

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

На правах рукописи



Ушаков Александр Васильевич

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

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

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

Красноярск – 2022

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. Аналитический обзор	9
1.1 Применение способа размола массы высокой концентрации	9
1.2 Оборудование для размола	17
1.3 Основные факторы процесса размола	21
1.3.1 Влияние межножевого зазора.....	22
1.3.2 Окружная скорость размалывающих органов.....	24
1.3.3 Влияние температуры нагрева массы на размол.....	26
1.3.4 Влияние конструкции размалывающих органов.....	27
Выводы к первой главе.....	32
ГЛАВА 2. Теоретическая часть	34
2.1 Теоретический анализ движения волокнистой массы в зоне размола	34
2.2 Геометрия активных элементов круговых канавок.....	35
2.3 Определение характера изменения угла β_x образованного между касательной к активной стенке канавки и радиусом r_x проведенным из центра диска в точку касания	37
2.4 Определение касательной силы P_τ в зависимости от угла β_x	44
Выводы ко второй главе.....	49
ГЛАВА 3. Экспериментальная часть	50
3.1 Описание экспериментальной установки для размола.....	50
3.2 Порядок проведения эксперимента	54
3.3 Методика проведения эксперимента	55
3.3.1 Методика определения бумагообразующих свойств волокнистой массы.....	55
3.3.2 Методика определения физико-механических показателей бумажных отливок.....	58

3.4 Планирование эксперимента	59
3.5 Результаты экспериментальных исследований при использовании конструкции гарнитуры с окружной формой ножей. Регрессионный анализ	62
3.5.1 Бумагообразующие свойства волокнистой массы	62
3.5.2 Физико-механические характеристики бумажных отливок.....	72
3.6.Определение оптимального режима размола волокнистой массы при использовании конструкции гарнитуры с окружной формой ножей	79
3.7.Сравнительный анализ процесса размола волокнистой массы с использованием различных конструкций гарнитур	82
3.7.1 Бумагообразующие свойства волокнистой массы	83
3.7.1.4 Изменение ширины волокна.....	88
3.7.2 Физико-механические характеристики бумажных отливок.....	94
3.8 Факторный анализ выходных параметров	99
Выводы к третьей главе.....	105
ГЛАВА 4. Оценка технико-экономической эффективности процесса размола для различных конструкций гарнитур	108
Выводы к четвертой главе	113
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	114
Библиографический список.....	116
ПРИЛОЖЕНИЕ А	129
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	132
ПРИЛОЖЕНИЕ В	133
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	136
ПРИЛОЖЕНИЕ Д	172

ВВЕДЕНИЕ

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

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

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

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Теоретическая и практическая значимость.

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

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

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

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

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

Положения, выносимые на защиту:

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

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

Соответствие паспорту специальности.

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

Апробация работы.

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

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

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

ГЛАВА 1. Аналитический обзор

1.1 Применение способа размола массы высокой концентрации

В целлюлозно-бумажной промышленности применяемые для производства бумаги древесные волокна, а также волокна природной целлюлозы представляют собой чрезвычайно сложный материал. Состав их неоднороден, и распределение различных компонентов гетерогенно. Морфологическое строение клеточной стенки как древесного, так и целлюлозного волокна являлось предметом исследований многих ученых. [1 - 4]. Рассмотрев различные литературные источники, можно сделать вывод о том, что для морфологической структуры целлюлозного волокна характерна вытянутая форма стенки клетки, наличие в ней внутренней полости (люмена), слоистость и фибриллярная структура [5 – 13].

Важнейшим процессом при производстве бумажной продукции является размол исходного волокнистого полуфабриката. Под термином «размол» понимается процесс разрушения волокна под действием механических и гидравлических сил между рабочими органами размалывающего оборудования для дальнейшего получения полотна бумаги с требуемыми качественными показателями. В современной теории размола придается большое значение слоисто-фибриллярному строению волокна. Вне зависимости от вида и принципа действия размалывающего оборудования необходимо создавать такие условия размола, которые бы обеспечивали разработку волокон с преимущественным преобладанием фибрилляции без значительного укорочения.

