varphi$ ) или угол скручивания волокна [20, 37].



А – проекция на плоскость; В – поверхность прямого и закрученного волокна;  $\varphi$  – угол наклона к продольной оси

Рисунок 1.4 – Схема ориентации фибрилл в стенках клетки по Бухеру

В древесных волокнах МФУ колеблется в пределах от  $3^\circ$  до  $50^\circ$  в зависимости от типа и расположения волокон в древесине (например, ранняя и поздняя), тогда как МФУ в недревесных волокнах более постоянный и колеблется от  $2^\circ$  до  $15^\circ$ , исключение составляет хлопок, для которого МФУ равен  $45^\circ$  [6, 22].

Помимо относительной толщины слоев МФУ определяет и общие механические характеристики волокон. При приложении нагрузки микрофибриллы

выравниваются по оси волокна. Если волокна повреждены или имеют дефекты, полученные во время транспортировки или обработки, прочность волокна падает ниже максимального значения. Разрушение волокна происходит, когда нарушается водородная связь в микрофибриллах целлюлозы. Как следствие, прочность на разрыв ниже при более низком содержании целлюлозы.

Значение МФУ также оказывает влияние на способность волокон к размолу. При более низком значении угла в процессе размола будет проще получить продольно отслоившиеся фибриллы, тогда как при больших значениях угла микрофибрилл волокна в большей степени будет подвергаться рубке, а следовательно - укорачиваться.

Кроме того, если микрофибриллы имеют ориентацию близкую к параллельной, волокно будет жестким и негибким с высокой прочностью на растяжение [6, 22, 38].

При оценке качества исходного сырья используется ряд коэффициентов, характеризующих морфологические свойства волокон. Среди них выделяют: коэффициент Рункеля ( $R_{un} = \frac{2w}{d}$ ), коэффициент гибкости ( $F = \frac{d}{D}$ ), коэффициент тонкости ( $S = \frac{L}{D}$ ), в которых  $w$  – толщина клеточной стенки,  $d$  – диаметр люмена,  $D$  – диаметр волокна,  $L$  – длина волокна.

Эти зависимости помогают заранее знать, чего ожидать при использовании определенного волокна, влияя прямым, косвенным или дополнительным образом на общие характеристики целлюлозы [17].

*Коэффициент Рункеля.* Коэффициент Рункеля является параметром, используемым для определения пригодности сырья для получения технической целлюлозы и бумаги. Он оценивает степень разрушения волокон в процессе производства бумаги. Чем ниже соотношение, тем проще волокно поддается размолу, что позволяет иметь большую контактную поверхность, создавая большее количество связей, в результате чего получается бумага более устойчивая к разрушению [17, 39].

Наиболее подходящее соотношение коэффициента Рункеля  $< 1$ , когда клеточная стенка тонкая, поскольку волокна более гибкие и образуют бумагу с большим количеством связей. Коэффициент Рункеля, равный 1, также пригоден для производства бумаги, но менее предпочтителен. При этом значение коэффициента не должно превышать 1,25. Однако некоторые исследователи утверждают, что соотношение от 1 до 2 является нормальным, а выше 2 – волокно становится непригодным твердыми и жесткими, что приводит к плохой склеивающей способности и, следовательно, к снижению качества бумаги [21, 39-41].

Кларк Дж. высказывает мнение, что коэффициент Рункеля не является надежным показателем для оценки пригодности материала в качестве сырья для ЦБП. Утверждается, что значения коэффициента для волокон березовой древесины противоречат превосходным характеристикам полученной из нее бумаги [61]. При этом стоит учитывать, что данный показатель оценивает пригодность сырья до химической обработки, следовательно, изначальное качество полуфабриката может быть существенно ниже.

*Коэффициент гибкости.* Коэффициент гибкости является еще одним важным фактором при оценке сырья для производства бумаги, который измеряет способность волокна сгибаться, не ломаясь, и выражает степень разрушения волокон, приводящую к поверхностному контакту и соединению волокон между собой. Он определяется соотношением диаметра просвета к ширине волокна. Чем выше значение коэффициента, тем более гибким становится волокно, что способствует увеличению устойчивости к изгибу, поскольку увеличивается число соединений между волокнами [17, 40].

Длинные и тонкостенные волокна имеют более высокие значения коэффициента и обладают более высоким сопротивлением к изгибу, тогда как короткие и толстостенные имеют меньшие значения коэффициента и, следовательно, меньшее сопротивление изгибу [17, 43].

Волокна по коэффициенту гибкости делятся на 4 группы: высокоэластичные волокна со значением коэффициента более 75; эластичные

волокна с коэффициентом от 50 до 75; жесткие волокна с коэффициентом от 30 до 50; высокожесткие волокна – менее 30. Кроме того, значения коэффициента гибкости от 50 до 75 позволяют производить хорошую бумагу с высокими прочностными свойствами.

Исследователи сообщают, что желательным значением коэффициента гибкости является 70, тогда как минимальное значение равно 30. Волокна с коэффициентом гибкости более 75 полностью сжимаются, что приводит к хорошему контакту волокон между собой и прочному их соединению. Когда коэффициент гибкости составляет от 50 до 75, волокна частично сжимаются, образуя эллиптические поперечные сечения, что также приводит к хорошему поверхностному контакту и соединению волокон между собой [17, 21].

При этом некоторые ученые утверждают [23], что волокна с коэффициентом гибкости менее 70 не подходят для использования в качестве сырья в целлюлозно-бумажной промышленности.

*Коэффициент тонкости (соотношение сторон).* Коэффициент тонкости или соотношение сторон также является немаловажной характеристикой недревесного целлюлозосодержащего сырья. Его рассчитывают путем деления длины волокна на его диаметр. Длина и диаметр являются важными морфологическими характеристиками, которые используются при оценке качества сырья. Волокна, подходящие для производства целлюлозы и бумаги, имеют расчетное соотношение длины к ширине примерно 100:1. Для текстильных же волокон это отношение составляет 1000:1 [2].

Большее соотношение указывает на длинные и тонкие волокна, которые предпочтительны для производства высококачественной бумаги из-за их способности хорошо переплетаться, обеспечивая высокую прочность продукции [43-45].

*Модуль Юнга.* Дополнительным показателем прочности растительного волокна является модуль Юнга. В контексте производства бумаги модуль Юнга является мерой жесткости растительных волокон, когда они подвергаются растягивающему напряжению. Он количественно определяет взаимосвязь между

напряжением (силой на единицу площади) и деформацией (пропорциональной деформацией) в материале. Для растительных волокон модуль Юнга является показателем того, насколько они будут растягиваться или сжиматься под заданной нагрузкой.

Более высокий модуль указывает на то, что волокно более жесткое и с меньшей вероятностью деформируется под нагрузкой, что имеет решающее значение для сохранения структурной целостности бумаги.

Угол микрофибрилл в волокнах тесно коррелирует с модулем Юнга. Меньший угол обычно приводит к более высокому модулю Юнга, а это означает, что волокна становятся более жесткими и прочными. Высокое содержание целлюлозы также обычно указывает на высокий модуль Юнга, что дополнительно свидетельствует о прочности волокна [46].

Что касается влияния диаметра, то большинство исследований, проведенных на растительных волокнах, показали, что модуль Юнга увеличивается при уменьшении диаметра волокон [9, 47-49].

В таблице дано сравнение основных характеристик древесных и недревесных волокон [28, 50, 51].

Таблица 1.2 – Сравнение древесных и недревесных волокон

Вид сырья	Содержание целлюлозы, %	Длина волокна, мм	Диаметр волокна, мкм	МФУ	Коэффициент Рункеля	Коэффициент гибкости	Соотношение сторон	Модуль Юнга, ГПа
Техническая конопля	73-77	20	22	2	0,6-0,7	80	900:1	27-128
Лен	75-82	28	21	10	0,6-0,7	-	1200:1	27-85
Хлопковый линт	90-96	3,5	21	45	-	-	500:1	5-13
Хвойная (деловая) древесина	46-54	3-4	33	20-45	0,35	60-100	60-100:1	8-12
Лиственная (деловая) древесина	41-45	1-1,4	24	20-50	0,4-0,7	50-70	60:1	10-20

При проведении оценки пригодности использования недревесного целлюлозосодержащего сырья в целлюлозно-бумажной промышленности важно

обращать внимание на такие структурно-размерные характеристики, как содержание целлюлозы, длина и диаметр волокна, МФУ, коэффициент Рункеля.

Рекомендуемое содержание целлюлозы в волокнистом сырье должно превышать 30%. Большая часть недревесного целлюлозосодержащего сырья, описанного в таблице 1.1, имеет большое содержание целлюлозы, что в некоторых случаях дает возможность использовать их даже без применения химической обработки.

Для отдельных видов недревесных растений длина и соотношение сторон значительно превышают аналогичные критерии у древесных волокон, что требует предварительного укорочения недревесного целлюлозосодержащего сырья с одновременным сохранением качественных характеристик морфологической структуры волокон.

Проводя сравнение МФУ древесных и недревесных волокон, можно предположить, что недревесные волокна будут легче поддаваться размолу и фибрилляции, поскольку значение угла не превышает  $20^\circ$ .

Коэффициент Рункеля, как показатель качества волокнистого сырья, предопределяющий способность растительных волокон к размолу, говорит о пригодности недревесных волокон в качестве альтернативного источника сырья для производства целлюлозно-бумажной продукции.

### **1.3 Особенности размола волокнистой массы из недревесного целлюлозосодержащего сырья**

Размол является одной из важнейших технологических операций, определяющей свойства готовой продукции. Этот процесс наиболее энергоемкий в бумажном производстве, на его осуществление расходуется до 60-70 % энергии от общего потребления при изготовлении бумаги [52].

Назначение размола – придание волокнам определенной структуры и размеров по длине и толщине, гибкости и пластичности, необходимой степени гидратации для обеспечения хорошего формования (просвета) и заданных свойств

бумаги. При размоле в присутствии воды волокна не только подвергаются механическому воздействию, но и изменяются их коллоидно-химические свойства. Волокна становятся более гибкими, эластичными, жирными на ощупь, труднее обезвоживаются. Механические процессы вызывают измельчение волокон и формируют структуру бумаги, тогда как коллоидно-химические явления обеспечивают связь волокон в бумаге [51-53].

Эффект размола заключается в структурных изменениях, напрямую влияющих на свойства волокнистой массы и вызывающих отличия у размолотых и необработанных волокон [54]. Эти различия выражаются в следующих эффектах:

*Внешняя фибрилляция.* Внешняя фибрилляция заключается в отделении клеточных стенок от волокна, что увеличивает внешнюю удельную поверхность волокон и количество свободных гидроксильных групп на их поверхности. Фибриллы, полученные в результате внешней фибрилляции, выполняют роль коротковолокнистой фракции и придают бумажным листам определенные прочностные характеристики. Этот процесс особенно выражен при размоле МВК, где он играет более важную роль, чем при размолу МНК [55, 56].

*Внутренняя фибрилляция.* Увеличение внутренней фибрилляции происходит в результате разрыва водородных связей между структурными элементами целлюлозных волокон (микро- и макрофибриллами) молекулами воды. Это в свою очередь позволяет проникать молекулам воды внутрь размолотых целлюлозных волокон, что приводит к увеличению набухания и повышенной деформируемости волокон [52, 54, 56, 57].

*Образование мелочи.* Мелочь является одним из компонентов бумажного листа. Процесс механической обработки (размола) приводит к образованию небольших отдельных элементов волокон, чьи размеры обычно составляют  $\leq 0,2$  мм. Мелкие частицы делятся на две группы. К первой относятся хлопьевидные или крупные частицы, с небольшим соотношением длины к ширине, богатые лигнином и имеющие низкий потенциал связываемости. Эти

частицы отрицательно влияют на механические свойства бумаги, поскольку препятствуют образованию связей между волокнами.

Вторая группа включает гибкие и хорошо набухшие частицы, богатые целлюлозой, которые имеют большое соотношение длины к ширине и высокий потенциал связываемости, что способствует повышению прочности бумаги.

В случае химически обработанной волокнистой массы существует еще одна классификация мелочи. Она также делится на два вида: первичная мелочь (присутствует в волокнистой массе до размола), вторичная мелочь (появляется в волокнистой массе после размола) [56].

Подвижность мелких частиц, небольшие размеры, хорошее набухание и химическая совместимость позволяют заполнять пустоты между волокнами в местах соединения. Предполагается, что мелкая фракция уменьшает концентрацию напряжений в соединенных областях и приводит к их более равномерному распределению [58].

*Укорачивание волокон.* Ещё одним эффектом размола является укорачивание волокна посредством его рубки. Принято считать, что этот эффект оказывает негативное влияние на прочностные характеристики бумажной продукции. Положительным свойством этого процесса является улучшение формования бумажного полотна, поскольку считается, что в процессе отлива бумаги длинные волокна будут способствовать флокуляции [56, 59].

*Скрученность и изогнутость волокон.* Размол может вызвать как увеличение, так и уменьшение скрученности и изогнутости волокна. Скрученность в основном влияет на разрывную прочность и способность связываться волокнам друг с другом. Сильно перекрученные волокна имеют низкое сопротивление разрыву, но более высокое сопротивление раздиранию, что объясняется неравномерным распределением напряжений по длине скрученного волокна. Деформированные волокна переносят напряжение на большую площадь и большее количество связей, а также требуется большая энергия для выпрямления и частичного или полного разрыва связей между волокнами.

Изогнутые волокна имеют тенденцию формировать лист, который имеет более высокое сопротивление излому, чем лист, образованный из прямых волокон [56, 60, 61].

Вышеперечисленные эффекты размол обусловлены такими факторами, как концентрация волокнистой массы, частота вращения ротора дисковой мельницы, межножевой зазор, вид размалывающей гарнитуры и др. Из них концентрация волокнистой массы является решающим фактором, поскольку она влияет на эффективность обработки, энергопотребление и, в конечном итоге, на качество волокнистой массы. Исследования показали, что различная концентрация целлюлозы влияет на энергопотребление и эффективность размол как при переработке МВК, так и МНК [55, 61].

Размол проходит при различных концентрациях: низкой, средней и высокой. При низкой концентрации волокнистая масса представляет собой двухфазную суспензию, переходящую при средней и высокой концентрации в трехфазную гетерогенную смесь воды, волокон и воздуха. При изменении концентрации от низкой к высокой характер контактов волокон меняется от случайных столкновений к вынужденным, а затем к постоянным контактам. Таким образом, волокнистые суспензии демонстрируют широкий диапазон поведения: от жидких гетерогенных суспензий с низким процентным содержанием волокон до прерывистых трехфазных смесей влажных волокон в газе [62].

При выборе концентрации волокнистой массы необходимо учитывать как свойства полуфабриката, так и желаемые характеристики готовой продукции.

Так, например, для размол коротковолокнистой массы из листовых пород древесины рекомендуют применять размол МВК, поскольку одним из основных свойств данного процесса является минимальное укорачивающее воздействие на волокно, что вызвано увеличением толщины волокнистой прослойки между размалывающими поверхностями [63, 64].

Исследователи также выделяют ряд других положительных свойств размол МВК:

- Вследствие усиления межволоконных сил трения повышается степень набухания, гибкость, пластичность, внутреннее и внешнее фибриллирование [64].

- Сохранение исходной длины волокна позволяет получить полуфабрикат с более высоким показателем прочности [65].

- Размол при низкой и высокой концентрации имеет разный характер фибрилляции. Так, при размоле МНК на поверхности волокон образуются тонкие нитевидные фибриллы из вторичного слоя S2, при размоле МВК в свою очередь образуются широкие лентообразные фибриллы из вторичного слоя S2 [66].

- При размоле МВК в большей степени развивается внешнее фибриллирование, что обеспечивает оптимальное развитие внешней удельной поверхности по отношению к прочности волокна. За счёт увеличения удельной поверхности волокна усиливается межволоконная связь [65].

- Образование мелкой фракции при размоле МВК происходит за счёт отделения мелких пучков фибрилл. Масса, обработанная при высокой концентрации, имеет меньшее содержание мелочи, чем при обработке с низкой концентрацией [65].

- При размоле МВК снижаются потери энергии на холостой ход, так как доля гидравлической составляющей в волокнистой суспензии снижается [55, 63, 66-73].

Рейзинь Р.Э. в своем исследовании приводит ряд размалываемости различного волокнистого сырья:

*Рами> лен> хлопок> полуцеллюлоза> соломенная целлюлоза>сульфатная небеленая целлюлоза>сульфатная беленая целлюлоза>сульфитная небеленая целлюлоза>сульфитная беленая целлюлоза> лиственная сульфитная беленая целлюлоза.*

Автор считает, что способность к размолу увеличивается от первого наименования к последнему, тем самым указывая на то, что лиственная сульфатная беленая целлюлоза поддается размолу лучше всего, а рами обрабатывается с наибольшими усилиями [72].

Рейзинь Р.Э. объясняет ряд размалываемости особенностями морфологической структуры волокна: волокна древесной целлюлозы размалываются легче, так как их строение несколько проще. После снятия первичного слоя открывается вторичный с весьма просто расположенными фибриллами. Фибриллы же вторичных слоев лубяных волокон и хлопка сильно переплетены и поэтому трудно отделимы. Целлюлоза из лиственной древесины размалывается легче целлюлозы из хвойной древесины, так как элементы строения первой по размерам мельче, стенки тоньше, особенно легко отделяется первичная оболочка волокон лиственной древесины [72].

Однако Матвеев Б.П., Иванов С.Н. и Щеглов И.М. утверждают обратное. Они высказывают мнение, что недревесная волокнистая масса подвергается размолу значительно проще, чем масса из древесины. Так, Иванов С.Н. указывает на то, что благодаря почти параллельному к оси волокна расположению фибрилл вторичной клеточной стенки, волокна льняной и конопляной полумассы легко расщепляются и фибриллируются при размолу, образуя жирную массу. Кроме того, получаемая из них бумага отличается высокой механической прочностью и эластичностью [51, 73, 74].

Натуральные волокна характеризуются широким разбросом механических свойств, что обычно объясняется методами, используемыми для испытаний одиночных волокон на растяжение и расчета их механических свойств, их морфологией, структурой и химическим составом волокон, зрелостью растения, положением волокна в растении, подготовкой волокон (вымачивание или декорткация), условиями окружающей среды (температура и влажность) и условиями хранения.

Отмечается, что прочность и жесткость натуральных волокон во многом зависит от их диаметра. Доказано, что с увеличением диаметра уменьшается предел прочности на растяжение для волокон льна, конопли, бамбука, джута и сизаля. Это объясняется наличием и, в частности, размером микроскопических дефектов внутри волокон. Чем больше дефект, тем ниже прочность, поэтому при увеличении диаметра волокна увеличивается вероятность наличия критического

дефекта, что приводит к более высокой вероятности уменьшения прочностных свойств [75].

Считается, что лубяные волокна льна и технической конопли являются превосходным сырьем для производства бумаги. Клеточные стенки этих растений легко разрушаются и благодаря большому диаметру люмена имеют тенденцию сплющиваться в ленты во время формирования бумажного листа, тем самым обеспечивая хороший контакт между волокнами и, следовательно, обладают хорошими прочностными характеристиками [41].

При этом исследователи отмечают, что разрушение первичной стенки и слоя  $S1$  у волокна льна требуют значительных усилий при размоле. Однако когда эти слои будут разрушены, степень помола волокнистой массы будет быстро увеличиваться, а диаметр волокон быстро уменьшаться за счёт образования наружных фибрилл.

Кенаф, имея схожую со льном структуру, напротив размалывается быстрее за счёт рыхлости слоя  $S2$  вторичной стенки. Благодаря этому волокна склонны к внутреннему фибриллированию. Однако из-за большого МФУ слоя  $S2$  трудно получить продольно отслоившиеся фибриллы [76].

Аксельрод Л. с коллегами провела исследования по размолу волокнистой массы из лубяных волокон конопли, обработанных сульфатным способом. Сравнивались показатели как не размолотой волокнистой массы, так и размолотой. Эксперимент подтвердил важность процесса размола для улучшения механических характеристик готовых изделий. Было доказано, что бумага из размолотого сырья имеет большее сопротивление разрыву. Авторы объясняют это увеличением фибрилляции волокна, что позволило образовать новые физические контакты между волокнами и тем самым укрепить их связь [77].

Для улучшения условий обработки длинных недревесных волокон Бейкер К. отмечает, что необходимо использовать низкоскоростные конические мельницы и использовать низкую концентрацию массы, чтобы избежать спутывания волокон и образования комков в зоне размола [78].

Делибас К. и Трасс О. провели сравнительное исследование по переработке конопляной пеньки (в композиции с сульфатной бленой хвойной целлюлозой) и черной ели, обработанной сульфатным способом, в экспериментальной мельнице «*Szego*». Конструкция мельницы схожа с конструкцией фротапульпера, отличающаяся тем, что вместо двух размалывающих шнеков их установлено четыре. Результаты исследования показали, что из технической конопли получается длиноволокнистая масса, что в результате приводит к увеличению разрывной длины готовой бумаги [79].

Обширное распространение получили исследования по размолу коротковолокнистого недревесного целлюлозосодержащего сырья, например, бамбука, рисовой или пшеничной соломы.

Так, например, исследователи утверждают, что внутренняя фибриляция в бамбуковых волокнах развивается значительно быстрее, чем в древесной массе. Это связано со структурой растения, поскольку бамбук состоит из тонкостенных ячеек, которые легко разрушаются. Присутствие этих мелких частиц имеет тенденцию усиливать связи между волокнами при формировании бумажного листа. Также отмечается, что набухание у волокон бамбука происходит снаружи за счёт маленького просвета, тогда как у древесных волокон набухание происходит изнутри [80].

Саини С. с коллегами провел исследование по размолу рисовой соломы с целью последующего изготовления из нее одноразовой картонной посуды. Волокнистая масса была размолота до 40 °ШР и подвергнута сульфатной варке. Показано, что полученная продукция по своим физико-механическим характеристикам удовлетворяет требованиям стандарта ISO 1397:1990. Дополнительная обработка изделия для водо- и жиростойкости позволила получить изделия, готовые к использованию [81].

Одной из ключевых особенностей размола коротковолокнистого недревесного целлюлозосодержащего сырья (банановые псевдостебли, стебли кукурузы, рисовая и пшеничная солома) является то, что оно содержит большое количество мелких частиц. Как следствие, это увеличивает потенциал

связываемости волокон при формировании бумажного листа даже в неразмолотом состоянии и демонстрирует высокие показатели прочности [41].

Что касается размола волокнистой массы при высокой концентрации, то информации об этом в настоящее время не так много.

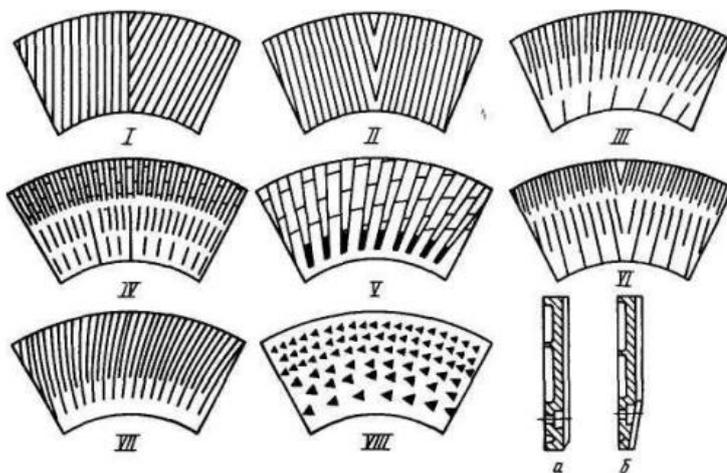
В исследовании, проведенном в Китае, [82] размолу подвергалась волокнистая масса из табачных стеблей концентрацией 10 %. Доказано, что размол оказывает существенное влияние на морфологию волокон. Сканирующая электронная микроскопия показала плотное переплетение волокон, что свидетельствует о значительной фибрилляции. К тому же промежутки между волокнами были заполнены фибриллярной мелочью, что благотворно повлияло на прочность бумаги.

#### **1.4 Конструктивные особенности рабочих органов размалывающих машин для обработки недревесного целлюлозосодержащего сырья при высокой концентрации**

Наиболее широко используемым оборудованием для размола как из древесного, так и из недревесного целлюлозосодержащего сырья являются дисковые мельницы, относящиеся к классу машин ножевого размола. Это обусловлено рядом факторов: простота конструкции, компактность оборудования, удобство в обслуживании, большое разнообразие ножевых гарнитур и их легкая смена, высокая производительность и эффективность размола, более широкая область применения (производство древесной массы из щепы, размол отходов древесно-массного производства), более низкий удельный расход энергии (благодаря меньшим гидродинамическим потерям), возможность размола массы высокой концентрации, большая единичная производительность [73].

Традиционно гарнитуры дисковых мельниц изготавливают в виде секторов, которые закрепляются на поверхности несущих дисков ротора и статора, а также в виде цельных колец для мельниц с консольным расположением диска. Выбор конфигурации диска основывается на экспериментальных данных. Элементами,

которые влияют на эффективность работы, являются: толщина ножей и расстояние между ними, углы наклона ножей к радиусу, наличие и расположение перегородок в каналах между ножами, форма ножей [83, 84].



I – параллельное однонаправленное; II, VI – параллельное разнонаправленное (зеркальное); III, IV, V – расходящиеся ножи: под углом к радиусу (III, V) и радиальные (IV); VII – спиральное; VIII – шипообразная гарнитура; а – сечение гарнитур I, II, III типов для массы низкой концентрации; б – сечение гарнитур IV, V, VI типов для массы высокой концентрации

Рисунок 1.5 – Варианты расположения ножей на гарнитурах дисковых мельниц

Успешному внедрению размола волокнистой массы высокой концентрации препятствуют проблемы, связанные с затрудненным прохождением массой зоны размола. К их числу относятся: забивание мельницы массой, низкий прирост степени помола при однократном прохождении волокнистого материала через размалывающий аппарат, относительно высокий удельный расход энергии, высокая температура массы в зоне размола и другие.

Основным побудителем движения в мельнице является центробежная сила, развиваемая вращающимся диском, и направленная на преодоление сил сопротивления прохождению волокнистым материалом зоны размола. В тех случаях, когда центробежная сила преобладает над силами сопротивления, размол проходит в нормальных условиях. В противном случае происходит забивание дисков массой, запрессовывание массы в каналах гарнитуры заподлицо с рабочей поверхностью ножей, отжим и прессование массы на входе в мельницу.

Появление воды в воронке шнекового питателя, повышение нагрузки на его двигатель, некоторое снижение нагрузки на главном двигателе мельницы, уменьшение производительности размалывающего аппарата и быстрый разогрев торцевой крышки могут служить признаками забивания мельницы массой. Забивание мельницы массой, как правило, приводит к останову размалывающего аппарата на некоторое время, необходимое для удаления уплотненного слоя массы, чистки ножевых дисков и других операций. Забивание мельницы массой может привести к более серьезным последствиям, например, выходу из строя привода шнекового питателя, поломке шнека и т.д. [73, 85].

Роль ножей при размоле заключается в том, чтобы предотвратить проскальзывание волокон по рабочей поверхности дисков. Легоцкий С.С. и Гончаров В.Н. высказали мнение, что конфигурация ножей не оказывает такого влияния на процесс, как при размоле МНК, но их роль заключается в предотвращении проскальзывания волокон по рабочей поверхности дисков. Для проверки этой гипотезы в ЛТИ ЦБП были проведены испытания по размолу с помощью гладкого безножевого диска. Было доказано, что размол таким образом осуществить практически невозможно. Очевидно, рабочие кромки ножей сохраняют определенные функции размола за счёт неполного заполнения канавок гарнитуры, а также сжатия массы в канавках ниже уровня рабочей поверхности ножей. В этом случае смысл рабочих кромок ножей заключается в увеличении сопротивления проскальзыванию волокон относительно рабочей поверхности дисков [64].

Ковалев В.И., Ушаков В.А. [63, 86] к функциям ножей при размоле относят не только транспортирование волокнистой массы по зоне размола, а и ее непосредственную разработку.

Под воздействием окружной скорости диска ротора в процессе размола волокна подвергаются циклической деформации, которая должна вызвать расслоение клеточной стенки [84].

Окружная скорость режущей кромки ножевого диска образована двумя составляющими: нормальной и касательной. Нормальная составляющая связана с

преобладанием рубящего и режущего воздействия на массу. Касательная составляющая вызывает «расчесывание» и фибриллирующий эффект [86].

Принимая во внимание строение лубяных волокон (см. стр. 19), в процессе размола должны превалировать касательные усилия, что позволит не разрушать волокно поперек, а получить длинные продольные фибриллы.

Учитывая вышеуказанные особенности, исследователи вывели ряд рекомендаций, по конструкциям дисковых мельниц и ножевых гарнитур для размола МВК:

- рабочая поверхность ножей гарнитуры должна выполняться профилированной с целью выравнивания давления по радиусу;

- гарнитура должна иметь не менее трех зон размола, из которых заходная часть выполняется более развитой, что необходимо для обеспечения транспортирующей способности мельниц;

- в канавках гарнитуры, в средней и периферической зонах, должны располагаться перегородки, высота которых к периферии постепенно увеличивается до высоты ножей;

- толщина ножей и расстояние между ними с целью более качественной разработки волокна должны уменьшаться от центра диска к периферии;

- масса из зоны размола должна иметь свободный выход [64, 85];

- величина зазора между дисками должна находиться в пределах нескольких миллиметров, и она зависит от исходной концентрации и скорости вращения диска [73];

- при увеличении ширины пазов и ширины ножей зазор между дисками может быть уменьшен [73];

- для продвижения массы к зоне размола необходимы внешние побудители движения, например, питающий шнек [73, 87].

Однако, несмотря на значительное влияние, которое оказывает вид рисунка размалывающей гарнитуры, в настоящий момент нет единой точки зрения по поводу целесообразности конструирования особого вида рисунка гарнитуры для размола МВК. Поэтому исследование влияния отдельных конструктивных

параметров ножевой гарнитуры на процесс размола волокнистого материала высокой концентрации, несомненно, остается актуальным вопросом [73].

Параметром размалывающей гарнитуры, которому уделяют все больше внимания, является форма ножей. По этому признаку конструкции можно разделить на гарнитуры с прямолинейной и криволинейной формой. Отдельно также можно выделить комбинацию этих форм.

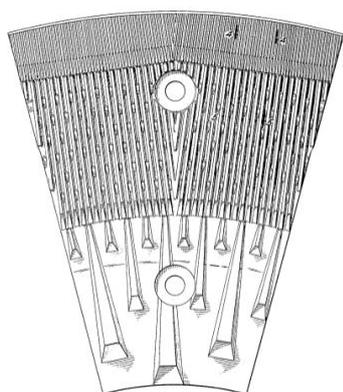


Рисунок 1.7 – Гарнитура Р. Шука

Гарнитура, разработанная Р. Шуком (рис. 1.7) [88], направлена на обработку волокнистого полуфабриката при высокой концентрации. Предложенная конструкция имеет 3 зоны размола различной конфигурации и направлена главным образом на равномерную обработку волокнистого сырья с преимущественной фибрилляцией и минимальным образованием коротких обломанных волокон. В соответствии с вышеуказанными рекомендациями, высокое качество помола здесь достигается за счёт изменения ширины межножевых канавок и использования нескольких зон размола.

Гарнитура, разработанная Ю.Д. Алашкевичем, В.И. Ковалевым и др. (рис. 1.8), решает задачу интенсификации процесса путем обеспечения оптимального режима прохождения волокнистого материала через размалывающую полость за счёт снижения местных сил сопротивления и отсутствия забивания и напрессовывания межножевых канавок [89]. Однако авторы не приводят информации о силовом воздействии ножевых размалывающих кромок на волокнистый полуфабрикат, и потому остается неясным, за счёт чего достигается интенсификация процесса размола.

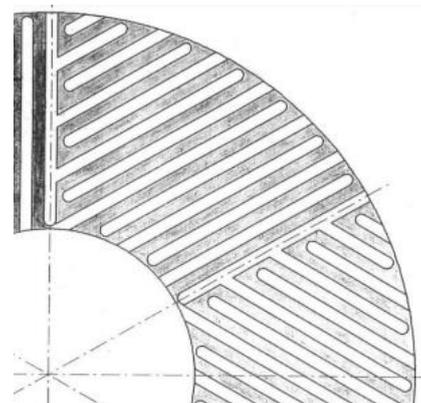


Рисунок 1.8 – Гарнитура Ю.Д. Алашкевича, В.И. Ковалева

Еще одним вариантом конструкции гарнитуры с прямолинейной формой ножей является конструкция Л. Жинграса, показанная на рисунке 1.9 [90].

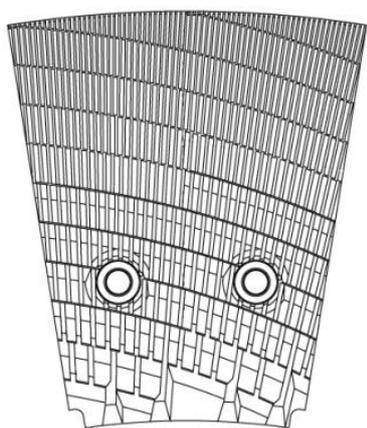


Рисунок 1.9 – Гарнитура  
Л. Жинграса

Ее проектирование было направлено на решение таких вопросов, как энергоэффективность процесса размола и равномерная обработка волокнистой массы.

Рисунок гарнитуры представлен прямолинейными ножами, расположенными по дуге, с уменьшающейся шириной межножевых канавок от входной к выходной кромке.

Здесь, как и в первом варианте, особенностью рисунка гарнитуры является постепенно изменяющаяся геометрия. Гарнитура имеет спиральную непрерывную размалывающую зону, но при этом непонятно, за счёт чего достигается улучшение качества обработки волокнистого полуфабриката.

Размалывающая гарнитура, разработанная в Южно-китайском технологическом университете (рис. 1.10), имеет окружную форму ножей и канавки между ними удерживания массы в зоне размола. Утверждается, что описываемая геометрия ножей повторяет траекторию движения массы по зоне размола, тем самым уменьшая перегибы и скручивания волокон. Но исследователи не приводят достоверных сведений о том, каким именно образом происходит перемещение полуфабриката, какое силовое воздействие оказывает гарнитура [91].

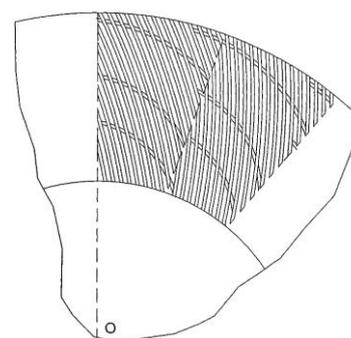


Рисунок 1.10 – Гарнитура  
Южно-китайского  
технологического  
университета

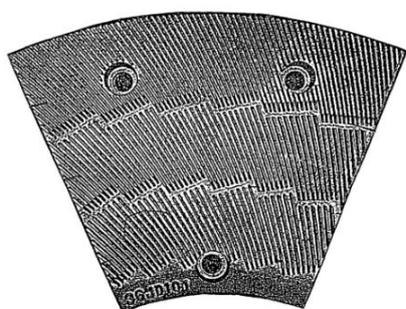


Рисунок 1.11 – Гарнитура П.  
Антенштейнера

П. Антенштейнер предлагает такую конструкцию гарнитуры (рис. 1.11), которая также состоит из трех зон размола. Особенностью рисунка является то, что режущие кромки имеют форму логарифмической спирали. А при пересечении ножей ротора и статора они обеспечивают постоянный угол скрещивания.

Автор в патенте [92] приводит математическое описание формы ножевого выступа и указывает на то, что такая форма предотвращает забивание массой межножевых канавок при размоле МВК. При этом П. Антенштейнер не приводит данных о силовом воздействии размалывающей гарнитуры на волокнистый полуфабрикат, которые могли бы подтвердить эффективность предложенного решения.

Существуют также комбинированные варианты исполнения ножевых гарнитур, которые сочетают в себе не только несколько размалывающих зон, разную ширину межножевых канавок или наличие перегородок, но и исполнение режущих кромок как прямолинейной, так и криволинейной формы.

Например, конструкция гарнитуры, представленная фирмой Andritz (рис. 1.12), имеет ножевые выступы изогнутой ближе к периферии диска формы. Такая геометрия направлена на удержание массы в зоне размола. При том важно отметить, что наибольший удерживающий эффект достигается за счёт зубчатых выступов на поверхности режущих кромок, а не благодаря изогнутой форме ножей [93].

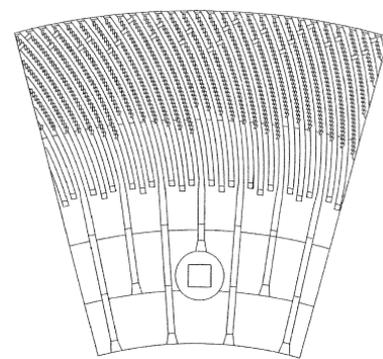


Рисунок 1.12 – Гарнитура фирмы Andritz

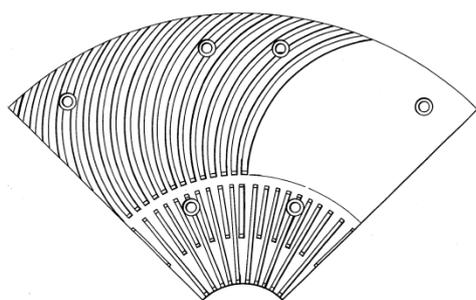


Рисунок 1.13 – Гарнитура Ф.Дж. Лейдера, Й. Риса

Другая комбинированная размалывающая гарнитура, разработанная Ф. Дж. Лейдером и Й. Рисом (рис. 1.13), направлена на равномерную обработку волокнистой массы. Как объясняют создатели, этот эффект достижим благодаря сочетанию ножей прямолинейной и окружной формы и двум зонам размола.

Авторами даются рекомендации по геометрическому построению рисунка гарнитуры, но при этом отсутствует взаимосвязь предлагаемых параметров с их влиянием на равномерность обработки волокнистого полуфабриката [94].

Особенности размола МВК вызывают ряд трудностей при проектировании рисунка размалывающей гарнитуры. Зачастую при разработке решается

ограниченное количество задач, решение которых не влечет за собой значительного улучшения обработки волокнистого материала. Вместе с тем исследователи, изменяя угол наклона ножей и их форму или изменяя ширину межножевых канавок и количество зон размола, не уделяют внимания влиянию этих параметров на силовое воздействие размалывающего диска. При этом величина усилий, возникающих на режущих кромках, является важной характеристикой гарнитур.

В работе Ушакова А.В. (рис. 1.14) [95, 96] предложено обоснование силового воздействия размалывающей гарнитуры при размоле МВК за счёт изменения формы и угла наклона ножей. Доказано, что окружная форма ножей по сравнению с прямолинейной позволяет постоянно увеличивать угол между режущей кромкой и касательной к ней, проведенной из центра диска таким образом, что силовое воздействие (касательное усилие), отвечающее за транспортирование массы по зоне размола и преимущественное фибриллирование волокон, постоянно увеличивается.

При этом исследование выполнено на листовенной беленой целлюлозе, имеющей значительно меньшую грубость, чем недревесные волокна. Поэтому неясно, каким должен быть угол наклона ножей и их форма и какой должна быть величина касательного усилия, которой будет достаточно для качественной обработки недревесного волокнистого сырья при высокой концентрации.

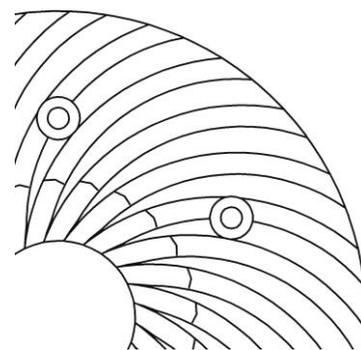


Рисунок 1.14 – Гарнитура А.В. Ушакова

## Выводы к первой главе

На основании анализа литературных данных о характеристиках недревесных растений, а также о возможности их использования в качестве волокнистого сырья можно сделать следующие выводы:

1. Из большого разнообразия источников недревесных растительных волокон, приведенных в аналитическом обзоре, в основном доступностью для дальнейшей переработки обладают технические культуры и отходы сельского хозяйства, наиболее пригодными из которых для использования в ЦБП на территории России считаются техническая конопля и лен.

2. Каждый вид недревесного целлюлозосодержащего сырья требует индивидуального подхода при обработке с учетом морфологического строения, прочностных характеристик и грубости волокна, в частности, для эффективной обработки технической конопли и льна необходимо увеличение силовых нагрузок в зоне размола, обеспечивающих при этом максимальные значения касательных усилий, что должно позволить получить хорошо фибриллированный волокнистый полуфабрикат с высокими бумагообразующими характеристиками.

3. Необходимые условия для обработки недревесного целлюлозосодержащего сырья могут быть созданы при размоле волокнистой массы высокой концентрации, для чего будет необходима разработка новой конструкции ножевой гарнитуры.

4. При использовании гарнитуры с криволинейной формой ножей с преобладанием касательных усилий в зоне размола будет превалировать фибриллирующее воздействие над рубящим с увеличением транспортирующей способности гарнитуры в зоне размола.

## ГЛАВА 2. Теоретическая часть

Проведённый аналитический обзор показал, что размол недревесных целлюлозосодержащих растений при высокой концентрации затруднителен. Сложности связаны как с затрудненным прохождением массы через зону размола и образованием густых скоплений волокон в межножевых канавках с забиванием последних, так и недостаточным силовым воздействием со стороны активных стенок ножевых выступов, способствующим продольному расщеплению недревесных волокон.

Для эффективной обработки недревесного волокнистого материала необходимо обеспечить:

- свободную проходимость массы через зону размола;
- повышение силового воздействия со стороны активных стенок ножевых выступов, через массу, к пассивным стенкам;
- увеличение связи значения межножевого зазора (толщины волокнистой прослойки между ножевыми выступами дисков ротора и статора) с межволоконными силами трения, степенью набухания и фибриллирования волокон, а также со снижением числа циклов прохождения массы через полость размола;
- уменьшение величины силы сопротивления продвижению массы (за счёт линейных сопряжений стенок канавок с их основанием) ведущей к скоплению и забиванию ею межножевых канавок заподлицо с поверхностью размалывающей гарнитуры.

Для обеспечения эффективной обработки волокнистого полуфабриката из недревесного целлюлозосодержащего сырья при высокой концентрации необходимо решить ряд задач (рис. 2.1):

- равномерное и последовательное увеличение угла касательной  $\beta_x$  от точек  $A_x$  и  $A_y$  пересечения активной кромки 3 кругового ножевого выступа и её касательных  $t - t^{Ax}$ ,  $t - t^{Ay}$  с входными круговыми кромками, соответственно,

фаски, полости размола, до точки пересечения  $B$  и касательной  $t - t^B$  к ней с круговой кромкой выхода 4 из полости размола;

– определение тангенциальной составляющей  $P_\tau^{Ay}$  окружной силы  $P_O^{Ay}$  вдоль  $t - t^{Ay}$ , достаточной для продвижения массы от входа в зону размола, к выходу из неё.

Реализация поставленных задач осуществлялась по следующим этапам:

- постановка исходных данных;
- вывод общего алгоритма угла касательной  $\beta_x$ ;
- определение значения угла касательной  $\beta_x$  при определённых исходных данных;
- характер изменения угла касательной  $\beta_x$  от входа 2 в полость размола, до выхода 4 из неё;
- характер изменения касательной составляющей  $P_\tau^{Ax}$  окружного усилия  $P_O^{Ax}$  по ходу изменения угла касательной  $\beta_x$  от входа 2 в полость размола, до выхода 4 из неё;
- анализ соотношения составляющих движущих сил  $P_\tau^{AY}$  и  $P_\tau^{BВЫХ}$ ;
- сравнение соотношения сил  $P_\tau^{Ay}$  и  $P_\tau^B$ ;
- сравнение угла касательной  $\beta_x$  с углом трения материала о стенку ножевого выступа.

#### *Постановка исходных данных*

Изменение морфологической структуры волокон в процессе размола зависит не только от таких факторов, как концентрация волокнистой массы, частота вращения ротора и величина зазора между ножами ротора и статора, но и от конструкции размалывающей гарнитуры.

Проектируя размалывающее оборудование, необходимо разработать и теоретически обосновать такую геометрию ножей гарнитуры, которая обеспечит преобладание касательных усилий со стороны активных режущих кромок для минимизации рубки волокна с преимущественным его фибриллизацией и предотвращения забивания массой зоны размола.

На рисунке 2.1 в системе координат  $X - Y$  изображена фронтальная проекция единичной круговой активной кромки ножевого выступа диска ротора.