Одним из факторов, влияющих на сохранность исходной длины волокна в процессе размола, является концентрация волокнистой массы [14]. Концентрация волокнистой массы с содержанием абсолютно сухого волокна в водной среде до 5 % называется низкой и представляет собой волокнистую суспензию. При концентрации волокнистой массы от 5 % и выше волокнистая суспензия теряет свойства текучести и превращается во влажную крошку с ярко выраженной аномалией вязкости [15].

Некоторые исследования указывают на целесообразность повышения концентрации массы при размоле различных волокнистых полуфабрикатов [16 - 20]. Установлено, что размол массы высокой концентрации характеризуется большой однородностью обработки волокон благодаря межволоконному трению, которое дополнительно к воздействию размалывающих органов участвует в разработке волокон [16, 21]. Исследования показывают [22], что изменение концентрации волокнистой массы в процессе размола обеспечивает достаточно высокие прочностные показатели готового продукта. Оптимальные значения концентрации волокнистой массы в процессе размола, при которых происходит рост прочностных показателей готового продукта, варьируются в пределах 10–30 % [22].

А.А. Васильев [15] установил, что наибольший эффект размола при высокой концентрации может быть обеспечен при обработке отходов сортирования древесной массы. Размол данного полуфабриката при высокой концентрации способствует значительному повышению прочностных показателей отливок. В.Н. Лаптев, проводя исследования в области размола отходов сортирования древесной массы, делает вывод о том, что размол древесной массы при низкой концентрации дает значительное снижение длинноволокнистой фракции поэтому, размол отходов сортирования древесной массы следует проводить при высокой концентрации, так как при этом не наблюдается укорочения волокон [23].

Размол древесной целлюлозы при высокой концентрации начали производить в 40-х годах XX века, причем только в виде лабораторных исследований. У. Стефенсон доказал [22], что размол при высокой концентрации массы в дисковой мельнице *PFJ* по сравнению с размолом с низкой концентрацией дает отливки, имеющие более высокие показатели сопротивления разрыву и продавливанию. В. Брехт, проведя исследования на аналогичной мельнице, но с горизонтальным расположением размалывающих органов, выяснил, что сохраняется исходная длина волокна, а фракционный состав показывает низкое содержание мелочи [22].

При размолу целлюлозы из длинноволокнистых пород древесины рост концентрации массы также обеспечивает ряд преимуществ, особенно при выработке мешочной и другой тароупаковочной бумаги. Начало широким исследованиям в

этой области положил В.Б. Уэст [18], опубликовавший в 1964 году результаты работы по изучению размол хвойной целлюлозы при концентрации от 4,5 до 20 % и выше на дисковой мельнице. Им было установлено, что размол хвойной целлюлозы при высокой концентрации массы, так же как и в случае с размолом лиственной целлюлозы, способствует повышению прочности бумаги В.Б. Уэст связывал данное явление с неизменностью длины волокна [24, 25].

Более детальная работа по изучению влияния концентрации целлюлозной массы из хвойных пород древесины в процессе размол была проведена исследователями Л.Н. Лаптевым, И.И. Халандовским, Г.А. Генслером [17]. В исследованиях [17] авторами была подвергнута размолу сульфатная небеленая целлюлоза из сосновой древесины при концентрации волокнистой массы от 3 до 30 %. Подводя итог своих исследований, авторы сделали следующие выводы:

– с повышением концентрации волокнистой массы от 3 до 20 % больший прирост даёт сопротивление продавливанию. Данный показатель возрастает на 40 % при степени помола массы 30-40 °ШР. Небольшой рост разрывной длины с повышением концентрации, наблюдается при степени помола 40 °ШР. Показатель сопротивления излому обнаруживает точку экстремума при степени помола 40 °ШР. Все перечисленные показатели имеют максимальные значения при концентрации 20 %, дальнейший рост концентрации приводит к снижению прочностных показателей.

Широкое применение размол массы высокой концентрации получил для целлюлозы из лиственных пород древесины и однолетних растений, содержащих большое количество коротких волокон, так как с повышением концентрации в процессе размол удастся в большей степени сохранить исходную длину волокна [26].

Многие высококачественные печатные виды бумаги содержат целлюлозу из лиственных пород древесины. Лиственная целлюлоза дает возможность получить бумагу с рядом положительных свойств, например более жесткую бумагу для гофрирования. В некоторых источниках [22] рекомендуют производить комбинированный способ размол хвойной и лиственной целлюлозы, при высокой кон-

центрации. Короткие волокна лиственной целлюлозы заполняют промежутки между длинными волокнами хвойной целлюлозы благодаря чему повышается однородность бумаги. Она приобретает ровный просвет, становится менее прозрачной и более гладкой. Отсутствие «облачности» позволяет каландрировать бумагу при низком давлении, причем лучше сохраняется ее сжимаемость – важное свойство для печати. Вследствие повышенной пористости, бумага, содержащая лиственную целлюлозу, отличается большей впитывающей способностью по отношению к типографской краске и повышенной деформацией при увлажнении. В такой бумаге слабее выражен дефект разносторонности, так как бумага, содержащая в композиции лиственную целлюлозу, имеет более равномерную структуру и состоит из разнородных по строению и размерам волокон, в ней меньше проявляются в виде одностороннего скручивания листа внутренние напряжения, возникающие при ее усадке [27].

В исследованиях [28] была подвергнута размолу целлюлоза из табачных стеблей. Для придания волокнам табачных стеблей более развитой внешней удельной поверхности, а также фибриллирования авторы рекомендуют первую стадию размола целлюлозной массы производить при концентрации 20 %. Исследователи делают вывод о том, что при размолу табачной целлюлозы при концентрации 20 % в большей степени удастся сохранить исходную длину волокна [28].

Для расширения области научных знаний, связанных с влиянием концентрации массы в процессе размола на бумагообразующие свойства целлюлозы из лиственных пород древесины, исследователями И.Н. Халандовским, Л.Н. Лаптевым, Н.Е. Трухтенковой [16] был проведен эксперимент, результаты которого могут быть сформулированы следующим образом:

- размол при концентрации от 10 до 30 % происходит без значительного укорочения исходной длины волокна;

- изменение концентрации волокнистой массы в процессе размола до 30 % обеспечивает рост удельной поверхности волокон на 30-50 % при степени помола 40 °ШР, в результате чего увеличиваются такие важные качественные показатели

как водоудерживающая способность и способность волокон к образованию межволоконных связей;

– волокна в процессе размола, находясь в тесном контакте друг с другом, подвергаются многократным скручивающим и изгибающим воздействиям, в связи с чем происходит их внутреннее фибриллирование;

– общие результаты физико-механических испытаний показывают положительное влияние концентрации волокнистой массы при размоле на все показатели прочности бумаги. Разрывная длина бумажных отливок, полученных из массы, размолотой при концентрации 6 % со степенью помола 40 °ШР, составляет 5040 м, что на 22 % ниже, чем для массы, размолотой при концентрации 30 %. Лучший результат показателя сопротивления продавливанию был получен при концентрации волокнистой массы 30 % и степени помола 40 °ШР. Показатель сопротивления раздиранию бумаги возрастает с повышением концентрации в среднем на 40-50 % в зависимости от степени помола.

Для изучения возможности повышения механических показателей сульфатной целлюлозы из березовой древесины Р.А. Рейска, Ю.Г. Бутко [21] проводили размол в дисковой мельнице при концентрации волокнистой массы 20 % и зазором между размальывающими гарнитурами 1 мм. Для сравнения результатов проводился размол той же целлюлозы при концентрации 3 % с использованием ЦРА. Исследователи отмечают разницу между размолом массы низкой и высокой концентрации. После размола массы концентрацией 20 % до 50 °ШР наибольшее количество волокон имеет длину 0,95 мм, в то время как после размола до той же степени помола массы концентрацией 3 % максимальное количество волокон имеет длину 0,8 мм. Размол массы высокой концентрации обеспечивает высокую водоудерживающую и низкую релаксационную способность, что свидетельствует о хорошем развитии пластичности, высоких степенях гидратации и внутреннем фибриллировании волокон. Несмотря на это, межволоконные связи образуются при размоле массы высокой концентрации хуже, чем при размоле массы низкой концентрации в ЦРА. По всей видимости, причиной является высокая степень изогнутости волокон, наблюдаемая при размоле массы высокой концентрации.