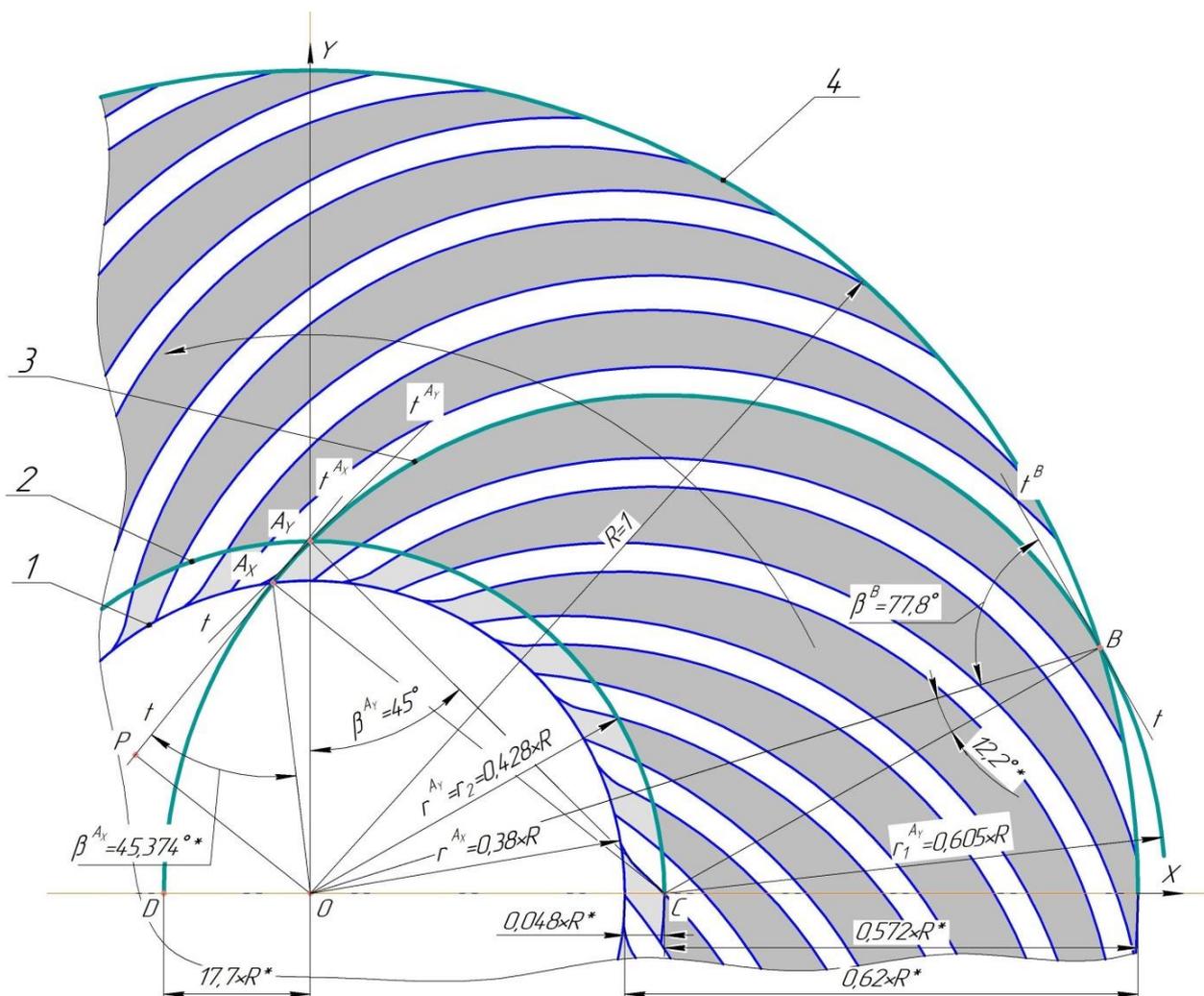


Рисунок 2.1 – Фронтальная проекция круговой активной кромки  $r^{A_{Bx}}$  единичного кругового ножевого выступа

Фронтальная проекция (рис. 2.1) включает:

- входную круговую кромку 1 в полость фаски с  $r^{Ax} = 0,38R$ ;
- входную кромку 2 в полость размола с  $r^{Ay} = r_2 = OC = OA_Y = a = b = 0,428R$ ;
- круговую режущую кромку 3  $A^YB$  с радиусом  $r_1^{Ay} = BC = CA_Y = o = 0,605R$ , проведённым из центра кривизны  $C$ , расположенного на оси абсцисс  $X$ ;

- центры  $C$  всех кромок 3 равномерно распределены на круговой кромке 2;
- круговую выходную кромку 4 из кольцевой зоны размола с  $R = OB = 1$ ;
- круговую стрелку, показывающую направление вращения диска ротора;
- площадь кольцевой поверхности размола диска ротора, ограниченную входной – 2 и выходной – 4 круговыми кромками;
- точку  $A_Y$ , лежащую на пересечении оси ординат  $Y$  с кромками 2 и 3;
- точку  $B$ , лежащую на пересечении круговых режущих кромок 3 с круговой кромкой 4 – выхода;
- касательные  $t - t^{Ax}$  и  $t - t^B$  к дуге  $A_YB$ , в точках  $A_Y$  и  $B$ ;
- входной угол  $\beta^X$ , образованный касательной,  $t - t^{Ax}$  и радиусом  $OA_X$ ;
- выходной угол  $\beta^B$ , образованный касательной  $t - t^B$  и радиусом  $OB$ ;
- справочные размеры, отмеченные звездочками \*.

## 2.1 Вывод алгоритма угла касательной $\beta_X$

Используя параметры входной круговой кромки 2, выведем алгоритм угла  $\beta_X$ .

В прямоугольном треугольнике  $OA_XP$  эксцентриситет:

$$OP = OA_X \sin \beta_X \quad (2.1)$$

Следовательно,

$$\sin \beta_X = \frac{OP}{OA_X} = \frac{OP}{r^{Ax}}$$

$$\beta_X = \text{Arcsin} \frac{OP}{r^{Ax}} \quad (2.2)$$

Переходя от частного к общему, можно видеть, что от кромки 2 диска до кромки 4,  $OP$  изменяется вместе с углом  $\beta_X$  наклона касательной  $t - t^{Ax}$ , т.е.,

$$\sin \beta_X = \frac{OP}{r^{Ax}},$$

$$\beta_X = \text{Arcsin} \frac{OP}{r^{Ax}} \quad (2.3)$$

В уравнении (2.3) все параметры неизвестны. Определим  $r_X$  и  $\sin A_X$  из треугольника  $OA_XC$  по:

– теореме косинусов

$$r_X^2 = r_1^2 + r_2^2 - 2 \cdot r_1 \cdot r_2 \cdot \cos C \quad (2.4)$$

$$r^{Ax} = \sqrt{r_1^2 + r_2^2 - 2 \cdot r_1 \cdot r_2 \cdot \cos C} \quad (2.5)$$

– по теореме синусов

$$\sin A_X = \frac{r_2 \sin C}{r^{Ax}} \quad (2.6)$$

– подставив уравнение (2.5) в знаменатель правой части уравнения (2.6), получим

$$\sin A_X = \frac{r_2 \sin C}{\sqrt{r_1^2 + r_2^2 - 2 \cdot r_1 \cdot r_2 \cdot \cos C}} \quad (2.7)$$

– поскольку угол  $PA_XC$  равен  $90^\circ$  (рис. 2.1), то угол  $\beta_X$  будет равен:

$$\beta_X = 90 - A_X \quad (2.8)$$

$$\beta_X = 90^\circ - \text{Arcsin} \frac{r_2 \cdot \sin C}{\sqrt{r_1^2 + r_2^2 - 2 \cdot r_1 \cdot r_2 \cdot \cos C}} \quad (2.9)$$

Таким образом, для определения характера изменения угла  $\beta_X$  надо задаться:

- соотношениями значений  $r_1$  и  $r_2$  со значением  $R$  круговой кромки 4;
- диапазоном значений  $R - r$ , ограничивающим зону размола, на которой значение угла  $\beta_X$ , возрастает по зависимости 2.9.

*Определение значения угла  $\beta_X$*

Исходные данные для определения значения угла  $\beta_X$  имеют следующие значения:  $r^{Ax} = c = 38$  мм;  $r_1^{Ay} = BC = A_YC = A_XC = o = 60,5$  мм;  $r = r_2 = r^{Ay} = OC = OA_X = OA_Y = a = 42,8$  мм;  $R = OB = 100$  мм.

Вначале определим значение угла  $\beta^{Ax}$  по заданному радиусу  $r^{Ax}$ : из косоугольного треугольника  $OA_XC$ , в котором известны стороны  $a$ ,  $c$  и  $o$ :

По теореме косинусов:

$$\cos A_X = \frac{o^2 + c^2 - a^2}{2oc} = \frac{60,5^2 + 38^2 - 42,8^2}{2 \cdot 38 \cdot 60,5} = 0,711$$

$$A_X = 44,626^\circ; \beta^{A_X} = 90^\circ - A_X = 45,373^\circ$$

Затем определим значение угла  $\beta^{A_Y}$  по заданному радиусу  $r^{A_Y}$ :

В прямоугольном треугольнике  $OAC$  даны три стороны:  $OC$ ,  $OA_Y$ ,  $A_XC$ .

По теореме косинусов:

$$\cos A_Y = \frac{o^2 + c^2 - a^2}{2oc} = \frac{60,5^2 + 42,8^2 - 42,8^2}{2 \cdot 42,8 \cdot 60,5} = 0,711$$

$$A_Y = 45^\circ, \beta^{A_Y} = 90^\circ - A_Y = 45^\circ$$

Таким образом, значения угла касательной  $\beta_X$  на входе в зону размола составляет  $45^\circ$ .

## 2.2 Характер изменения угла $\beta_X$

Для определения угла наклона касательной  $\beta_X$  в направлении от центра вращения  $O$  к выходной кромке 4 решение будем вести по углу  $C$ .

В треугольнике  $OA_XC$  известны: сторона  $A_XC = O = 60,5$  мм;  $OC = a = 42,8$  мм; угол  $C$  задается. Необходимо найти сторону  $c$  и угол  $A_X$ .

По теореме косинусов, после подстановки заданного угла  $C$ , найдем  $c$ :

$$\begin{aligned} c &= \sqrt{o^2 + a^2 - 2oa \cos C} = \sqrt{60,5^2 + 42,8^2 - 2 \cdot 60,5 \cdot 42,8 \cdot \cos C} \\ &= \sqrt{5492,09 - 5178,8 \cdot \cos C} \end{aligned}$$

Затем определим угол касательной  $\beta^{A_Y}$ . Поскольку угол между касательной  $t - t^{A_Y}$  в произвольной точке  $A_Y$  и радиусом  $r^{A_Y}$ , проведенным из центра вращения диска  $O$  в эту точку, равен  $90^\circ$ , то угол  $\beta^{A_Y}$  определяется следующим образом:

$$\beta^{A_Y} = 90 - A_Y$$

Аналогичным образом определяем углы промежуточных точек на активной режущей кромке 3 от точки  $O$  на оси  $X$  до точки  $B$ , находящейся на выходной кромке размалывающего диска 4, путем поворота радиуса  $r_X$  на заданные углы.

Полученные результаты вносим в таблицу 2.1.

Таблица 2.1 - Характер изменения  $\beta_x$  в зависимости от  $\angle A_x$

0	$\angle C_x, ^\circ$	$r^{Ax}, мм$	$\angle A_x, ^\circ$	$\angle \beta_x, ^\circ$	$r_1, мм$	$r = r_2, мм$
1	0	17,7	0	90	0,605·R	0,428·R
2	10	19,798	22,049	67,951		
3	20	25,012	35,821	54,179		
4	30	31,735	42,402	47,598		
5	38,587	38	44,626	45,374		
6	40	39,05	44,79	45,21		
7	45	42,8	$\beta^{Ay} = 45$	$\beta^{Ax} = \beta^{Ay} = 45$		
8	50	46,51	44,824	45,176		
9	60	53,877	43,47	46,529		
10	70	60,999	41,249	48,755		
11	80	67,77	38,459	51,541		
12	90	74,109	35,277	54,723		
13	100	79,946	31,818	58,182		
14	110	85,225	28,159	61,842		
15	120	89,897	24,35	65,649		
16	130	93,92	20,432	69,568		
17	140	97,259	16,432	73,569		
18	150,52	100	12,162	77,838		

Используя данные таблицы 2.1, представим графически изменение угла  $\beta_x$  при движении вдоль дуги  $DA_xB$  активной стенки 3 единичного кругового ножевого выступа (рис. 2.2).

При размоле массы высокой концентрации из недревесного целлюлозосодержащего сырья значение угла  $\beta_x$  равномерно возрастает, от минимального на входе в зону размола, в точке  $A^Y$  (на рис. 2.2 точка 7), до максимального – на выходе из неё, в точке  $B$  (на рис. 2.2 точка 18).

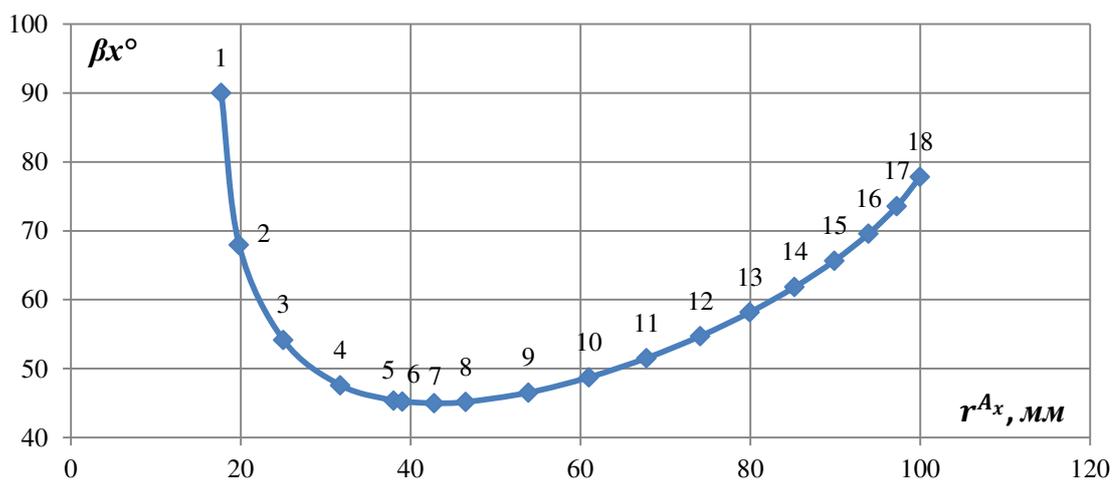


Рисунок 2.2 – График зависимости угла  $\beta_x$  от роста радиуса  $r_x$

Достоинством данного варианта является то, что, при ширине зоны размола, равной  $R - r = (1 - 0,428) \cdot R$  и при  $r_1 = 0,605R$ ,  $r_2 = 0,428R$ , значение угла  $\beta_x$  равномерно возрастает, от минимального –  $45^\circ$  в точке  $A^Y$ , до максимального –  $77,838^\circ$  в точке  $B$ . За счёт этого на волокнистую массу высокой концентрации, заполняющую межножевую канавку, возможно оказание силового воздействия, достаточного для её продвижения в направлении к выходной круговой кромке 4 размалывающего диска.

### 2.3 Характер изменения касательной составляющей $P_\tau^{Ax}$ окружного усилия $P_0^{Ax}$

Характер изменения касательной составляющей окружного усилия решаем на примере диска ротора размалывающей гарнитуры.

На рисунке:

- 2.3, (выполненном на базе рисунка 2.1), представлен фрагмент фронтальной проекции кольцевой размалывающей поверхности диска ротора с изображением активной стенки 2 кругового ножевого выступа в виде дуги  $A^YB$ ;
- 2.4 выполнен выносной элемент I;
- 2.5 выполнен выносной элемент II.



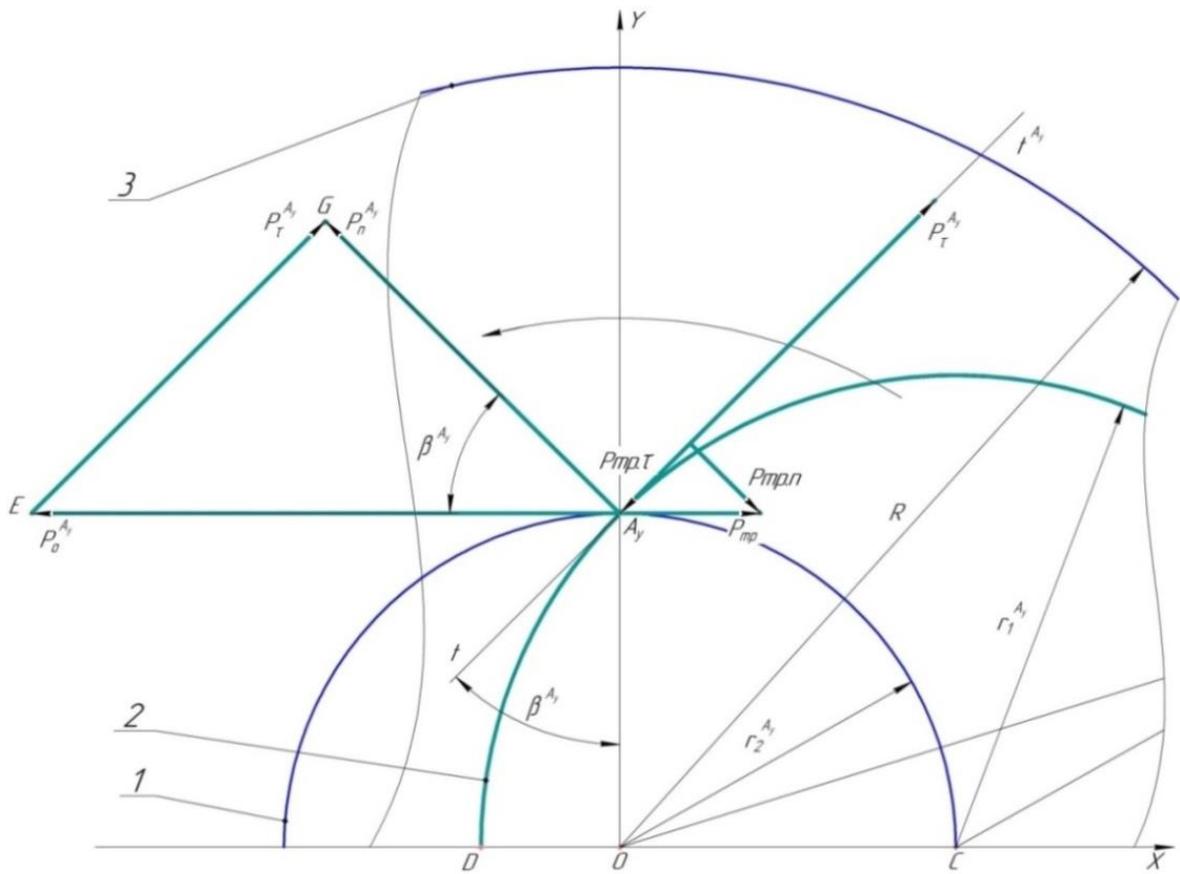


Рисунок 2.4 – Выносной элемент I

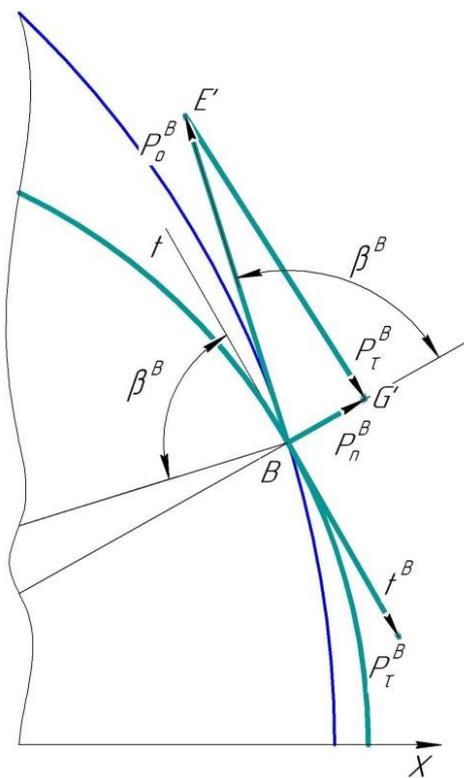


Рисунок 2.5 – Выносной элемент II

В силовом треугольнике  $BE'G'$  (рис. 2.5, выносной элемент II):

- $BG'$  является нормальной составляющей  $P_n^B$  силы  $P_0^B$ ;
- $E'G'$  является касательной составляющей  $P_\tau^B$  силы  $P_0^B$ .

Необходимо учесть ряд особенностей, влияющих на работу диска ротора:

а) первой особенностью является то, что от входа 1 в кольцевую размалывающую зону до выхода 3 из неё, значение:

- радиуса  $r_x^{Ax}$  увеличивается от минимального –  $r_2^{Ay}$ , в точке  $A_y$ , до

максимального –  $R$ , в точке  $B$ ;

– окружной силы  $P_O$ , приложенной в этих точках (вдоль касательных  $t - t^{A_Y}$  и  $t - t^B$ ), уменьшается, от максимума  $P_O^{A_Y}$  в точке  $A_Y$ , до минимума  $P_O^B$  в точке  $B$ ;

– крутящего момента  $M_{кр}$ , постоянно от входа в зону размола в точке  $A$ , до выхода из неё в точке  $B$  и составляет 12,7 Нм для электродвигателя марки АДМ100S2, т. е.

$$M_{кр} = P_O^{A_X} \cdot r_X^{A_X} = const$$

$$P_O^{A_X} = \frac{M_{кр}}{r_X^{A_X}} \quad (2.10)$$

– силы трения  $P_{тр}$  и её составляющих (противоположно направлены к силе  $P_O^{A_X}$  и её составляющим  $P_\tau^{A_X}$ ,  $P_n^{A_X}$ , в какой-то мере, компенсируют их) постоянны от точки  $A$  до точки  $B$ ;

б) второй особенностью является то, что поскольку на кромке 3 сила  $P_O^B$  минимальна, то решение ведём именно по ней, но при условии, что значение:

–  $P_O^B$  превышает значение силы трения  $P_{тр}$ , т. е.  $P_O^B > P_{тр}$ ;

– угла  $\beta^B$  должно превышать значение угла трения материала о стенки канавки в точке  $A_Y$  и угла трения между сжатыми волокнами;

–  $P_\tau^{A_X}$  (силы  $P_O^{A_X}$ ) должно превышать значение противодействующей касательной составляющей силы трения, т. е.  $P_\tau^{A_X} > P_{\tau_{тр}}$ ;

–  $P_\tau^B$  (силы  $P_O^B$ ) должно превышать значение противодействующей касательной составляющей силы трения, т. е.  $P_\tau^B > P_{\tau_{тр}}$ .

*Анализ отношения движущих сил  $P_\tau^{A_X}$ ,  $P_\tau^B$*

Определим значение движущих сил в зоне размола, приняв, что при движении массы по зоне размола участвуют как нормальные, так и центробежные силы.

Из треугольника  $A_YEG$  следует, что  $\frac{EG}{A_YE} = \frac{P_\tau^{A_Y}}{P_O^{A_Y}} = \sin \beta^{A_Y}$ ,  $P_\tau^{A_Y} = P_O^{A_Y} \cdot \sin \beta^{A_Y}$

тогда в любой точке  $A_X$  касательная составляющая  $P_\tau^{Ax} = P_O^{Ax} \sin \beta^{Ax}$ , или,

$$P_O^{Ax} = \frac{P_\tau^{Ax}}{\sin \beta^{Ax}} \quad (2.11)$$

заменив  $P_O^{Ax}$  в зависимости (2.11) на правую часть зависимости 2.10, получим

$$\frac{M_{кр}}{r_X^{Ax}} = \frac{P_\tau^{Ax}}{\sin \beta^{Ax}}. \quad (2.12)$$

Из (2.12) следует, что в точке  $A$

$$P_\tau^{Ax} = \frac{M_{кр} \cdot \sin \beta^{Ax}}{r_X^{Ax}}. \quad (2.13)$$

Из треугольника  $BE'G'$

$$\frac{E'G'}{E'B} = \frac{P_\tau^B}{P_O^B} = \sin \beta^B, \text{ или } P_\tau^B = P_O^B \sin \beta^B.$$

Тогда,

$$P_O^B = \frac{P_\tau^B}{\sin \beta^B} \quad (2.14)$$

Заменив  $P_O^B$  в 2.14 на 2.10, получим

$$\frac{M_{кр}}{R} = \frac{P_\tau^B}{\sin \beta^B} \quad (2.15)$$

Из (2.15) следует, что

$$P_\tau^B = \frac{M_{кр} \cdot \sin \beta^B}{R}. \quad (2.16)$$

Разделив (2.16) на (2.13), получим

$$\frac{P_\tau^B}{P_\tau^{Ax}} = \frac{\sin \beta^B \cdot r}{\sin \beta^{Ax} \cdot R} \quad (2.17)$$

Из зависимости (2.17) следует, что

$$P_\tau^B = P_\tau^{Ax} \cdot \frac{\sin \beta^B \cdot r}{\sin \beta^{Ax} \cdot R}. \quad (2.18)$$

В уравнении (2.18):

–  $\beta^{Ax}$  и  $\sin\beta^{Bx}$  возрастают в направлении от входной круговой кромки 1, до выходной круговой кромки 3, не пропорционально возрастанию  $r_x$ , за счёт чего в процессе возрастания их соотношение является величиной непостоянной;

– с учётом вышеизложенного, значение силы  $P_\tau^{Ax}$  изменяется, при движении от входной круговой кромки 1 с  $P_\tau^{Ax}$  до выходной круговой кромки 3 с  $P_\tau^B$ .

Приняв во внимание, что значение  $P_\tau$  непостоянно, и в процессе продвижения массы к выходу 3 в любой точке выше силы её трения (например,  $P_\tau^B > P_{\tau_{тр}}$ ), можно предположить, что значение действующей на волокнистую массу высокой концентрации, произвольной разности сил  $P_\tau^{Ax} - P_{\tau_{тр}}$  и минимальной разности сил  $P_\tau^B - P_{\tau_{тр}}$ , будет достаточным для продвижения этой массы в сторону выходной периферийной кромки 3 и выброса её из зоны размола.

При этом надо учесть, что такую же функцию выполняет и:

- нормальная составляющая  $P_n^B$  окружной силы  $P_O^B$ ;
- центробежная сила;
- окружная скорость и скорость выбрасывания массы, значение которых на выходной периферийной кромке 3 максимально.

*Сравнение соотношения сил  $P_\tau^B$  и  $P_\tau^{Ay}$*

Согласно уравнению (2.18) определим силовое воздействие касательных составляющих на выходе из зоны размола  $P_\tau^B$ . Сравним соотношение  $P_\tau^B$  и  $P_\tau^A$ , используя расчетные данные из таблицы 2.1.

Исходные данные для расчета:  $\beta_A = 45^\circ$ ;  $\beta_B = 77,838^\circ$ ;  $r = 42,8$  мм;  $R = 100$  мм. Подставив эти значения в уравнение (2.18), получим:

$$P_\tau^B = P_\tau^{Ay} \cdot \frac{\sin \beta^B \cdot r}{\sin \beta^{Ay} \cdot R} = P_\tau^{Ay} \cdot \frac{\sin 77,838 \cdot 42,8}{\sin 45 \cdot 100} = 0,581 \cdot P_\tau^{A_{ОКР}}, \text{ или } 58,1\% P_\tau^{A_{ОКР}}.$$

Перспективы практического использования зависимости (2.18) связаны с её последующим анализом и дальнейшими исследованиями.

Значение угла касательной  $\beta_x$  должно равномерно возрастать от минимального на входе в зону размола до максимального – на выходе.

Для этого необходимо задаваться шириной кольцевой зоны размола:  $R - r = (1 - 0,428)R, r_1 = 0,605R, r_2 = 0,428R$ , за счёт чего на её площади на волокнистую массу высокой концентрации возможно оказание силового воздействия, достаточного для ее продвижения по канавке в направлении к выходной круговой кромке диска ротора.

Значения окружной силы  $P_O$  и её касательной  $P_\tau$  и нормальной  $P_n$ , составляющих при движении от входной круговой кромки до выходной, уменьшаются. Движущая сила на выходе составляет 58,1% от движущей силы на входе в размалывающую кольцевую полость, т. е.  $P_\tau^B = 58,1 \cdot P_\tau^{AY}$ . Значение окружной силы  $P_\tau^B$  на выходной окружной кромке должно превышать значение силы трения:  $P_{mp}$ , т. е.  $P_\tau^B > P_{mp}$ . Значение входного угла  $\beta^A$  должно превышать значение угла трения материала о стенки канавки и угла трения между волокнами.

*Сравнение входного угла  $\beta^{AY}$  с углом  $\alpha_{mp}$  трения материала о стенку ножевого выступа*

Как отмечалось выше, транспортирующее действие активных боковых стенок межножевых канавок тем выше, чем больше угол касательной  $\beta^{AY}$  наклона этих стенок к радиусу. В связи с этим можно предположить, что происходит ускоренное передвижение массы от действия стенок около входной окружной кромки диска. На выходной кромке оно обеспечивается ещё и действием центробежных сил.

Для определения соотношения значений угла касательной  $\beta^{AY}$  на входе в зону размола с углом трения  $\alpha_{mp}$  материала о стенки ножевых выступов зададимся средней величиной коэффициента трения:  $\mu = \text{tg} \alpha_{mp} = 0,1 \dots 0,11$  [97].

Соответственно, угол:

– трения волокнистой массы об активные боковые стенки  $\alpha_{mp} = (5,71 \dots 6,28)^\circ \approx 6^\circ$ .

Так как значения угла касательной на входе  $\beta^{A\gamma}$  и на выходе  $\beta^B$  нам известны: ( $45^\circ$  и  $77,838^\circ$  соответственно), найдем их соотношение с углом трения  $\alpha_{mp}$  волокнистого материала об активные боковые стенки:

– соотношение  $\frac{\beta^{A\gamma}}{\alpha_{mp}} = \frac{45^\circ}{6^\circ} = 7,5;$

– соотношение  $\frac{\beta^B}{\alpha_{mp}} = \frac{77,838^\circ}{6^\circ} = 13.$

Таким образом:

– т.к.  $\angle \beta^{A\gamma} = 7,5 \angle \alpha_{тр}$ , то и скорость движения материала от действия стенок около входной окружной кромки диска тоже возрастает в 7,5 раз;

– передвижение материала от действия стенок около выходной окружной кромки диска происходит с ускорением в 13 раз, что противоречит нашим первоначальным рассуждениям (см. стр. 54).

Однако стоит учесть, что размолу подвергается достаточно обезвоженная волокнистая масса, и выполнение условия ее прохождения через зону размола является необходимой задачей.

Таким образом, можно предположить, что основные условия, которым должен удовлетворять входной угол  $\beta^{A\gamma}$ , имеют следующий вид:

– продвижение волокнистой массы высокой концентрации при угле  $\beta^{A\gamma}$  равном углу трения  $\alpha_{mp}$  от центра к выходной окружности диска будет затруднительно;

– при угле  $\beta^{A\gamma}$  меньше угла трения  $\alpha_{mp}$  передвижение массы будет невозможно, и может произойти резка волокон и забивание межножевых канавок;

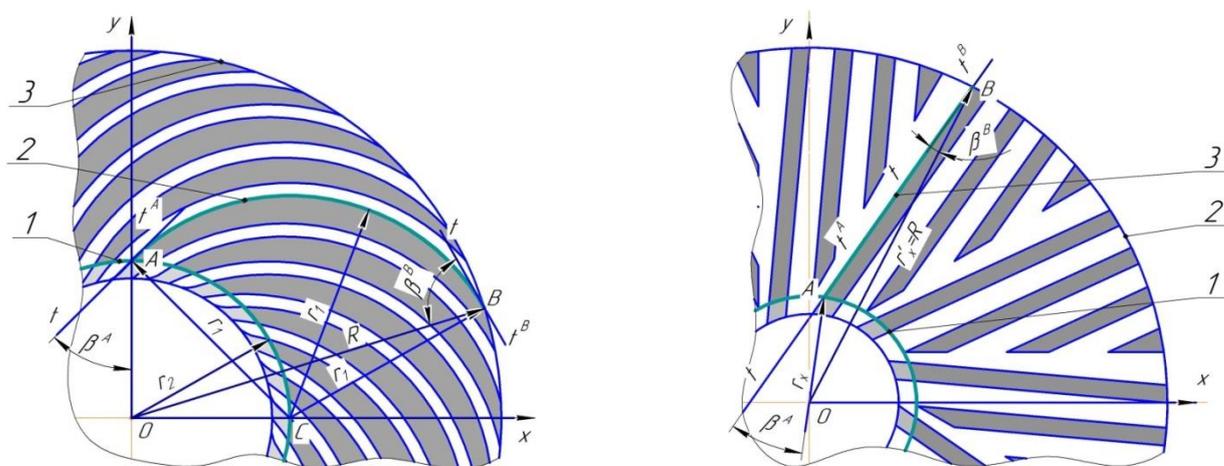
– угол  $\beta^{A\gamma}$  больше угла трения  $\alpha_{mp}$ , что будет способствовать продвижению волокон по зоне размола от входной окружной кромки к выходной тем больше, чем больше значение угла  $\beta^{A\gamma}$ . В данном примере втягивание массы и ее транспортирование по зоне размола происходит быстро, т. к. угол касательной  $\beta_x$  на входе и на выходе значительно больше угла трения  $\alpha_{mp}$ .

## 2.4 Сравнение значения касательного усилия $P_t^B$ на выходе из зоны размола для различных конструкций гарнитур

Важной характеристикой любой гарнитуры является величина касательных усилий на режущих кромках ножей, которые в свою очередь оказывают влияние как на транспортирующую способность гарнитуры, так и на степень фибрилляции волокон.

Вопрос влияния касательных усилий исследован в работе А.В. Ушакова [63]. Доказано, что тангенциальные усилия, развивающиеся на выходной кромке размалывающей гарнитуры с окружной формой ножей, в 5,7 раз превышают этот показатель для традиционной гарнитуры и составляют 102,8 Н против 18,1 Н.

Считаем целесообразным выяснить величину касательных усилий на выходе из зоны размола для ножевых гарнитур, исследуемых в работе.



$r_1$  – радиус кривизны;  $r_2$  – радиус центра кривизны;  $r_x$  – радиус, проведенный из центра кривизны в точку касания;  $\beta^A$  – угол между касательной  $t - t^A$  и радиусом  $r_x$ , проведенным из центра диска  $O$  в точку касания  $A$ ;  $\beta^B$  – угол между касательной  $t - t^B$  и радиусом  $r_x$ , проведенным из центра диска  $O$  в точку касания  $B$ ; 1 – входная кромка; 2 – режущая кромка; 3 – выходная кромка.

Рисунок 2.6 – Геометрическая структура окружного и прямолинейного ножа

Для этого на рисунке 2.6 обозначим касательные к активным режущим кромкам окружных и прямолинейных ножей и углы, ими образованные.

Геометрическая структура окружного и прямолинейного ножа наглядно демонстрирует характер изменения угла касательной  $\beta_x$  к активной режущей кромке ножевого выступа. На изменение количественных значений воздействует угол наклона режущей кромки  $\beta_x$ , образованной между касательной к режущей кромке  $t - t^B$  и радиусом  $r_x$  от центра диска в точке  $o$  до точки выхода из зоны размола  $B$ . Так для окружных ножей угол  $\beta_x$  постоянно возрастает, тогда как для прямолинейных ножей тенденция является обратной.

Для определения численных значений касательных усилий на выходной кромке  $P_\tau^B$  воспользуемся уравнением 2.16. Для этого зададимся исходными данными для:

– окружной гарнитуры для обработки недревесного сырья  $\beta_B = 77,838^\circ$ ;  $\sin \beta^B = 0,978$ ;  $R = 100$  мм;

– для традиционной гарнитуры с углом наклона ножей  $35^\circ$   $\beta_B = 7,5^\circ$ ;  $\sin \beta^B = 0,13$ ;  $R = 100$  мм;

– для традиционной гарнитуры с углом наклона ножей  $20^\circ$   $\beta_B = 7,3^\circ$ ;  $\sin \beta^B = 0,127$ ;  $R = 100$  мм.

Подставив исходные данные, получим следующие значения касательной силы  $P_\tau^B$  на выходе из зоны размола для:

– окружной гарнитуры для обработки недревесного сырья

$$P_\tau^B = \frac{12,7 \cdot 0,978}{0,1} = 124,206 \text{ Н};$$

– для традиционной гарнитуры с углом наклона ножей  $35^\circ$

$$P_\tau^B = \frac{12,7 \cdot 0,13}{0,1} = 16,51 \text{ Н};$$

– для традиционной гарнитуры с углом наклона ножей  $20^\circ$

$$P_\tau^B = \frac{12,7 \cdot 0,127}{0,1} = 16,57 \text{ Н}.$$

Внесем исходные данные и полученные значения в таблицу 2.2 [74].

Воспользовавшись зависимостью 2.18, сравним  $P_\tau^B$  для гарнитуры с окружной формой ножей для недревесного сырья и:

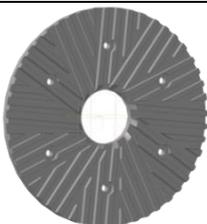
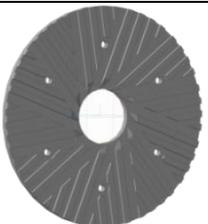
– традиционной гарнитуры с углом наклона ножей  $20^\circ$

$$P_\tau^B = P_\tau^{Ax} \cdot \frac{\sin 7,3^\circ \cdot 33}{\sin 23,13^\circ \cdot 100} = 0,102;$$

– традиционной гарнитуры с углом наклона ножей  $35^\circ$

$$P_\tau^B = P_\tau^{Ax} \cdot \frac{\sin 7,5^\circ \cdot 30}{\sin 26,45^\circ \cdot 100} = 0,081.$$

Таблица 2.2 – Сравнительная характеристика касательных сил для различных конструкций гарнитур

	С окружной формой ножей для обработки древесного сырья	С окружной формой ножей для обработки недревесного сырья	Традиционная с углом наклона ножей $20^\circ$	Традиционная с углом наклона ножей $35^\circ$
Вид гарнитуры				
$r$ , мм	38	42,8	33	30
$R$ , мм	100	100	100	100
$\beta^A$ , °	22,6	45	23,13	26,45
$\beta^B$ , °	54,1	77,8	7,3	7,5
$P_\tau^B$ , Н	102,8	124,2	16,57	16,51

Таким образом, получим следующее соотношение  $P_\tau^B$  для:

– традиционной гарнитуры с углом наклона ножей  $20^\circ$

$$\frac{P_\tau^B \text{ окр}}{P_\tau^B \text{ трад}} = \frac{0,581}{0,102} = 5,696;$$

– традиционной гарнитуры с углом наклона ножей  $35^\circ$

$$\frac{P_\tau^B \text{ окр}}{P_\tau^B \text{ трад}} = \frac{0,581}{0,081} = 7,172.$$

Как было указано ранее, отличительной особенностью окружной формы ножей в сравнении с прямолинейными является постепенное увеличение угла касательной  $\beta_x$  вдоль всей режущей кромки от точки входа в зону размола  $A$  до точки выхода из зоны размола  $B$ . Эта зависимость способствует увеличению касательных усилий вдоль активной режущей кромки ножевого выступа, тем самым увеличивая как фибриллирующее, так и транспортирующее воздействие.

## Выводы ко второй главе

Во второй главе диссертационной работы было проведено теоретическое обоснование геометрии окружного ножа с возрастающим углом касательной  $\beta_x$ , образованным между касательной к режущей кромке и радиусом  $r_x$ , проведенным из центра диска в точку касания. Увеличение максимального значения угла касательной  $\beta_x$  вдоль активной режущей кромки от минимального на входе до максимального на выходе по сравнению с аналогичной гарнитурой для обработки древесного сырья способствует возрастанию фибриллирующего и транспортирующего воздействия за счёт повышения касательных усилий как на входе, так и на выходе из зоны размола. Этот эффект достигается при ширине кольцевой зоны размола  $R - r = (1 - 0,428) \cdot R$  и при  $r_1 = 0,605R$ ,  $r_2 = 0,428R$ .

Для подтверждения расчётов теоретической части были проведены экспериментальные исследования, результаты которых представлены в главе 3.

### **ГЛАВА 3. Экспериментальная часть**

Для анализа эффективности процесса размола волокнистой массы высокой концентрации из недревесного целлюлозосодержащего сырья решались такие задачи:

- определение бумагообразующих свойств волокнистой массы и физико-механических характеристик бумажных отливок в зависимости от частоты вращения ротора, величины межножевого зазора между ножами ротора и статора, концентрации волокнистой массы;

- сравнительный анализ эффективности процесса размола волокнистых полуфабрикатов высокой концентрации из недревесного целлюлозосодержащего сырья с учетом конструктивных особенностей размалывающих гарнитур;

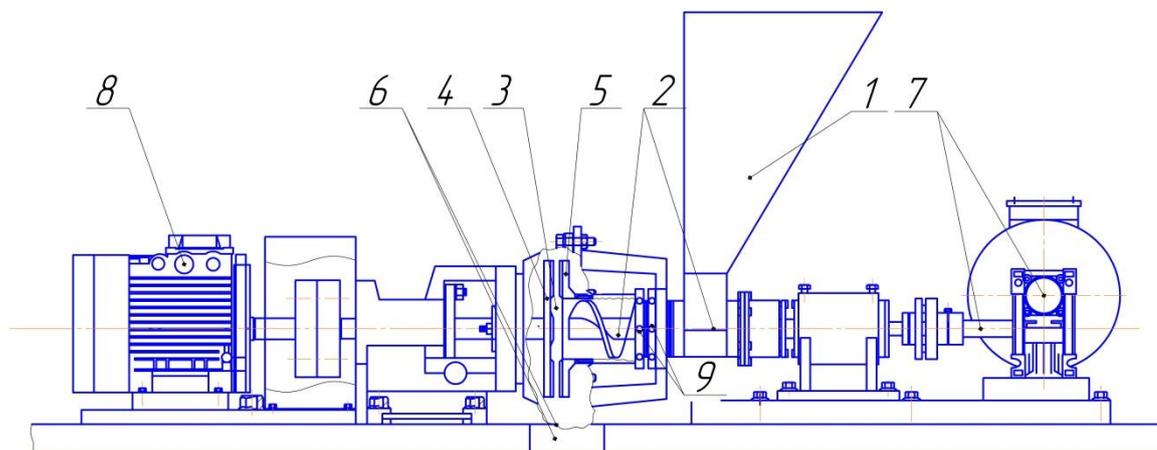
- оценка способности к размолу различных видов недревесного целлюлозосодержащего сырья при размоле массы высокой концентрации с использованием конструкции гарнитуры с окружной формой ножей.

#### **3.1 Описание экспериментальной установки для размола**

Исследование проводилось на лабораторной дисковой мельнице (рис. 3.1). Конструкция дисковой мельницы включает в себя: бункер 1 для подачи волокнистой массы высокой концентрации, шнековый питатель 2, приводимый в движение электродвигателем через червячный редуктор 7 и осуществляющий подачу массы в зону размола 3, которая состоит из дисков ротора 4 и статора 5, выход массы из зоны размола происходит через выходное отверстие 6, диск ротора приводится в движение электродвигателем 8, межножевой зазор регулируется с помощью механического присадочного устройства.

Установка зазора между размалывающими гарнитурами осуществляется с помощью двух контргаяк, представляющих собой механизм присадки «винт-гайка» с шагом 1 мм.

Процесс регулирования зазора: для увеличения зазора контргайки необходимо вращать по часовой стрелке, для уменьшения – против часовой. Величина требуемого зазора определяется с помощью набора измерительных щупов. Технические характеристики дисковой мельницы представлены в таблице 3.1.



1 – бункер для волокнистой массы; 2 – шнековый питатель; 3 – зона размола; 4 – диск ротора; 5 – диск статора; 6 – выходное отверстие; 7 – червячный редуктор шнекового питателя; 8 – электродвигатель привода ротора дисковой мельницы; 9 – механическое присадочное регулировочное устройство.

Рисунок 3.1 – Схема дисковой мельницы.

Таблица 3.1 – Технические характеристики дисковой мельницы

Параметр	Значение
Диаметр дисков, мм	200
Зазор между размалывающими поверхностями дисков, мм	0,1-2
Мощность электродвигателя вращения ротора, кВт	4
Мощность электродвигателя привода шнекового питателя, кВт	0,55
Частота вращения диска ротора, об/мин	До 2500
Число оборотов вала шнекового питателя, об/мин	До 95
Концентрация размалываемой массы, %	10-20

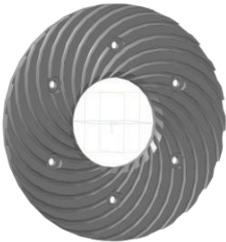
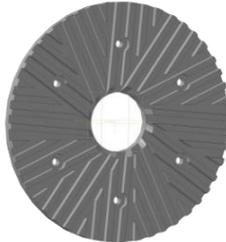
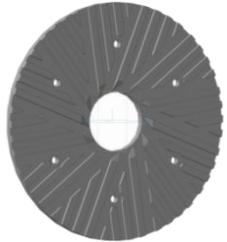
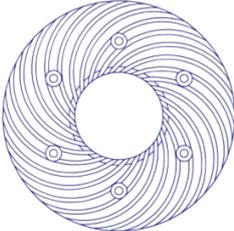
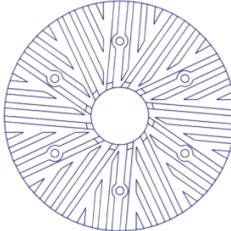
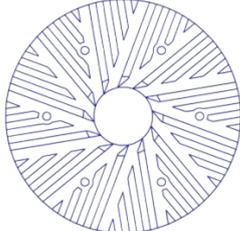
### *Конструктивные особенности размалывающих гарнитур*

Для исследования воздействия размалывающей гарнитуры с окружной формой ножей на бумагообразующие свойства массы и физико-механические характеристики бумажных отливок для дисковой мельницы была спроектирована

и изготовлена размалывающая гарнитура (таблица 3.2), на конструкцию которой были получены патенты (приложение А) [98, 99].