Коллективом ученых [15, 26, 27] опубликованы результаты размола сульфатной целлюлозы из лиственных пород древесины. С увеличением концентрации массы от 6 до 30 % показатель средневзвешенной длины волокна постоянно возрастает. Увеличение степени помола в процессе размола при высокой концентрации массы происходит в основном за счет интенсивного внешнего и внутреннего фибриллирования волокон, в то время как при низкой концентрации - за счет укорачивания волокон. Это подтверждается тем, что удельная поверхность волокон в процессе размола с увеличением концентрации возрастает в среднем на 30 %. С повышением концентрации при размоле у бумажных отливок возрастает сопротивление излому. Отливки из массы, размолотой при 30 %-ной концентрации, имеют величину сопротивления излому в среднем в пять раз выше, чем при 6 %-ной концентрации. Этот факт объясняется сохранением исходной длины волокна и его высокой внешней удельной поверхностью. Сохранением исходной длины волокна объясняются также результаты, полученные при определении сопротивления раздиранию, величина которых выше на 45-50 %, сопротивление продавливанию в этих же условиях повышается на 40 %. Разрывная длина изменяется незначительно. Проведенные исследования в лаборатории [15, 27] позволили сделать вывод о перспективности применения способа размола при высокой концентрации для различных видов бумаги, особенно при выработке оберточнупаковочных, для которых показатели прочностных характеристик имеют наибольшее значение. Авторами [15, 27] даны рекомендации оптимальных концентраций массы при размоле различных волокнистых материалов (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Рекомендации оптимальных концентраций массы при размоле различных волокнистых материалов

Вид сырья	Концентрация, %
Лиственная (березовая) сульфатная небеленая целлюлоза	около 30 %
Лиственная (осиновая) сульфатная беленая целлюлоза	около 15 %
Хвойная (сосновая) сульфатная небеленая целлюлоза	15-20 %
Отходы древесномассного производства	10-30 %
Бисульфитная полуцеллюлоза	15-25 %
Соломенная целлюлоза	до 10 %

Следует отметить, что в промышленных условиях находит применение двухступенчатый способ размола массы: первая ступень при высокой концентрации, а вторая - при низкой. Техника размола целлюлозной массы высокой концентрации с последующим размолем при низкой концентрации выбирается рядом исследователей [22, 29] для улучшения морфологических свойств волокна при одновременном повышении физико-механических характеристик готового бумажного продукта.

Результаты применения двухступенчатого способа размола для сульфатных беленых целлюлоз из хвойной и лиственных пород древесины представлены в исследованиях [22, 30]. Двухступенчатый размол обеспечивает высокие значения показателя сопротивления раздиранию по сравнению со значением того же показателя, получаемого при обычном размоле массы низкой концентрации как у лиственной, так и у хвойной целлюлозы [22].

А.И. Коршунов на основе проведенных экспериментов [31] считает, что после размола массы высокой концентрации необходимо проводить размол на второй ступени при низкой концентрации, прежде всего для разбивания сгустков и дополнительной гидратации волокон [31].

Для производства мешочной бумаги фирма Уддехольм (Швеция) производила двухступенчатый размол целлюлозы. На первой ступени размол осуществлялся при концентрации 32-35 %. На второй ступени размол целлюлозы проводился при концентрации массы 4 % [32 - 34].

Применение способа размола массы высокой концентрации в целлюлозно-бумажном производстве можно охарактеризовать следующим образом:

- во время размола массы высокой концентрации в меньшей степени происходит укорачивание волокон и в большей степени фибриллирование, повышается гибкость и пластичность волокон, увеличивается скорость обезвоживания массы. Данный способ размола особенно целесообразен для полуфабрикатов из лиственных пород древесины содержащих большое количество коротких волокон.

- с увеличением концентрации волокнистой массы в зоне размола доля гидравлической составляющей в волокнистой суспензии снижается за счет увели-

чения в массе процентного содержания воздушно-сухого волокна. В связи с чем повышается производительность размалывающего оборудования.

- с увеличением производительности удельный расход энергии будет снижаться, так как потери энергии на холостой ход за счет снижения процентного содержания количества воды в суспензии будут значительно ниже.

- концентрация волокнистой массы оказывает существенное влияние на срок службы размалывающих органов. Это связано с тем, что размол волокнистого материала при высоких концентрациях массы происходит при относительно больших зазорах между размалывающими органами.

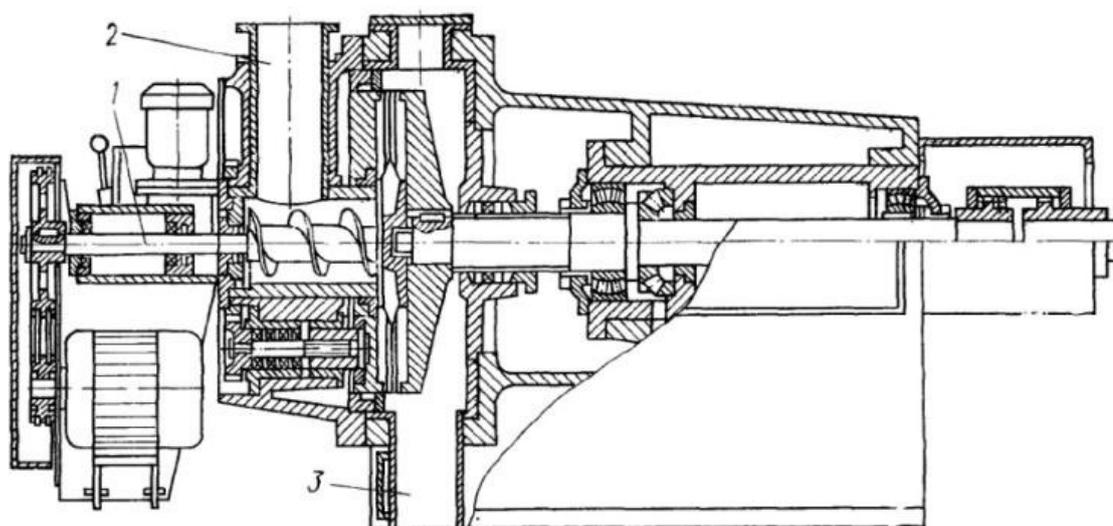
- недостаток, ограничивающий применение способа размола массы при высокой концентрации, связан с ее транспортировкой в зону размола. Подача массы в зону размола транспортирующим устройством должна быть равной пропускной способности размалывающих органов, в противном случае масса обезвоживается и забивается в области размалывающих органов;

- при размоле волокнистых полуфабрикатов высокой концентрации могут возникать сложности с транспортировкой волокнистой массы в зоне размола. Это явление в значительной степени связано с конструктивными особенностями размалывающих органов аппарата. В связи с этим повышается температура размалываемой массы до максимально допустимых пределов и выше, наблюдается медленный прирост степени помола, понижается качество помола массы и качество механических свойств готового продукта [35, 36]. Вопросы, связанные с транспортировкой волокнистой массы в зоне размола с учетом конструктивных особенностей размалывающих органов, нуждаются в более детальной проработке.

- данные по выбору оптимальных концентраций массы, при которых в процессе размола обеспечиваются высокие прочностные показатели готового продукта, а также повышение производительности и снижение удельных затрат на электроэнергию, зависят прежде всего от вида сырья, габаритов размалывающего оборудования и основных технологических факторов процесса размола.