Сравнение результатов эксперимента проводилось с использованием гарнитур с прямолинейной формой ножей. Технологические параметры гарнитур даны в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Технологические параметры размалывающих гарнитур

Показатель	Гарнитура		
	С окружной формой ножей	Традиционная гарнитура 20°	Традиционная гарнитура 35°
3D вид гарнитуры			
2D вид гарнитуры			
Количество ножей ротора и статора, шт	48	96	96
Суммарная длина режущих кромок ножей, м	2,6	2,02	2,3
Секундная режущая длина при частоте вращения ротора 2500 об/мин, (м/с)	2688	1026	1194
Площадь контакта ножей, м <sup>2</sup>	0,0106	0,0044	0,0041
Секундная размалывающая поверхность при частоте вращения ротора 2500 об/мин, (м <sup>2</sup> м/с)	0,44	0,18	0,17
Ширина ножа, мм	3,8-12,2	6	5
Высота ножа, мм	5	5	3
Ширина ячейки, мм	3,5	6	7

### 3.2 Порядок проведения эксперимента

В качестве исходного сырья были выбраны лубяные волокна технической конопли южной сорта «Мария» с содержанием целлюлозы 67%. Полуфабрикат, представляющий собой внешнюю часть стебля растения (пеньку), с заострённостью до 5% предварительно обрабатывали для придания ему однородности. Обработка проводилась в дезинтеграторе-дробилке «Рекорд» с помощью штифтов, установленных внутри рабочей зоны и осуществляющих противоположное движение с большой скоростью.



Рисунок 3.2 – Дезинтегратор-дробилка «Рекорд»

Обработанное волокно предварительно замачивалось в воде на сутки для дальнейшего размола.

Характеристики волокнистого полуфабриката определялись по параметрам, представленным в таблице 3.3 (см. методику проведения эксперимента).

Таблица 3.3 – Характеристики волокнистого полуфабриката

Бумагообразующие свойства										
Средняя длина волокна, мкм	Ширина волокна, мкм	Индекс фибрилляции, %	Водоудержи- вающая способность, %	Грубость волокна, мг/м	Содержание мелочи, %	Фракционный состав средней длины волокна, мкм, %				
						200-301	301-684	684-1553	1553-3524	3524-5310
696	26	3,901	169	0,947	4,776	29,006	45,258	19,456	5,533	0,747
Физико-механические характеристики										
Разрывная длина, м	Сопротивление продавливанию, кПа			Сопротивление излому			Сопротивление раздиранию, мН			
26	0			7			426			

Эксперимент проводился при концентрации волокнистой массы 10-18 %, частоте вращения ротора 2000-2500 об/мин, с интервалом 250 об/мин, величине зазора между ножами ротора и статора 1-1,5 мм. В течение каждого эксперимента, через определенное количество пропусков массы через зону размола, осуществлялись замеры прироста степени помола волокнистой массы по Шоппер-Риглеру на приборе СР-2. Контроль расхода электроэнергии при размоле осуществлялся с помощью электросчетчика марки «Энергомера ЦЭ6803В М7 Р31».

Для определения бумагообразующих свойств волокнистой массы отбирались пробы при степени помола 30-60 °ШР с интервалом 15 °ШР. Для определения физико-механических характеристик формировались бумажные отливки на листоотливном аппарате ЛА-1. В процессе эксперимента фиксировалось число пропусков волокнистой массы через зону размола и время размола для достижения требуемой степени помола. Также для каждой пробы проводился замер концентрации.

### 3.3 Методика проведения эксперимента

#### 3.3.1 Методика определения бумагообразующих свойств волокнистой массы

Бумагообразующие свойства волокнистой массы оценивались с помощью анализатора волокна *Morfi neo* (рис. 3.3) [100-103].



Прибор состоит из 4 частей: гидравлической (насос, камера, трубка); оптической (измерительная ячейка, камера, линза и источник света); электрической (регулирование насоса и карусели); компьютера.

Исследуется сильно разбавленная волокнистая суспензия с содержанием абсолютно сухого вещества 25-30 мг для эффективного диспергирования волокон и анализа каждого волокнистого элемента. Масса проходит через высокоскоростную камеру, и все видимые элементы анализируются программным обеспечением. Анализ продолжается до тех пор, пока программное обеспечение *Morfi neo* не подсчитает 5000 волокон

Оптическая разрешающая способность прибора составляет 10 микрон, при этом рабочая разрешающая способность составляет 4 микрона благодаря специальной обработке изображения.

Прибор позволяет получить следующую информацию о волокнах: средняя длина волокна, ширина волокна, фракционный состав, содержание мелочи, грубость волокна, индекс фибрилляции.

#### *Средняя длина волокна*

Расчет длины происходит путем деления волокна на сегменты сканированием по направлению каждого участка ( $F_A$ ,  $F_B$ ,  $F_C$  и т.д.) (рис. 3.4).

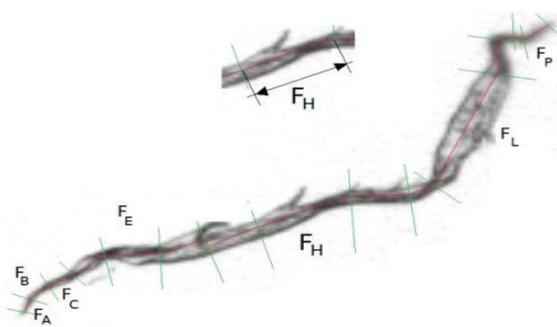


Рисунок 3.4 – Схема распознавания длины выпрямленного участка волокна оптической ячейкой

После этого программа соединяет вместе все сегменты, восстанавливая при этом недоступные, и путем сложения длин всех сегментов рассчитывается длина выпрямленного волокна  $L_i$ .

Средняя длина волокна  $La$

определяется по формуле:

$$La = \sum \frac{Li}{N}, \quad (3.1)$$

где  $Li$  – длина каждого волокна;

$N$  – число волокон.

#### *Ширина волокна*

Значение ширины волокон рассчитывается на каждом сегменте при определении средней длины.

#### *Грубость волокна*

Грубость определяется как масса на единицу длины волокна, то есть отношение массы всех волокон к общей длине. Для оценки массы необходимо умножить количество обработанных изображений на их объем. Затем, зная концентрацию волокнистой суспензии, рассчитывается общая измеренная масса. Общая длина учитывает совокупность длин волокон на изображении, даже тех, которые касаются края изображения и которые были исключены из предыдущих расчетов.

#### *Индекс фибрилляции*

Индекс фибрилляции  $Fib$  определяется прибором как отношение суммы длин всех фибрилл к сумме длин всех волокон. Формула для расчета индекса фибрилляции имеет вид:

$$Fib = \frac{\sum_{i=1}^N F_i}{\sum_{i=1}^N L_i} * 100\%, \quad (3.2)$$

где  $\sum_{i=1}^N F_i$  – сумма длин всех фибрилл, мкм;

$\sum_{i=1}^N L_i$  – сумма длин всех волокон, мкм.

#### *Фракционный состав*

Прибор распределяет по фракционному составу все распознанные волокна, в зависимости от их длины в процентом содержании.

#### *Мелочь*

Прибор относит к мелочи все распознанные волокна, размеры которых меньше 0,2 мм.

### *Водоудерживающая способность*

Водоудерживающая способность – степень набухания волокон, рассчитывается согласно ISO 23714:2014 [104]. Данный показатель предложен Джайме и заключается в определении оставшейся в них влаги после центрифугирования при определенных условиях. Содержание влаги после центрифугирования находится по разности массы пробы до сушки и после сушки,  $W$ , %.

$$W = \frac{B_B - B_C}{B_B} \cdot 100\%, \quad (3.3)$$

где  $B_B$  – масса влажного волокна после центрифугирования, г;

$B_C$  – масса сухого волокна, г.

Измерение  $B_B$  и  $B_C$  осуществлялось с использованием лабораторных аналитических весов ВЛА-200 г-М. Точность измерения  $\pm 0,1$  мг.

### **3.3.2 Методика определения физико-механических показателей бумажных отливок**

Прочность бумажных отливок оценивали по следующим физико-механическим показателям: разрывная длина, сопротивление излому, сопротивление продавливанию, сопротивление раздиранию.

Перед испытанием физико-механических свойств готовых отливок испытываемые образцы кондиционировали в эксикаторе (содержание серной кислоты 35 %, относительная влажность 65 %), испытания проводились в атмосферных условиях (относительная влажность воздуха  $(50 \pm 2)$  %, температура воздуха  $(23 \pm 3)$  °С).

#### *Разрывная длина*

Разрывная длина – это условный показатель, который выражает длину полоски бумаги (м), при которой она подвергается разрыву под влиянием силы собственной тяжести, будучи подвешена за один конец. Разрывная длина  $L$ , м, согласно ГОСТ ISO 1924-1-2018 [105] вычисляется по формуле

$$L = \frac{\lambda}{g} \cdot P, \quad (3.4)$$

где  $\lambda$  – длина полоски, м;

$g$  – масса испытуемой полоски, кг;

$P$  – разрывное усилие, Н, точность измерения разрывного усилия 5 %.

#### *Сопротивление раздиранию*

Определение величины показателя сопротивления бумаги раздиранию производится методом Эльмендорфа согласно ГОСТ 13525.3-97 [106]. Метод основан на определении усилия, необходимого для раздирания предварительно надрезанного образца бумаги. Испытание образцов проводилось на аппарате РБ, после чего величина сопротивления раздиранию  $E$ , Н рассчитывалась по формуле

$$E = \frac{a \cdot 16}{j}, \quad (3.5)$$

где  $a$  – среднее арифметическое пяти отсчетов по шкале прибора;

16 – цена деления шкалы, точность измерений прибора  $\pm 3\%$ ;

$j$  – количество образцов, испытываемых одновременно.

#### *Сопротивление излому*

Метод испытания прочности на излом заключается в определении числа двойных перегибов, выдерживаемых находящейся под натяжением полоски бумаги до разрушения по линии изгиба. Испытания проводились на аппарате *Drick* согласно ГОСТ 13525.2-80 [107], в котором испытываемая полоска разрывается от разрушения связи между волокнами.

#### *Сопротивление продавливанию*

Определение величины сопротивления продавливанию проводилось по ГОСТ Р ИСО 2758-2017 «Метод определения сопротивления продавливанию» [108]. Испытание образцов проводилось на приборе *CALIBRATED*, работающем автоматически. Точность измерений прибора  $\pm 9\%$ .

### 3.4 Планирование эксперимента

Для получения математических уравнений, описывающих процесс размола волокнистой массы, был применен метод активного эксперимента. Математические зависимости, полученные таким методом, позволяют установить количественные соотношения между входными и выходными параметрами.

Наиболее предпочтительным способом математического описания объекта для определения влияния основных технологических факторов процесса размола с использованием гарнитуры с окружной формой ножей на бумагообразующие свойства массы и физико-механические характеристики отливок является многофакторный эксперимент, поскольку он позволяет при переходе к каждому последующему опыту варьировать почти все факторы одновременно.

В данной работе для построения математической модели процесса, проверки её адекватности и оценки влияния на процесс каждого учитываемого технологического фактора проводимый эксперимент был реализован в три этапа:

1. Исследование влияния основных факторов процесса размола волокнистого полуфабриката из недревесного целлюлозосодержащего сырья при использовании гарнитуры с окружной формой ножей на бумагообразующие свойства волокнистой массы и физико-механические характеристики бумажных отливок.

2. Оценка эффективности процесса размола недревесного целлюлозосодержащего сырья при использовании гарнитуры авторского исполнения и традиционных ножевых гарнитур.

3. Оценка эффективности процесса размола различных видов недревесного целлюлозосодержащего сырья с использованием авторской конструкции гарнитуры.

Первый этап заключался в планировании и реализации многофакторного эксперимента по *B*-плану второго порядка. Для построения математической модели процесса размола использовался регрессионный анализ. Данный метод позволяет устанавливать значения факторов и диапазоны их варьирования по

своему усмотрению, не нарушая хода технологического процесса, согласно техническим характеристикам применяемого оборудования и требованиям стандартов к готовой продукции. Зависимости выходных параметров  $Y$  от независимой переменной  $X$  аппроксимированы уравнениями регрессии.

Матрица планирования эксперимента построена при помощи пакета программы *STATGRAPHICS® Centurion* [109].

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

Таблица 3.4 – Факторы активного многофакторного эксперимента

Параметр	Обозначение	
	Натуральное	Нормализованное
Входные (управляемые факторы)		
Частота вращения ротора, об/мин	$n$	$X_1$
Межножевой зазор, мм	$S$	$X_2$
Концентрация массы, %	$C$	$X_3$
Выходные параметры (контролируемые факторы)		
Изменение бумагообразующих показателей при размоле волокнистой массы		
Средняя длина волокна, мкм	$Li$	$Y_1$
Средняя ширина волокна, мкм	$z$	$Y_2$
Индекс фибрилляции, %	$Fib$	$Y_3$
Грубость волокна, мг/м	$k$	$Y_4$
Водоудерживающая способность (по Джайме), %	$W$	$Y_5$
Фракционный состав средней длины волокна		
Содержание мелочи, %	$A$	$Y_6$
Фракция 200-301 мкм, %	$fr_1$	$Y_7$
Фракция 301-684 мкм, %	$fr_2$	$Y_8$
Фракция 684-1553 мкм, %	$fr_3$	$Y_9$
Фракция 1553-3524 мкм, %	$fr_4$	$Y_{10}$
Фракция 3524-5310 мкм, %	$fr_5$	$Y_{11}$

Продолжение таблицы 3.4

Изменение физико-механических свойств отливок при размоле волокнистой массы		
Сопротивление излому	$U$	$Y_{12}$
Разрывная длина, м	$L$	$Y_{13}$
Сопротивление продавливанию, кПа	$Pa$	$Y_{14}$
Сопротивление раздиранию, мН	$E$	$Y_{15}$

На основании результатов многочисленных поисковых экспериментов были определены уровни и шаги варьирования входных параметров, которые представлены в таблице 3.5 (приложение Б).

Таблица 3.5 – Уровни и шаги варьирования исследуемых факторов

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

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

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{33}X_3^2 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 \quad (3.6)$$

Коэффициенты уравнений регрессии для каждого выходного параметра приведены в приложении В, таблицы В1-В3. В контексте задачи исследования представлялось целесообразным выяснить вклад в дисперсию выходных параметров варьирования переменных факторов. Для этого 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.

### **3.5 Результаты многофакторного эксперимента по размолу технической конопли при использовании конструкции гарнитуры с окружной формой ножей**

На первом этапе эксперимента был проведен регрессионный анализ для оценки влияния авторской конструкции размалывающей гарнитуры при варьировании частоты вращения ротора, величины межножевого зазора и концентрации волокнистой массы на бумагообразующие свойства волокнистой массы и физико-механические характеристики бумажных отливок. Значения результатов проведенных экспериментов представлены в приложении Г, таблицы Г1-Г3.

#### **Бумагообразующие свойства волокнистой массы.**

##### *Средняя длина волокон*

Размер и форма волокон считаются важными параметрами для оценки качества волокнистой массы при производстве разных типов бумаги.

Длинные и хорошо фибриллированные волокна позволяют получить прочную бумагу благодаря значительному количеству водородных связей и большой площади для связываемости [110, 111].

Рисунок 3.5 показывает, как изменяется средняя длина волокон при степени помола 60 °ШР в зависимости от выходных параметров: частоты вращения ротора  $n$ , величины зазора  $s$  между ножами ротора и статора, а также концентрации волокнистой массы  $C$ . Поверхности откликов, иллюстрирующие изменения средней длины волокон при других степенях помола, приведены в приложении Д, рисунок Д1.

Из всех переменных факторов процесса размола влияние величины межножевого зазора возрастает с приростом степени помола. Кроме того, с увеличением степени помола становится заметным воздействие частоты вращения ротора. Так, при увеличении межножевого зазора с одновременным увеличением частоты вращения ротора отмечается большая сохранность исходной длины волокон в процессе размола.

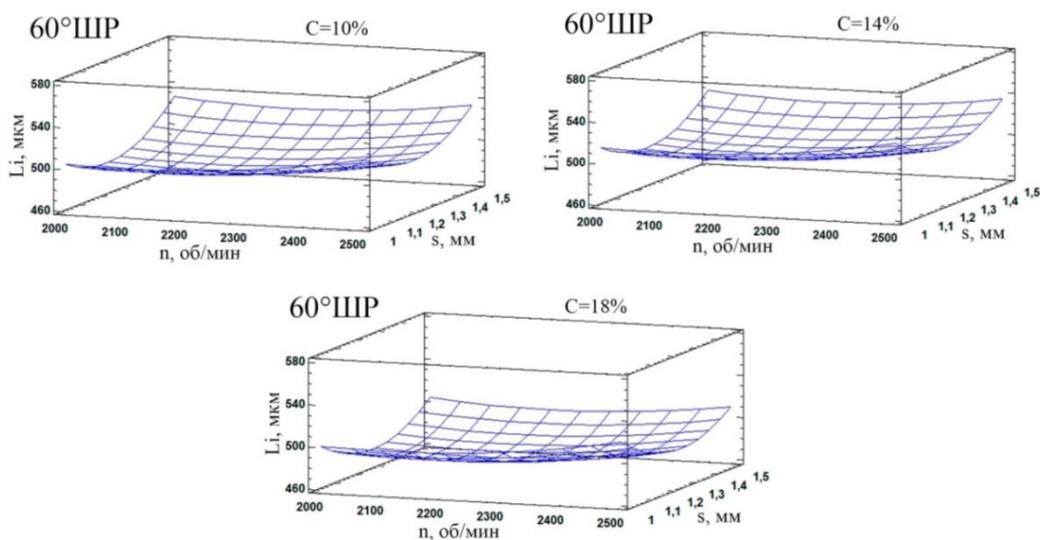


Рисунок 3.5 – Зависимость средней длины волокон от частоты вращения ротора, величины межножевого зазора и концентрации при степени помола волокнистой массы 60 °ШР

С повышением концентрации волокнистой массы средняя длина волокон несколько снижается, при этом данный показатель имеет близкие значения при концентрациях 10 % и 14 %. При концентрации 18 % длина волокон в процессе размола снижается с 696 мкм до 468 мкм. Это объясняется тем, что при повышении концентрации волокнистой массы грубые волокна конопли больше подвергаются излому и укорочению, тогда как при более низкой концентрации процесс размола направлен в сторону фибриллирования.

Соотношение длины и ширины волокон выступает важным параметром при производстве бумаги. Это соотношение напрямую влияет на прочность готовой продукции.

### *Ширина волокон*

Рисунок 3.6 отражает изменение ширины волокон при различных степенях помола волокнистой массы и концентрации 10 % в зависимости от частоты вращения ротора  $n$ , величины зазора  $s$  между ножами ротора и статора и концентрации волокнистой массы  $C$ . Поверхности откликов ширины волокон при концентрации волокнистой массы 14 % и 18 % представлены в приложении Д, рисунок Д2.

Исследователи считают [64], что упрочнение бумажного листа происходит за счёт увеличения ширины волокна, которое обусловлено образованием свободных гидроксильных групп на концах отслоившихся фибрилл, впоследствии образующих водородные связи между волокнами и дополнительно переплетающихся между собой.

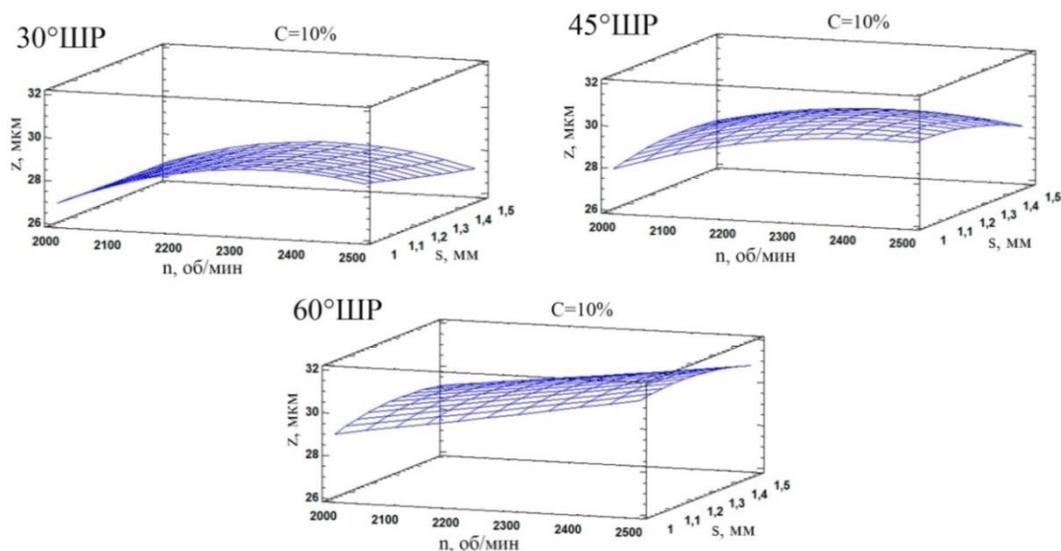


Рисунок 3.6 – Зависимость ширины волокон от частоты вращения ротора, величины межножевого зазора и степени помола волокнистой массы при концентрации 10 %

Анализ поверхностей откликов изменения ширины волокон показывает, что с ростом степени помола ширина волокон увеличивается на 18 %. Максимальный прирост показателя наблюдается на последнем этапе размола до 60 °ШР. Наиболее сильное воздействие на изменение показателя оказывает частота вращения ротора. Аналогично изменению средней длины волокон, наибольшие значения ширины достигаются при концентрации волокнистого полуфабриката 10 % за счёт интенсивного фибриллирования и снижения грубости.

#### *Фракционный состав*

Структура бумажного листа предполагает наличие неоднородных по структуре волокон. Так более длинные волокна создают каркас, а более короткие заполняют межволоконное пространство, благодаря чему волокна крепко связываются между собой [56, 112].

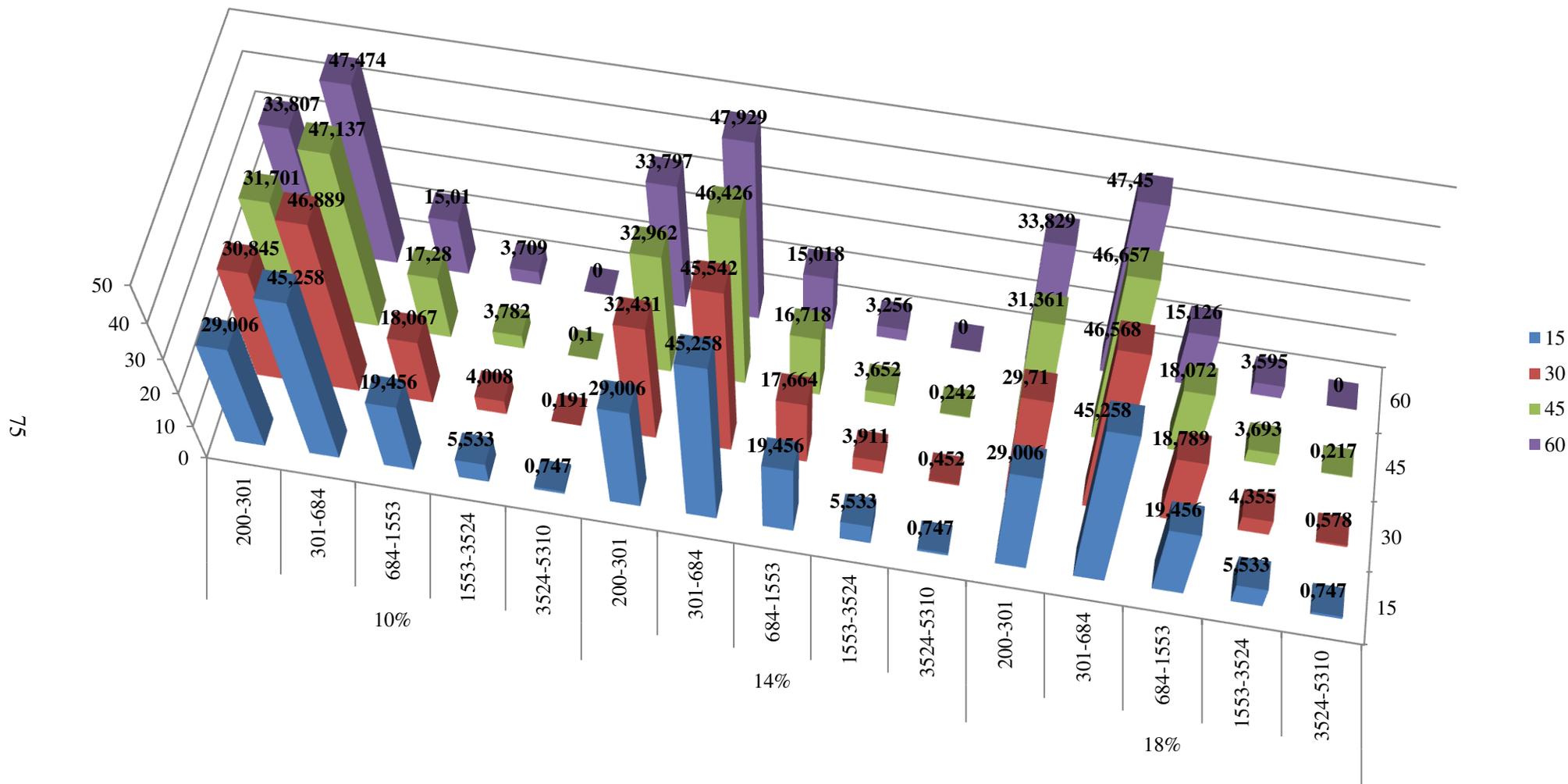


Рисунок 3.7 – Гистограмма распределения длины волокон по классам фракций при частоте вращения ротора 2500 об/мин, величины зазора между ножами ротора и статора 1,5 мм и концентрации волокнистой массы 10 %, 14 %, 18 %

Рисунок 3.7 графически представляет изменение фракционного состава волокнистой массы из технической конопли.

Силовое воздействие размалывающей гарнитуры с окружной формой ножей на волокна приводит к направленным изменениям их длины. На гистограмме видно, что происходит незначительное снижение процентного содержания длинных волокон с одновременным незначительным увеличением коротковолокнистых фракций. При этом фракционный состав практически однороден при всех концентрациях. Однако в волокнистой массе с концентрацией 10 % наблюдается несколько большее количество длиноволокнистых фракций и меньшее количество коротковолокнистых по сравнению с волокнистой массой с концентрацией 14 % и 18 %. Увеличение содержания коротковолокнистых фракций с ростом концентрации размалываемой массы можно соотнести с увеличением количества обломанных волокон.

Помимо взаимодействия длинных и коротких волокон, определяющих конечные характеристики бумаги, важное место в образовании бумажного полотна занимает мелочь.

#### *Содержание мелочи*

По сравнению с волокнами вторичные мелкие частицы имеют высокую удельную поверхность и высокую набухаемость. Мелочь, образованная путем отслоения фибрилл, имеет свойство заполнять пустые пространства в структуре бумаге и создавать более плотную волокнистую сеть, тем самым позволяя более равномерно распределять напряжения при приложении нагрузки [66, 84, 113].

Рисунок 3.8 показывает, как изменяется содержание мелочи  $A$  в волокнистой массе при степени помола 60 °ШР в зависимости от частоты вращения ротора  $n$ , величины зазора  $s$  между ножами ротора и статора и концентрации волокнистой массы  $C$ . Поверхности, отражающие изменения содержания мелочи при других степенях помола, приведены в приложении Д, рисунок Д3.

Интенсивнее всего мелочь образуется при величине межножевого зазора 1,25 мм, частоты вращения ротора 2500 об/мин и концентрации волокнистой

массы 10 %. Также значительное количество мелочи образуется и при величине межножевого зазора 1,25 мм, частоте вращения ротора 2000 об/мин и концентрации волокнистой массы 18 %.

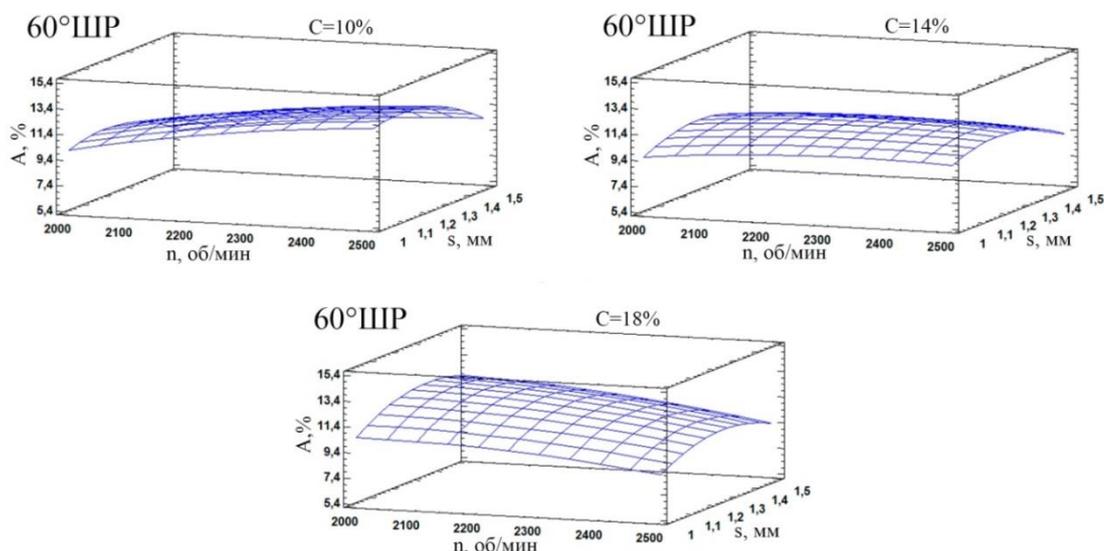


Рисунок 3.8 – Зависимость содержания мелочи от частоты вращения ротора, величины межножевого зазора и концентрации при степени помола волокнистой массы 60 °ШР

Следует отметить, что для исследуемого диапазона концентраций величина межножевого зазора с увеличением степени помола оказывает наибольшее влияние на образование мелочи.

#### *Грубость волокон*

Недревесные волокна считаются более грубыми за счёт большой толщины клеточной стенки. В то же время это увеличивает потенциал их фибриллирования [41].

Рисунок 3.9 демонстрирует изменение грубости при различных степенях помола и концентрации волокнистой массы 10%. Приложение Д, рисунок Д4 показывает, как изменяется грубость волокон при размоле в зависимости от частоты вращения ротора  $n$ , величины зазора  $s$  между ножами ротора и статора и различных концентрациях волокнистой массы  $C$ .

На представленных графиках наблюдается снижение грубости с увеличением степени помола, что согласуется с литературными данными.

При этом наибольшие значения грубости, при размоле до 60 °ШР, определены при концентрации 14 % и составляют 0,530 мг/м.

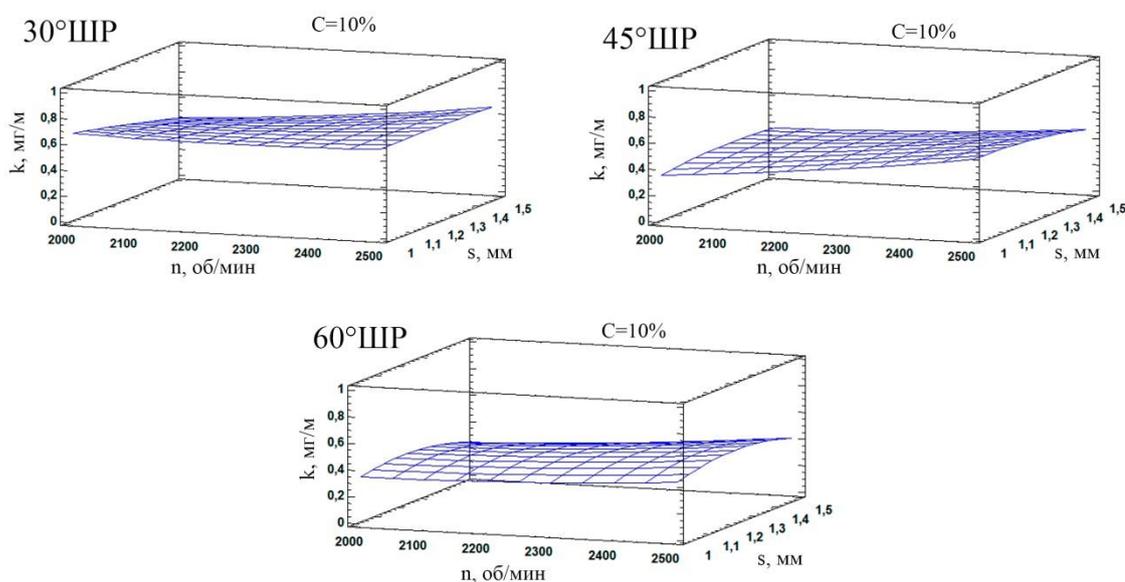


Рисунок 3.9 – Зависимость грубости волокон от частоты вращения ротора, величины межножевого зазора и степени помола волокнистой массы при концентрации 10 %

Уменьшение грубости на 32,1 % отмечается для концентрации волокнистой массы 10 % и частоте вращения ротора 2000 об/мин и составляет 0,304 мг/м. Частота вращения ротора снижает свой вклад с приростом степени помола, тогда как влияние величины межножевого зазора возрастает.

При концентрации волокнистого полуфабриката 10 % происходит наибольшее снижение грубости волокон, что вызвано преимущественным сохранением их средней длины и значительным увеличением ширины.

Снижение значений показателя грубости указывает на приобретение волокнами гибкости, что благоприятно сказывается на их способности переплетаться между собой и образовывать прочную волокнистую сеть.

Высокая грубость недревесных целлюлозосодержащих волокон положительно сказывается на изменении индекса фибрилляции в процессе размола.

## Индекс фибрилляции

Размол при высокой концентрации в большей степени направлен в сторону внешней фибрилляции с образованием продольных лентообразных фибрилл. Такой эффект достигается благодаря образованию толстой волокнистой прослойки в зоне размола, которая способствует интенсивному истиранию волокон, а не их укорочению [114-116].

Анализ экспериментальных данных показал следующие зависимости изменения индекса фибрилляции, представленные на рисунке 3.10. Данные при других степенях помола в зависимости от частоты вращения ротора  $n$ , величины зазора  $s$  между ножами ротора и статора и концентрации волокнистой массы  $C$  даны в приложении Д, рисунок Д5.

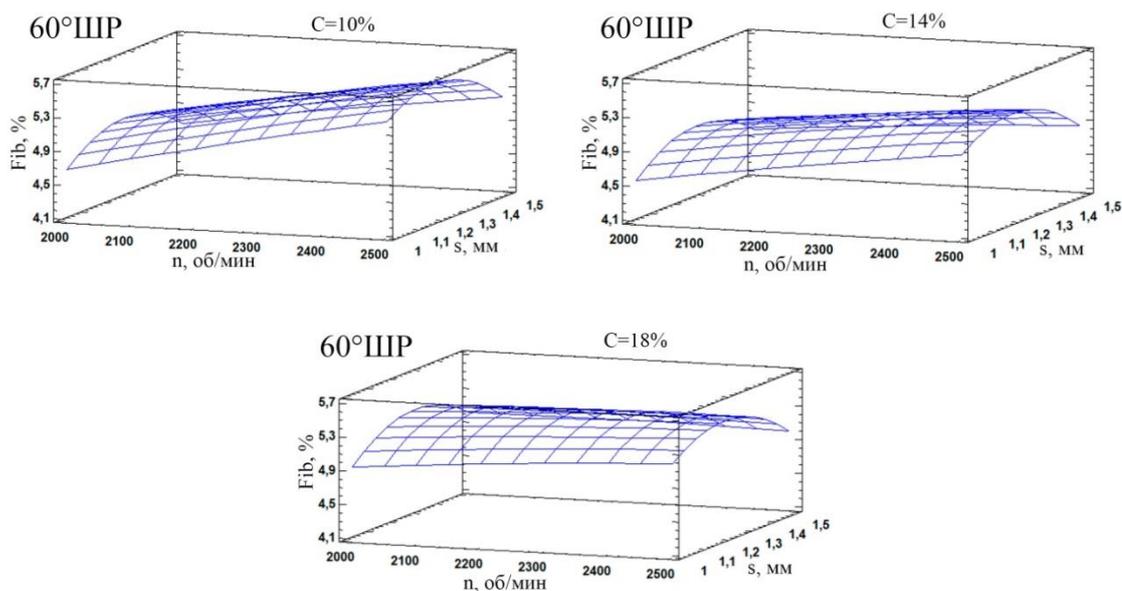


Рисунок 3.10 – Зависимость индекса фибрилляции от частоты вращения ротора, величины межножевого зазора и концентрации при степени помола волокнистой массы 60 °ШР

Изменение индекса фибрилляции в большей степени зависит от частоты вращения ротора, что объясняется грубостью и большой толщиной клеточной стенки недревесных волокон, требующих приложения больших усилий для разрушения наружных слоев клеточной стенки. Максимальные значения фибрилляции волокон получены при частоте вращения 2500 об/мин,

межножевом зазоре 1,25 мм и концентрации волокнистого полуфабриката 10 % и составляют 5,6 %. При этом с увеличением концентрации волокнистой массы при степени помола 60 °ШР отмечается снижение воздействия частоты вращения.

Зависимость изменения индекса фибрилляции подобна вышеописанным зависимостям. Достижение максимальных значений индекса при концентрации волокнистой массы 10 % может быть вызвано меньшей изогнутостью волокон и их большей удельной поверхностью.

#### *Водоудерживающая способность*

Изменение водоудерживающей способности позволяет косвенно оценить степень внутренней фибрилляции. Под действием циклических нагрузок внутри зоны размола происходит гидратация волокон, вызванная разрывом поперечных (водородных) связей между структурными элементами клеточной стенки. Клеточная стенка разрушается и принимает лентовидную форму, становясь более гибкой в поперечном направлении [84].

Однако высокий показатель водоудерживающей способности отрицательно сказывается при отливе бумажного полотна на сеточной части бумагоделательной машины. Поэтому стремятся получить волокнистый полуфабрикат с минимально укороченными волокнами и относительно невысоким показателем водоудерживающей способности [117, 118].

По результатам регрессионного анализа на рисунке 3.11 представлены изображения поверхностей откликов водоудерживающей способности при концентрации волокнистой массы 10 %.

Поверхности откликов, показывающие изменения водоудерживающей способности при различных концентрациях в зависимости от частоты вращения ротора  $n$ , величины зазора  $s$  между ножами ротора и статора и концентрации волокнистой массы  $C$ , представлены в приложении Д, рисунок Дб.

Способность к водоудержанию равномерно возрастает с увеличением степени помола и достигает 419 %.

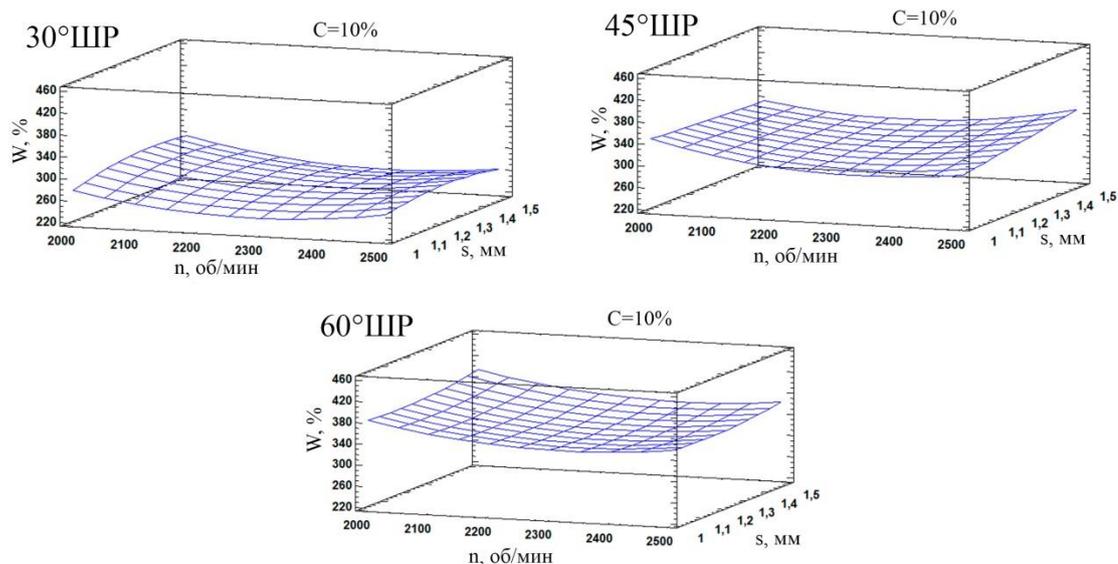


Рисунок 3.11 – Зависимость водоудерживающей способности от частоты вращения ротора, величины межножевого зазора и степени помола волокнистой массы при концентрации 10 %

С увеличением частоты вращения ротора водоудерживающая способность несколько снижается. Величина межножевого зазора и концентрация волокнистой массы значительного влияния не оказывают.

### **Физико-механические характеристики бумажных отливок.**

Физико-механические показатели во многом зависят от длины волокон, их собственной прочности и от силы межволоконной связи. Сочетание этих факторов в разной степени формирует основные прочностные характеристики бумажной продукции.

#### *Сопротивление излому*

Показатель сопротивления излому характеризует механическую прочность бумаги. Наиболее высоким сопротивлением излому отличается бумага, состоящая из длинных, прочных, гибких и крепко связанных между собой волокон [119].

На рисунке 3.12 показаны изображения поверхностей откликов сопротивления излому при степени помола 60°ШР в зависимости от частоты вращения ротора  $n$ , величины зазора  $s$  между ножами ротора и статора и концентрации волокнистой массы  $C$ . Поверхности откликов, описывающие

данный показатель при других степенях помола волокнистой массы, даны в приложении Д, рисунок Д7.

Волокнистая масса, размолотая до 30 °ШР, содержит слабо фибриллированные и грубые волокна, что негативно сказывается на изгибающей способности бумажных отливок.

Уменьшение грубости волокон и увеличение индекса фибрилляции позволяет бумажным отливкам лучше выдерживать многократное изгибающее воздействие за счёт приобретения волокнами гибкости и возрастания количества межволоконных связей.

Увеличение межножевого зазора с одновременным увеличением частоты вращения ротора вызывает рост сопротивления излому бумажных отливок.

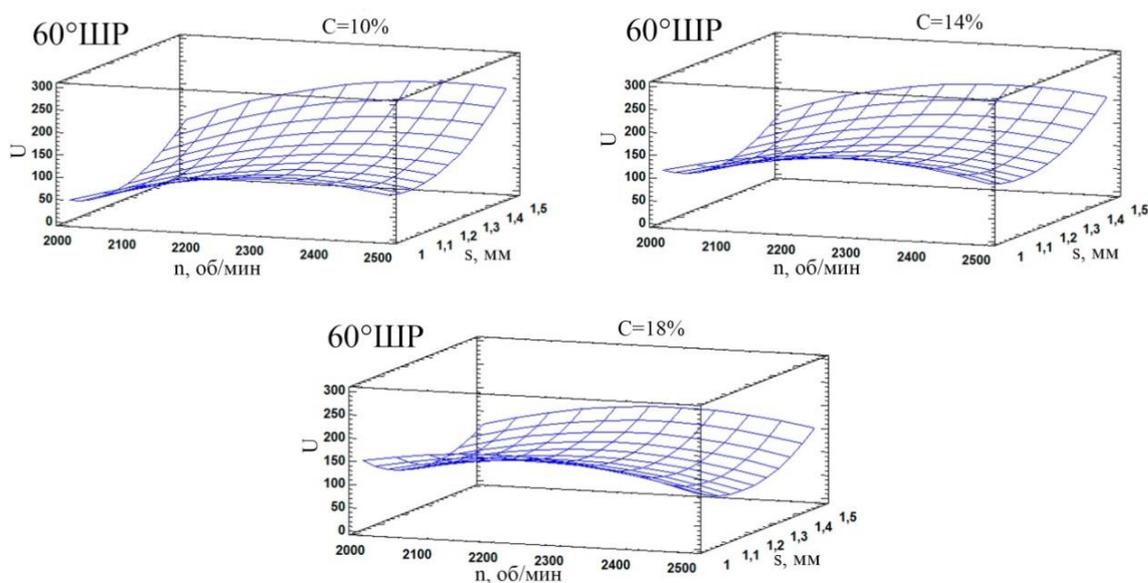


Рисунок 3.12 – Зависимость сопротивления излому от частоты вращения ротора, величины межножевого зазора и концентрации волокнистой массы при степени помола волокнистой массы 60 °ШР

Максимальных значений показатель достигает при степени помола 60 °ШР, частоты вращения ротора 2500 об/мин, величине межножевого зазора 1,5 мм и концентрации волокнистой массы 10 % и составляет 270 перегибов.

### Разрывная длина

Одним из ключевых показателей при оценке качества получаемой продукции является показатель разрывной длины.

Изменение показателя разрывной длины тесно связано не столько с содержанием длинных волокон, сколько со степенью их фибрилляции.

Рисунок 3.13 иллюстрирует изменение показателя разрывной длины при степени помола 60 °ШР. Изображения поверхностей откликов в зависимости от частоты вращения ротора  $n$ , величины зазора  $s$  между ножами ротора и статора и концентрации волокнистой массы  $C$  при других степенях помола представлены в приложении Д, рисунок Д8.

Важную роль в изменении разрывной длины играет величина межножевого зазора. Однако с увеличением степени помола вклад этого фактора снижается. Частота вращения ротора не оказывает статистически значимого воздействия.

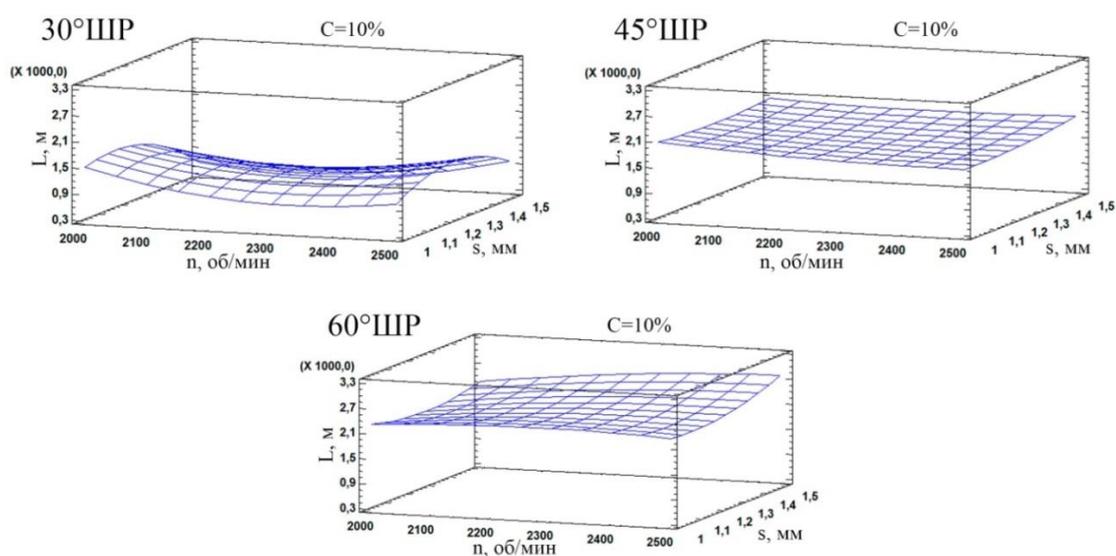


Рисунок 3.13 – Зависимость разрывной длины от частоты вращения ротора, величины межножевого зазора и степени помола волокнистой массы при концентрации 10 %

Наибольшие значения разрывной длины достигаются при концентрации волокнистой массы 10 %, частоты вращения ротора 2500 об/мин и величине зазора между ножами ротора и статора 1,5 мм и составляют 3136 м, что соответствуют показателям ГОСТ 8273-75 для оберточной бумаги [120]. Вместе с

тем увеличение концентрации волокнистой массы не вызывают значительного изменения показателя разрывной длины.

### *Сопротивление продавливанию*

Показатель сопротивления продавливанию зависит от силы сцепления волокон между собой, что обеспечивается такими бумагообразующими свойствами как средняя длина волокон, индекс фибрилляции и содержание мелочи.

При обработке результатов эксперимента были получены следующие зависимости изменения показателя сопротивления продавливанию при степени помола 60 °ШР, которые отображены на рисунке 3.14. Поверхности откликов для степеней помола 30 °ШР и 45 °ШР, отображающие их зависимость от частоты вращения ротора  $n$ , величины зазора  $s$  между ножами ротора и статора и концентрации волокнистой массы  $C$ , приведены в приложении Д, рисунок Д9.

Наибольший отклик показателя сопротивления продавливанию наблюдается при степени помола волокнистой массы 30 °ШР.

Повышение значений показателя сопротивления продавливанию вызвано главным образом изменением величины межножевого зазора.

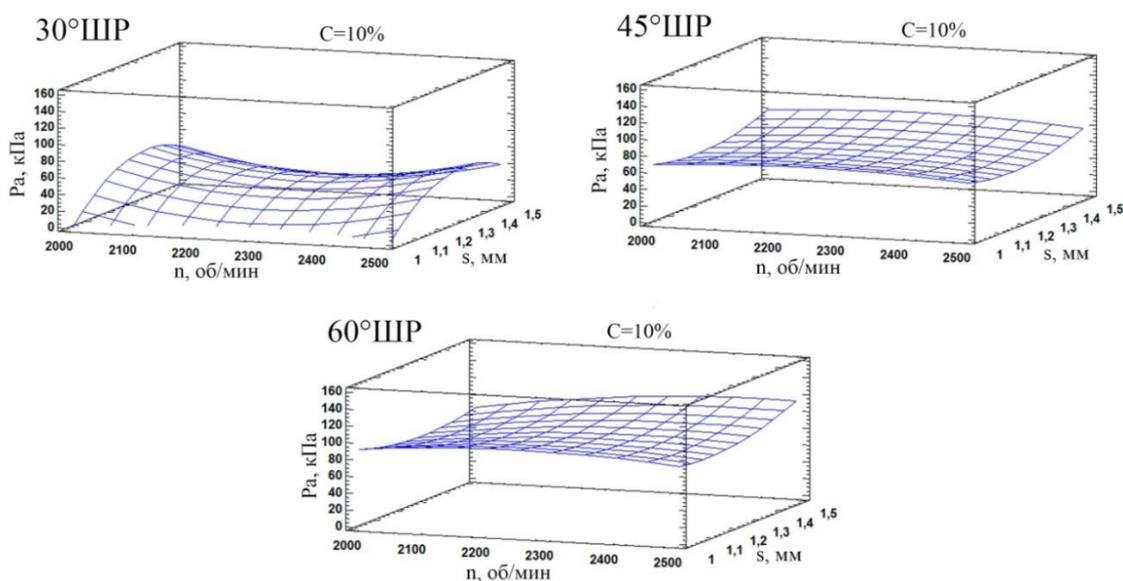


Рисунок 3.14 – Зависимость сопротивления продавливанию от частоты вращения ротора, величины межножевого зазора и степени помола волокнистой массы при концентрации 10 %

Более низкие значения продавливания бумажных отливок, полученных при межножевом зазоре 1 мм, объясняются более интенсивным укорачиванием волокон, следовательно, их меньшим потенциалом связываемости. Для концентрации размалываемой массы 10 %, величине межножевого зазора 1,5 мм и частоте вращения ротора 2500 об/мин достигается максимальное значение сопротивления продавливанию, которое составляет 120 кПа.

### *Сопротивление раздиранию*

На значения сопротивления раздиранию в большей степени влияют длина и прочность составляющих бумагу волокон, нежели величина сил связи между ними. Сопротивление бумаги раздиранию больше у той бумаги, которая изготовлена из относительно более длинных волокон [119].

В ходе обработки экспериментальных данных были выявлены зависимости изменения показателя сопротивления раздиранию при концентрации волокнистой массы 10 %, представленные на рисунке 3.15. Поверхности откликов для степеней помола 30 °ШР и 45 °ШР в зависимости от частоты вращения ротора  $n$ , величины зазора  $s$  между ножами ротора и статора и концентрации волокнистой массы  $C$  при других степенях помола отражены в приложении Д, рисунок Д10.

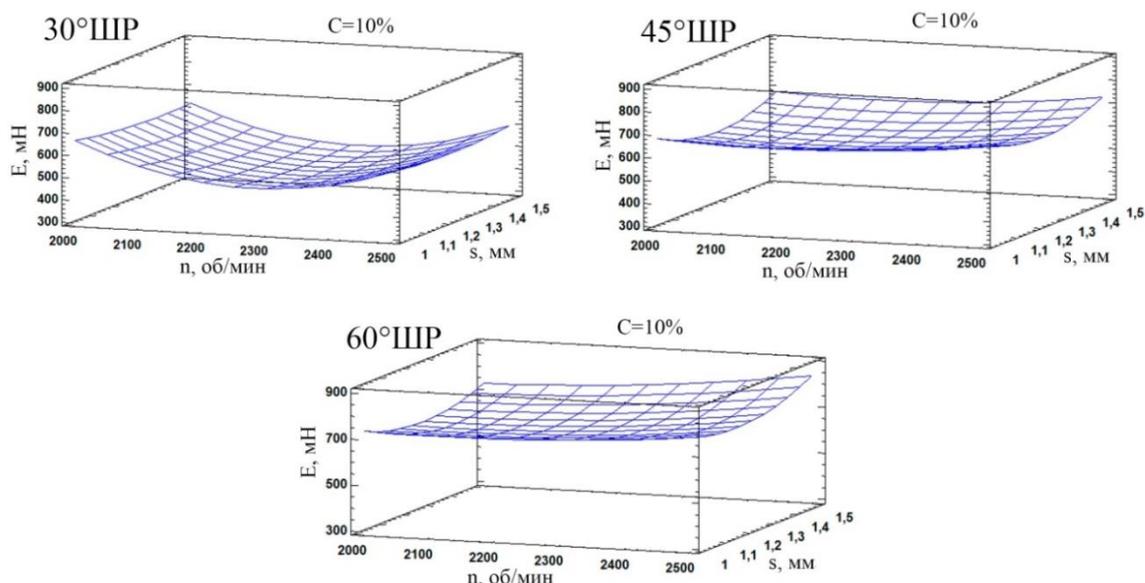


Рисунок 3.15 – Зависимость сопротивления раздиранию от частоты вращения ротора, величины межножевого зазора и степени помола волокнистой массы при концентрации 10 %

Динамика изменения сопротивления раздиранию демонстрирует стабильный рост вне зависимости от концентрации волокнистой массы. Основными факторами, воздействующими на данный показатель, является частота вращения ротора и величина межножевого зазора, наиболее интенсивное влияние отмечается при степени помола 30 °ШР. С ростом степени помола вклад частоты вращения ротора ослабевает. Максимальное увеличение сопротивления раздиранию достигается при концентрации волокнистой массы 10 %, зазоре 1,5 мм, частоте вращения ротора 2500 об/мин и составляет 863 мН. Дальнейшее увеличение концентрации волокнистого полуфабриката дает некоторое снижение показателя. Это объясняется уменьшением средней длины волокон с ростом концентрации массы, что соответствует традиционным представлениям.

Для дальнейшей оценки эффективности использования авторской конструкции размалывающей гарнитуры с традиционными конструкциями гарнитур и оценки влияния механизма процесса размола на различные виды недревесного целлюлозосодержащего сырья необходимо определить оптимальный режим работы размалывающего оборудования.

### **3.6 Определение оптимального режима размола волокнистой массы при использовании конструкции гарнитуры с окружной формой ножей**

Для установления оптимальных режимов размола волокнистого полуфабриката был использован метод обобщенного параметра оптимизации выходных параметров.

Суть решения задачи оптимизации заключается в «свертке» информации – создании глобального скалярного критерия (обобщенного параметра оптимизации), по которому определяются оптимальные факторы процесса размола. В данном исследовании в качестве параметров оптимизации были выбраны такие бумагообразующие свойства как индекс фибрилляции ( $Y3$ ), грубость волокон ( $Y4$ ) и физико-механические характеристики бумажных отливок: сопротивление излому, разрывная длина, сопротивление раздиранию,

сопротивление продавливанию ( $Y_{12}-Y_{15}$ ). Данные выходных параметров и их нормированные значения с обобщенным параметром оптимизации приведены в приложении Е.

Трудностью задачи оптимизации является то, что выходные параметры различаются по физической природе и измерены в разных масштабах. Эта трудность преодолевается путем перехода от натуральных значений выходных параметров к нормированным значениям, при которых все значения будут меняться от нуля до единицы для всех наблюдений [109].

Формула для вычисления частных функций полезности имеет следующий вид:

$$d_n = \frac{y_{\text{тек}} - y_{\min}}{y_{\max} - y_{\min}}, \quad (3.7)$$

где  $y_{\text{тек}}$  – текущее значение для каждого наблюдаемого выходного параметра;

$y_{\max}$  – максимальное значение выходного параметра;

$y_{\min}$  – минимальное значение выходного параметра.

Преобразовав все значения выходных параметров в частные функции полезности, вычисляется обобщенный параметр оптимизации как сумма частных функций полезности, деленных на число наблюдаемых выходных параметров:

$$W_{\text{ОБ}} = \frac{\sum_{u=1}^n d_u}{n}, \quad (3.8)$$

где  $n$  – число наблюдаемых параметров.

В приложении Д представлен обобщенный параметр оптимизации для всех наблюдаемых выходных параметров. Данные таблицы наглядно показывают, что оптимальные факторы процесса размола соответствуют самым высоким значениям выходных параметров  $Y$ , что подтверждается обобщенными значениями параметра оптимизации близкими к единице.

С помощью регрессионного анализа на основе функции обобщенного параметра оптимизации от выходных факторов процесса размола  $W=f(x_1, x_2, x_3)$  получается уравнение регрессии.

Уравнение имеет следующий вид:

$$W_{OB} = -4,165 + 0,005 \cdot X_1 - 5,26 \cdot X_2 + 0,206 \cdot X_3 - 1,025E^{-6} \cdot X_1^2 + 0,001 \cdot X_1 \cdot X_2 - 1,204E^{-4} \cdot X_1 \cdot X_3 + 1,039 \cdot X_2^2 + 0,003 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,003 \cdot X_3^2 \quad (3.9)$$

Максимальные значения обобщенного параметра оптимизации, найденные по уравнению регрессии, соответствуют следующим режимам работы дисковой мельницы:

- частота вращения ротора  $n = 2500$  об/мин;
- величина зазора между ножами ротора и статора  $s = 1,5$  мм;
- концентрация волокнистой массы  $C = 10$  %.

Аксонметрические изображения поверхностей откликов представлены на рисунке 3.16.

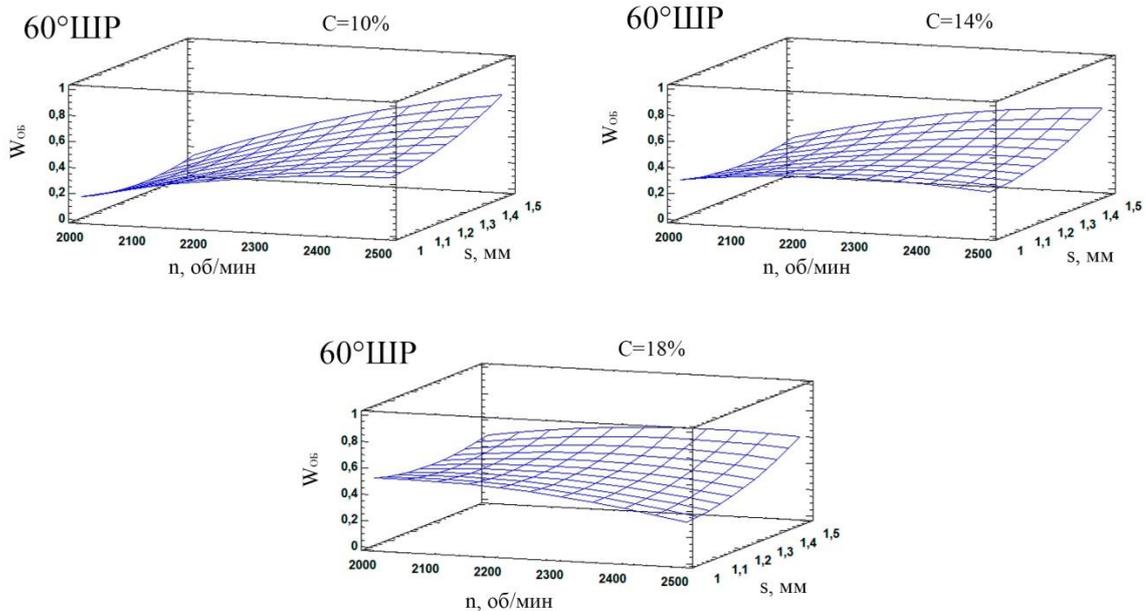


Рисунок 3.16 – Зависимость обобщенного параметра оптимизации  $W_{OB}$  от частоты вращения ротора, величины межножевого зазора и концентрации волокнистой массы.

Найденные по уравнению регрессии оптимальные параметры размола подтверждаются представленными поверхностями откликов.

### 3.7 Оценка эффективности процесса размола недревесного целлюлозосодержащего сырья при использовании различных конструкций гарнитур

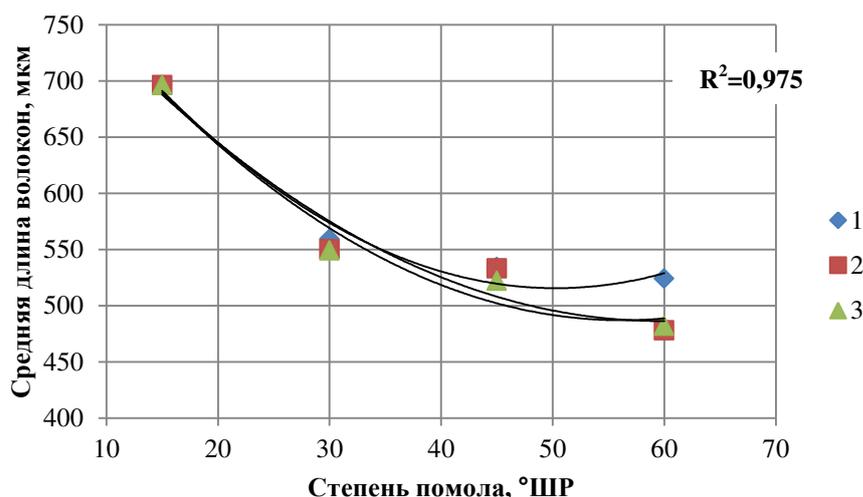
Для изучения влияния конструкции гарнитуры с окружной и прямолинейной формой ножей (таблица 3.2) на бумагообразующие свойства волокнистой массы и физико-механические характеристики бумажных отливок во второй части эксперимента был проведен однофакторный эксперимент при найденных оптимальных режимах размола.

Для сравнения использовались традиционная гарнитура с углом наклона ножей  $35^\circ$ , традиционная гарнитура с углом наклона ножей  $20^\circ$ .

**Бумагообразующие свойства волокнистой массы при использовании различных конструкций гарнитур.**

*Средняя длина волокон*

Для визуализации изменений средней длины волокна от степени помола с учетом воздействия различных конструкций размалывающих гарнитур построены графики, представленные на рисунке 3.17.



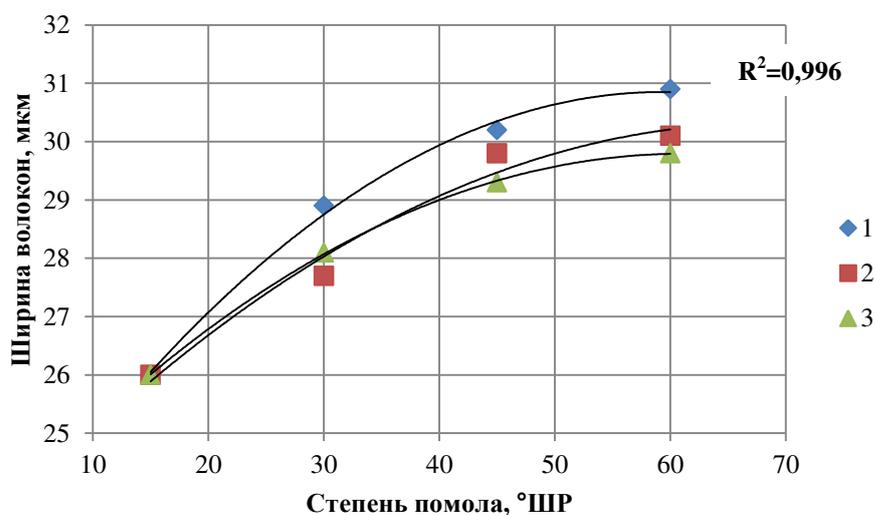
1 – гарнитура с окружной формой ножей; 2 – традиционная гарнитура  $20^\circ$ ; 3 – традиционная гарнитура  $35^\circ$

Рисунок 3.17 – Зависимость средней длины волокон от степени помола при использовании различных конструкций гарнитур

Средняя длина волокон при степени помола волокнистой массы 60 °ШР, полученной с использованием гарнитуры с окружной формой ножей, составляет 524 мкм, тогда как для традиционных гарнитур длина составляет 482 мкм при первоначальном значении 696 мкм.

### *Ширина волокон*

На рисунке 3.18 отображены графики зависимости изменения ширины волокна при использовании различных конструкций гарнитур.



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

Рисунок 3.18 – Зависимость ширины волокон от степени помола при использовании различных конструкций гарнитур

Наиболее интенсивно изменение ширины волокна происходит при силовом воздействии окружных ножей. При этом характер изменения средней ширины волокна сходен при использовании как гарнитуры с окружной формой ножей, так и традиционных гарнитур. Однако применение в процессе размолта авторской конструкции гарнитуры позволяет увеличить ширину волокна с 26 мкм до 30,9 мкм.

### *Фракционный состав*

Гистограмма, показанная на рисунке 3.19, даёт более подробную информацию о распределении длин волокон по фракциям.

Применение размалывающей гарнитуры с окружной формой ножей позволяет сохранить более чем 30 % волокна длиной 1553-3524 мкм по сравнению с традиционными гарнитурами. Кроме того, процентное содержание волокон фракции 301-684 мкм при размоле волокнистого полуфабриката авторской гарнитурой немного ниже, чем при размоле традиционными гарнитурами. При этом отмечается некоторое увеличение процентного содержания волокон фракции 200-301 мкм для размалывающей гарнитуры с окружной формой ножей. Следует отметить, что с ростом степени помола процентное содержание коротких волокон увеличивается. Такие волокна в свою очередь заполняют промежутки между более длинными волокнами, благодаря чему повышается однородность бумаги [55 ,111].

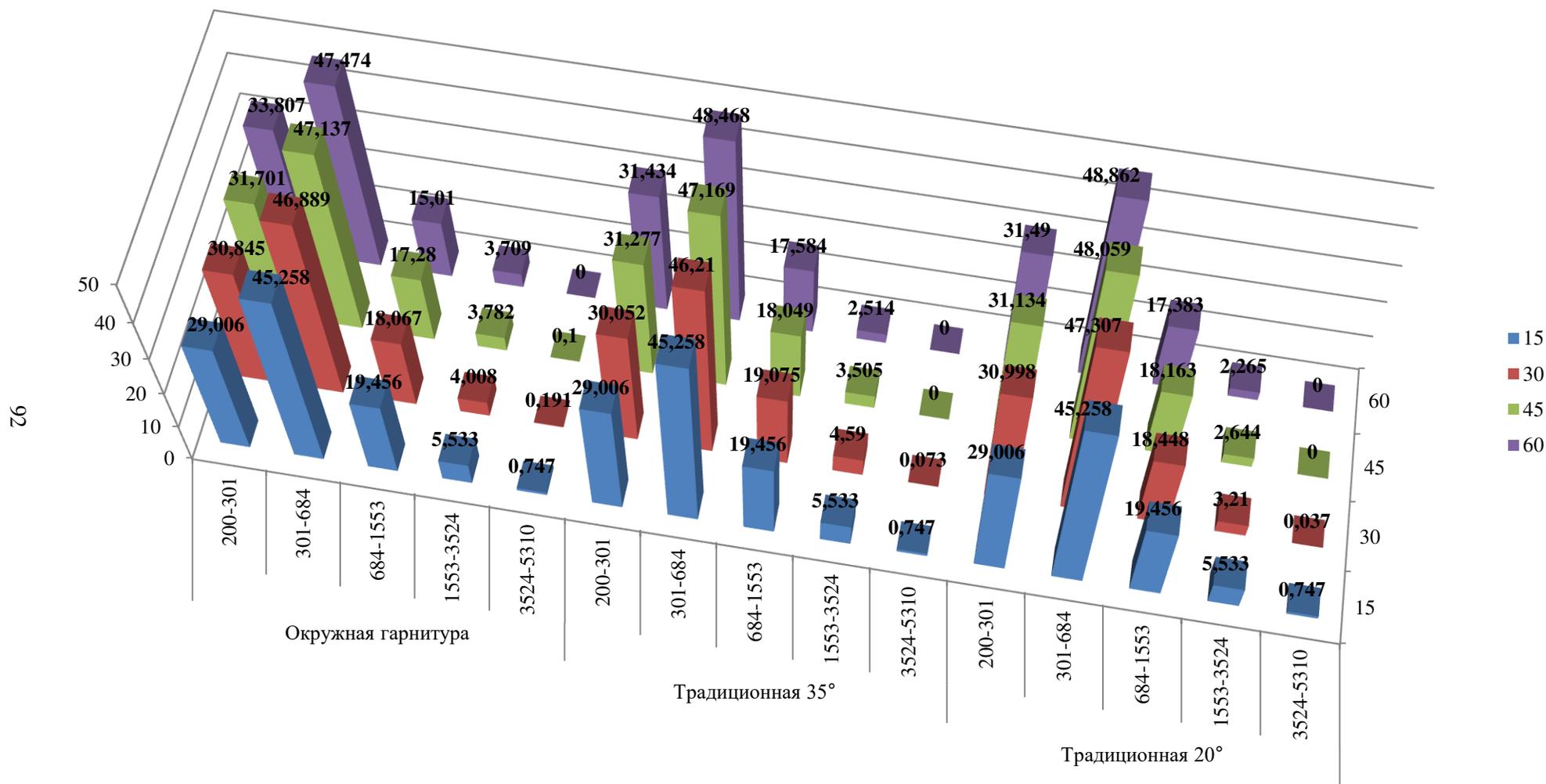
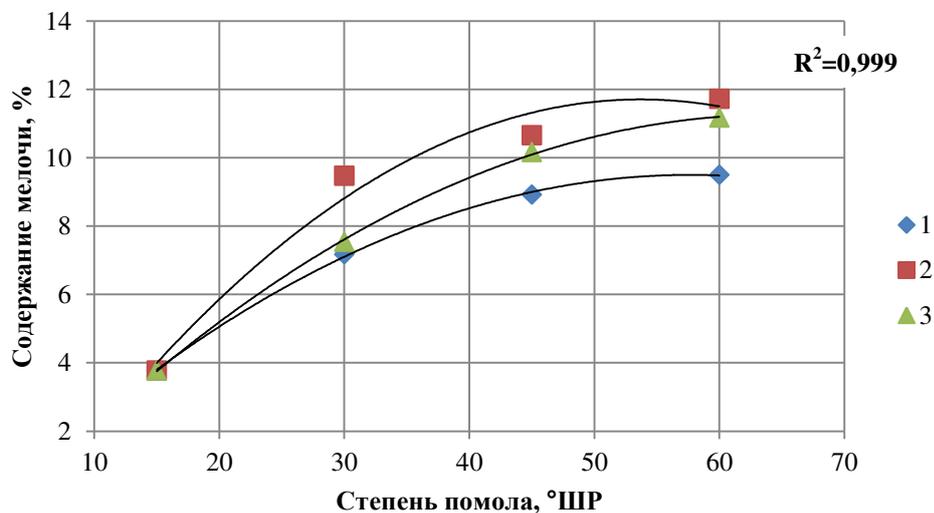


Рисунок 3.19 – Гистограмма распределения длины волокон по классам фракций при частоте вращения ротора 2500 об/мин, величины зазора между ножами ротора и статора 1,5 мм и использования гарнитур с окружной формой ножей, традиционной с углом наклона ножей 35°, традиционной с углом наклона ножей 20°

### Содержание мелочи

На рисунке 3.20 показано изменение содержания мелочи при размоле с использованием различных конструкций гарнитур.



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

Рисунок 3.20 – Зависимость содержания мелочи от степени помола при использовании различных конструкций гарнитур

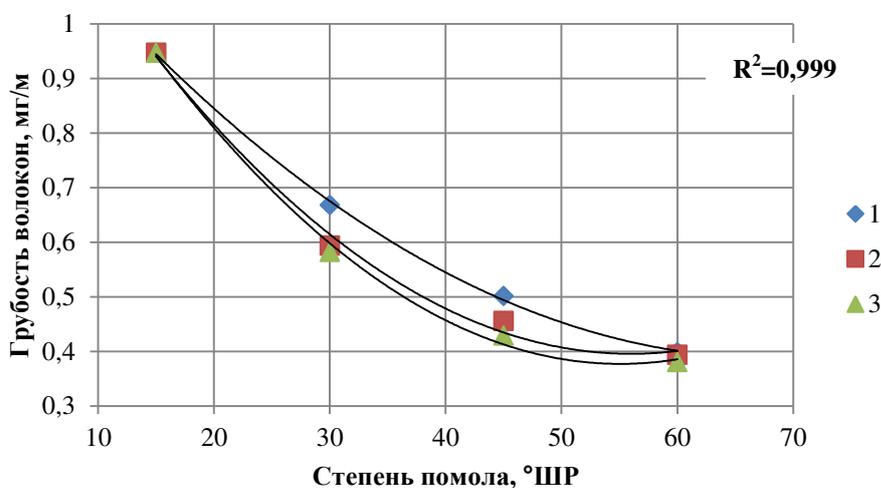
В процессе анализа результатов эксперимента было выявлено, что вид конструкций гарнитур с прямолинейными ножами оказывает более интенсивное рубящее воздействие, вследствие которого содержание мелочи в волокнистой массе больше на 19 %, чем при размоле с использованием окружной конструкции гарнитуры.

### Грубость волокон

Изменение грубости волокон в процессе размола имеет близкие качественные зависимости, которые отражены на рисунке 3.21.

При этом стоит отметить, что механизм снижения грубости при использовании традиционных и окружной гарнитур различен. Размалывающие гарнитуры с прямолинейной формой ножей оказывают в большей степени

рубящее воздействие, тогда как разработанная гарнитура направляет процесс размола в сторону фибрилляции волокон.



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

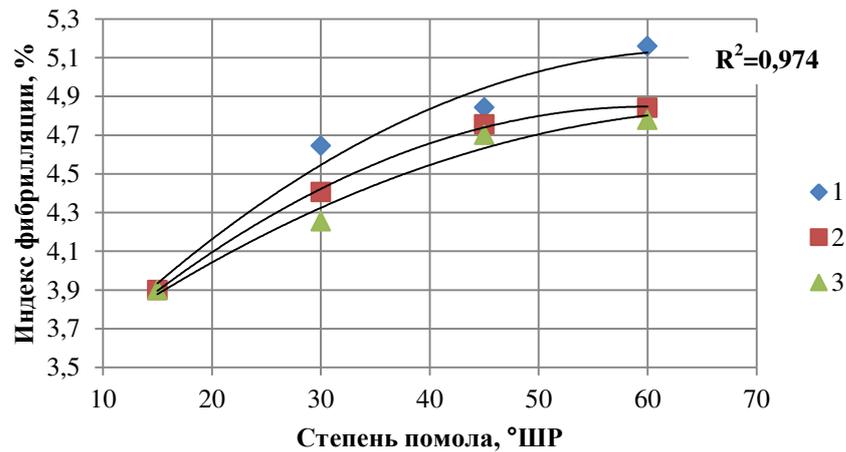
Рисунок 3.21 – Зависимость толщины волокон от степени помола при использовании различных конструкций гарнитур

За счёт этого эффекта толщина волокон при обработке традиционными гарнитурами снижается несколько сильнее. Но при размоле до 60 °ШР мы видим, что значения толщины выравняются, при этом для традиционных гарнитур зависимость становится более пологой, тогда как для гарнитуры авторского исполнения наблюдается тенденция к дальнейшему снижению показателя.

#### *Индекс фибрилляции*

На рисунке 3.22 отображены изменения индекса фибрилляции в процессе размола.

Для всех видов используемых гарнитур зависимости носят характер, близкий к линейному. Однако использование конструкции гарнитуры с окружной формой оказывает наиболее сильное фибриллирующее воздействие, превышающее значение индекса фибрилляции при размоле традиционными гарнитурами и составляет 5,2 % против 4,8 %.

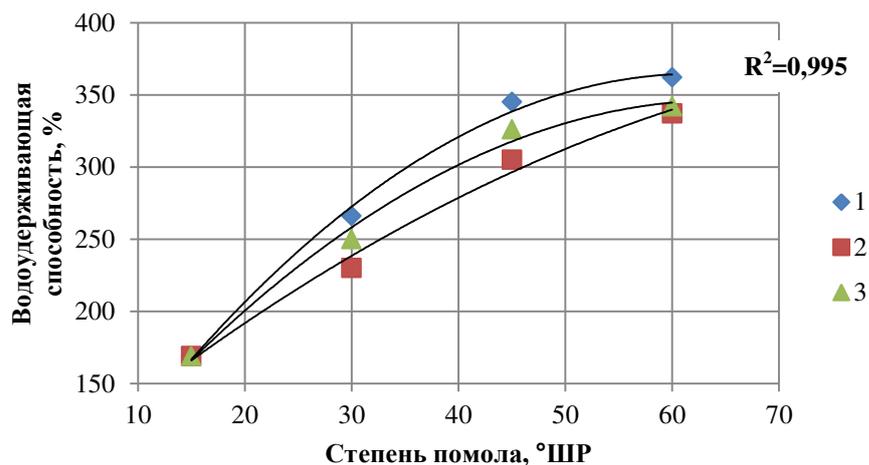


1 – гарнитура с окружной формой ножей; 2 – традиционная гарнитура 20°; 3 – традиционная гарнитура 35°

Рисунок 3.22 – Зависимость индекса фибрилляции волокон от степени помола при использовании различных конструкций гарнитур

При этом значительное изменение индекса при размоле авторской гарнитурой отмечается при 60 °ШР, тогда как при применении гарнитур с прямолинейной формой ножей на последнем этапе размола прирост значений индекса фибрилляции практически не наблюдается.

### *Водоудерживающая способность*



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

Рисунок 3.23 – Зависимость водоудерживающей способности волокнистой массы от степени помола при использовании различных конструкций гарнитур

На рисунке 3.23 представлена динамика изменения водоудерживающей способности в процессе размола с использованием различных конструкций гарнитур.

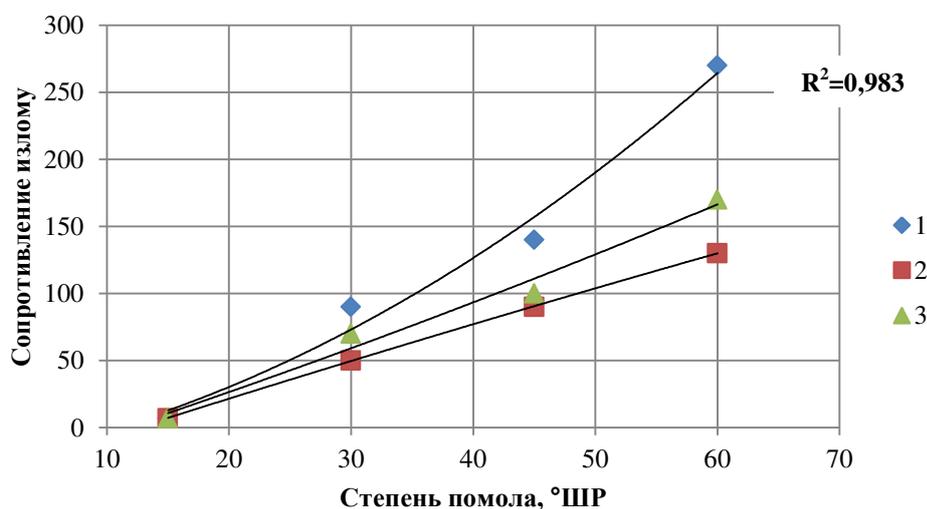
На графике наблюдается рост водоудерживающей способности по идентичным качественным зависимостям при использовании окружной и традиционных конструкций гарнитур. Наибольшее значение показателя достигается при обработке волокнистого полуфабриката конструкцией гарнитуры с окружной формой ножей.

Однако значительного прироста показателя не наблюдается, что положительно скажется на процессе формования бумажного листа.

### **Физико-механические характеристики бумажных отливок при использовании различных конструкций гарнитур.**

#### *Сопротивление излому*

Сопротивление излому значительно отличается в зависимости от вида конструкции гарнитуры. Характер изменения зависимостей отражен на рисунке 3.24.



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

Рисунок 3.24 – Зависимость сопротивления излому от степени помола при использовании различных конструкций гарнитур

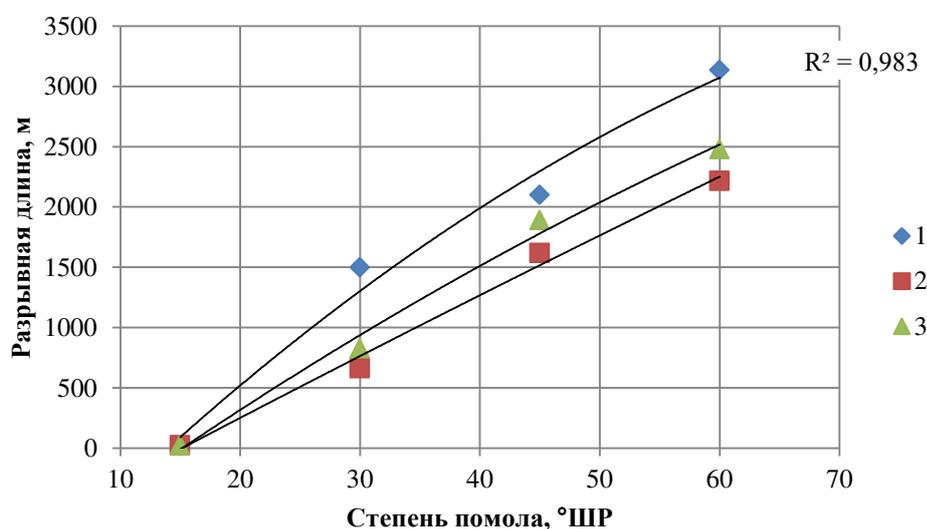
Динамика формирования сопротивления излому принимает гиперболический характер и достигает своего максимума при использовании конструкции гарнитуры с окружной формой ножей, что на 52 % больше, чем при использовании традиционной гарнитуры с углом наклона ножей 20°.

Высокие значения данного показателя у бумажных отливок подтверждают высокую степень разработки волокон.

### *Разрывная длина*

Разрывная длина бумажных отливок из технической конопли растёт вне зависимости от конструкции используемой размалывающей гарнитуры, что иллюстрирует рисунок 3.25.

Однако наибольший рост значений показателя отмечен при использовании конструкции гарнитуры с окружной формой ножей и составляет 3136 м, против 2480 м для традиционной гарнитуры с углом наклона ножей 35° и 2217 м для традиционной гарнитуры с углом наклона ножей 20°. Интенсивный прирост значений наблюдается в течение всего процесса размола.



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

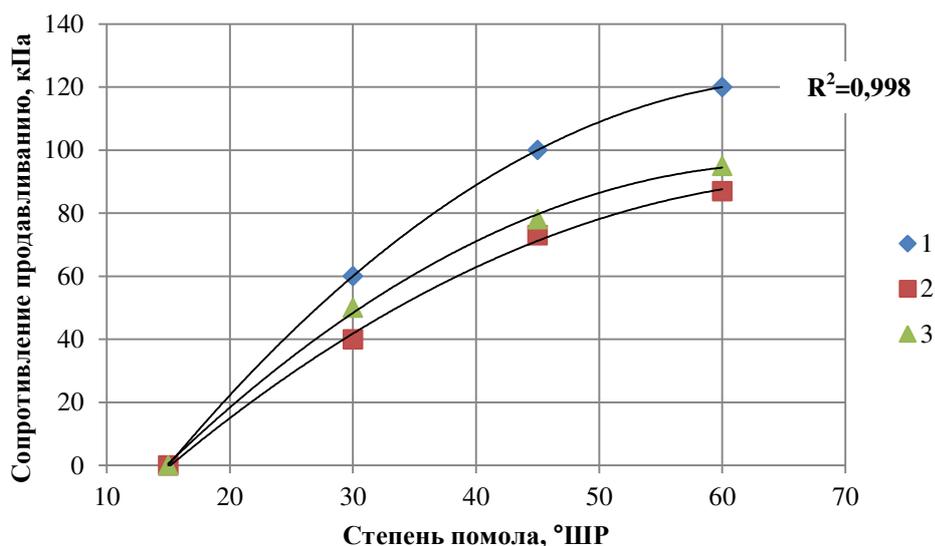
Рисунок 3.25 – Зависимость разрывной длины от степени помола при использовании различных конструкций гарнитур

Кроме того, график указывает на то, что дальнейший прирост степени помола будет способствовать увеличению значений показателя разрывной длины.

### *Сопротивление продавливанию*

Из рисунка 3.26 видно, что с ростом степени помола размалываемой массы увеличивается сопротивление продавливанию бумажных отливок вне зависимости от конструкции применяемой ножевой гарнитуры.

Наиболее высокий прирост значений отмечается при размоле массы с использованием конструкции гарнитуры с окружной формой ножей. Так, изменение сопротивления продавливанию для отливок, полученных при применении разработанной гарнитуры, больше на 27 %, чем для отливок, изготовленных с использованием традиционных гарнитур.



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

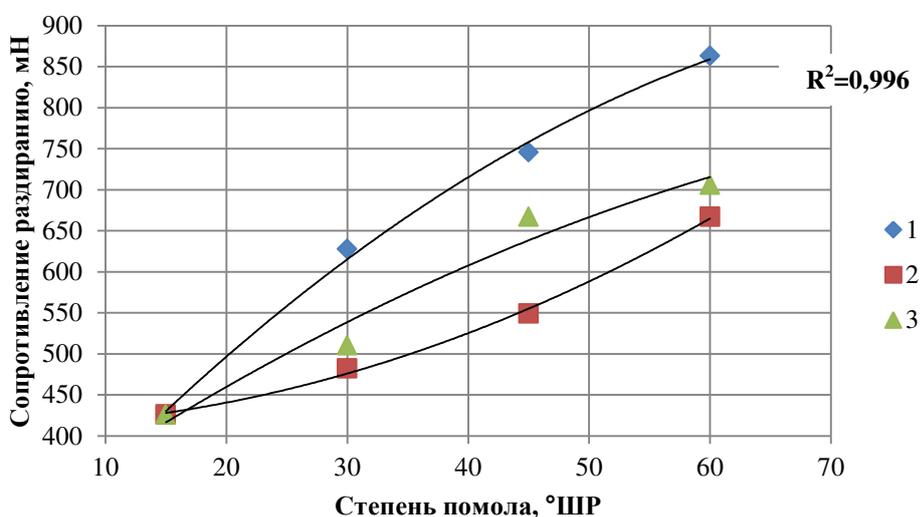
Рисунок 3.26 – Зависимость сопротивления продавливанию от степени помола при использовании различных конструкций гарнитур

Качественно же сопротивление продавливанию изменяется идентичным образом для всех конструкций гарнитур.

### Сопротивление раздиранию

Рисунок 3.27 демонстрирует, как изменяются зависимости сопротивления раздиранию.

Из графика видно, что применение конструкции гарнитуры с окружной формой ножей позволяет получить отливки с более высокой степенью сопротивления раздиранию. В сравнении с традиционными гарнитурами показатель сопротивления раздиранию с увеличением степени помола вырос на 72 %, тогда как для гарнитур с прямолинейной формой ножей этот рост составил 40 %.



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

Рисунок 3.27 – Зависимость сопротивления раздиранию от степени помола при использовании различных конструкций гарнитур

Использование в процессе размолта авторской конструкции размалывающей гарнитуры позволяет достичь большей степени фибрилляции волокон, что способствует увеличению потенциала их связываемости и позволяет достичь более высоких прочностных показателей бумажных отливок, чем при использовании размалывающих гарнитур с традиционной формой ножей.

### **3.8 Оценка эффективности процесса размолла различных видов недревесного целлюлозосодержащего сырья с использованием авторской конструкции гарнитуры**

Для оценки эффективности процесса размолла с использованием авторской конструкции гарнитуры было выбрано 3 вида недревесного целлюлозосодержащего сырья (таблица 3.7).

Размолу подвергались отходы переработки таких сельскохозяйственных растений, как техническая конопля и лён, в больших объемах выращиваемые на территории России. Отходы переработки хлопка в виде линта были выбраны как один из самых широко применяемых источников недревесной целлюлозы, в том числе для получения ценных бумаг высокого качества.

Льняной полуфабрикат, с заострённостью до 5 %, аналогично конопляному полуфабрикату, предварительно обрабатывался в дезинтеграторе-дробилке «Рекорд» для придания ему однородности с последующим замачиванием в воде на сутки.

Волокнистая масса из хлопкового линта предварительно замачивалась в воде на сутки с последующим роспуском в дезинтеграторе.

Размол проводился с использованием гарнитуры с окружной формой ножей при концентрации волокнистой массы 10 %, частоте вращения ротора дисковой мельницы 2500 об/мин и величине межножевого зазора 1,5 мм.

Были определены бумагообразующие свойства волокнистой массы (средняя длина волокон, ширина волокон, индекс фибрилляции, грубость волокон, водоудерживающая способность) и физико-механические характеристики бумажных отливок (разрывная длина, сопротивление излому, сопротивление продавливанию, сопротивление раздиранию).