1.2 Оборудование для размола

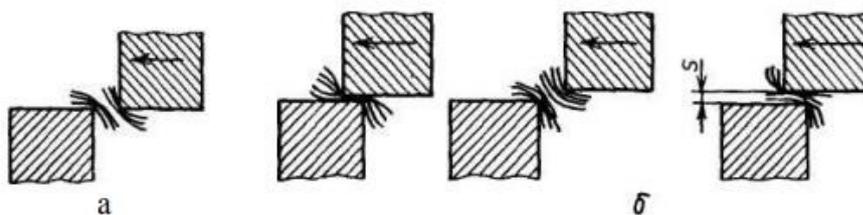
На предприятиях целлюлозно-бумажной промышленности при размоле волокнистых полуфабрикатов высокой концентрации широкое распространение получили дисковые мельницы – размалывающий аппарат непрерывного действия с ножевой гарнитурой [1]. В зависимости от количества зон размола и вращающихся поверхностей все мельницы подразделяются на четыре группы: однодисковые, сдвоенные, двухдисковые и многодисковые мельницы [37]. В конструкции дисковых мельниц для размола волокнистых полуфабрикатов высокой концентрации предусмотрено наличие транспортирующего устройства для подачи массы в зону размола. Наибольшее распространение получили дисковые мельницы первой и второй группы, которые могут выпускаться с горизонтальным и вертикальным валом ротора. На рисунке 1.1 показана однодисковая мельница со шнековым питателем. Основной принцип действия дисковой мельницы заключается в том, что обработка волокон происходит в зазоре между поверхностями перемещающихся относительно друг друга ножей дисковых гарнитур [1]. В зависимости от величины зазора между ножами ротора и статора волокна могут укорачиваться либо фибриллироваться. Чем меньше зазор, тем больше волокна укорачиваются.



1 – шнековый питатель, 2 – загрузочная горловина, 3 – выпускной проем

Рисунок 1.1 – Однодисковая мельница со шнековым питателем

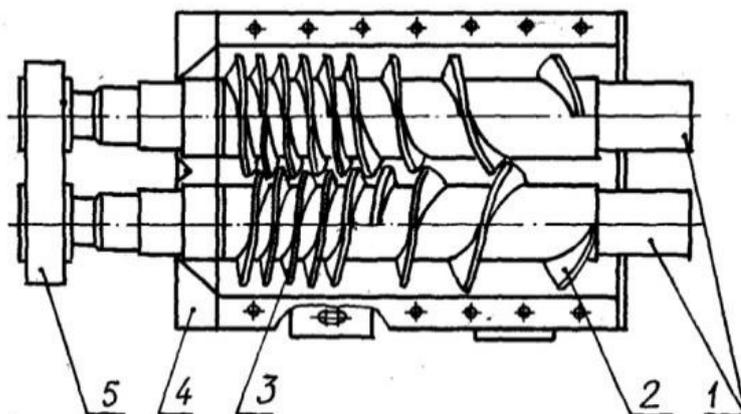
На рисунке 1.2 показана схема воздействия на волокна ножей размалывающей машины. В связи с тем что размол волокнистого полуфабриката при высоких концентрациях происходит при относительно больших зазорах, доля гидравлической составляющей снижается, а составляющая механического воздействия на волокнистую массу резко возрастает и в некоторых случаях имеет преобладающий характер. Следовательно, обработка волокнистой массы происходит с интенсивным фибриллированием [1, 38].



а – резание при малом зазоре, *б* – фибриллирование при большом зазоре

Рисунок 1.2 – Схема воздействия на волокна ножевой размалывающей машины

Наряду с традиционными ножевыми размалывающими машинами для размола массы высокой концентрации существуют экспериментальные аппараты с механическим воздействием под названием «фротпульпер» (рисунок 1.3). Размалывающими органами данного аппарата являются два шнека, между поверхностями которых имеется зазор.

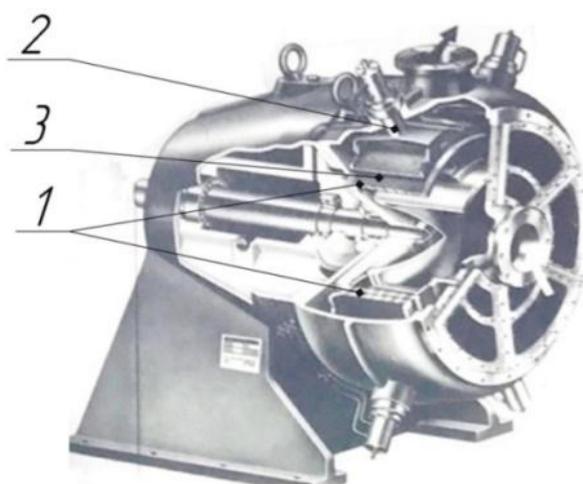


1 – шнеки, *2* – заходные транспортирующие витки, *3* – рабочие витки, *4* – подпорное кольцо, *5* – подшипники

Рисунок 1.3 – Схема фротпульпера

Опыт практической эксплуатации показал целесообразность применения фротпульпера на первой стадии массного размола, так как обработка волокна происходит без значительного укорочения за счет интенсивного трения волокон между собой и о поверхности внутри аппарата [39].