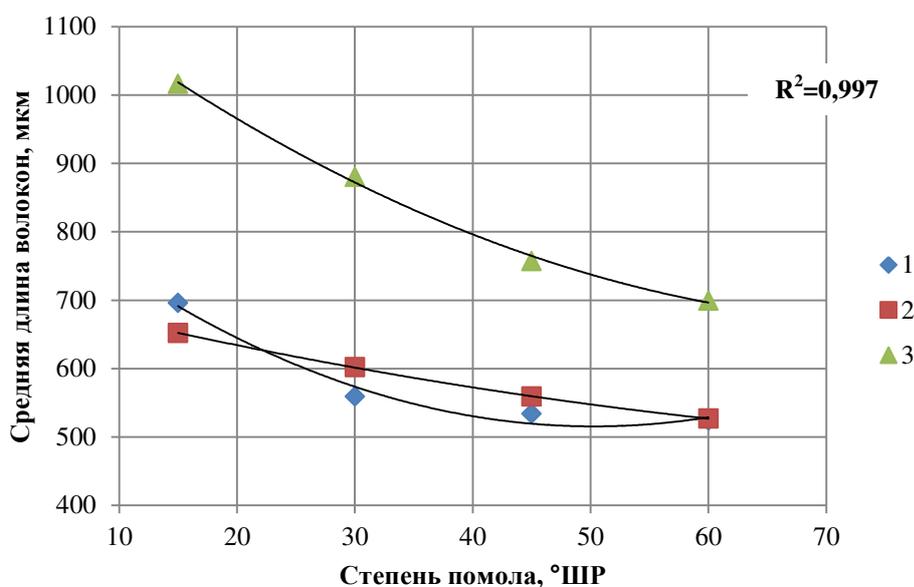
Таблица 3.7 – Сравнительная характеристика исходного недревесного целлюлозосодержащего сырья

	Внешний вид	Содержание целлюлозы	Бумагообразующие свойства											
			Средняя длина волокна, мкм	Ширина волокна, мкм	Индекс фибрилляции, %	Водоудерживающая способность, %	Грубость волокна, мг/м	Содержание мелочи, %	Фракционный состав средней длины волокна, мкм, %					
200-301	301-684	684-1553							1553-3524	3524-5310	5310-8000			
Техническая конопля		67%	696	26	3,901	169	0,947	4,776	29,006	45,258	19,456	5,533	0,747	0
			Физико-механические характеристики											
			Разрывная длина, м		Сопротивление продавливанию, кПа			Сопротивление излому			Сопротивление раздиранию, мН			
			26		0			7			426			
Лен		76%	652	25,6	3,196	154	0,522	10,862	25,704	37,714	25,63	10,533	0,419	0
			Физико-механические характеристики											
			Разрывная длина, м		Сопротивление продавливанию, кПа			Сопротивление излому			Сопротивление раздиранию, мН			
			12		0			2			315			
Хлопковый линт		92%	1016	20,6	1,879	150	0,351	3,584	12,733	33,541	34,369	16,633	2,177	0,5
			Физико-механические характеристики											
			Разрывная длина, м		Сопротивление продавливанию, кПа			Сопротивление излому			Сопротивление раздиранию, мН			
			42		0			10			549			

## Бумагообразующие свойства волокнистой массы из различных видов растительного сырья.

### Средняя длина волокон

Изменение средней длины волокон исследуемого недревесного сырья в результате размола представлено на рисунке 3.28.



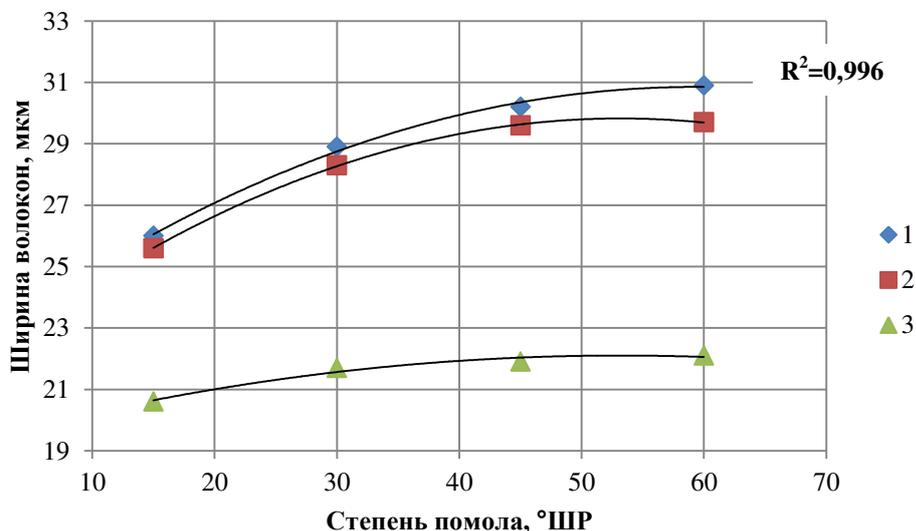
1 – техническая конопля; 2 – лён; 3 – хлопковый линт

Рисунок 3.28 – Зависимость средней длины волокон от степени помола при использовании различных видов сырья

На рисунке 3.28 видно, что снижение средней длины волокон хлопкового линта происходит более интенсивно. Это указывает на то, что в процессе размола хлопковое волокно подвергается рубке несколько больше, чем лубяное. При этом качественный и количественный характер снижения средней длины волокон схож для выбранных видов лубяного сырья и отмечается снижением в пределах 20 %, тогда как волокна хлопкового линта теряют в длине 31 %. Большое укорочение хлопковых волокон обусловлено их витой структурой, это в значительной степени затрудняет продольное расщепление, что в дальнейшем подтверждается результатами исследований.

### Ширина волокон

Графики, представленные на рисунке 3.29, демонстрируют одинаковые качественные, но различные количественные зависимости.



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

Рисунок 3.29 – Зависимость ширины волокон от степени помола при использовании различных видов сырья

Лубяные волокна и волокна хлопкового линта имеют значительно отличающуюся морфологию, что подтверждается данными по анализу изменения ширины волокон в процессе размола.

Волокна хлопкового линта имеют спиралевидную структуру и МФУ равный  $45^\circ$ , что значительно затрудняет продольное отслоение фибрилл в процессе размола. Для лубяных волокон характерно почти параллельное расположение фибрилл, которые, отслоившись в процессе размола, способны увеличить ширину. В данном случае количественный рост значений ширины льняных и конопляных волокон составил 16 %, тогда как для хлопкового линта рост составил всего 7 %. Кроме того, лубяные волокна считаются толстостенными, что также позволяет получить прирост ширины при механической обработке.

### *Фракционный состав*

Изменение фракционного состава волокнистой массы из различных видов недревесного целлюлозосодержащего сырья отражено на рисунке 3.30.

На гистограмме видно, что волокнистый полуфабрикат из хлопкового линта содержит больше длинноволокнистой фракции 3524-8000 мкм на 85 % по сравнению с льняной массой и на 73 % по сравнению с конопляной массой.

Вместе с этим процентное содержание фракции 200-301 мкм для хлопкового линта увеличивается на 40 %, тогда как льна и технической конопли увеличение составляет 18 % и 15 % соответственно. Подобное изменение фракционного состава объясняется тем, что хлопковый линт несколько хуже поддается размолу, в основном укорачиваясь. Лубяные волокна в большей степени фибриллируются, сохраняя исходную длину.

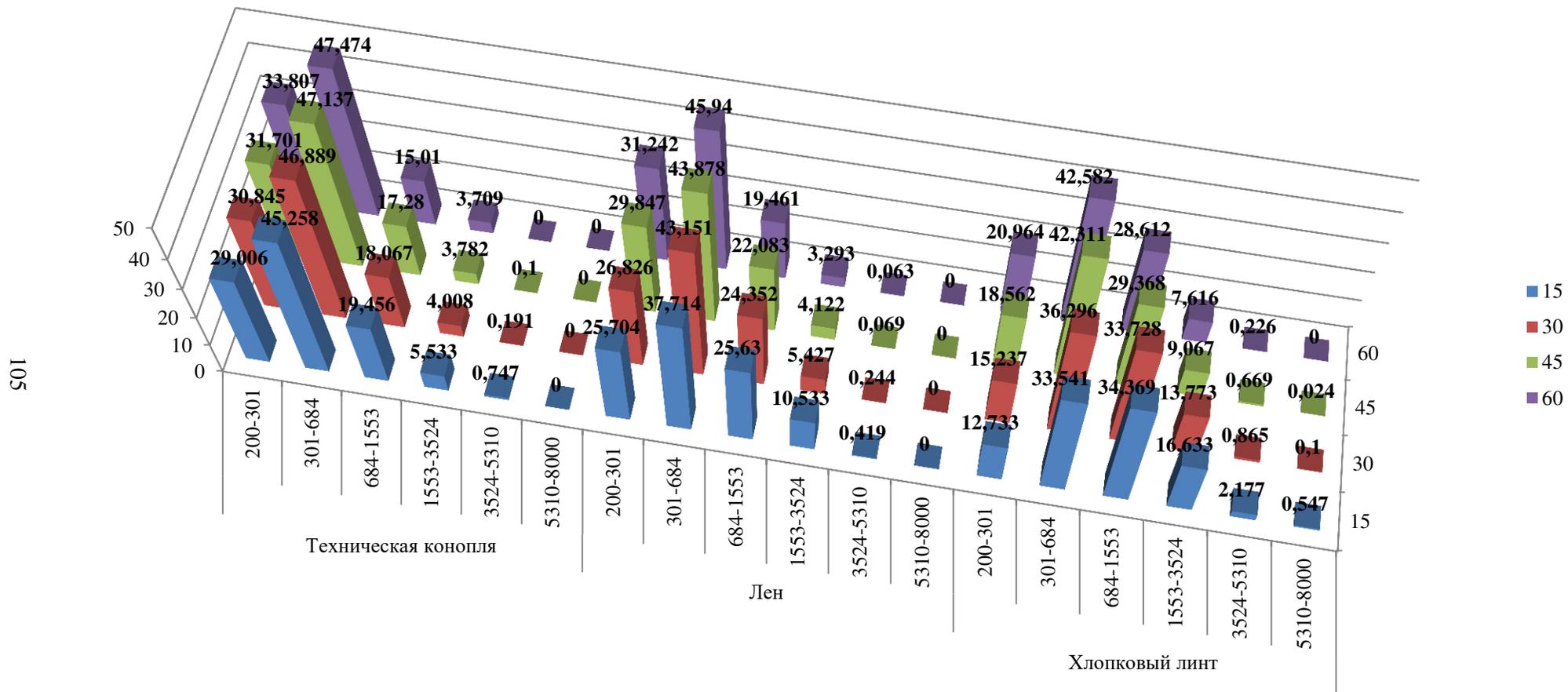
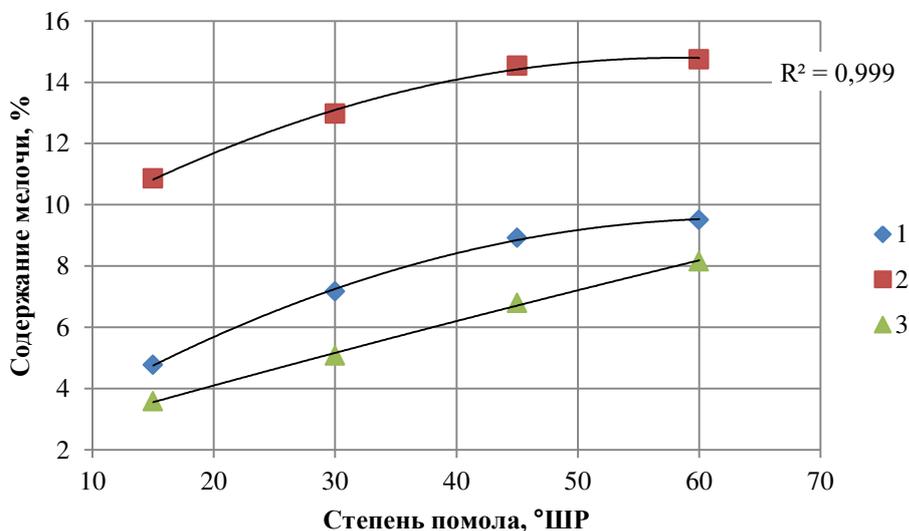


Рисунок 3.30 – Гистограмма распределения длины волокон по классам фракций при частоте вращения ротора 2500 об/мин, величины зазора между ножами ротора и статора 1,5 мм при использовании технической конопля, льна, хлопкового линта в качестве сырья

## Содержание мелочи

Рисунок 3.31 иллюстрирует изменение содержания мелочи при размоле различных видов недревесного сырья.



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

Рисунок 3.31 – Зависимость содержания мелочи от степени помола при использовании различных видов сырья

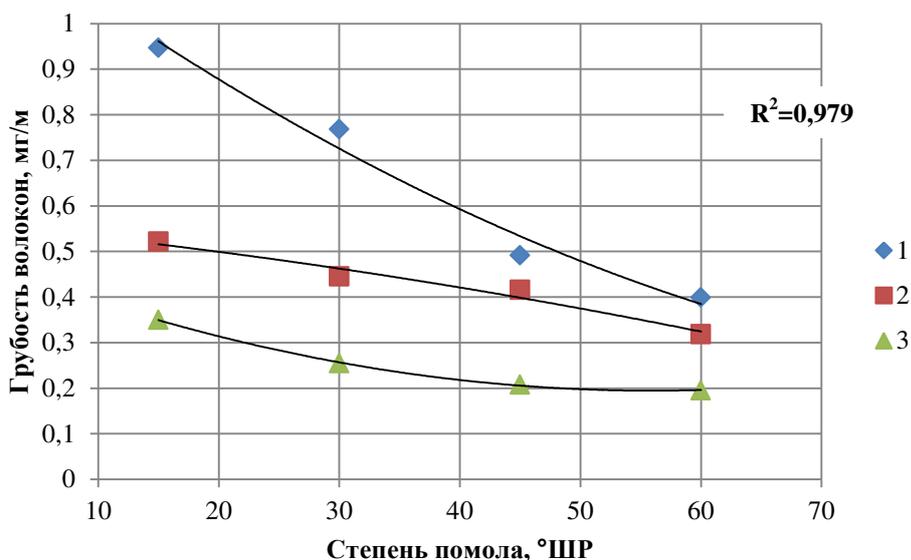
Изначально большее содержание мелочи в технической конопле и льне можно объяснить условиями подготовки в молотковой дробилке, тогда как хлопковый линт является отходом чесания хлопка, что является более щадящим методом обработки.

При этом прирост содержания мелочи в процессе размолла для лубяных культур менее интенсивен. Из графика видно, что разница в содержании мелочи при 45 °ШР и 60 °ШР для технической конопля и льна составляет 0,2 %, и 0,5 % соответственно, а для хлопкового линта – 1,4 % с тенденцией на увеличение. Это объясняется как морфологией волокон, так и их собственной прочностью. Согласно значениям модуля Юнга (таблица 1.2), наиболее прочными из исследуемых волокон являются волокна технической конопля и льна. Так в процессе размолла лубяные волокна легче разделяются на фибриллы, но поскольку

лён имеет меньшую прочность, чем техническая конопля, его частицы быстрее отрываются от основной оси волокна.

### *Грубость волокон*

Грубость как волокон хлопкового линта, так и лубяных снижается с приростом степени помола, что отражено на рисунке 3.32.



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

Рисунок 3.32 – Зависимость грубости волокон от степени помола при использовании различных видов сырья

Уменьшение грубости для волокон хлопкового линта и льна происходит более плавно, тогда как для волокон технической конопли снижение более интенсивно. Хлопок в силу структуры снижает свою грубость незначительно. Более интенсивная разработка происходит для лубяного сырья, в особенности для технической конопли. Для конопляных волокон значения показателя грубости снижаются на 57 %, для льняных на 38 %, для хлопковых на 31 %. Это указывает на приобретение волокнами значительной гибкости.

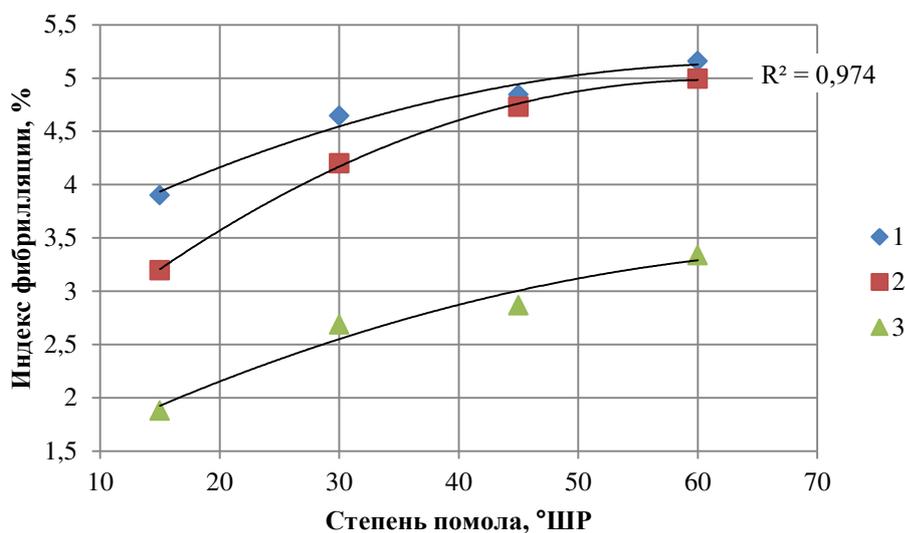
### *Индекс фибрилляции*

Индекс фибрилляции, как и все бумагообразующие свойства, тесно связан со строением волокон. Изменения значений индекса, полученные в результате эксперимента, подтверждают мнения [51, 73] о высокой способности

недревесного сырья к размолу. Утверждается, что при размолу лубяных волокон довольно легко получить длинные лентообразные фибриллы, чего нельзя сказать о хлопковых волокнах.

Данное утверждение связано не только со значениями коэффициента Рункеля, который для зрелых лубяных волокон равен 0,6-0,7, но и высокой степенью внешней фибрилляции, превосходящей аналогичный показатель для волокон лиственной древесины [63].

Отображенные на рисунке 3.33 графики изменения индекса фибрилляции разных видов волокон качественно близки к зависимостям изменения ширины волокна.



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

Рисунок 3.33 – Зависимость индекса фибрилляции волокон от степени помола при использовании различных видов сырья

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

Визуальное изменение внешней фибрилляции проанализировано с использованием микроскопа Микмед-6 ЛОМО при увеличении 100 крат. Снимки волокон сделаны при степенях помола 15°, 30°, 45°, 60 °ШР для различных видов недревесного сырья.

Для получения снимков образцы тонким слоем распределялись на предметном стекле во избежание переплетения волокон между собой.

Согласно полученным данным, с ростом степени помола наблюдается увеличение внешней фибрилляции всех исследуемых видов волокон (рисунок 3.34).

В процессе размола волокна технической конопли претерпевают значительные изменения. С ростом степени помола от оси волокна отслаивается большое количество длинных лентообразных фибрилл.

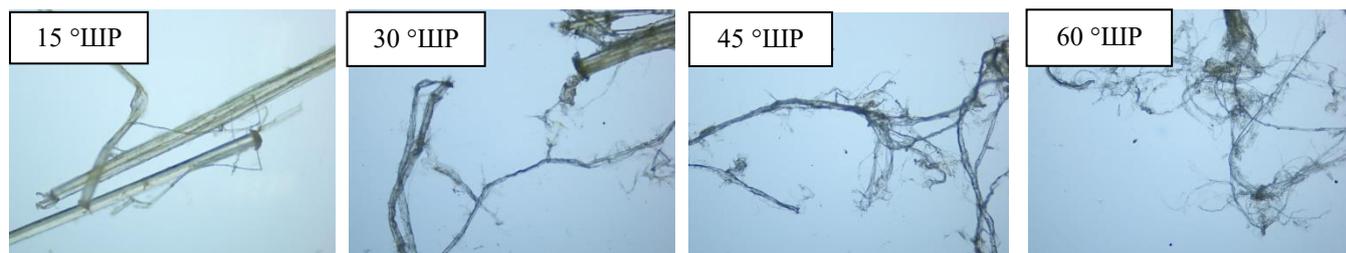


Рисунок 3.34 – Изменение внешней фибрилляции волокон технической конопли от степени помола с использованием окружной конструкции гарнитуры

При достижении степени помола 60 °ШР происходит наиболее интенсивная фибрилляция части волокон, что способствует увеличению их наружной поверхности и росту числа свободных гидроксильных групп.

Аналогично изменяется внешняя фибрилляция льняных волокон (рисунок 3.35).

С приростом степени помола отмечается увеличение числа продольно отслоившихся фибрилл.

Однако из-за меньшей собственной прочности волокон, часть фибрилл целиком отрывается от основной оси волокна, тем самым уменьшая его ширину и значения индекса фибрилляции.

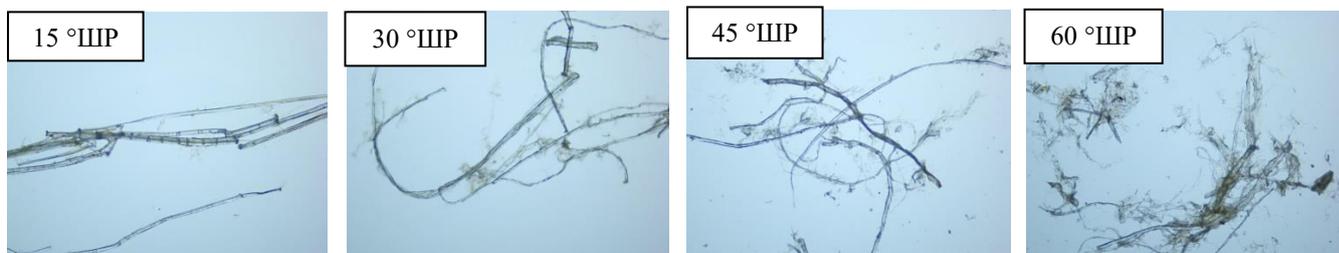


Рисунок 3.35 – Изменение внешней фибрилляции волокон льна от степени помола с использованием окружной конструкции гарнитуры

Для волокон хлопкового линта характерно иное изменение внешней фибрилляции в процессе размола (рисунок 3.36).

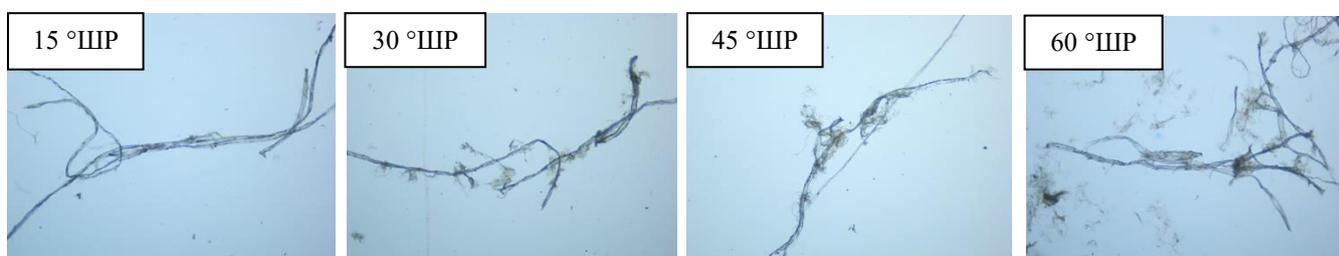


Рисунок 3.36 – Изменение внешней фибрилляции волокон хлопкового линта от степени помола с использованием окружной конструкции гарнитуры

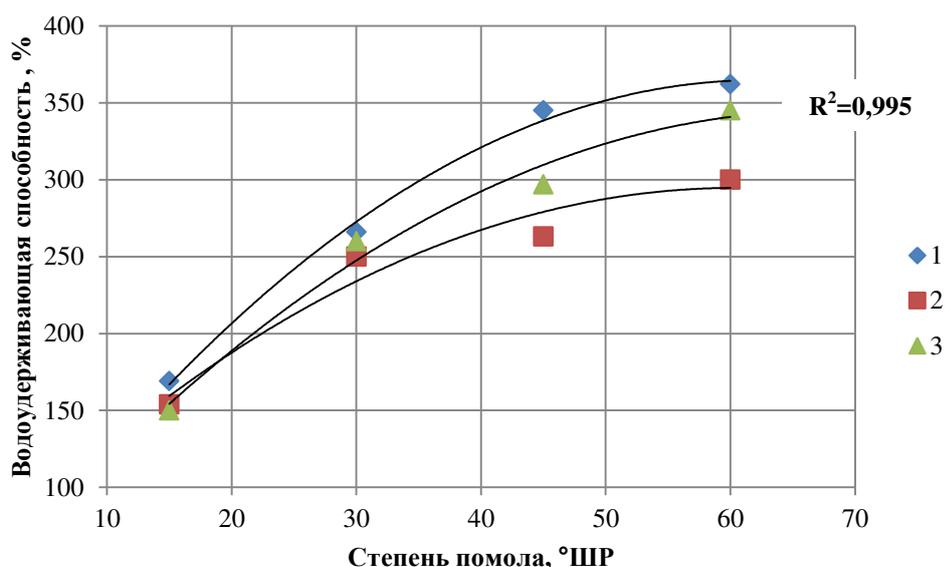
Микроскопические снимки наглядно доказывают, что хлопковые волокна хуже поддаются фибриллированию. Можно заметить, как с ростом степени помола вместе с незначительным увеличением внешней фибрилляции увеличивается и количество мелких волокон. При достижении степени помола 60 °ШР фибриллы в большей степени отрываются от основной оси волокна, что доказывается незначительным увеличением значений индекса фибрилляции.

#### *Водоудерживающая способность*

Водоудерживающая способность, характеризующая не только степень набухания волокон, но и степень внутренней фибрилляции, а также наличие хорошо фибриллированной мелочи, даёт возможность оценить уровень разработанности волокон.

Рисунок 3.37 отражает зависимость изменения показателя водоудерживающей способности для разных видов недревесного сырья в процессе размола.

Результаты эксперимента показывают, что наибольшему гидратирующему и фибриллирующему воздействию подверглись волокна технической конопли. Для них показатель водоудерживающей способности составил 362 %. Несколько ниже данный показатель для волокнистой массы из хлопкового линта – 345 %. Менее всего увеличилась водоудерживающая способность для волокнистого полуфабриката из льна и составила 300 %.



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

Рисунок 3.37 – Зависимость водоудерживающей способности волокнистой массы от степени помола при использовании различных видов сырья

По нашему мнению, несмотря на схожую морфологическую структуру с волокнами технической конопли, льняные волокна хуже поддаются гидратации и внутренней фибрилляции, но при этом быстрее разрушаются. Высокое количество мелочи в волокнистой массе не является показателем высокой водоудерживающей способности, поскольку можно предположить, что эта мелочь плохо фибриллирована, а потому не способна достаточно удерживать воду.

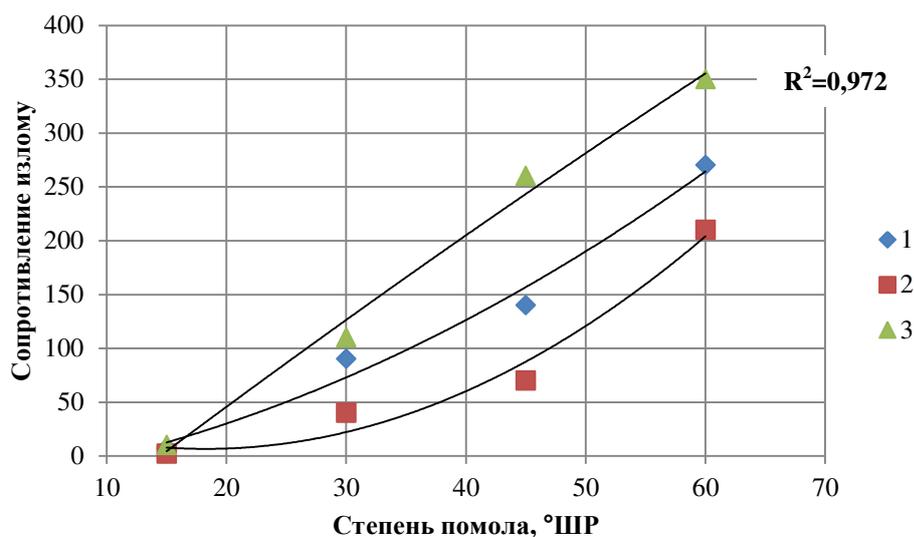
## Физико-механические характеристики бумажных отливок из различных видов растительного сырья.

### Сопротивление излому

Сопротивление излому бумажных отливок из разных видов недревесного сырья увеличивается с ростом степени помола, что демонстрирует рисунок 3.38.

Качественные изменения графиков демонстрируют схожесть строения лубяных волокон и их отличие от волокон хлопкового линта.

Волокна хлопкового линта благодаря своей морфологической структуре обладают высокой гибкостью, что подтверждается полученными данными. Это свойство не только сохраняется, но и увеличивается в процессе размола, благодаря чему бумажные отливки имеют значительные показатели сопротивления излому.



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

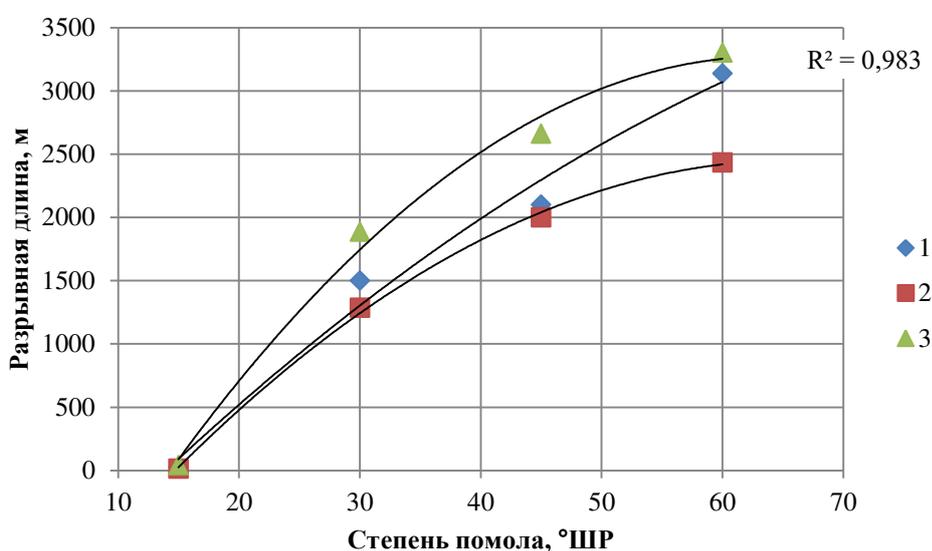
Рисунок 3.38 – Зависимость сопротивления излому от степени помола при использовании различных видов сырья

Количественные значения сопротивления излому для бумажных отливок из хлопковой волокнистой массы больше на 23 % и 40 %, чем для отливок из размолотых конопляных и льняных волокон соответственно.

### Разрывная длина

Характер изменения разрывной длины бумажных отливок из различных видов недровесного сырья отображен на рисунке 3.39.

С ростом степени помола отмечается увеличение разрывной длины отливок из различных видов недровесного сырья. При этом наблюдается некоторое отличие в качественном изменении данного показателя между отливками из технической конопли и льна. Так, при размоле льняной волокнистой массы с 45 °ШР до 60 °ШР прирост прочности менее интенсивен, чем при размоле конопляной массы.



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

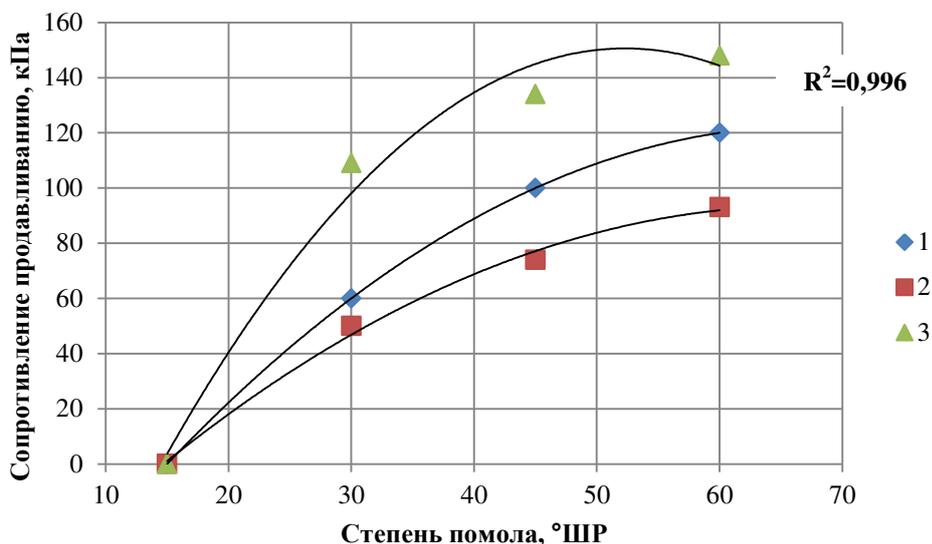
Рисунок 3.39 – Зависимость разрывной длины от степени помола при использовании различных видов сырья

Количественные значения, достигнутые при размоле волокнистой массы из альтернативного сырья, составляют 3312 м для хлопковых отливок, 3136 м для конопляных отливок и 2433 м для льняных отливок.

### Сопротивление продавливанию

Значения показателя сопротивления продавливанию, представленные на рисунке 3.40, варьируются в зависимости от вида используемого сырья.

Анализ экспериментальных данных показывает, что наибольшее значение показателя сопротивления продавливанию характерно для бумажных отливок из волокон хлопкового линта. Наибольшая величина показателя для хлопковых отливок составляет 148 кПа, для конопляных – 120 кПа, для льняных – 93 кПа.



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

Рисунок 3.40 – Зависимость сопротивления продавливанию от степени помола при использовании различных видов сырья

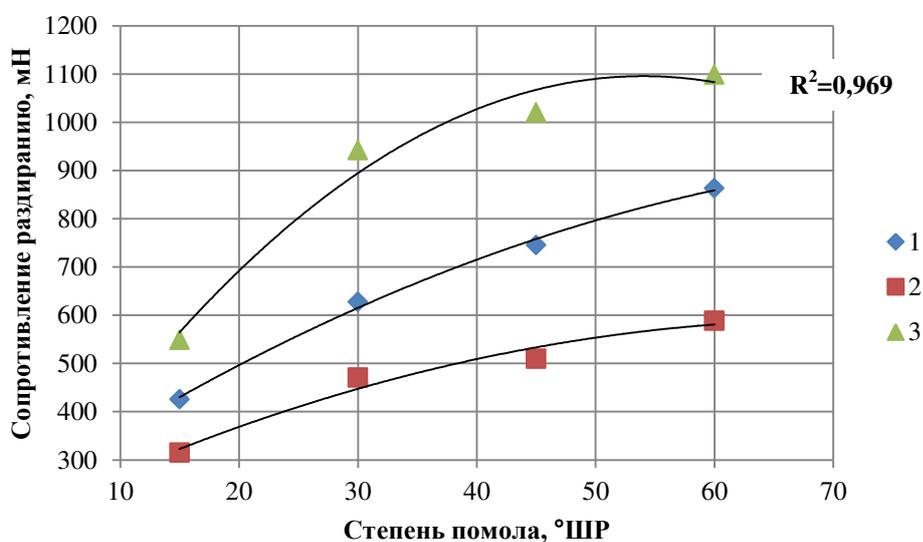
Качественно зависимости изменения сопротивления продавливанию отличаются также в зависимости от особенностей морфологии волокнистого сырья. Значительный рост значений сопротивления продавливанию для отливок, сформированных из хлопкового полуфабриката, прекращается при достижении 50 °ШР, тогда как отливки, сформированные из лубяных полуфабрикатов, не достигают точки перегиба при размоле до 60 °ШР.

#### *Сопротивление раздиранию*

Рисунок 3.41 иллюстрирует зависимость изменения сопротивления раздиранию бумажных отливок, полученных из различных видов сырья.

Аналогично вышеописанным физико-механическим показателям отливки, полученные из хлопковой волокнистой массы, имеют наибольшие прочностные показатели. Количественные показатели для хлопковых отливок выше на 21 %,

чем для бумажных отливок из технической конопли и выше на 46 %, чем для отливок изо льна.



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

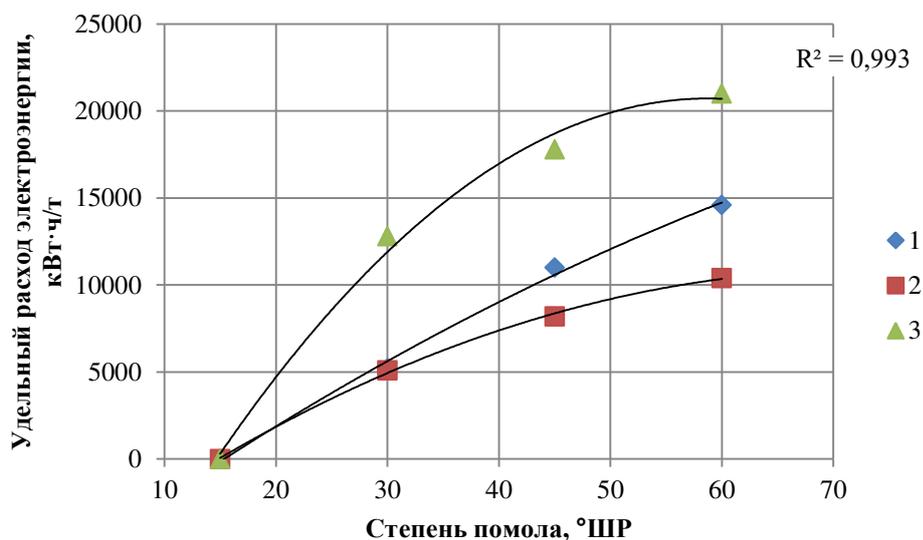
Рисунок 3.42 – Зависимость сопротивления раздиранию от степени помола при использовании различных видов сырья

Важную роль в сопротивлении раздиранию играет собственная прочность волокон. Несмотря на то, что волокна хлопкового линта обладают наименьшей собственной прочностью, отливки из этого материала имеют наибольшую прочность при раздирании. Это объясняется тем, что используемые в данном исследовании хлопковые волокна имеют большую среднюю длину, чем волокна льна и технической конопли.

*Удельный расход электроэнергии при размоле различных видов недревесного целлюлозосодержащего сырья*

Для оценки эффективности процесса размола представленных видов недревесного целлюлозосодержащего сырья рассмотрим удельный расход электроэнергии на обработку тонны абсолютно сухого вещества.

Рисунке 3.42 иллюстрирует график изменения удельного расхода электроэнергии в зависимости от степени помола.



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

Рисунок 3.42 – Зависимость изменения удельного расхода электроэнергии от степени помола при использовании различных видов сырья

Из графика видно, что для размола волокнистой массы из технической конопли до степени помола 60 °ШР требуется  $14,6 \cdot 10^3$  кВт·ч/т. Для обработки такого же количества полуфабриката из льна требуется на 27 % меньше электроэнергии, тогда как на обработку хлопкового линта затрачивается электроэнергии больше на 30 %. Вместе с этим необходимые показатели прочности хлопковых бумажных отливок достигаются уже при степени помола волокнистой массы 45 °ШР расход электроэнергии при этом составляет  $17,8 \cdot 10^3$  кВт·ч/т.

Можно предположить, что большее количество электроэнергии в процессе размола хлопкового линта затрачивается из-за скрученности волокна вокруг своей оси и больших значений МФУ. Такая морфология затрудняет равномерную обработку массы. Волокна спутываются между собой, что осложняет получение продольно отслоившихся фибрилл.

Проведенное сравнение качественных показателей размола лубяных культур (технической конопли и льна) показало целесообразность использования отходов их переработки в получении целлюлозно-бумажных материалов. При этом, как по бумагообразующим свойствам, так и по физико-механическим

показателям данное сырье незначительно уступает такому широко применяемому в ЦБП материалу как хлопковый линт.

### 3.9 Факторный и кластерный анализ выходных параметров

Для установления взаимосвязи исследуемых выходных параметров, влияющих на изменчивость бумагообразующих свойств волокнистой массы и физико-механических характеристик бумажных отливок, был проведен факторный и кластерный анализы. Очевидно, что анализируемые показатели связаны между собой, на что указывают коэффициенты корреляции между ними (приложение Ж). Такая связь подтверждает, что существуют группы параметров, отражающих одно общее свойство объекта, но измеренных разными способами. Поскольку количество выходных параметров достаточно велико, целесообразно провести факторный анализ структуры связи.

Целью факторного анализа является извлечение на поверхность величины, так называемого «фактора», который бы по возможности точнее позволил воспроизвести наблюдаемые корреляции с использованием соответствующей процедуры вычислений [121].

Исследуемый объект характеризуется параметрами  $Y_1, Y_2, \dots, Y_m$ , включенными в исследование. Существование корреляций обусловлено существованием нескольких (меньше, чем число  $m$ ) «латентных» (скрытых) факторов, изменение которых вносит вклад в варьирование бумагообразующих свойств волокнистой массы и физико-механических показателей бумажных отливок. Для анализа структуры связей между выходными параметрами используются методы многомерного факторного анализа.

Дисперсии и корреляции нормализованных переменных  $Y_1, Y_2, \dots, Y_m$  образуют  $m \times m$  матрицу  $C = \{c_{ij}\}$  с дисперсиями на главной диагонали (при  $i=j$ ) и корреляциями вне главной диагонали (при  $i \neq j$ ). Задача факторного анализа заключается в построении математической модели в виде линейной регрессии.

$$Y_i = l_{i1}f_1 + l_{i2}f_2 + \dots + l_{it}f_t + \varepsilon_i; i = 1, \dots, m; m > t \quad (3.10)$$

на основании информации, заключенной в корреляционной матрице  $C$ . В выражении (3.10) переменные  $f_i$  – латентные факторы; коэффициенты  $l_{ij}$  – нагрузки  $j$ -го фактора в  $i$ -й переменной. Слагаемые  $\varepsilon_i$  – остатки с дисперсиями  $v_i$ , представляющие собой источники отклонений, действующие только на  $Y_i$ . Факторная модель содержит в себе следующую гипотезу факторного анализа: множество коррелированных переменных  $Y_i$  ( $i=1, 2, \dots, m$ ) можно описать меньшим числом латентных факторов  $f_j$  ( $j=1, 2, \dots, t; m>t$ ) и множеством независимых остатков  $\varepsilon_i$  ( $i=1, \dots, m$ ).

Из выражения (3.10) следует, что корреляционная матрица (в общем случае ковариационная) может быть выражена через нагрузки и остаточные дисперсии:

$$C = LL^T + V, \quad (3.11)$$

где  $L$  – матрица  $m \times t$  факторных нагрузок  $l_{ij}$ ;

$V$  – диагональная матрица  $m \times m$  с остаточными дисперсиями  $v_i$  на диагонали.

При умножении  $L$  в выражении (3.11) на любую ортогональную матрицу размера  $t \times t$  произведение  $LL^T$  не изменяется. Следствием этого является существование большого множества решений, удовлетворяющих равенству (3.11) и равноценных по статистическим критериям.

Поиск наилучшей модели (3.10) проводят в два этапа. Вначале находят частное решение, удовлетворяющее какому-либо дополнительному формальному ограничению, однозначно фиксирующему факторные нагрузки. Затем производят ортогональное преобразование  $L$  («вращение» пространства факторов), при котором латентные факторы приобретают физическую содержательность.

В данном исследовании факторный анализ выполнен методом *Minres*, для ортогонального преобразования факторных нагрузок использован критерий *Varimax Rotation*. Анализ проводился для девяти показателей выходных параметров (таблица 3.4). Матрица корреляции представлена в приложении [122, 123].

Статистическая значимость с доверительной вероятностью не менее 95 % установлена для двух латентных факторов, ответственных за 71,147 % суммарной

дисперсии девяти выходных параметров, в том числе на долю первого фактора приходится 57,763 % этой дисперсии, на долю второго – 13,384 % (таблица 3.11).

Таблица 3.11 – Факторные нагрузки для двухфакторной модели

Показатель выходных параметров		Факторная нагрузка		Общий вклад
		Фактор 1	Фактор 2	
Y1	Средняя длина волокна, мкм	-0,177	-0,698	0,518
Y2	Ширина волокна, мкм	0,140	0,889	0,809
Y3	Индекс фибрилляции, %	0,163	0,908	0,852
Y4	Грубость волокна, мг/м	-0,508	0,067	0,262
Y5	Водоудерживающая способность, %	0,744	0,504	0,808
Y12	Сопротивление излому	0,731	0,478	0,763
Y13	Разрывная длина, м	0,758	0,569	0,899
Y14	Сопротивление продавливанию, кПа	0,719	0,514	0,781
Y15	Сопротивление раздиранию, мН	0,832	0,130	0,781
Доля от суммарной дисперсии, %		57,763	13,384	71,147

График собственных чисел матрицы корреляции (в порядке их убывания), сообщает о том, сколько скрытых факторов определяют существенную долю суммарной дисперсии анализируемых показателей (рис. 3.43).