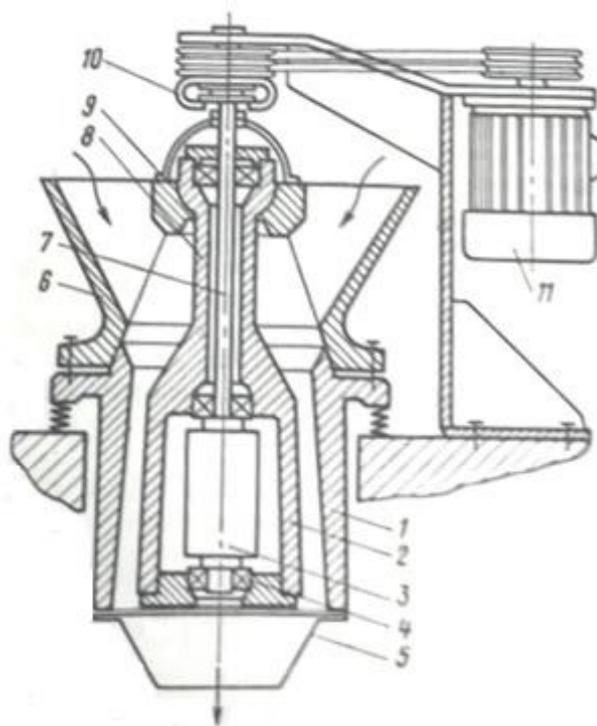
Эксперименты, связанные с размолотом волокнистой массы высокой концентрации, проводились в исследованиях [40, 41] с использованием размалывающего аппарата «Варго» (рисунок 1.4). Данный размалывающий аппарат соединяет в себе достоинство роллов и современных аппаратов непрерывного действия. Аппарат состоит из перфорированного барабана 1, вращающегося между четырьмя перфорированными башмаками 2. Зазор между башмаками и барабаном регулируется. Неразмолотая масса под давлением проходит через перфорации вращающегося барабана в кольцевую зону размола между внешней поверхностью барабана и внутренней поверхностью 3 перфорированных башмаков. В зоне размола образуется волокнистый слой повышенной концентрации, сквозь который осуществляется отвод воды через перфорации как башмаков, так и барабана. Размол осуществляется в среднем слое кольцевого пространства за счет трения волокон друг о друга. Волокна фибриллируются и гидратируются без укорочения. Размолотая масса отводится из кольцевой зоны на участках между башмаками [41, 42].



1 – перфорированный барабан, 2 – перфорированные башмаки, 3 – внешняя и внутренняя поверхность перфорированных башмаков

Рисунок 1.4 – Размалывающий аппарат «Варго»

Интересные результаты были получены при лабораторных испытаниях виброинерционного аппарата для механической обработки волокнистого материала (см. рисунок 1.5) [43, 44]. Аппарат включает в себя корпус 1 с загрузочной 6 и разгрузочной 5 воронками, ротор 2, подвешенный на сферическом шарнире 9 и полой штанге 8 внутри корпуса, приводной вал 7 с дебалансом 3, установленный внутри ротора на подшипниках 4. Крутящий момент от двигателя 11 через компенсационную муфту 10 передается приводному валу с дебалансом, вращение которого создает центробежную силу, передаваемую через подшипники ротору и вынуждающую его прижиматься к корпусу и совершать обкатку по его рабочей поверхности [38]. Результаты размол в виброинерционном аппарате предварительно прошедшей термическую обработку щепы показывают, что обработка материала не сопровождается значительными повреждениями и рубкой волокон [43, 44].