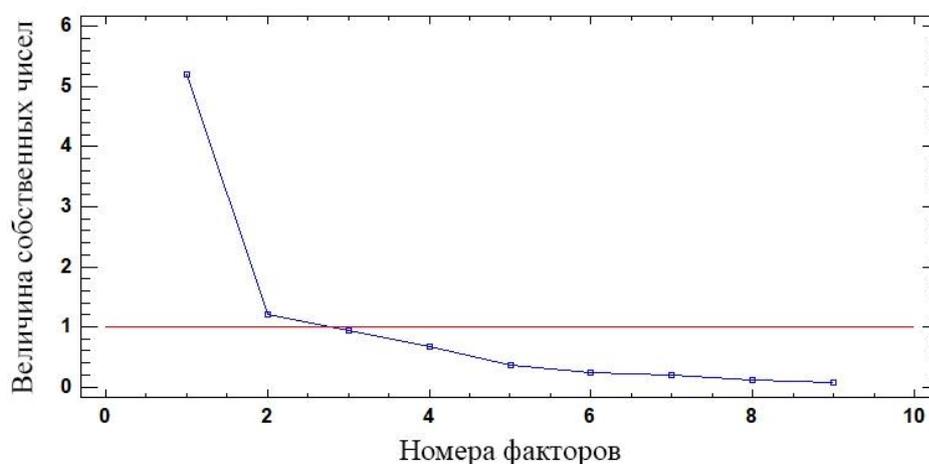


Рисунок 3.43 – Собственные числа матрицы корреляции (в порядке их убывания)

Горизонтальная линия на графике отделяет статистически значимые собственные числа от случайных чисел. Те числа, которые находятся выше линии, включаются в анализ. На данной стадии анализа целесообразно рассмотрение двухфакторной модели структуры корреляции.

Расположение наблюдаемых показателей в двухмерном пространстве показано на рисунке 3.44. Координатами точек являются факторные нагрузки (таблица 3.11).

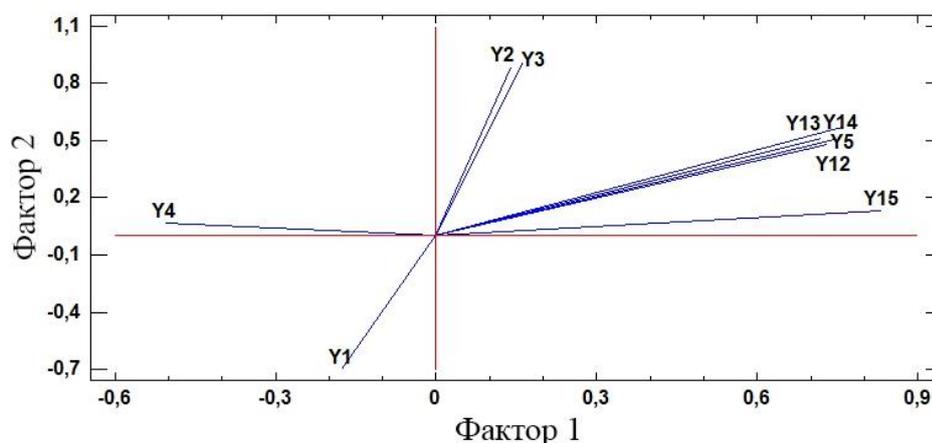


Рисунок 3.44 – Расположение контролируемых показателей в пространстве двух скрытых факторов

Для факторного анализа объектом служит структура матрицы парных линейных корреляций между выходными параметрами. Кластерный анализ в свою очередь построен на геометрическом расстоянии между нормализованными величинами выходных параметров.

Кластерный анализ выполнен методом Варда (*Ward's method*) с использованием нормализованных значений переменных (свойств) и квадрата «евклидова расстояния» (*Squared Euclidean distance*) в качестве метрики.

На рисунке 3.45 приведена дендрограмма 9 свойств. Обозначения на оси абсцисс соответствуют индексам свойств. На основании визуальной оценки можно заключить, что результаты группировок схожи с результатом факторного анализа.

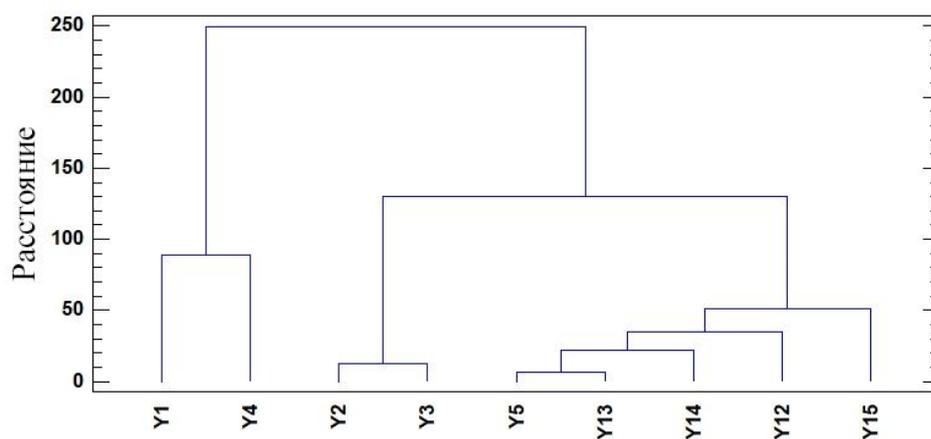


Рисунок 3.45 – Результаты кластеризации по свойствам волокна

Свойства по величине «расстояний» между ними сгруппировались в два кластера. В первый кластер входят свойства  $Y_1$  и  $Y_4$ , во второй – свойства  $Y_2$ ,  $Y_3$ ,  $Y_5$ ,  $Y_{12}$ ,  $Y_{13}$ ,  $Y_{14}$ ,  $Y_{15}$ , при этом свойства  $Y_2$ ,  $Y_3$  можно выделить в отдельный подкластер.

Исследуемые свойства распределены между двумя латентными факторами вдоль осей координат. Физико-механические характеристики и водоудерживающая способность сгруппировались в единый кластер на положительной оси координат первого латентного фактора. Отрицательную корреляцию с вышеуказанным кластером имеет показатель грубости волокон. Природа первого фактора может быть обусловлена изменением гибкости волокон в процессе размола. Недревесные волокна, в особенности лубяные культуры, как правило, считаются грубыми, поскольку имеют толстую клеточную стенку [41, 124]. По мере того, как волокна становятся менее грубыми, они, как правило, приобретают гибкость, что позволяет волокнам лучше прилегать друг другу при формировании бумажного листа, улучшая межволоконное связеобразование. Кроме того, снижение грубости волокон с одновременным увеличением водоудерживающей способности свидетельствует о высокой степени разработки волокон, указывая на значительную гидратацию, косвенно подтверждая увеличение внутренней фибрилляции. Расположение показателей грубости и физико-механических характеристик в пространстве двух скрытых факторов доказывает, что в процессе размола снижение грубости волокон с одновременным

приобретением ими гибкости положительно сказывается на увеличении прочностных свойств бумажных отливок.

Для второго фактора отмечается отрицательная корреляция между средней длиной волокон с шириной и индексом фибрилляции. Такая взаимосвязь не противоречит общеизвестным эффектам размола. Однако данный фактор отвечает только за 13 % изменчивости от общей дисперсии наблюдаемых показателей, поэтому сложно интерпретировать его природу. Можно предположить, что природа данного фактора в большей степени связана с фибрилляцией волокон.

Процесс размола неразрывно связан как с укорочением волокон, так и с их фибрилляцией. На то, какой эффект при обработке волокнистого материала будет преобладать, влияют переменные факторы процесса размола, важным из которых является конструкция размалывающей гарнитуры. В. Манфреди утверждает, что возникновение «резки» и фибрилляции тесно связаны между собой. Считается, что «резка» происходит не за счёт разрубания волокон режущими кромками размалывающей гарнитуры, а из-за снижения собственного сопротивления клеточной стенки, которое вызвано её разрывом при растяжении [84].

Проведенные факторный и кластерный анализ морфологических свойств волокон и прочностных характеристик бумаги показывают, что изменчивость характеристик получаемой продукции зависит от двух латентных факторов. Первый фактор отождествляется со степенью гибкости волокон, второй – с их фибрилляцией. Общая доля дисперсии наблюдаемых показателей составляет 71,1 %. На первый из выявленных факторов приходится 57,8 %, на второй – 13,4 %.

## Выводы к третьей главе.

По результатам проведенного многофакторного эксперимента были сделаны следующие выводы:

1. В ходе регрессионного анализа экспериментальных данных были установлены следующие изменения бумагообразующих свойств волокнистой массы:

– с повышением концентрации волокнистой массы с 10 до 18 % наблюдается снижение средней длины волокон на 10 %;

– ширина волокон увеличивается с повышением частоты вращения ротора от 2000 до 2500 об/мин на 18 %;

– максимальное содержание длиноволокнистой фракции установлено при размоле массы с концентрацией 10 %;

– снижение концентрации волокнистой массы с 14 % до 10 % при размоле приводит к снижению грубости волокон с 0,530 мг/м до 0,304 мг/м;

– прирост индекса фибрилляции волокон на 16 % наблюдается при концентрации 10 % с увеличением частоты вращения ротора до 2500 об/мин.

Исследование физико-механических показателей бумажных отливок из технической конопли при варьировании технологическими параметрами процесса размола выявило следующие зависимости:

– наибольшее влияние на показатель сопротивления излому оказывает повышение частоты вращения ротора, так при изменении от 2000 до 2500 об/мин прирост показателя составил 48 %;

– величина межножевого зазора в значительной степени влияет на разрывную длину бумажного полотна, так при изменении зазора с 1 до 1,5 мм её значение увеличилось с 2661 м до 3136 м при концентрации волокнистой массы 10 %;

– аналогичное влияние зазор оказывает и на сопротивление продавливанию бумаги, здесь прирост составляет 10 %;

– при степени помола волокнистой массы 60 °ШР и концентрации 10 %, с ростом частоты вращения ротора и увеличением межножевого зазора наблюдается повышение сопротивления раздиранию до 863 мН.

2. В качестве параметров оптимизации были выбраны такие бумагообразующие свойства волокнистой массы, как грубость волокон и индекс фибрилляции и физико-механические показатели бумажных отливок как определяющие качество получаемой продукции. Установлено, что в процессе размола волокнистого полуфабриката из технической конопли при высокой концентрации с использованием гарнитуры с окружной формой ножей оптимальными параметрами размола являются концентрация волокнистой массы- 10 %, частота вращения ротора- 2500 об/мин, величина межножевого зазора - 1,5 мм.

3. В результате сравнения авторской гарнитуры с окружной формой ножей и традиционных гарнитур с углами наклона ножей 20° и 35° выявлено, что окружная гарнитура подвергает волокна меньшему укорочению, позволяет достичь увеличения индекса фибрилляции на 18 % против 13 % для традиционных гарнитур и снизить образование мелочи в процессе размола в сравнении с использованием традиционных конструкций гарнитур на 19 %. Предлагаемая конструкция гарнитуры также способствует большему увеличению прочностных показателей бумажных отливок. Так, значения разрывной длины бумажных отливок, полученных при использовании конструкции гарнитуры с окружной формой ножей, больше на 30 % по сравнению с традиционными гарнитурами.

4. Изначально более длинноволокнистый, имеющий меньшую грубость волокон хлопковый линт показал более низкую интенсивность прироста бумагообразующих свойств, что привело к получению физико-механических характеристик бумажных отливок, близких по значениям к отливкам из лубяных культур, при этом техническая конопля и лён в отличие от хлопка не достигают точки перегиба показателей.

Для размола волокнистой массы при высокой концентрации из лубяных волокон удельный расход электроэнергии несколько ниже, чем при размолу хлопкового полуфабриката, что обусловлено разницей в морфологии волокон.

5. Факторный и кластерный анализы, направленные на выявление корреляционных связей между исследуемыми параметрами, показали, что при размолу МК изменение гибкости волокон в совокупности с изменением фибрилляции волокон оказывают значительное воздействие на бумагообразующие свойства волокнистого материала и физико-механические характеристики бумажных отливок. Проведенное исследование показало, что изменение грубости волокон обуславливает 57,8 % изменчивости всех наблюдаемых показателей от их полной дисперсии.

## **ГЛАВА 4. Оценка технико-экономической эффективности производства бумажной продукции из недревесного целлюлозосодержащего сырья**

Расчёт технико-экономической эффективности осуществлен на примере технической конопли, так как по результатам экспериментов бумажные отливки из такого сырья имеют наиболее оптимальные физико-механические характеристики при среднем удельном расходе электроэнергии.

### **4.1 Перспективы применения волокнистого полуфабриката из технической конопли**

Техническая конопля, интерес к возделыванию которой увеличивается с каждым годом, представляет собой растение, используемое в различных отраслях промышленности. Росту популярности этой лубяной культуры способствует не только высокое качество и природные свойства (см. стр. 17), но и различные меры поддержки, оказываемые государством:

- льготные краткосрочные и инвестиционные кредиты;
- несвязанная поддержка по ставке 10 тыс. рублей на 1 га посевной площади конопли;
- поддержка в рамках единой субсидии;
- возмещение до 50 % прямых понесенных затрат на строительство и модернизацию пенькоперерабатывающих предприятий;
- приобретение специализированной техники и оборудования [125].

В связи с этим происходит и увеличение количества отходов, нуждающихся в качественной утилизации. Использование отходов переработки технической конопли имеет важное как экологическое, так и экономическое значение. Компании, занимающиеся выращиванием и переработкой технической конопли, в случае, если будут использовать собственные отходы в качестве волокнистого

сырья при производстве бумажной продукции, могут получить дополнительную выгоду:

- Увеличение прибыли. Использование отходов переработки технической конопли в качестве волокнистого сырья для производства упаковочной бумаги позволит получить дополнительный источник дохода за счёт применения ранее неиспользуемых материалов;
- Расширение рынка сбыта. Упаковочная бумага, изготовленная из собственных отходов переработки лубяной культуры, позволит уменьшить не только собственные затраты на приобретение упаковочных материалов, но и расширить рынок сбыта производимой продукции и диверсифицировать источники своих доходов;
- Экологическая составляющая. Производство упаковочной бумаги из отходов заготовки технической конопли будет способствовать сокращению объема неиспользуемых отходов и поможет снизить негативное воздействие на окружающую среду;
- Повышение конкурентоспособности. Бумага из технической конопли, будучи натуральной и биоразлагаемой, может иметь популярность на рынке, что позволит извлечь из этого выгоду, рекламируя продукцию как экологически чистую [2, 126, 127].

В настоящее время сегмент рынка упаковочной бумаги из технической конопли является относительно молодым и имеет ряд особенностей, среди которых экологическая привлекательность, инновационность продукции и необходимость правового регулирования, связанная с выращиванием технической конопли.

Конкурентными преимуществами такой бумаги могут быть краткосрочное созревание волокнистого материала, доступность сырья и простота его уборки по сравнению с древесиной, высокие физико-механические свойства изготавливаемой продукции, а также снижение производственной себестоимости готовой продукции за счёт меньшей стоимости технологического оборудования, снижение

энерго- и водопотребления, исключение из технологии химических реагентов и экономии на экологических отчислениях при утилизации отходов [34-36, 63].

Конечными потребителями упаковочной бумаги из технической конопли могут быть компании из разных секторов, например:

- производители пищевых продуктов (упаковка пищевых продуктов, например, зерновых культур, орехов, кондитерских изделий для сохранения их свежести);
- производители товаров для дома и ванных комнат (упаковка сухих и жидких ванных средств, косметики, домашнего текстиля);
- производители медицинской продукции (упаковка медицинских масок, перчаток и др.);
- производители товаров для животных (упаковка кормов, наполнителей и др.);
- производители электроники (упаковка мобильных телефонов, планшетов, ноутбуков и др.);
- производители товаров ручной работы (упаковка украшений, сувениров и др.);
- производители профессиональной косметики (упаковка профессиональной косметики и средств для ухода, особенностью которых может стать экологическая составляющая материала).

Помимо производства упаковочной бумаги из технической конопли, перспективным может стать направление изготовления канцелярских товаров в премиум-сегменте.

Рынок бумажных канцелярских товаров включает в себя множество продуктов, таких как блокноты, журналы, ежедневники, поздравительные открытки и другое. Особенности этого рынка заключаются в разнообразии дизайна, экологичности материалов, удобства и долговечности продукции, а также изменчивости цен в зависимости от бренда и предполагаемого использования.

Согласно анализу показателей уровня концентрации производителей, на рынке канцелярских бумажных принадлежностей этот рынок насыщен и есть как крупные, так и средние производители [128]. Благодаря высокой конкуренции данная отрасль имеет перспективы дальнейшего развития. Это обусловлено следующими причинами:

- бумага из конопли имеет высокое качество и долговечность, что делает ее подходящей для производства высококлассных канцелярских товаров;
- производство бумаги из технической конопли поможет создать рабочие места и новые возможности для предпринимателей в сфере выращивания и переработки технической конопли;
- в долгосрочной перспективе использование конопляной бумаги может привести к экономии затрат благодаря своей износостойкости, что снизит необходимость в частых заменах [26, 28, 29, 32].

Таким образом, получаемый при размоле МВК волокнистый полуфабрикат из технической конопли сможет найти свое применение не только при производстве упаковочной бумаги, но и в премиум-сегменте канцелярских товаров.

#### **4.2 Формирование стоимости готовой продукции**

Согласно Общероссийскому классификатору видов экономической деятельности (ОКВЭД), около 100 предприятий в России занимаются возделыванием и переработкой технической конопли [129]. В приложении 3, в таблице 31 представлена выборка из 30 компаний.

Все производители классифицированы по объему прибыли на 3 категории: крупные, средние и малые предприятия. Наибольший интерес из представленных производителей конопли имеют средние предприятия, чья прибыль составляет от 500 тыс. руб. до 30 млн. руб., поскольку они имеют потенциал для финансовых вложений и развития дополнительного производства, а возможная получаемая выгода для них окажется существенной.

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

- Затраты на оборудование

$$КО = \sum (Q_i \cdot C_i), \quad (4.1)$$

где  $Q_i$  – количество единиц оборудования;

$C_i$  – цена за единицу оборудования, руб.

Данные для расчета приведены в таблице 4.1 [130-133].

Таблица 4.1 – Используемое оборудование

Наименование	Количество, шт	Цена за единицу, руб	Сумма, руб
Кипоразборщик	1	1270000	1270000
Молотковая дробилка	1	100000	100000
Дисковая мельница	1	1500000	1500000
Комплектующие		500000	500000
КДМ	1	15000000	15000000

$$КО = 1270000 + 100000 + 1500000 + 500000 + 15000000 = 18370000 \text{ руб.}$$

- Материальные затраты (таблица 4.2)

$$МЗ = \sum (Q_i \cdot C_i), \quad (4.2)$$

где  $Q_i$  – количество материала, сырья или комплектующих;

$C_i$  – цена за единицу материала [134, 145].

Таблица 4.2 – Материальные затраты на производство 1000 т/год продукции

Наименование	Единица измерения	Расход на единицу продукции	Цена за единицу измерения, руб	Затраты на весь выпуск, руб
Сырье и основные материалы:				
Пенька	т	1,2	30000	36000000
Канифольный клей	кг	10	130	1300000
Вспомогательные материалы:				
Расход воды на технологические нужды	м <sup>3</sup>	9	17,9	161100
Электроэнергия	кВтч/сутки	18250	8,06	51483250

$$M3 = 1,2 \cdot 30000 \cdot 1000 + 10 \cdot 130 + 9 \cdot 17,9 + 18250 \cdot 8,06 = 88944350 \text{ руб.}$$

- Затраты на строительство цеха, выполняемые сторонними организациями (представляют среднестатистический расчет строительства цеха, сумма которого может меняться в зависимости от изменения условий) [136].

Составляют 55558500 руб.

- Затраты на оплату труда

$$ЗОТ = ОТ + НОТ, \quad (4.3)$$

где ОТ – основная заработная плата сотрудников, руб;

НОТ – начисления на оплату труда, руб.

Данные для расчета представлены в таблице 4.3 [137].

Таблица 4.3 – Основная заработная плата

Наименование работ	Количество привлекаемых специалистов	Квалификационная группа основных работников, привлекаемых к выполнению этапа	Трудоемкость выполнения работ	Стоимость, руб	Основная заработная плата, руб
Работа по договору рабочего персонала		Инженерно-технические работники, всего			
		в том числе:			
	10	Основные	120	45000	5400000
		Рабочие, всего			
		в том числе:			
	2	Ремонтные	24	30000	720000
Работа административно-управленческого персонала	2	Начальник цеха, технологи	24	65000	1440000

Найдем основную заработную плату по формуле:

$$ОТ = K_C \cdot T \cdot C, \quad (4.4)$$

где  $K_C$  – количество привлекаемых специалистов;

$T$  – трудоемкость выполняемых работ, ч/сут;

$C$  – стоимость выполняемых работ, руб.

Для инженерно-технических работников основная заработная плата составит:

$$OT = 10 \cdot 8 \cdot 45000 = 3600000 \text{ руб.}$$

Для ремонтных рабочих основная заработная плата составит:

$$OT = 2 \cdot 8 \cdot 30000 = 480000 \text{ руб.}$$

Для административно-управленческого персонала основная заработная плата составит:

$$OT = 2 \cdot 12 \cdot 65000 = 1040000 \text{ руб.}$$

Итого основная заработная плата составит:

$$OT = 3600000 + 480000 + 1040000 = 5120000 \text{ руб.}$$

Начисления на оплату труда включают в себя:

Дополнительная заработная плата

$$Д_{ЗП} = OT \cdot 10\% \quad (4.5)$$

$$Д_{ЗП} = 5120000 \cdot 10\% = 512000 \text{ руб.}$$

Страховые взносы на обязательное социальное страхование

$$СВ = OT \cdot 30\% \quad (4.6)$$

$$СВ = 5120000 \cdot 30\% = 1536000 \text{ руб.}$$

Таким образом, затраты на оплату труда составят:

$$З_{OT} = 5120000 + 512000 + 1536000 = 7168000 \text{ руб.}$$

- Затраты на подготовку и освоение производства (10% от основной заработной платы).

$$З_{ПОП} = З_{OT} \cdot 10\% \quad (4.7)$$

$$З_{ПОП} = 7168000 \cdot 10\% = 716800 \text{ руб.}$$

- Общепроизводственные затраты (10% от основной заработной платы).

$$ОПЗ = OT \cdot 10\% \quad (4.8)$$

$$ОПЗ = 5120000 \cdot 10\% = 512000 \text{ руб.}$$

- Общехозяйственные затраты (7% от основной заработной платы).

$$ОХЗ = OT \cdot 7\% \quad (4.9)$$

$$ОХЗ = 5120000 \cdot 7\% = 358400 \text{ руб.}$$

- Амортизация

$$A = КО \cdot 10\% + СЦ \cdot 3\% \quad (4.10)$$

$$A = 18370000 \cdot 10\% + 55558500 \cdot 3\% = 3503755 \text{ руб.}$$

- Капитальные вложения

$$KB = KO + CMP + PP + PZ + DP, \quad (4.11)$$

где КО – стоимость оборудования, машин и механизмов;

СМР – стоимость строительно-монтажных работ (строительство цеха);

PP – проектные и изыскательские работы (3% от суммарной стоимости оборудования и затрат на строительство цеха);

$$PP = (KO + CMP) \cdot 3\% \quad (4.12)$$

$$PP = (18370000 + 55558500) \cdot 3\% = 2217855 \text{ руб.}$$

PZ – прочие затраты (транспортировка, установка, пусконаладка) (2% от суммарной стоимости оборудования и затрат на строительство цеха);

$$PZ = (KO + CMP) \cdot 2\% \quad (4.13)$$

$$PZ = (18370000 + 55558500) \cdot 2\% = 1478570 \text{ руб.}$$

DP – дополнительные расходы (страхование, налоги, пошлины) (1% от суммарной стоимости оборудования и затрат на строительство цеха).

$$DP = (KO + CMP) \cdot 1\% \quad (4.14)$$

$$DP = (18370000 + 55558500) \cdot 1\% = 739285 \text{ руб.}$$

$$KB = 18370000 + 55558500 + 2217855 + 1478570 + 739285 = 78364210 \text{ руб.}$$

- Себестоимость

$$C = MZ + ZOT + Z_{\text{ПОП}} + A + ОПЗ + ОХЗ, \quad (4.15)$$

$$C = 88944350 + 7168000 + 716800 + 3503755 + 512000 + 358400 = \\ = 101203305 \text{ руб.}$$

Полученные результаты представим в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Плановая калькуляция затрат

Наименование статей калькуляции	Плановые затраты, руб.
Материальные затраты – всего:	88 944 350
Затраты на оплату труда – всего:	7 168 000
В том числе:	
Основная заработная плата	5 120 000
Дополнительная заработная плата	512 000
Страховые взносы на обязательное социальное страхование	1 536 000

Продолжение таблицы 4.4

Затраты на подготовку и освоение производства – всего:	716 800
Затраты на оборудование	18 370 000
Амортизация	3 503 755
Общепроизводственные затраты	512 000
Общехозяйственные затраты	358 400
Затраты по работам (услугам), выполняемым (оказываемым) сторонними организациями (строительство цеха)	55 558 500
Капитальные вложения	78 364 210
Себестоимость	101 203 305

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

Поскольку бумага из технической конопли является инновационным продуктом, предполагается, что ее цена за 1 тонну будет составлять не менее 120 000 рублей. Такая стоимость обусловлена ее научным обоснованием и подходом к созданию экологичной и эффективной технологии переработки технической конопли с обеспечением высокого качества волокнистого полуфабриката без химической обработки в процессе получения бумажной продукции.

В будущем при распространении на рынке, а также при необходимости корректирования характеристик продукции и придания ей новых свойств, возможно повышение ее цены.

При реализации продукции по рыночной стоимости дополнительная прибыль составит:

$$\Delta\P = 120000000 - 101203305 = 18796695 \text{ руб.}$$

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

## **Выводы к четвертой главе**

Предприятия, занимающиеся выращиванием и переработкой технической конопли, внедряя в производство изготовление бумажной продукции из отходов заготовки технической конопли, получают не только экологические преимущества, но и экономическую выгоду, которая будет заключаться в приобретении дополнительной прибыли. Использование волокнистого полуфабриката из технической конопли в качестве сырья для производства канцелярской продукции будет иметь особую актуальность, поскольку рынок насыщен производителями, а значит конкурентоспособен. Производя широкий ряд товаров с большим спектром индивидуальной настройки, предприниматели могут извлечь дополнительную прибыль в размере 18 796 695 руб., при объеме капитальных вложений 78 364 210 руб., с учетом, что 1 тонна продукции реализуется за 120 000 руб.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

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

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

4. Сравнение эффективности процесса размола гарнитуры авторского исполнения с традиционными гарнитурами показало, что за счёт преобладания касательных усилий наблюдается увеличение индекса фибрилляции и ширины волокон, масса получается более длинноволокнистой, снижение грубости волокон при размоле на окружной гарнитуре происходит более интенсивно. Также наблюдается значительное увеличение основных физико-механических показателей бумажных отливок в диапазоне от 22 % до 51 %, что позволяет обеспечивать качество получаемой продукции, соответствующей требованиям стандарта на упаковочные сорта бумаги. Вместе с тем выявлено, что авторская конструкция размалывающей гарнитуры за счёт требуемого силового воздействия обеспечивает эффективную обработку волокон, имеющих как высокие прочностные свойства, так и сложную морфологическую структуру.

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

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

## ПРИНЯТЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

В настоящей диссертации используются следующие определения, обозначения и сокращения:

МВК – масса высокой концентрации;

МНК – масса низкой концентрации;

МФУ – микрофибриллярный угол;

$R_{un}$  – коэффициент Рункеля;

$F$  – коэффициент гибкости;

$S$  – коэффициент тонкости (соотношение сторон);

$S_1$  – внутренний слой вторичной стенки волокна;

$S_2$  – промежуточный слой вторичной стенки волокна;

$S_3$  – наружный слой вторичной стенки волокна;

$P_n$  – нормальная сила;

$P_{mp}$  – сила трения;

$P_y$  – угловая сила;

$\beta_x$  – угол, образованный между касательной к активной режущей кромке и радиусом, проведенным из центра в точку касания;

$P_\tau$  – касательное усилие, Н;

$n$  – частота вращения ротора, об/мин;

$s$  – величина зазора между ножами ротора и статора, мм;

$C$  – концентрация волокнистой массы, %;

$Li$  – средняя длина волокна, мкм;

$z$  – ширина волокна, мкм;

$Fib$  – индекс фибрилляции, %;

$k$  – грубость волокна, мг/м;

$W$  – водоудерживающая способность, %;

$A$  – содержание мелочи по площади, %;

$fr_n$  – фракция волокнистой массы по длине, %;

$U$  – сопротивление излому;

$L$  – разрывная длина, м;

$Pa$  – сопротивление продавливанию, кПа;

$E$  – сопротивление раздиранию, мН;

$W_{OB}$  – обобщенный параметр оптимизации;

ОКВЭД – общероссийский классификатор видов экономической деятельности.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Alireza, Ashori. Nonwood Fibers — A Potential Source of Raw Material in Papermaking / Ashori Alireza. — Text : direct // Polymer-Plastics Technology and Engineering. — 2006. — № 45 (10). — P. 1133-1136. DOI:10.1080/03602550600728976.
2. Azeez, M.A. Pulping of Non-Woody Biomass // Salim Newaz Kazi. Pulp and Paper Processing. — IntechOpen, 2018. N. page. DOI:10.5772/INTECHOPEN.79749.
3. Sridach, W. The environmentally benign pulping process of non-wood fibers / W. Sridach, J. Suranaree — Text : direct // Suranaree J. Sci. Technol. — 2002. — № 17(2). — P. 105-123.
4. Mudit, Chandra. Use of Nonwood Plant Fibers for Pulp and Paper Industry in Asia: Potential in China / Chandra Mudit. — Blacksburg, Virginia : Virginia Polytechnic Institute, 1998. — 91 p. — Text : direct.
5. Zhong Liu, Huimei Wang, Lanfeng Hui. Pulping and Papermaking of Non-Wood Fibers // Salim Newaz Kazi. Pulp and Paper Processing. IntechOpen, 2018. — n. page. DOI:10.5772/INTECHOPEN.79017.
6. S.R. Petroudy. Advanced High Strength Natural Fibre Composites in Construction // Mizi Fan, Feng Fu. Advanced High Strength Natural Fibre Composites in Construction. — Woodhead Publishing, 2017. — C. 59-83. DOI: 10.1016/B978-0-08-100411-1.00003-0.
7. Fiber dimensions, lignin and cellulose content of various plant materials and their suitability for paper production / Ververis, C., Georghiou, K., Christodoulakis, N.S. [and other]. — Text : direct // Industrial Crops and Products. — 2004. — № 19. — P. 245-254. DOI: 10.1016/j.indcrop.2003.10.006.
8. M. Ramesh. Hemp, jute, banana, kenaf, ramie, sisal fibers // Anthony R. Bunsell. Handbook of Properties of Textile and Technical Fibres. — Elsevier, 2018 — P. 301–325. DOI: 10.1016/B978-0-08-101272-7.00009-2.

9. The hygroscopic behavior of plant fibers: a review / A. Céline, S. Fréour, F. Jacquemin, P. Casari — Text : direct // *Frontiers in Chemistry*. — 2013. — № 1. — n. page. DOI:10.3389/fchem.2013.00043.
10. Gassan, J. Calculation of elastic properties of natural fibers / J. Gassan, A. Chate, A.K. Bledzki — Text : direct // *Journal of Materials Science*. — 2001. — № 36. — P. 3715-3720. DOI:10.1023/A:1017969615925.
11. Saijonkari-Pahkala, Katri. Non-wood plants as raw material for pulp and paper / Katri Saijonkari-Pahkala. — Text : direct // *Agricultural and Food Science*. — 2001. — № 36. — n. page. DOI:10.23986/AFSCI.5707.
12. Biagiotti, J. A Review on Natural Fibre-Based Composites-Part I / J. Biagiotti, D. Puglia, Jose M. Kenny — Text : direct // *Journal of Natural Fibers* . — 2004. — № 1(2). — P. 37-68.. doi:10.1300/J395v01n02\_04.
13. Evaluation of the Chemical Composition of Different Non-Woody Plant Fibers Used for Pulp and Paper Manufacturing / G. Marques, J. Rencoret, A. Gutiérrez, J.C. Río — Text : direct // *The Open Agriculture Journal*. — 2010. — № 4. — P. 93-101. DOI:10.2174/1874331501004010093.
14. Biomass conversion of agricultural waste residues for different applications: a comprehensive review / N. Gupta, B.K. Mahur, A.M. Izrayeel [and other]. — Text : direct // *Environmental Science and Pollution Research*. — 2022. — № 29. — P. 73622 – 73647. DOI: 10.1007/s11356-022-22802-6.
15. Dasong, Dai. Hemp nanocellulose: fabrication, characterisation and application / Dai Dasong. — London : School of Engineering and Design Brunel University, 2012. — 247 p. — Text : direct.
16. Ресурсосберегающая технология получения технической целлюлозы из недревесного растительного сырья и области ее применения / А. В. Вураско, Е. И. Симонова, И. Г. Первова, А. Р. Минакова. — Текст : непосредственный // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика..* — 2018. — № 2(30). — С. 21-32. DOI 10.15593/2409-5125/2018.02.02.

17. Wood anatomical characteristics and paper resistance index of *Schizolobium parahyba* (Vell.) Blake from experimental plant / S. Nisgoski, G.I. Muñiz, R. Trianoski [and other]. — Text : direct // *Scientia Forestalis*. — 2012. — № 40(94). — P. 203-211.

18. Saidjo, S., Wakata, A., Djoda, P. [and other] Extraction, Applications and Characterization of Plant Fibers // Han-Yong Jeon. *Natural Fiber*. IntechOpen, 2023. — N. page. DOI: 10.5772/intechopen.103093.

19. A comparative fiber morphological analysis of major agricultural residues (used or investigated) as feedstock in the pulp and paper industry / D. Tsalagkas, Z. Börcsök, Z. Pásztor [and other]. — Text : direct // *BioResources*. — 2021. — № 16(4). — P. 7935-7952. DOI: 10.15376/biores.16.4.7935-7952.

20. Königsberger, M. Multiscale micromechanics modeling of plant fibers: upscaling of stiffness and elastic limits from cellulose nanofibrils to technical fibers / M. Königsberger, M. Lukacevic, J. Füssl — Text : direct // *Materials and Structures*. — 2023. — № 56. — n. page. DOI: 10.1617/s11527-022-02097-2.

21. Syed, N.N. Fiber Characteristics and Papermaking of Seagrass Using Hand-beaten and Blended Pulp / N.N. Syed, M.H. Zakaria, J.S. Bujang — Text : direct // *Bioresources*. — 2016. — № 11(2). — P. 5358-5380. DOI: 10.15376/biores.11.2.5358-5380.

22. Madsen, B. Wood versus Plant Fibers: Similarities and Differences in Composite Applications / B. Madsen, K. E. Gamstedt — Text : direct // *Advances in Materials Science and Engineering*. — 2013. — № 2013. — n. page. DOI:10.1155/2013/564346.

23. Emmclan, L.S. Utilization of aquatic weeds fibers for handmade papermaking / L.S. Emmclan, M.H. Zakaria, J.S. Bujang — Text : direct // *BioResources*. — 2018. — № 13(3). — P. 5684-5701. DOI: 10.15376/biores.13.3.5684-5701.

24. Пашин, Е. Л. Основы сельскохозяйственного производства конопли учеб. пособие / Е. Л. Пашин, Л. В. Пашина. — Кострома : Костром. гос. технол. ун-т, 2004. — 47 с. — Текст : непосредственный.

25. Manaia, J.P. Industrial Hemp Fibers: An Overview / J.P. Manaia, A. Manaia, L. Rodrigues — Text : direct // *Fibers*. — 2019. — № 7(12). — n. page. DOI:10.3390/fib7120106.
26. Applications of hemp in textiles, paper industry, insulation and building materials, horticulture, animal nutrition, food and beverages, nutraceuticals, cosmetics and hygiene, medicine, agrochemistry, energy production and environment: a review / G. Crini, E. Lichtfouse, G. Chanet, N. Morin-Crini — Text : direct // *Environmental Chemistry Letters*. — 2020. — № 18. — P. 1451–1476. DOI:10.1007/s10311-020-01029-2.
27. H. J. Fike. Industrial Hemp: Renewed Opportunities for an Ancient Crop / Fike, H. J. — Text : direct // *Critical Reviews in Plant Sciences*. — 2016. — № 35. — P. 406-424. DOI:10.1080/07352689.2016.1257842.
28. L. J. Bowyer. Industrial Hemp (*Cannabis sativa* L.) as a Papermaking Raw Material in Minnesota: Technical, Economic, and Environmental Considerations / Bowyer, L. J. — St. Paul : University of Minnesota, 2004. — 47 p. — Text : direct.
29. Variation in physical and mechanical properties of hemp stalk fibers along height of stem / X. Li, X. Li, S. Wang [and other]. — Text : direct // *Industrial Crops and Products*. — 2013. — № 42. — P. 344-348. DOI: 10.1016/j.indcrop.2012.05.043.
30. Investigation of the internal structure of hemp fibres using optical coherence tomography and Focused Ion Beam transverse cutting / V. Placet, J. Méteau, L. Froehly [and other]. — Text : direct // *Journal of Materials Science*. — 2014. — № 49. — P. 8317-8327. DOI 10.1007 / s10853-014-8540-5.
31. R. M. Horne. Bast fibres: hemp cultivation and production / Horne, R. M. — Text : direct // *Handbook of Natural Fibres (Second Edition)*. — 2012. — № 1. — P. 163-196. DOI: 10.1016/B978-0-12-818398-4.00007-4.
32. Comparison of papermaking potential of wood and hemp cellulose pulps / E. Małachowska, P.J. Przybysz, M. Dubowik [and other]. — Text : direct // *Forestry and Wood Technology*. — 2015. — № 91. — n. page.

33. Quality of hemp (*Cannabis sativa* L.) stems as a raw material for paper / H.V. Werf, J.H. Veen, A.T. Bouma, M.T. Cate — Text : direct // *Industrial Crops and Products*. — 1994. — № 2. — P. 219-227. DOI:10.1016/0926-6690(94)90039-6.

34. Лиходеевский, А. В. К вопросу о возрождении незаслуженно забытых технологий: техническая конопля / А. В. Лиходеевский — Текст : непосредственный // *Теория и практика мировой науки*. — 2021. — № 3. — С. 29-38.

35. Новый сорт конопли посевной Роман для целлюлозно-бумажной промышленности / В. А. Серков, Р. О. Белоусов, М. Р. Александрова, О. К. Давыдова. — Текст : непосредственный // *Международный сельскохозяйственный журнал*. — 2021. — № 3(381). — С. 86-89. DOI 10.24412/2587-6740-2021-3-86-89.

36. Актуальные направления селекции конопли посевной для решения современных проблем отечественной экономики и импортозамещения (обзор) / В. А. Серков, Р. О. Белоусов, М. Р. Александрова, О. К. Давыдова. — Текст : непосредственный // *Нива Поволжья*. — 2019. — № 3(52). — С. 38-47.

37. Zimniewska, M., Wladyka-Przybylak, M., Mańkowski, J. Cellulosic Bast Fibers, Their Structure and Properties Suitable for Composite Applications // Susheel Kalia, B. S. Kaith, Inderjeet Kaur. *Cellulose Fibers: Bio- and Nano-Polymer Composites*. Springer Berlin, Heidelberg, 2011. — P. 97-119. DOI:10.1007/978-3-642-17370-7\_4.

38. Tabet, T.A., Aziz, F.A. Cellulose Microfibril Angle in Wood and Its Dynamic Mechanical Significance // Theo G.M. Van De Ven. *Cellulose - Fundamental Aspects*. IntechOpen, 2013. — n. page. DOI: 10.5772/51105.

39. Lamesa, A. Evaluation of fiber characteristics and basic density of *Acacia melanoxylon* (R.Br.) grown in Ethiopia for pulp and paper making / A. Lamesa, B. Tsegaye — Text : direct // *Annals of Civil and Environmental Engineering*. — 2022. — № 6(1). — P. 53-61. DOI: 10.29328/journal.acee.1001041.

40. Trischler, J. Evaluating the Competition of Lignocellulose Raw Materials for their Use in Particleboard Production, Thermal Energy Recovery, and Pulp- and

Papermaking / J. Trischler, D. Sandberg, T. Thörnqvist — Text : direct // Bioresources. — 2014. — № 9. — P. 6591-6613. DOI:10.15376/biores.9.4.6591-6613.

41. Non-Wood Fibers: Relationships of Fiber Properties with Pulp Properties / T. Ferdous, Y. Ni, M.A. Quaiyyum, [and other]. — Text : direct // ACS Omega. — 2021. — № 6. — P. 21613 – 21622. DOI:10.1016/j.matpr.2023.08.278.

42. Кларк, Дж. Технология целлюлозы (наука о целлюлозной массе и бумаге, подготовка массы, переработка ее на бумагу, методы испытаний) : пер. с англ. А.В. Оболенской, Г.А. Пазухиной. – Москва: Лесная промышленность, 1983. – 456 с. – Текст : непосредственный.

43. M. Sharma. Evaluation of Fiber Characteristics in some weeds of Arunachal Pradesh, India for Pulp and Paper Making / Sharma, M. — Text : direct // Research Journal of Agriculture and Forestry Sciences . — 2013. — № 1(3). — P. 15-21.

44. Wood properties related to pulp and paper quality in two Macaranga species naturally regenerated in secondary forests, Central Kalimantan, Indonesia / R. Takeuchi, I. Wahyudi, H. Aiso [and other]. — Text : direct // Tropics. — 2016. — № 25. — P. 107-115. DOI:10.3759/tropics.MS15-23.

45. Omotoso, A. M. Pulp and Paper Evaluation of Solid Wastes from Agricultural Produce / A. M. Omotoso, W. A. Owolabi — Text : direct // International Journal of Chemistry. — 2015. — № 7. — n. page. DOI:10.5539/ijc.v7n2p113.

46. The impact of natural fibers' characteristics on mechanical properties of the cement composites / M. Kurpińska, M. Pawelska-Mazur, Y. Gu, F. Kurpiński — Text : direct // Scientific Reports. — 2022. — № 12. — n. page. DOI: 10.1038/s41598-022-25085-6.

47. Quantification of the Young's modulus of the primary plant cell wall using Bending-Lab-On-Chip (BLOC) / A.S. Nezhad, M. Naghavi, M. Packirisamy, [and other]. — Text : direct // Lab on a chip. — 2013. — № 13. — P. 599-608. DOI:10.1039/C3LC00012E.

48. Jouannot-Chesney, P., Jernot, J.P., Bréard, J. [and other]. Young's Modulus of Plant Fibers // Raul Fanguero, Sohel Rana. Natural Fibres: Advances in Science and

Technology Towards Industrial Applications. Springer Dordrecht, 2016. P. 61-69. DOI: 10.1007/978-94-017-7515-1\_5.

49. You, X., Chen, F., Ma, Y. [and other]. Single Fibre Swelling Behavior for Natural and Man-Made Cellulose Fibres Under Industrial Steeping Conditions // Springer. — 2021. DOI:10.1016/j.compositesa.2011.10.01.

50. Ajuziogu, G.C. Comparative Paper-making Potentials of Three Species from the Verbenaceae and Lamiaceae Family / G.C. Ajuziogu, E.O. Ojua, D.O. Aina — Text : direct // Asian Journal of Research in Botany. — 2019. — № 2(4). — P. 1-5.

51. Иванов, С. Н. Технология бумаги / С. Н. Иванов. – Изд. 2-е, переработ. – Москва : Лесная промышленность, 1970. – 720 с. – Текст : непосредственный.

52. С.Ф. Примаков. Производство бумаги / Примаков, Ф. С. — Москва : Лесная промышленность, 1987. — 222 с. — Текст : непосредственный.

53. Влияние фибриллирования и укорочения волокон при размоле на характеристики прочности, реформативности и трещиностойкости целлюлозных материалов / В. В. Гораздова, Е. В. Дернова, Д. А. Дулькин, Е. О. Окулова. — Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. — 2018. — № 2(362). — С. 109-121. DOI 10.17238/issn0536-1036.2018.2.109.

54. Effect of fiber flocculation and filling design on refiner loadability and refining characteristics / K. El-Sharkawy, S. Haavisto, K. Koskenhely, H. Paulapuro — Text : direct // Bioresources. — 2008. — № 3. — P. 403-424. DOI:10.15376/biores.3.2.403-424.

55. Role of external fibrillation in high-consistency pulp refining / A. Ushakov, Y. Alashkevich, V. Kozhukhov, R. Marchenko — Text : direct // BioResources. — 2023. — № 18(3). — P. 5494-5511. DOI:10.15376/biores.18.3.5494-5511.

56. Motamedian, H.R. Mechanisms of strength and stiffness improvement of paper after PFI refining with a focus on the effect of fines / H.R. Motamedian, A.E. Halilovic, A. Kulachenko — Text : direct // Cellulose. — 2019. — № 26. — P. 4099–4124. DOI: 10.1007/s10570-019-02349-5.

57. The effect of the refining intensity on the progress of internal fibrillation and shortening of cellulose fibers / P. Przybysz, M. Dubowik, E. Małachowska [and other]. — Text : direct // BioResources. — 2020. — № 15(1). — P. 1482-1499. DOI:10.15376/biores.15.1.1482-1499.

58. Cellulosic Fines: Properties and Effects / N. Odabas, U. Henniges, A. Potthast, T. Rosenau — Text : direct // Progress in Materials Science . — 2016. — № 83(3). — n. page. DOI:10.1016/j.pmatsci.2016.07.006.

59. Seth, S. R. Fibre Quality Factors in Papermaking — I The Importance of Fibre Length and Strength / Seth, S. R. — Text : direct // MRS Online Proceedings Library . — 1990. — № 197. — P. 125–141. DOI:10.1557/proc-197-125.

60. Hartler, J. N. Aspects on curled and microcompressed fibers / Hartler, J. N. — Text : direct // Nordic Pulp & Paper Research Journal. — 1995. — № 10. — P. 4-7. DOI:10.3183/npprj-1995-10-01-p004-007.

61. Joutsimo, O.P. Effects of fiber deformations on pulp sheet properties and fiber strength / O.P. Joutsimo, R.C. Wathen, T. Tamminen — Text : direct // Paperi Ja Puu. — 2005. — № 87(6). — P. 1-16.

62. Rheology of pulp fibre suspensions: A critical review / B. Derakhshandeh, R.J. Kerekes, S.G. Hatzikiriakos, C.P. Bennington — Text : direct // Chemical Engineering Science. — 2011. — № 66. — P. 3460-3470. DOI: 10.1016/j.ces.2011.04.017.

63. Ушаков, А. В. Размол волокнистых полуфабрикатов высокой концентрации в целлюлозно-бумажном производстве : специальность 05.21.03 : : дис. ... канд. техн. наук / Ушаков А. В. — Красноярск, 2022. — 173 с. — Текст : непосредственный.

64. Легоцкий, С. С. Размалывающее оборудование и подготовка бумажной массы / С. С. Легоцкий, В. Н. Гончаров. — Москва : Лесная промышленность. — 1990. — 224 с. — Текст : непосредственный.

65. Коршунов, А. И. Исследования влияния комбинированного способа сульфатной небеленой целлюлозы на свойства массы и мешочной бумаги :

специальность 05.21.03 : дис. ... канд. техн. наук / А. И. Коршунов. – Ленинград , 1977. – 224 с. – Текст : непосредственный.

66. Characterization of fiber development in high- and low-consistency refining of primary mechanical pulp / D. Fernando, D. Gorski, M. Sabourin, D. Geoffrey — Text : direct // *Holzforschung*. — 2013. — № 67(7). — P. 735-745. DOI:10.1515/HF-2012-0135.

67. Optimising High-consistency Refining Conditions for Good Sack Paper Quality / N. Gurnagul, S. Ju, P.M. Shallhorn, K.B. Miles — Text : direct // *Appita Journal*. — 2006. — № 59. — P. 476-480.

68. Daoxing, Y. Fluidization Characteristics of Medium-High-Consistency Pulp Fiber Suspensions with an Impeller / Y. Daoxing, L. Hong — Text : direct // *International Journal of Rotating Machinery*. — 2016. — № 2016(1):1-8 — P. 1-8. DOI:10.1155/2016/3902723.

69. Effect of pulp consistency during refining on physical and mechanical characteristics of handsheets / A. Ushakov, Y. Alashkevich, V. Kozhukhov, R. Marchenko — Text : direct // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2021. — № 2094. — n. page. DOI:10.1088/1742-6596/2094/5/052035.

70. Kerekes, J. R. Perspectives on high and low consistency refining in mechanical pulp / J. R. Kerekes — Text : direct // *BioResources*. — 2015. — № 10(4). — P. 8795-8811. DOI:10.15376/biores.10.4.8795-8811.

71. Olejnik, K.. Impact of pulp consistency on refining process conducted under constant intensity determined by SEL and SEC factors / Olejnik, K. — Text : direct // *BioResources*. — 2013. — № 8(3). — P. 3212-3230. DOI: 10.14258/jcprm.2020048251.

72. Рейзинь, Р. Э. Структурно-механические свойства волокнистых масс и их значение при фракционирующем размоле : специальность 05.21.03 : дис. ... канд. техн. наук / Р.Э. Рейзинь, — Рига, 1958. — 286 с. — Текст : непосредственный.

73. Матвеев, Б. П. Исследование основных факторов процесса размола сульфатной небеленой целлюлозы в дисковой мельнице при высокой

концентрации : специальность 05.21.03 : дис. ... канд. техн. наук / Б. П. Матвеев. — Ленинград, 1971. — 233 с. — Текст : непосредственный.

74. Щеглов, И. М. непрерывный размол волокнистого сырья / И. М. Щеглов. — Москва : Государственное издательство литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1962. — 171 с. — Текст : непосредственный.

75. Diameter dependence of the apparent tensile modulus of hemp fibres: A morphological, structural or ultrastructural effect / V. Placet, F. Trivaudey, O. Cissé [and other]. — Text : direct // Composites Part A-applied Science and Manufacturing. — 2012. — № 43. — P. 275-287. DOI: 10.1016/j.compositesa.2011.10.019.

76. Pratima, Bajpai. Nonwood Plant Fibers for Pulp and Paper / Bajpai Pratima. — : Elsevier, 2021. — 229 p. — Text : direct.

77. The Effect of Pulp Production Times on the Characteristics and Properties of Hemp-Based Paper / L. Axelrod, P.N. Charron, I. Tahir [and other]. — Text : direct // Materials Today Communications. — 2022. — № 34. — n. page. DOI:10.1016/j.mtcomm.2022.104976.

78. Baker, C. Good practice for refining the types of fiber found in modern paper furnishes / Baker, C. — Text : direct // Tappi Journal. — 1995. — № 78. — P. 147-153.

79. Trass, O. Refining Hemp Fibers for Papermaking / O. Trass, K. Delibas — Text : direct // Journal of Natural Fibers. — 2005. — № 2(1). — P. 59–68. DOI:10.1300/J395v02n01\_05.

80. Basic effects of pulp refining on fiber properties - a review / S. Gharekhani, E. Sadeghinezhad, S.N. Kazi [and other]. — Text : direct // Carbohydrate polymers. — 2015. — № 115. — P. 785-803. DOI: 10.1016/j.carbpol.2014.08.047.

81. Conversion of rice straw into disposable food-serving bowl via refiner mechanical pulping: an environmentally benign approach to mitigate stubble burning and plastic pollution / S.S. Saini, A.A. Kadam, V. Kumar [and other]. — Text : direct // Biomass Conversion and Biorefinery. — 2021. — № 13. — P. 6797 - 6806. DOI:10.1007/s13399-021-01728-y.

82. Effects of beating on tobacco stalk mechanical pulp / W. H. Gao, K. F. Chen, J. Zeng [and other]. – Text : direct // Cellulose Chem. Technology. – 2012. – № 46 (3/4). – P. 277-282.

83. Теория и конструкция машин и оборудования отрасли : учебное пособие для направлений 15.03.02, 15.04.02 «Технологические машины и оборудование», 44.03.04, 44.04.04 «Профессиональное обучение», 18.05.01 «Химическая технология» очной и заочной форм обучения : в 2 частях / Ю. Д. Алашкевич, Н. С. Решетова ; отв. ред. О. П. Жукова. – Красноярск : СибГТУ, 2015. – Ч. 2. – 316 с. – Текст : непосредственный.

84. Vail, Manfredi. Eucalyptus Kraft Pulp Refining / Manfredi Vail. — : Springer Cham, 2024. — 320 p. — Text : direct. DOI: 10.1007/978-3-031-47285-5.

85. Васильев, А. А. Оптимизация параметров ножевой гарнитуры для размола массы высокой концентрации : дис. ... канд. техн. наук / А. А. Васильев. – Ленинград, 1983. – 225 с. – Текст : непосредственный.

86. Ковалев, В. И. Размол волокнистых полуфабрикатов при различном характере построения рисунка ножевой гарнитуры : специальность 05.21.03 : диссерт. ... канд. тех. наук / В. И. Ковалев. – Красноярск : СибГТУ, 2007. – 500 с. – Текст : непосредственный.

87. Вихарев, С. Н. Теория и конструкция машин для размола волокнистых полуфабрикатов / С. Н. Вихарев. — Екатеринбург : УГЛТУ, 2014. — 31 с. — Текст : непосредственный.

88. Patent US3473745A, USA. Refining plate for high consistency pulp / Current Assignee : SWM Corp A CORP OF Sprout Waldron and Co Inc.; 20.10.1969.

89. Патент № 2380468 С1 Российская Федерация, МПК D21D 1/30, B02C 7/12. размалывающая гарнитура дисковой мельницы : № 2008140587/12 : заявл. 13.10.2008 : опубл. 27.01.2010 / Ю. Д. Алашкевич, В. И. Ковалев, В. Н. Щербаков, И. В. Ковалев ; заявитель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Сибирский государственный технологический университет".

90. Patent US20140077016A1, USA. Refiner plate with gradually changing geometry / Current Assignee : Andritz Inc.; 20.03.2014.

91. Patent CN101974862A, China. Medium and high consistency beating refining disc / Current Assignee : South China University of Technology SCUT.; 16.02.2011.

92. Patent US7407123B2, USA. Refiner plates with logarithmic spiral bars / Current Assignee : Durametal Corp.; 05.08.2008.

93. Patent US9708765B2, USA. Rotor refiner plate element for counter-rotating refiner having curved bars and serrated leading edges / Current Assignee : Andritz Inc.; 18.07.2017.

94. Patent US4023737A, USA. Spiral groove pattern refiner plates / Current Assignee : Westvaco Corp.; 17.05.1977.

95. Патент № 2761544 С1 Российская Федерация, МПК D21D 1/30, B02C 7/12. Размалывающая гарнитура : заявл. 23.11.2020 : опубл. 09.12.2021 / Ю. Д. Алашкевич, В. И. Ковалев, В. А. Кожухов, А. В. Ушаков ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева".

96. Патент № 2761545 С1 Российская Федерация, МПК D21D 1/30, B02C 7/00. Размалывающая гарнитура : заявл. 26.04.2021 : опубл. 09.12.2021 / Ю. Д. Алашкевич, В. И. Ковалев, В. А. Кожухов, А. В. Ушаков ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева".

97. Гончаров, В. Н. Теоретические основы размола волокнистых материалов в ножевых машинах : специальность 05.21.03 : дис. ... докт. техн. наук : защищена 22.01.90 / В. Н. Гончаров. – Ленинград, 1990. – 433 с. – Текст : непосредственный.

98. Патент № 2805266 С1 Российская Федерация, МПК B02C 7/12, D21D 1/30. размалывающая гарнитура : № 2022127576 : заявл. 24.10.2022 : опубл.

13.10.2023 / Ю. Д. Алашкевич, В. И. Ковалев, В. А. Кожухов [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва".

99. Патент № 2798559 С1 Российская Федерация, МПК D21D 1/30. Размалывающая гарнитура : № 2022135058 : заявл. 29.12.2022 : опубл. 23.06.2023 / Ю. Д. Алашкевич, В. И. Ковалев, В. А. Кожухов, А. А. Карелина ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва".

100. Анализатор волокна MorFi Compact . — Текст : электронный // РГА – Санкт-Петербург : [сайт]. — URL: <https://pta-spb.ru/лабораторное-оборудование-дляцбп/анализатор-волокна-morfi-compact> (дата обращения: 12.09.2024).

101. Mechanical and Hygroscopic Properties of Molded Pulp Products Using Different Wood-Based Cellulose Fibers / C. Dislaire, B. Seantier, M. Muzy, Y. Grohens — Text : direct // Polymers. — 2021. — № 13(19). — n. page. DOI: 10.3390/polym13193225.

102. The use of MorFi analyser to characterise mechanical pulps / G. Tourtollet, F. Cottin, A. Cochaux, M. Petit-Conil — Text : direct // International Mechanical Pulping Conference. — Québec, 2003. — P. 225-232.

103. ISO 16065-2. Целлюлоза. Определение длины волокна методом автоматизированного оптического анализа. Часть 2. Метод с использованием неполяризованного света. — Женева : ISO, 2021. — 25 с. — Текст : непосредственный.

104. ISO 23714:2014. Целлюлоза. Определение показателя влагоудержания (WRV). — Женева: ISO, 2014. . — 8 с. — Текст : непосредственный.

105. ГОСТ ISO 1924-1-2018. Бумага и картон. Определение прочности при растяжении. Часть 1. Метод нагружения с постоянной скоростью. — Москва : Стандартиформ, 2018. — 17 с. — Текст : непосредственный.

106. ГОСТ 13525.3-97. Полуфабрикаты волокнистые и бумага. Метод определения сопротивления раздиранию (метод Эльмендорфа). — Москва : ИПК Издательство стандартов, 1997. — 11 с. — Текст : непосредственный.
107. ГОСТ 13525.2-80. Полуфабрикаты волокнистые, бумага и картон. Метод определения прочности на излом при многократных перегибах. — Москва : Издательство стандартов, 1981. — 7 с. — Текст : непосредственный.
108. ГОСТ Р ISO 2758-2017. Бумага. Метод определения сопротивления продавливанию. — Москва : Стандартиформ, 2017. — 10 с. — Текст : непосредственный.
109. Пен, Р. З. Планирование эксперимента в Statgraphics Centurion / Р. З. Пен. Красноярск : СибГТУ, 2014. — 292 с. — Текст : непосредственный.
110. Fiber length and bonding effects on tensile strength and toughness of kraft paper / P. T. Larsson, T. Lindström, L. A. Carlsson, C. Fellers — Text : direct // Journal of Materials Science. — 2018. — № 53(3). — P. 3006–3015. DOI:10.1007/s10853-017-1683-4.
111. Tejado, A. Why does paper get stronger as it dries / A. Tejado, G. T. Ven — Text : direct // Materials Today. — 2010. — № 13. — P. 42-49. DOI: 10.1016/S1369-7021(10)70164-4.
112. Wheat straw pulp fractionation part 1. the effect of cells, vessels and fines on paper properties. / R. Paivi, K. Mikko, O. Kaj [and other]. — Text : direct // Cellulose Chemistry and Technology. — 2013. — № 47(5-6). — P. 443-453.
113. Fine Cellulosic Materials Produced from Chemical Pulp: the Combined Effect of Morphology and Rate of Addition on Paper Properties / J. Bossu, R. Eckhart, C. Czibula [and other]. — Text : direct // Nanomaterials. — 2019. — № 9(3):321. — n. page. DOI: 10.3390/NANO9030321.
114. Kerekes, R. J. External fibrillation of wood pulp / R. J. Kerekes, D. B. McDonald, F. P. Meltzer [and other]. — Text : direct // TAPPI Journal. — 2023. — № 22(6):363. — n. page. DOI: 10.32964/tj22.6.363.

115. Kang, T. Effect of External Fibrillation on Paper Strength / T. Kang, H. Paulapuro — Text : direct // Pulp & Paper Canada . — 2006. — № 107(7/8). — P. 51-54.
116. Szwarcztajn, E. External fibrillation of beaten cellulose fibres / E. Szwarcztajn, K. Przybysz. — Text : direct // Cellulose Chem.Technol. — 1972. — № 6(2). — P. 223-238.
117. A novel approach to determining the contribution of the fiber and fines fraction to the water retention value (WRV) of chemical and mechanical pulps / M. Mayr, R. Eckhart, H. Winter, W. Bauer — Text : direct // Cellulose. — 2017. — № 24. — P. 3029–3036. DOI: 10.1007/s10570-017-1298-6.
118. Choi, E. Effect of Beating and Water Impregnation on Fiber Swelling and Paper Properties / Eun-Yeon Choi, Byoung-Uk Cho. — Text : direct // Journal of Korea Technical Association of The Pulp and Paper Industry. — 2013. — № 45(6). — n. page.
119. Фляте, Д. М. Технология бумаги. Учебник для вузов / Д. М. Фляте. — Москва : Лесная промышленность, 1988. — 440 с. — Текст : непосредственный.
120. ГОСТ 8273-75. Бумага оберточная. Технические условия. — Москва : Издательство стандартов, 1975. — 15 с. — Текст : непосредственный.
121. Иберла, К. Факторный анализ / К. Иберла. — Москва : Статистика, 1980. — 398 с. — Текст : непосредственный.
122. Пен, Р. З. Факторный анализ свойств мелованной бумаги / Р. З. Пен, Л. В. Чендылова, И. Л. Шапиро. — Текст : непосредственный // Фундаментальные исследования. — 2015. — № 10-2. — С. 289-293.
123. Пен, Р. З. Кластерный анализ свойств мелованной бумаги / Р. З. Пен, Л. В. Чендылова, И. Л. Шапиро. — Текст : непосредственный // Фундаментальные исследования. — 2015. — № 10-1. — С. 63-66.
124. Non-wood fibers as raw material for pulp and paper industry / Essam, S., Abd, El-Sayed., Mohamed, El-Sakhawy., Mohamed, El-Sakhawy. — Text : direct // Nordic Pulp & Paper Research Journal. — 2020. — № 35 (2). — P. 215-230. DOI: 10.1515/NPPRJ-2019-0064.

125. Попов, Р. А. Состояние, проблемы и возможности для развития отечественного коноплеводства / Р. А. Попов — Текст : непосредственный // Агротехника и энергообеспечение. — 2019. — № 4(25). — С. 42-52.

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

127. Sadrmanesh, V. Bast fibres: structure, processing, properties, and applications / V. Sadrmanesh, Y. Chen. — Text : direct // International Materials Reviews. — 2018. — № 64. — P. 381–406. DOI: 10.1080/09506608.2018.1501171.

128. Анализ показателей уровня концентрации производителей на рынке производителей бумажных канцелярских принадлежностей / Ю. Д. Алашкевич, А. В. Рубинская, В. А. Кожухов [и др.]. — Текст : непосредственный // Экономика и предпринимательство. — 2024. — № 4(165). — С. 38-43. DOI 10.34925/EIP.2024.165.4.004.

129. Код ОКВЭД 01.16.3 - Выращивание обыкновенной конопли. — Текст : электронный // Т-Банк : [сайт]. — URL: <https://www.tbank.ru/business/contractor/okved/01-16-3/1/> (дата обращения: 06.12.2024).

130. Рафинер высокой концентрации для целлюлозы / [Электронный ресурс] // Китайские компании, поставщики, производители, фабрики и продукты : [сайт]. — URL: [https://ru.topchinasupplier.com/wholesale/High-Consistency-Refiner-for-Pulp\\_190230/](https://ru.topchinasupplier.com/wholesale/High-Consistency-Refiner-for-Pulp_190230/) (дата обращения: 06.12.2024).

131. Кипоразборщик для взвешивания и подачи волокна / [Электронный ресурс] // Поставщик.ру - база оптовых поставщиков : [сайт]. — URL: <https://www.postavshhiki.ru/katalog-tovarov/788-matrasy-na-divan-optom/272064-kiporazborshchik-dlya-vzveshivaniya-i-podachi-voilo> (дата обращения: 06.12.2024).

132. Дробилки молотковые / [Электронный ресурс] // Сельхозтехника и оборудование для ферм - АгроПоставка : [сайт]. — URL: <https://ar-pn.com/izmelchenie/drobilki-molotkovye/> (дата обращения: 06.12.2024).

133. Прайс-лист / [Электронный ресурс] // Омский бумажный завод : [сайт]. — URL: <https://www.bumzav.ru/price> (дата обращения: 06.12.2024).

134. Тарифы на электроэнергию для малых предприятий и ИП. — Текст : электронный // Снижение расходов на электроэнергию для предприятия : [сайт]. — URL: <https://time2save.ru/tarify-na-elektroenergiu-dla-malih-predpriyatij-i-ip> (дата обращения: 06.12.2024).

135. Тарифы. — Текст : электронный // Сибирская генерирующая компания : [сайт]. — URL: <https://sibgenco.ru/consumers/tariffs/> (дата обращения: 06.12.2024).

136. Расчет стоимости промышленного здания, цеха. — Текст : электронный // Быстро-строй. Строительная компания : [сайт]. — URL: <https://moskva.bystro-stroy64.ru/kalkulyator-rascheta-czenyi-promyishlennyix-zdaniij.html> (дата обращения: 06.12.2024).

137. Росстат - Рынок труда, занятость и заработная плата / [Электронный ресурс] // Федеральная служба государственной статистики : [сайт]. — URL: [https://rosstat.gov.ru/labor\\_market\\_employment\\_salaries](https://rosstat.gov.ru/labor_market_employment_salaries) (дата обращения: 06.12.2024).

# ПРИЛОЖЕНИЕ А

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

**№ 2798559**

## Размалывающая гарнитура

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва" (СибГУ им. М.Ф. Решетнёва) (RU)*

Авторы: *Алашкевич Юрий Давыдович (RU), Ковалев Валерий Иванович (RU), Кожухов Виктор Анатольевич (RU), Карелина Александра Александровна (RU)*

Заявка № **2022135058**

Приоритет изобретения **29 декабря 2022 г.**

Дата государственной регистрации  
в Государственном реестре изобретений  
Российской Федерации **23 июня 2023 г.**

Срок действия исключительного права  
на изобретение истекает **29 декабря 2042 г.**

*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

*Ю.С. Зубов*



# РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2805266

### РАЗМАЛЫВАЮЩАЯ ГАРНИТУРА

Патентообладатель: **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва" (СибГУ им. М.Ф. Решетнёва) (RU)**

Авторы: **Алашкевич Юрий Давыдович (RU), Ковалев Валерий Иванович (RU), Кожухов Виктор Анатольевич (RU), Ушаков Александр Васильевич (RU), Карелина Александра Александровна (RU)**

Заявка № 2022127576

Приоритет изобретения **24 октября 2022 г.**

Дата государственной регистрации

в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации **13 октября 2023 г.**

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает **24 октября 2042 г.**

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов



## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Таблица Б1 – Матрица планирования эксперимента

Номер опыта	Число факторов		
	$X_1$	$X_2$	$X_3$
1	2500 об/мин	1,5 мм	18 %
2	2000 об/мин	1,5 мм	18 %
3	2500 об/мин	1 мм	18 %
4	2000 об/мин	1 мм	18 %
5	2500 об/мин	1,5 мм	10 %
6	2000 об/мин	1,5 мм	10 %
7	2500 об/мин	1 мм	10 %
8	2000 об/мин	1 мм	10 %
9	2500 об/мин	1,25 мм	14 %
10	2000 об/мин	1,25 мм	14 %
11	2250 об/мин	1,5 мм	14 %
12	2250 об/мин	1 мм	14 %
13	2250 об/мин	1,25 мм	18 %
14	2250 об/мин	1,25 мм	10 %
15	2250 об/мин	1,25 мм	10 %
16	2250 об/мин	1,25 мм	10 %

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

Таблица В1 – Коэффициенты  $b_{ij}$  уравнений регрессии и статистические параметры выходных параметров при степени помола 30 °ШР

Коэффициенты регрессии	Выходные параметры														
	$Y1$	$Y2$	$Y3$	$Y4$	$Y5$	$Y6$	$Y7$	$Y8$	$Y9$	$Y10$	$Y11$	$Y12$	$Y13$	$Y14$	$Y15$
	Значения коэффициентов														
$b_0$	-767,881	-0,093	-10,171	5,926	1927,08	-4,758	90,359	43,77	-26,657	-19,479	12,006	709,956	28051,4	707,128	12503,1
$b_1$	0,926	0,008	0,005	-0,002	-1,897	-0,007	-0,057	0,008	0,038	0,021	-0,01	-0,772	-29,44	-1,701	-9,982
$b_2$	690,7	38,82	15,36	-2,339	687,75	48,809	-0,669	-9,225	13,452	-1,955	-1,601	281,1	8939,35	1590,15	-1456,7
$b_3$	-30,418	-0,961	-0,168	-0,206	5,815	-1,235	1,06	0,016	-1,064	-0,114	0,103	2,706	206,684	33,853	39,293
$b_{11}$	-0,0001	0,0000014	-3,38E-7	3,584E-7	0,0003	6,89E-7	0,000009	-0,000002	-0,000007	-0,000002	0,000002	0,0001	0,005	0,0003	0,002
$b_{22}$	-58,0	-9,8	-5,41	-0,154	-199,0	-21,967	-7,912	0,439	0,055	7,135	0,283	-86,0	-7453,0	-551,0	310,0
$b_{33}$	0,929	0,074	0,015	0,004	-1,527	0,039	-0,049	-0,022	0,046	0,025	0,0005	-0,367	-11,082	-0,683	-1,226
$b_{12}$	-0,176	-0,005	-0,001	0,0008	-0,066	0,002	0,008	0,001	-0,004	-0,005	-0,00002	-0,02	3,462	0,002	0,156
$b_{13}$	0,006	-0,0003	-0,0001	0,000001	0,016	0,00002	0,00009	0,0001	0,00003	-0,0001	-0,00008	0,003	-0,024	-0,0001	-0,019
$b_{23}$	-9,75	-0,2	0,024	0,066	-2,125	-0,064	0,011	0,388	-0,26	-0,219	0,079	-1,25	96,375	-12,625	29,25
Коэффициент детерминации $R^2, \%$	76,664	82,816	80,912	54,713	86,82	70,052	71,807	87,162	74,66	76,78	68,466	92,754	86,161	73,682	79,597

Таблица В2 – Коэффициенты  $b_{ij}$  уравнений регрессии и статистические параметры выходных параметров при степени помола 45 °ШР

Коэффициенты регрессии	Выходные параметры														
	$Y1$	$Y2$	$Y3$	$Y4$	$Y5$	$Y6$	$Y7$	$Y8$	$Y9$	$Y10$	$Y11$	$Y12$	$Y13$	$Y14$	$Y15$
	Значения коэффициентов														
$b_0$	1339,01	-33,158	4,847	-1,404	2903,59	19,232	111,189	-2,159	-57,308	40,371	7,906	-414,34	12195,9	-347,92	4320,33
$b_1$	-0,279	0,064	-0,002	-0,0002	-2,173	-0,026	-0,079	0,054	0,068	-0,035	-0,007	0,805	-5,971	0,549	-2,086
$b_2$	-834,15	-1,46	6,41	2,347	-319,95	55,697	2,004	-7,058	8,751	-3,153	-0,544	-1108,5	-4249,8	-457,6	-3134,35
$b_3$	-4,59	-1,813	-0,245	0,05	10,978	-2,336	1,461	-0,795	-1,396	0,521	0,209	36,156	-90,012	13,318	82,94
$b_{11}$	0,00005	-0,00001	4,15E-7	3,164E-7	0,0004	0,000002	0,00001	-0,00001	-0,00001	0,000009	0,000001	-0,0001	0,001	-0,0001	0,0005
$b_{22}$	323,0	-2,0	-2,897	-0,501	5,0	-30,016	-13,455	0,494	6,418	6,159	0,384	370,0	1180,0	202,0	1177,0
$b_{33}$	0,292	0,026	0,003	0,0002	0,113	0,037	0,00001	0,022	0,055	-0,013	-0,002	-0,742	5,515	-0,179	-1,527
$b_{12}$	0,038	0,0008	0,0004	-0,0005	0,198	0,009	0,013	0,001	-0,0103	-0,004	0,00004	0,1	0,848	0,0	-0,002
$b_{13}$	-0,001	0,0002	0,00006	-0,00002	0,0008	0,0005	0,00001	0,00008	-0,00002	-0,00003	-0,00004	-0,006	-0,015	-0,002	-0,029
$b_{23}$	-1,375	0,45	0,005	-0,001	-11,375	-0,082	0,132	0,083	-0,0712	-0,106	-0,038	-1,25	-39,5	-2,5	19,625
Коэффициент детерминации $R^2, \%$	78,02	98,596	54,057	94,524	92,511	93,639	93,081	52,199	85,467	69,364	39,913	76,48	37,403	77,434	63,733

Таблица В3 – Коэффициенты  $b_{ij}$  уравнений регрессии и статистические параметры выходных параметров при степени помола 60 °ШР

Коэффициенты регрессии	Выходные параметры														
	$Y1$	$Y2$	$Y3$	$Y4$	$Y5$	$Y6$	$Y7$	$Y8$	$Y9$	$Y10$	$Y11$	$Y12$	$Y13$	$Y14$	$Y15$
	Значения коэффициентов														
$b_0$	2260,39	-109,047	-15,495	0,537	2104,5	-76,035	70,391	21,623	-45,301	51,595	1,691	-2931,4	-3836,6	-250,35	4160,73
$b_1$	-1,577	0,096	0,009	-0,001	-1,656	0,05	-0,043	0,031	0,058	-0,043	-0,002	3,116	8,061	0,591	-1,573
$b_2$	-649,8	43,755	13,912	2,13	-238,75	46,378	11,017	15,694	-10,194	-17,147	0,629	-2178,0	-11766,8	-682,35	-3062,9
$b_3$	56,625	0,051	0,123	-0,019	47,778	0,273	0,487	-2,192	0,344	1,3126	0,048	108,375	630,534	12,378	5,475
$b_{11}$	0,0003	-0,00001	-0,000001	2,967E-7	0,0003	-0,000006	0,000007	-0,000007	-0,000009	0,000009	5,26E-7	-0,0006	-0,001	-0,0001	0,0003
$b_{22}$	340,0	-10,3	-3,935	-1,195	121,0	-20,695	-18,541	-5,066	15,96	7,545	0,102	840,0	3127,0	177,0	984,0
$b_{33}$	-1,234	-0,008	-0,002	0,001	-1,589	0,045	-0,0006	0,136	-0,003	-0,039	-0,001	-1,093	-4,878	0,097	0,156
$b_{12}$	0,06	-0,009	-0,001	0,0003	-0,014	-0,003	0,013	-0,002	-0,011	0,001	-0,0003	0,24	1,946	0,114	0,232
$b_{13}$	-0,007	0,00006	-0,00002	-0,000009	-0,0008	-0,001	-0,0004	0,0003	0,00004	0,00002	7,5E-7	-0,02	-0,204	-0,006	-0,014
$b_{23}$	-4,0	0,008	0,003	0,007	-0,875	0,807	0,458	0,044	-0,332	-0,254	-0,009	-25,0	4,625	0,125	14,75
Коэффициент детерминации $R^2$ , %	70,941	93,725	70,853	82,643	78,253	72,493	88,406	62,44	60,681	80,837	61,618	73,077	59,999	84,367	76,02

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Таблица Г1 – Бумагообразующие свойства волокнистой массы

Конструктивные параметры			Степень помола, °ШР	Бумагообразующие свойства волокнистой массы					
Частота вращения ротора, <i>n</i> , об/мин	Величина межножевого зазора, <i>s</i> , мм	Концентрация волокнистой массы, <i>C</i> , %		Средняя длина волокон, мкм	Ширина волокон, мкм	Индекс фибрилляции, %	Грубость, мг/м	Содержание мелочи, %	Водоудерживающая способность, %
2500	1,5	18	30	547	27,3	4,239	0,718	6,36	263
			45	538	29,1	4,966	0,491	9,581	347
			60	527	30,6	4,966	0,484	9,663	359
2000	1,5	18	30	527	26,8	4,075	0,695	5,812	248
			45	527	29	4,452	0,454	5,971	325
			60	495	29,9	5,043	0,338	12,011	392
2500	1	18	30	536	28,8	4,629	0,619	6,658	288
			45	522	29,7	4,814	0,589	8,636	343
			60	511	31,3	5,333	0,403	9,15	366
2000	1	18	30	539	26,6	4,232	0,469	7,118	228
			45	516	27,2	4,411	0,433	7,427	387
			60	510	29,8	4,958	0,424	11,383	391
2500	1,5	10	30	559	27,5	4,197	0,768	7,174	266
			45	534	28,8	4,646	0,492	8,924	345
			60	524	30,9	5,16	0,399	9,504	362
2000	1,5	10	30	568	26,9	4,206	0,419	6,987	289
			45	549	28	4,382	0,379	7,765	343
			60	535	29,3	4,515	0,304	7,947	387
2500	1	10	30	550	28,6	4,516	0,600	7,49	254
			45	544	29,7	4,664	0,596	7,763	312
			60	533	31,4	5,431	0,437	12,904	361
2000	1	10	30	517	27,2	4,298	0,786	7,758	289
			45	494	28,2	4,364	0,342	8,781	343
			60	488	29,3	4,72	0,329	9,863	387

Продолжение таблицы Г1

2500	1,25	14	30	523	28,8	4,593	0,663	7,587	320
			45	522	29,5	5,075	0,559	9,422	343
			60	502	30,6	5,208	0,530	11,448	371
2000	1,25	14	30	531	27,5	4,311	0,481	7,736	285
			45	510	27,9	4,785	0,441	9,346	339
			60	505	28,5	4,996	0,354	10,302	416
2250	1,5	14	30	522	28,8	4,624	0,506	7,054	277
			45	521	29,2	4,648	0,395	7,701	301
			60	520	29,4	4,969	0,307	10,518	406
2250	1	14	30	527	29,7	4,34	0,574	5,437	254
			45	527	28,9	4,407	0,503	7,058	329
			60	519	28,9	4,601	0,390	9,481	351
2250	1,25	18	30	531	29,7	4,531	0,729	6,695	245
			45	513	29,8	4,777	0,538	9,123	325
			60	468	31,5	5,247	0,505	10,29	344
2250	1,25	10	30	547	29,3	4,696	0,513	9,804	262
			45	504	29,6	4,917	0,429	10,584	308
			60	497	29,8	5,503	0,387	13,739	347
2250	1,25	10	30	521	29,2	4,672	0,508	9,805	260
			45	502	29,8	4,920	0,430	10,573	310
			60	495	30,1	5,403	0,384	13,699	350
2250	1,25	10	30	537	29,5	4,694	0,519	9,719	263
			45	497	29,7	4,899	0,429	10,547	308
			60	473	29,8	5,501	0,381	13,721	352

Таблица Г2 – Фракционный состав волокнистой массы

Конструктивные параметры			Степень помола, °ШР	Фракционный состав, %				
Частота вращения ротора, <i>n</i> , об/мин	Величина межножевого зазора, <i>s</i> , мм	Концентрация волокнистой массы, <i>C</i> , %		200-301	301-684	684-1553	1553-3524	3524-5310
2500	1,5	18	30	29,71	46,568	18,789	4,355	0,578
			45	31,361	46,657	18,072	3,693	0,217
			60	33,829	47,45	15,126	3,595	0
2000	1,5	18	30	29,714	47,164	18,097	4,395	0,63
			45	30,366	48,407	17,849	3,211	0,167
			60	32,993	49,226	15,7	2,052	0,029
2500	1	18	30	29,866	46,152	19,43	4,43	0,122
			45	29,928	48,417	18,412	3,196	0,047
			60	30,571	49,047	17,306	3,038	0,038
2000	1	18	30	30,743	46,356	18,291	4,088	0,522
			45	31,624	47,387	17,222	3,285	0,482
			60	32,594	48,046	16,316	2,991	0,053
2500	1,5	10	30	31,045	44,889	19,067	4,808	0,191
			45	31,701	47,137	17,28	3,782	0,1
			60	33,807	47,474	15,01	3,709	0
2000	1,5	10	30	30,117	45,263	19,165	5,203	0,252
			45	30,175	46,045	18,576	4,852	0,352
			60	30,738	48,601	17,052	3,507	0,102
2500	1	10	30	29,945	45,346	19,323	4,978	0,408
			45	30,21	46,061	18,945	4,532	0,252
			60	31,901	47,513	17,154	3,36	0,072
2000	1	10	30	32,492	46,693	17,661	3,046	0,108
			45	32,552	48,531	16,054	2,824	0,039
			60	32,658	50,073	15,048	2,201	0,02
2500	1,25	14	30	32,761	45,34	17,748	3,694	0,457
			45	33,189	46,225	16,633	3,633	0,244
			60	33,965	47,725	14,933	3,243	0

Продолжение таблицы Г2

2000	1,25	14	30	31,06	47,217	18,308	3,216	0,199
			45	32,677	47,461	16,308	3,362	0,192
			60	33,313	48,133	15,27	3,172	0,112
2250	1,5	14	30	30,952	46,833	18,246	3,832	0,137
			45	31,14	47,451	17,846	3,481	0,082
			60	31,566	47,779	17,423	3,173	0,059
2250	1	14	30	30,308	46,344	18,625	4,501	0,222
			45	31,082	48,13	17,475	3,141	0,172
			60	32,281	48,611	16,102	3,006	0
2250	1,25	18	30	29,86	47,052	19,014	3,898	0,176
			45	30,215	48,902	18,108	2,693	0,082
			60	33,82	50,131	14,346	1,703	0
2250	1,25	10	30	30,795	45,364	19,327	4,35	0,164
			45	31,711	47,329	18,185	2,719	0,056
			60	32,325	48,321	17,079	2,275	0
2250	1,25	10	30	30,62	45,485	19,232	4,59	0,073
			45	31,277	46,838	18,102	3,783	0
			60	31,434	48,468	17,584	2,514	0
2250	1,25	10	30	30,998	47,251	18,485	3,21	0,056
			45	31,099	48,001	18,163	2,696	0,041
			60	31,49	49,091	17,383	2,036	0

Таблица Г3 – Физико-механические характеристики бумажных отливок

Конструктивные параметры			Степень помола, °ШР	Физико-механические характеристики бумажных отливок			
Частота вращения ротора, <i>n</i> , об/мин	Величина межножевого зазора, <i>s</i> , мм	Концентрация волокнистой массы, <i>C</i> , %		Сопротивление излому	Разрывная длина, м	Сопротивление продавливанию, кПа	Сопротивление раздиранию, мН
2500	1,5	18	30	10	621	0	549
			45	50	1774	70	667
			60	140	2661	107	824
2000	1,5	18	30	10	621	0	746
			45	60	1655	74	746
			60	120	3074	110	746
2500	1	18	30	10	599	0	471
			45	30	1552	65	589
			60	130	2261	85	667
2000	1	18	30	10	887	0	589
			45	50	1981	79	667
			60	110	2690	105	667
2500	1,5	10	30	10	1160	51	628
			45	80	2062	77	746
			60	270	3136	120	863
2000	1,5	10	30	30	486	50	628
			45	50	2217	82	706
			60	110	2260	86	746
2500	1	10	30	10	946	0	549
			45	40	2018	72	746
			60	100	2284	87	785
2000	1	10	30	20	1715	0	706
			45	50	2049	67	706
			60	60	2365	93	706
2500	1,25	14	30	20	1508	52	628
			45	30	1552	56	667
			60	70	2173	86	667

Продолжение таблицы Г3

2000	1,25	14	30	30	1537	64	589
			45	50	1951	71	628
			60	120	2775	87	706
2250	1,5	14	30	9	642	0	471
			45	70	1774	89	706
			60	210	2631	103	706
2250	1	14	30	10	769	0	510
			45	80	1744	78	667
			60	170	2927	11	746
2250	1,25	18	30	10	1035	47	471
			45	50	2069	75	667
			60	170	2971	105	667
2250	1,25	10	30	8	953	0	432
			45	30	1478	61	510
			60	70	2040	89	667
2250	1,25	10	30	9	944	0	421
			45	30	1472	62	506
			60	71	2042	91	670
2250	1,25	10	30	8	932	0	429
			45	29	1430	60	509
			60	67	1997	90	658

## ПРИЛОЖЕНИЕ Д

### Результаты регрессионного анализа

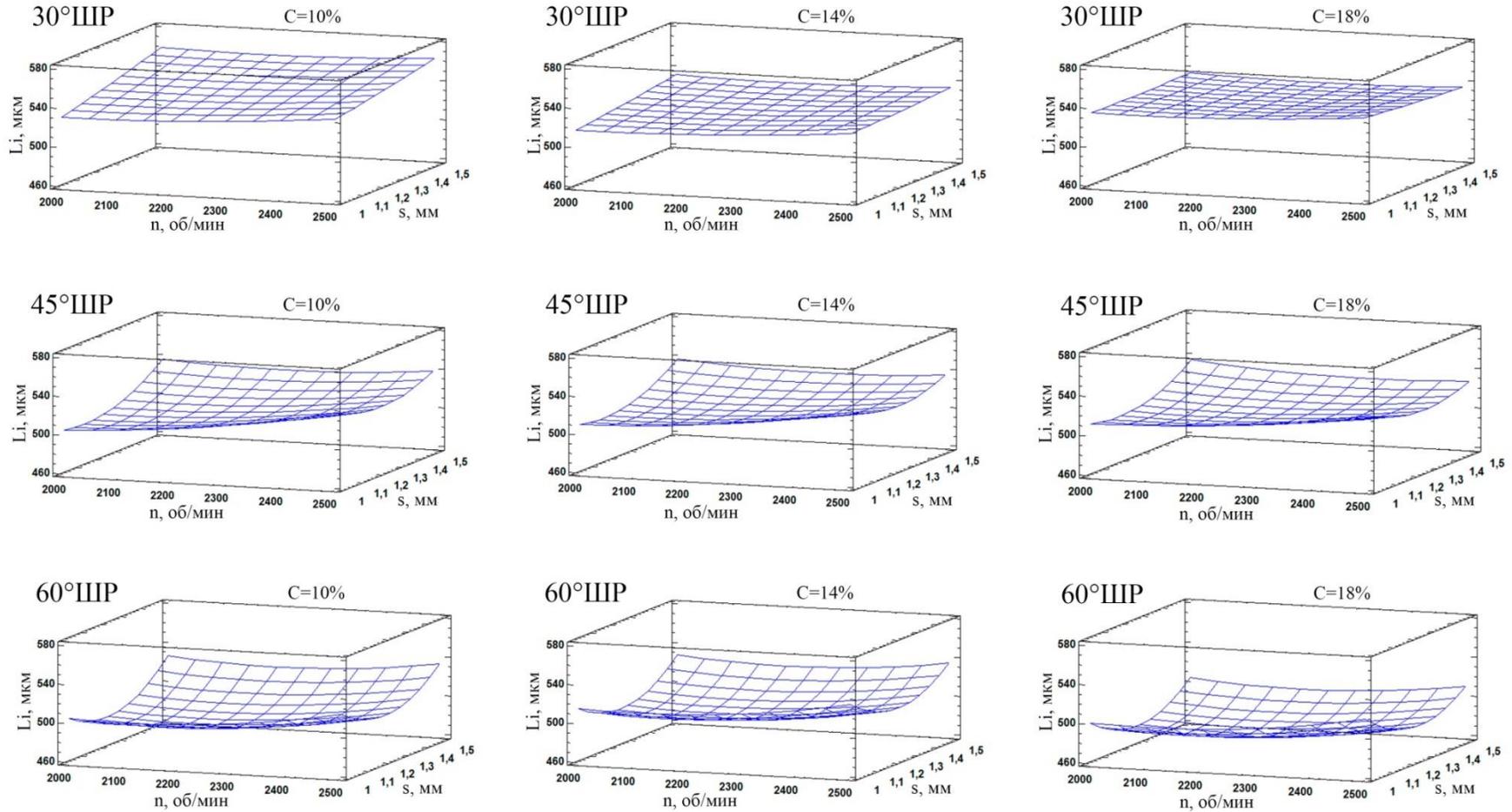


Рисунок Д1 – Зависимость средней длины волокон от частоты вращения  $n$ , величины межножевого зазора  $s$ , концентрации волокнистой массы  $C$  при степени помола 30 °ШР, 45 °ШР, 60 °ШР.

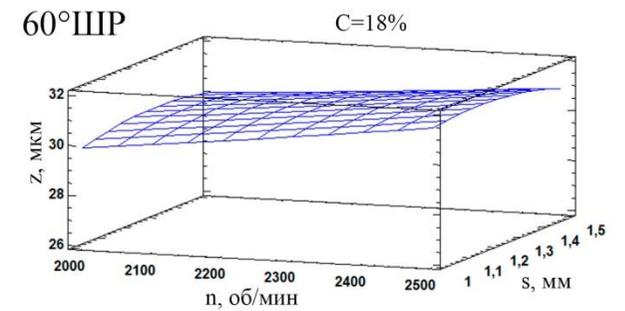
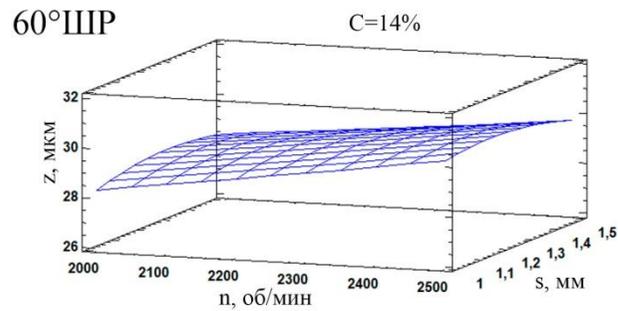
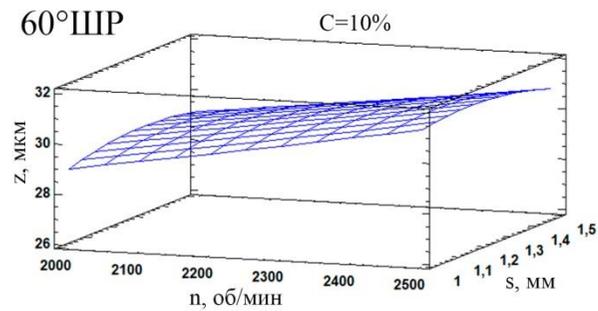
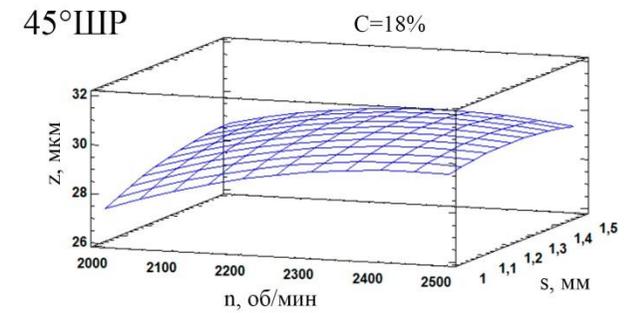
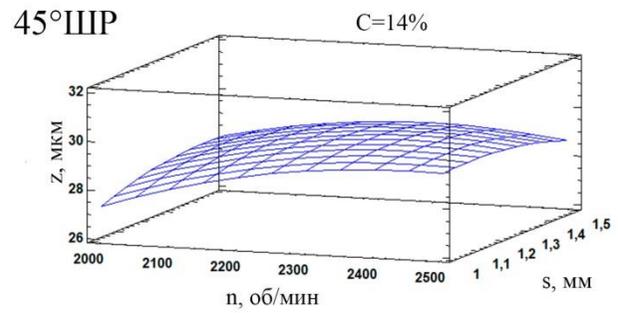
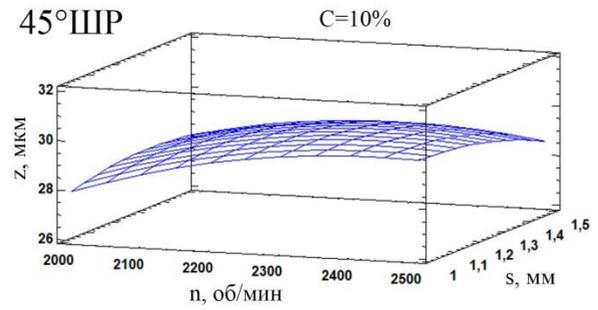
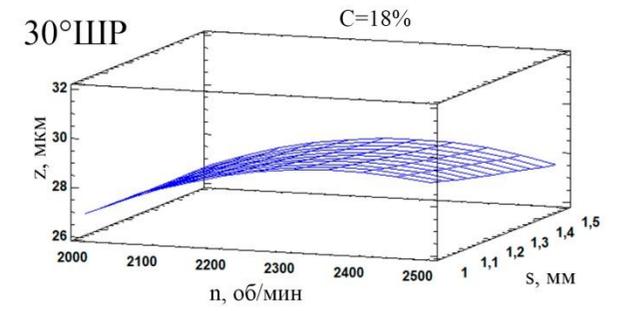
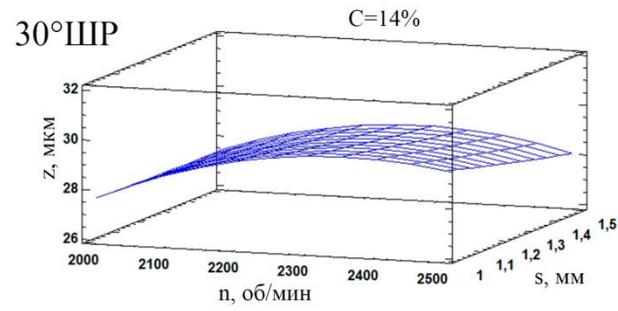
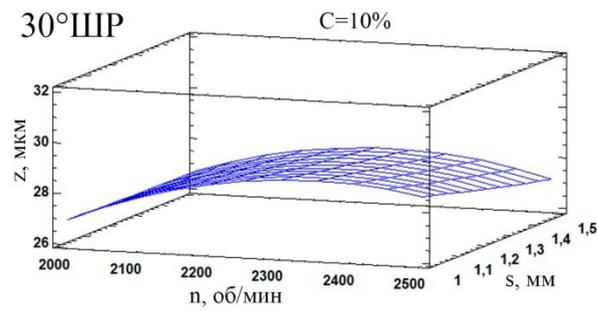


Рисунок Д2 – Зависимость ширины волокон от частоты вращения  $n$ , величины межножевого зазора  $s$ , концентрации волокнистой массы  $C$  при степени помола 30 °ШР, 45 °ШР, 60 °ШР.

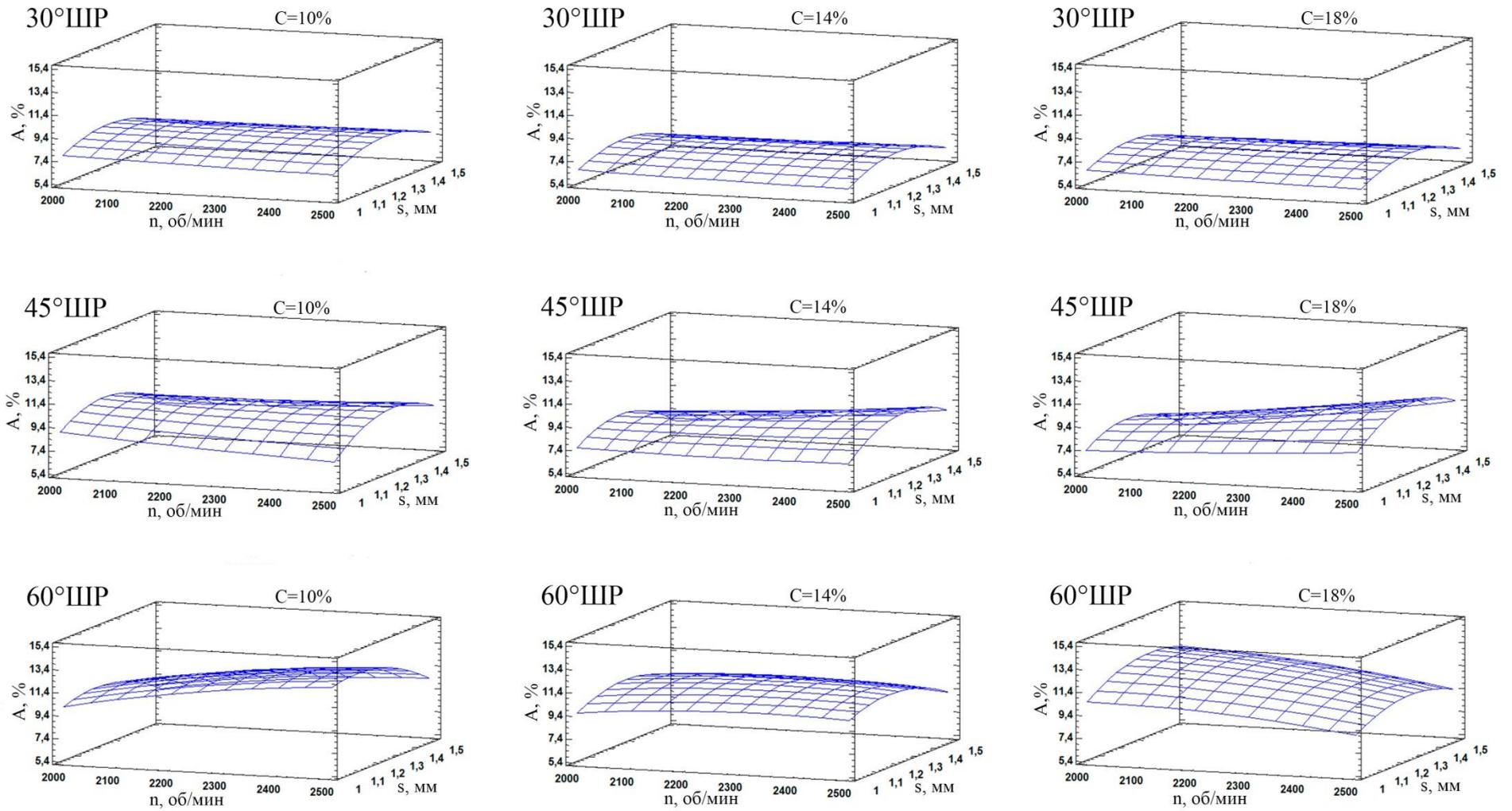


Рисунок ДЗ – Зависимость содержания мелочи от частоты вращения  $n$ , величины межножевого зазора  $s$ , концентрации волокнистой массы  $C$  при степени помола 30 °ШР, 45 °ШР, 60 °ШР.

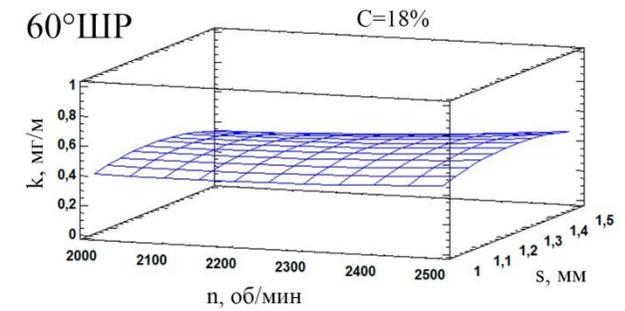
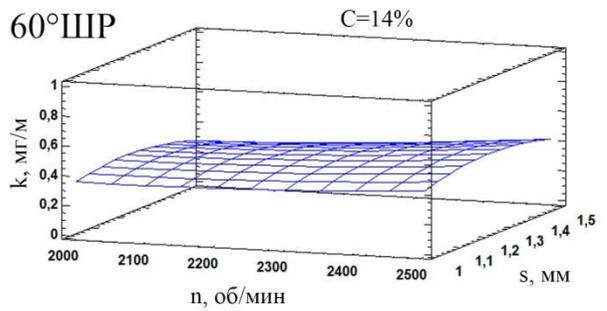
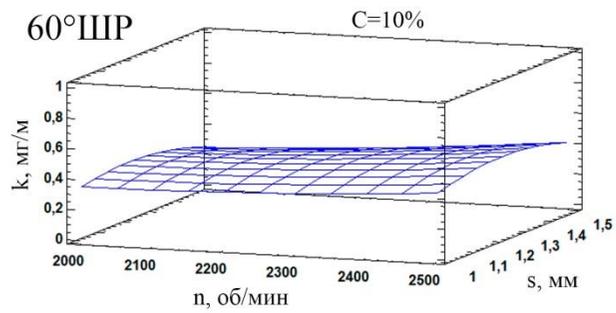
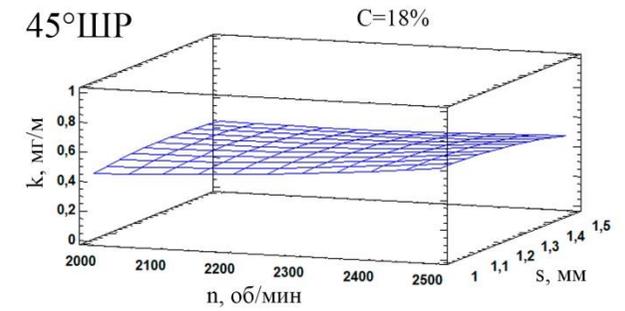
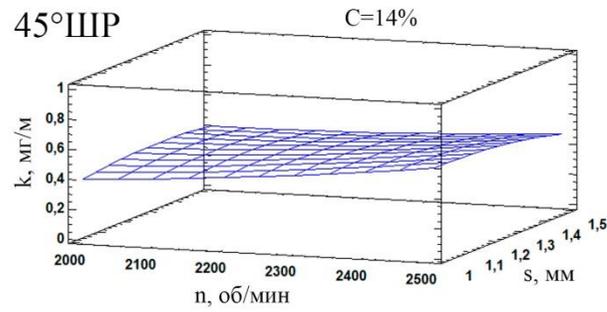
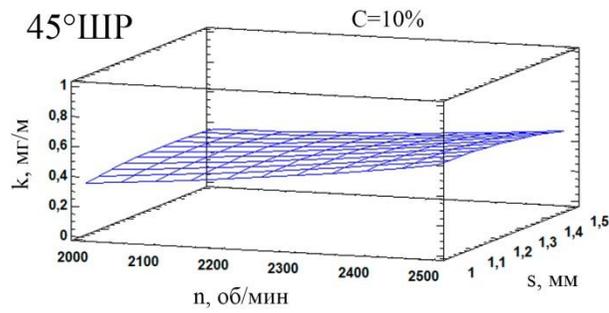
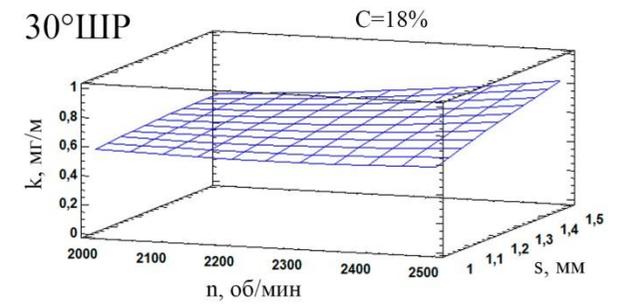
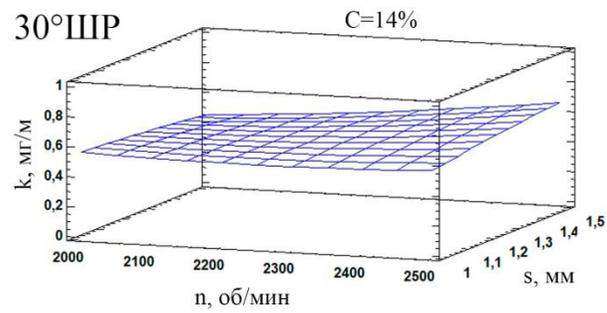
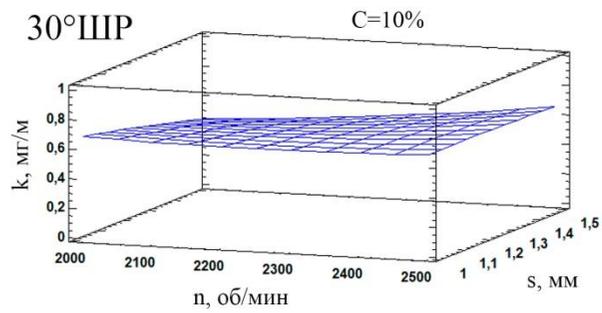


Рисунок Д4 – Зависимость грубости волокон от частоты вращения  $n$ , величины межслоевого зазора  $s$ , концентрации волокнистой массы  $C$  при степени помола 30 °ШР, 45 °ШР, 60 °ШР.

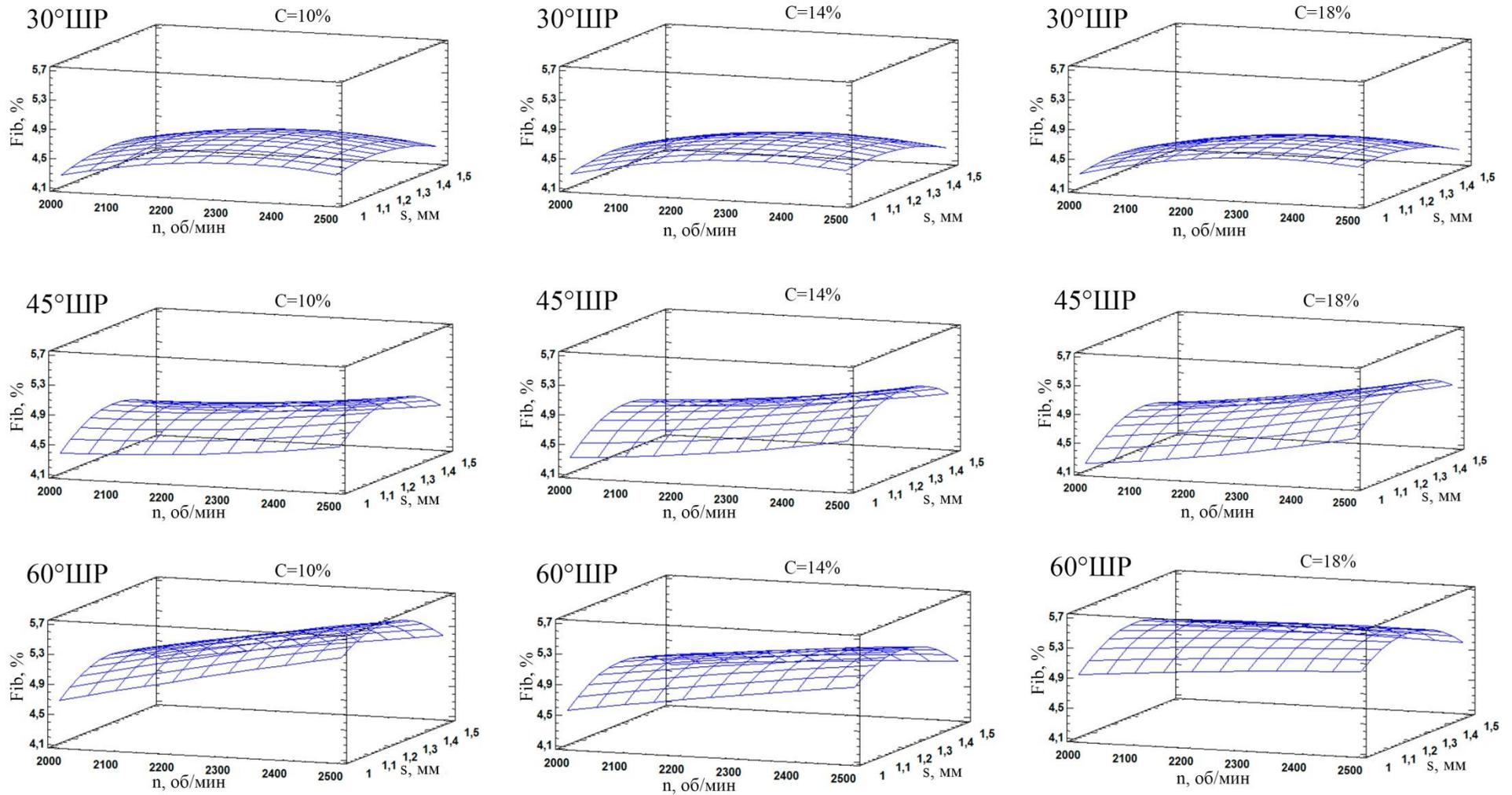


Рисунок Д5 – Зависимость индекса фибриляции от частоты вращения  $n$ , величины межножевого зазора  $s$ , концентрации волокнистой массы  $C$  при степени помола 30 °ШР, 45 °ШР, 60 °ШР.

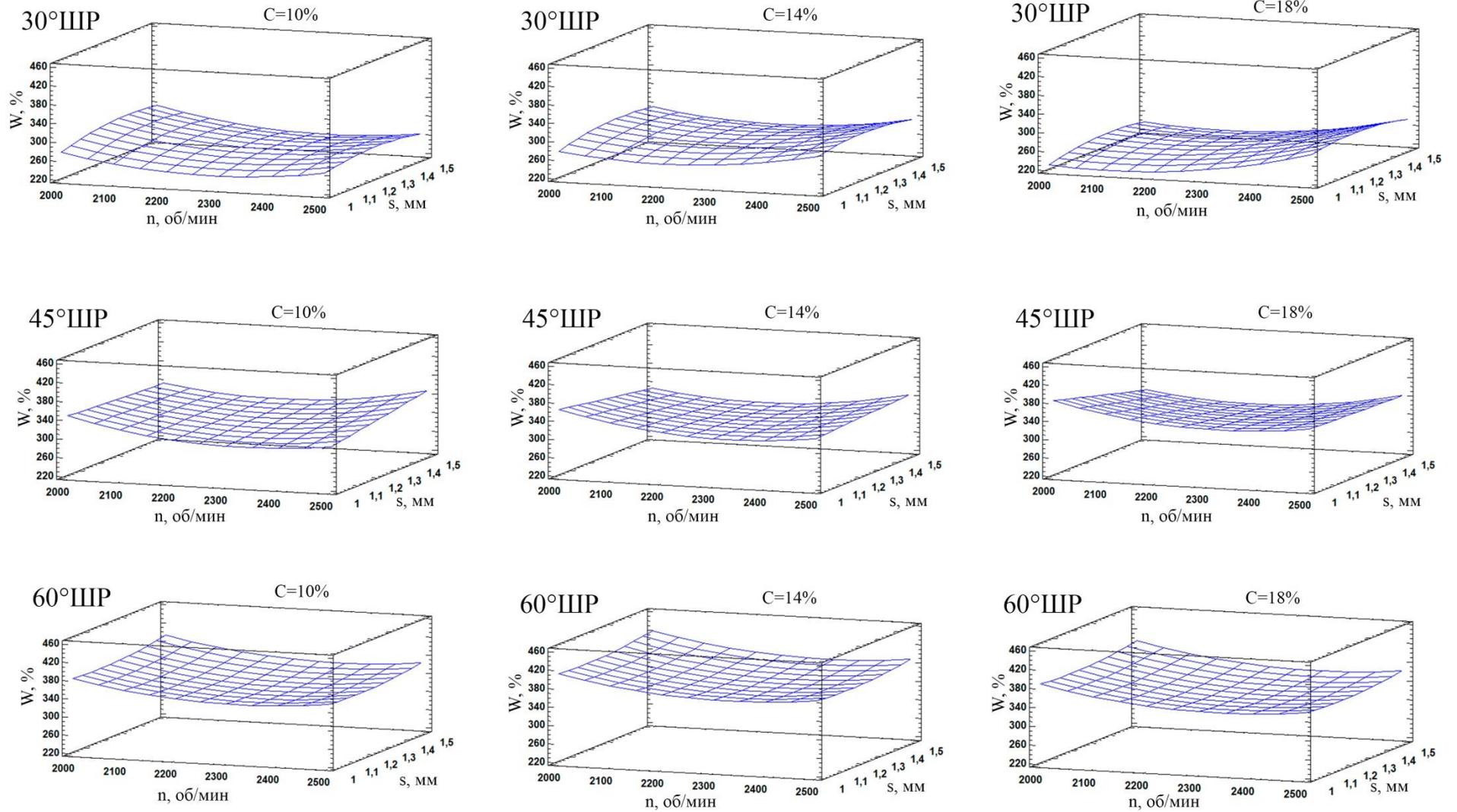


Рисунок Д6 – Зависимость водоудерживающей способности от частоты вращения  $n$ , величины межжевого зазора  $s$ , концентрации волокнистой массы  $C$  при степени помола 30 °ШР, 45 °ШР, 60 °ШР.

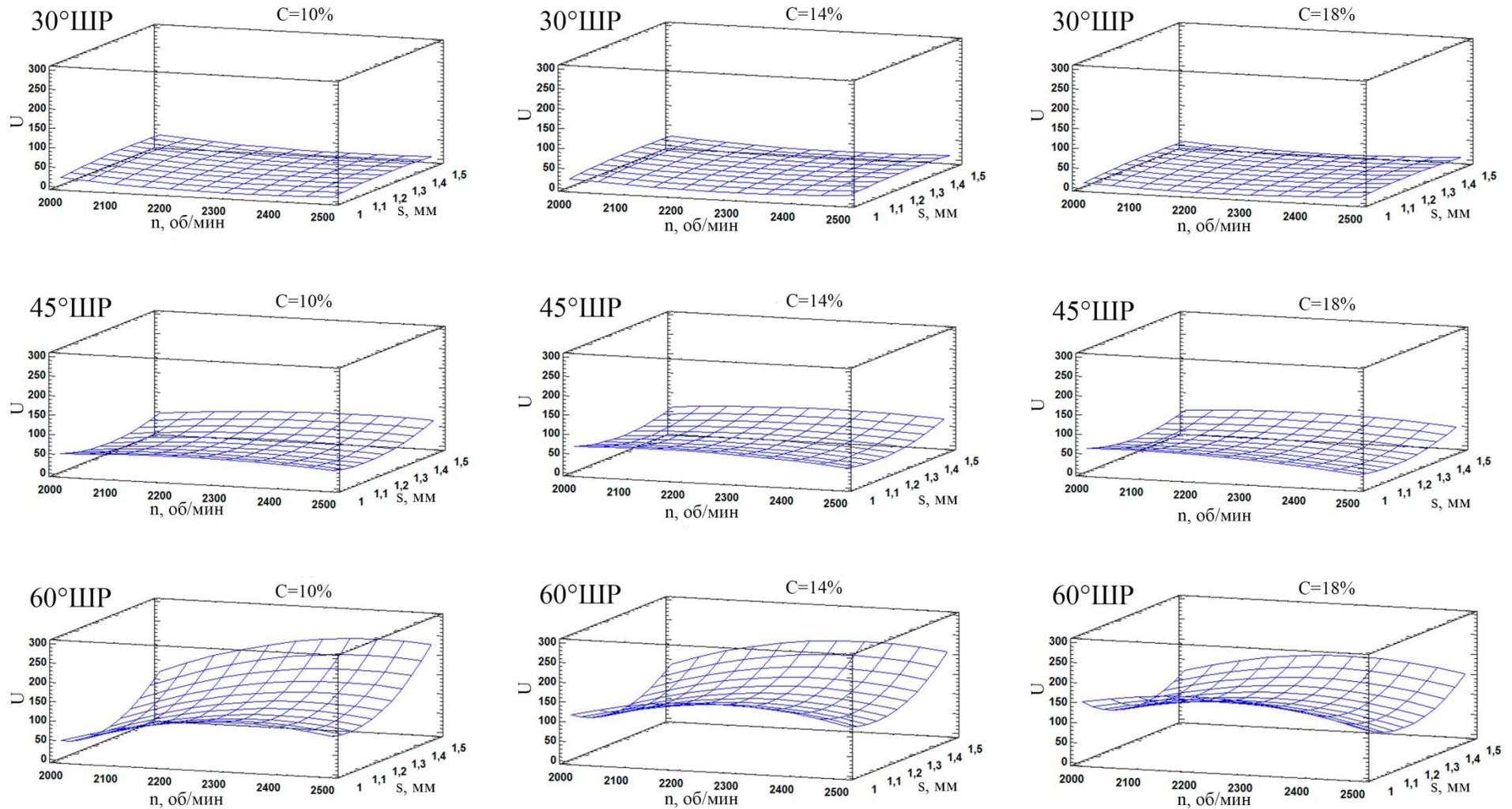


Рисунок Д7 – Зависимость сопротивления излому от частоты вращения  $n$ , величины межзолевого зазора  $s$ , концентрации волокнистой массы  $C$  при степени помола 30 °ШР, 45 °ШР, 60 °ШР.

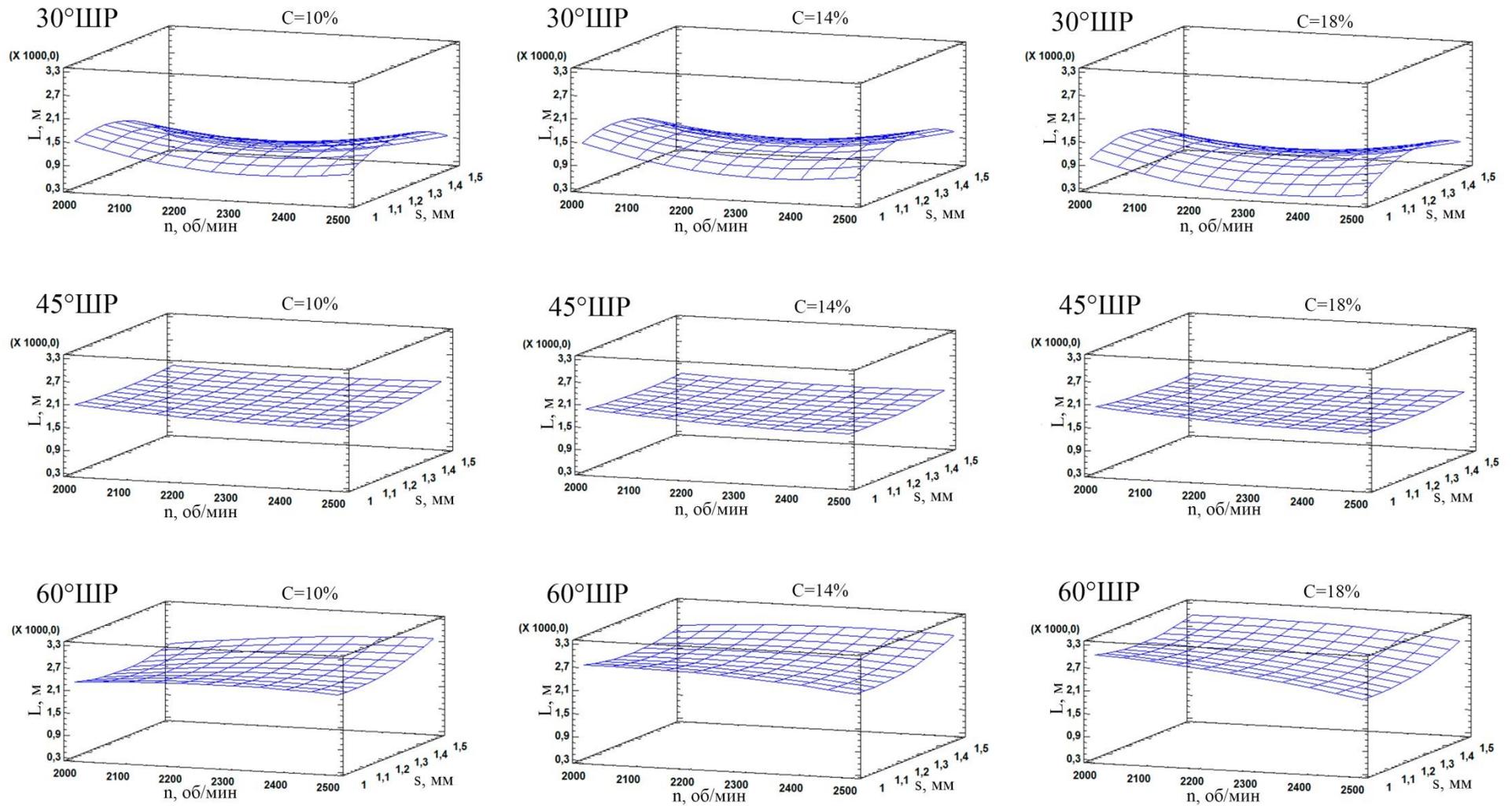


Рисунок Д8 – Зависимость разрывной длины от частоты вращения  $n$ , величины межножевого зазора  $s$ , концентрации волокнистой массы  $C$  при степени помола 30 °ШР, 45 °ШР, 60 °ШР.

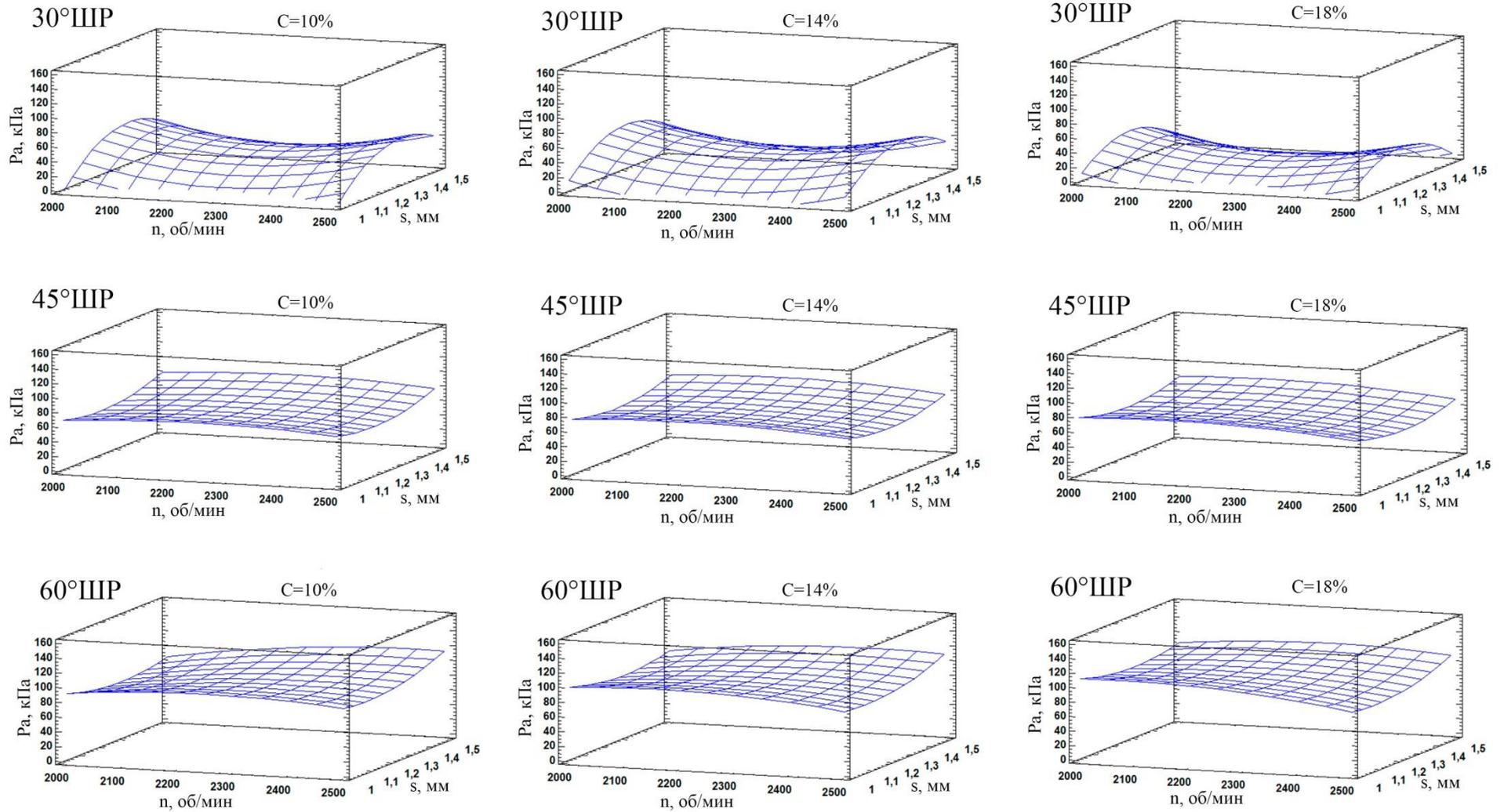


Рисунок Д9 – Зависимость сопротивления продавливанию от частоты вращения  $n$ , величины межножевого зазора  $s$ , концентрации волокнистой массы  $C$  при степени помола 30 °ШР, 45 °ШР, 60 °ШР.

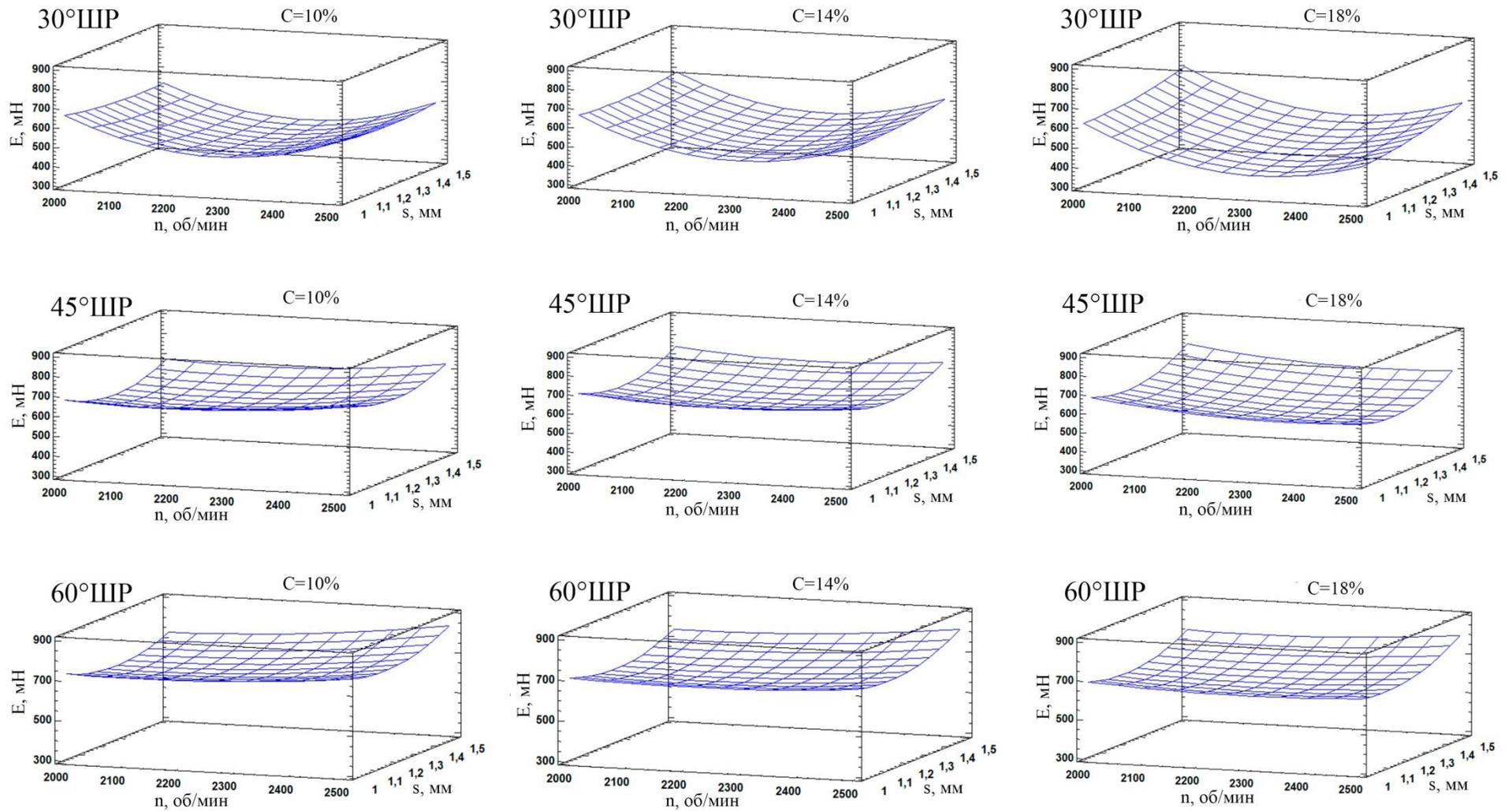


Рисунок Д10 – Зависимость сопротивления раздиранию от частоты вращения  $n$ , величины межножевого зазора  $s$ , концентрации волокнистой массы  $C$  при степени помола 30 °ШР, 45 °ШР, 60 °ШР.

## ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Таблица Е1 – Данные выходных параметров и их нормированных значений с обобщенным параметром оптимизации

Наблюдения при 60°ШР	Выходной параметр						Нормировка выходного параметра						Обобщенный параметр
№	<i>Y3</i>	<i>Y4</i>	<i>Y12</i>	<i>Y13</i>	<i>Y14</i>	<i>Y15</i>	<i>d3</i>	<i>d4</i>	<i>d12</i>	<i>d13</i>	<i>d14</i>	<i>d15</i>	<i>W<sub>OB</sub></i>
1	4,966	0,484	140	2661	107	824	0,456	0,794	0,381	0,567	0,629	0,801	0,605
2	5,043	0,338	120	3074	110	746	0,534	0,153	0,286	0,943	0,714	0,403	0,506
3	5,333	0,403	130	2261	85	667	0,828	0,440	0,333	0,202	0,000	0,000	0,300
4	4,958	0,433	110	2690	105	667	0,448	0,570	0,238	0,593	0,571	0,000	0,404
5	5,16	0,399	270	3136	120	863	0,653	0,420	1,000	1,000	1,000	1,000	0,846
6	4,515	0,304	110	2260	86	746	0,000	0,000	0,238	0,201	0,029	0,403	0,145
7	5,431	0,437	100	2284	87	785	0,927	0,588	0,190	0,223	0,057	0,602	0,431
8	4,72	0,329	60	2365	93	706	0,207	0,114	0,000	0,297	0,229	0,199	0,174
9	5,208	0,530	70	2173	86	667	0,701	1,000	0,048	0,121	0,029	0,000	0,316
10	4,996	0,354	120	2775	87	706	0,487	0,221	0,286	0,671	0,057	0,199	0,320
11	4,969	0,307	210	2631	103	706	0,460	0,016	0,714	0,539	0,514	0,199	0,407
12	4,601	0,390	170	2927	110	746	0,087	0,383	0,524	0,809	0,714	0,403	0,487
13	5,247	0,505	170	2971	105	667	0,741	0,888	0,524	0,849	0,571	0,000	0,596
14	5,503	0,387	70	2040	89	667	1,000	0,366	0,048	0,000	0,114	0,000	0,255

## ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

Таблица Ж1 – Матрица корреляции

	<i>Y1</i>	<i>Y2</i>	<i>Y3</i>	<i>Y4</i>	<i>Y5</i>	<i>Y6</i>	<i>Y7</i>	<i>Y8</i>	<i>Y9</i>	<i>Y10</i>	<i>Y11</i>	<i>Y12</i>	<i>Y13</i>	<i>Y14</i>	<i>Y15</i>
<i>Y1</i>		-0,4409	-0,5159	0,0809	-0,5229	-0,5323	-0,6418	-0,8116	0,7495	0,8983	0,5063	-0,3830	-0,5783	-0,4405	-0,2080
<i>Y2</i>	-0,4409		0,8431	-0,0988	0,4771	0,6076	0,3994	0,4904	-0,4610	-0,4679	-0,6883	0,5678	0,5709	0,5700	0,2454
<i>Y3</i>	-0,5159	0,8431		-0,1206	0,5728	0,8462	0,5596	0,4517	-0,5396	-0,5401	-0,6261	0,5557	0,5927	0,5711	0,2540
<i>Y4</i>	0,0809	-0,0988	-0,1206		-0,3221	-0,1709	0,0194	-0,2790	0,1378	0,1518	0,0833	-0,3072	-0,2284	-0,3163	-0,0904
<i>Y5</i>	-0,5229	0,4771	0,5728	-0,3221		0,6484	0,6079	0,6272	-0,7222	-0,5966	-0,5345	0,6922	0,8494	0,7968	0,6132
<i>Y6</i>	-0,5323	0,6076	0,8462	-0,1709	0,6484		0,6533	0,4523	-0,5828	-0,6185	-0,6124	0,5025	0,6668	0,5821	0,3211
<i>Y7</i>	-0,6418	0,3994	0,5596	0,0194	0,6079	0,6533		0,4024	-0,8910	-0,5841	-0,5068	0,5737	0,7071	0,5372	0,4767
<i>Y8</i>	-0,8116	0,4904	0,4517	-0,2790	0,6272	0,4523	0,4024		-0,7012	-0,8828	-0,5671	0,5452	0,6673	0,5616	0,4102
<i>Y9</i>	0,7495	-0,4610	-0,5396	0,1378	-0,7222	-0,5828	-0,8910	-0,7012		0,6897	0,5128	-0,6961	-0,8045	-0,6284	-0,6103
<i>Y10</i>	0,8983	-0,4679	-0,5401	0,1518	-0,5966	-0,6185	-0,5841	-0,8828	0,6897		0,6053	-0,4553	-0,6607	-0,5420	-0,3000
<i>Y11</i>	0,5063	-0,6883	-0,6261	0,0833	-0,5345	-0,6124	-0,5068	-0,5671	0,5128	0,6053		-0,5513	-0,6068	-0,5377	-0,2479
<i>Y12</i>	-0,3830	0,5678	0,5557	-0,3072	0,6922	0,5025	0,5737	0,5452	-0,6961	-0,4553	-0,5513		0,8384	0,6633	0,6585
<i>Y13</i>	-0,5783	0,5709	0,5927	-0,2284	0,8494	0,6668	0,7071	0,6673	-0,8045	-0,6607	-0,6068	0,8384		0,7941	0,7230
<i>Y14</i>	-0,4405	0,5700	0,5711	-0,3163	0,7968	0,5821	0,5372	0,5616	-0,6284	-0,5420	-0,5377	0,6633	0,7941		0,6296
<i>Y15</i>	-0,2080	0,2454	0,2540	-0,0904	0,6132	0,3211	0,4767	0,4102	-0,6103	-0,3000	-0,2479	0,6585	0,7230	0,6296	

### ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Таблица 31 – Прибыль и выручка, полученная предприятиями по заготовке технической конопли, за год

Наименование компании	Прибыль, руб	Выручка, руб
<i>Крупные предприятия</i>		
ООО "КРЕМЯНОЕ"	94080000	401420000
ЗАО АФ "ЮЖНАЯ"	89970000	667390000
ООО "МОРДОВСКИЕ ПЕНЬКОЗАВОДЫ"	77800000	2100000
ООО "АГРОЛИДЕР"	45790000	88690000
ООО "КМК"	35940000	35900000
ООО "АМК"	34610000	120660000
ООО "АГРОЛЕС"	33530000	201080000
<i>Средние предприятия</i>		
ООО "ОПХ "ПРОСТОР"	22460000	209370000
ООО "НОВ-АГРО"	18830000	354680000
СПОК "ГРИНЕВО"	9850000	327000
ООО СХП "РОДИНА"	8950000	24210000
ООО "МНОГОПОЛЬЕ"	7780000	49740000
ООО "ПРЕОБРАЖЕНСКОЕ 2016"	7490000	43290000
ООО "КУРСКАЯ ПЕНЬКА"	5450000	73640000
ООО "ДЕЛЬТА"	5230000	64840000
АО "АТЕРРА"	3850000	2820000
КФХ "АГРО-СТРИМ"	3480000	9250000
К/Х "КОЛОС"	1240000	14960000
ООО "МИР АГРО"	1150000	158200000
ООО "ТРИ ДЕРЕВНИ"	811000	8050000
СПК КОЛХОЗ "РУСЬ"	637000	14500000
<i>Малые предприятия</i>		
ООО "ХЕМП"	484000	5880000
ООО "СЕВЕРНАЯ РАПСОВАЯ КОМПАНИЯ"	408000	34780000
СППССК "ЯМАЛ-АГРО"	369000	1090000
ООО "АПК "ВАЛЬДАУ"	331000	5000000
СПК "КОЖИЛЬСКИЙ"	294000	130700000
ООО "АЛТЕКС"	191000	30210000
ООО "МИЛЛЕНИУМ АГРО"	100000	403000
СППСК "СОЮЗ ЭКО ПЛАН"	79000	3080000
КФХ "ТЕХНОВЕЛЕС"	13000	85000