1 – корпус, 2 – ротор, 3 – дебаланс, 4 – подшипники, 5 – разгрузочная камера, 6 – загрузочная камера; 7 – приводной вал, 8 – штанга, 9 – сферический шарнир, 10 – компенсационная муфта; 11 – электродвигатель

Рисунок 1.5 – Виброинерционный аппарат

При изменении концентрации волокнистой массы в процессе размола наряду с механическим характером воздействия размалывающих органов на волокна возникает интенсивное трение волокон между собой за счет сил сжатия и сдвига. В ряде исследований [25, 35] качество помола волокнистых полуфабрикатов высокой концентрации рассматривалась с позиции межволоконного трения в процессе размола. Вопросы, связанные с механическим воздействием размалывающих органов (с точки зрения влияния их конструктивного исполнения) на качество помола массы и прочностные показатели готового продукта в известных размалывающих аппаратах [39 - 44], рассматривались не в полной мере. Следствием этого является сложность обоснованного выбора конструкции размалывающих органов и трудность получения массы с точно заданным и однородным качеством. Представляется целесообразным более детально изучить влияние конструкции размалывающих органов на качество помола массы высокой концентрации с учетом основных технологических факторов процесса размола.

1.3 Основные факторы процесса размола

Качество бумажного продукта весьма зависит от многочисленных факторов. К числу главных факторов, влияющих на процесс размола при неизменных свойствах волокнистого материала, поступающего в размалывающий аппарат, относятся: зазор между размалывающими органами, конструктивное исполнение размалывающих органов, окружная скорость размалывающих органов, концентрация волокнистой массы, температура массы и ряд других факторов [2].

Влиянию основных технологических факторов процесса на механизм размола и качество помола волокнистых суспензий низкой концентрации посвящены работы ученых Д.М. Фляте, А.А. Гаузе, Ю.Д. Алашкевича, В.Н. Гончарова, С.С. Легоцкого, В.Л. Кагана, Е.Е. Савицкого, А.К. Веретнова и т.д. [3, 45 - 55].

В сравнении с размолом волокнистой суспензии низкой концентрации, характер процесса размола волокнистой массы высокой концентрации с учетом

основных технологических факторов процесса размола имеет некоторые отличия. Для более детального анализа качества помола массы необходимо рассмотреть влияние данных факторов в диапазоне высоких концентраций.

1.3.1 Влияние межножевого зазора

Анализ течения суспензии низкой концентрации в рабочих зазорах ножевых размалывающих машин и механизма разработки волокон с учетом гидродинамических сил был рассмотрен в работах Ю.Д. Алашкевича. Установлено, что величина зазора в ножевых размалывающих машинах оказывает влияние на характер размола волокнистой массы, где наряду с механическим воздействием размалывающих органов на волокно возникают также гидродинамические явления в потоке суспензии. В зависимости от возникающих в совокупности гидродинамических и механических сил в рабочем пространстве межножевого зазора с волокнами может происходить как укорочение, так и расщепление с преимущественным фибриллированием [56, 57].

С уменьшением зазора увеличивается режущее действие размалывающего аппарата, снижается продолжительность размола и уменьшается удельный расход энергии на размол. Увеличение зазора между размалывающими органами приводит к улучшению фибриллирующего действия размалывающего органа на волокнистый полуфабрикат [58]. Однако такой способ размола требует больше времени и значительны энергозатрат при достижении одной и той же степени помола [1, 59].

Ж. Стефенс считает, что зазор следует поддерживать на минимально допустимом уровне, ошибочно предполагая, что при таком варианте достигается наибольшая эффективность обработки массы, без укорочения волокна [60]. Е. Говард высказывает мнение о существовании при любых условиях размола вполне определенного зазора, при котором происходит наиболее эффективная обработка волокнистого материала. Он придает большое значение зазору, справедливо считая,

что влияние некоторых факторов на процесс размола фактически сводится к влиянию зазора [38, 62].

С увеличением концентрации волокнистой массы ее реологические свойства меняются. Е.Е. Савицкий считает, что определяющими факторами разработки волокнистой массы с концентрацией свыше 10 % являются усилия межволоконного трения, а не механические воздействия ножевых кромок, как это имеет место при низкой концентрации [14]. Влиянию зазора на характер размола массы высокой концентрации был посвящен ряд работ [18, 62 - 64], которые показали, что зазор между размалывающими органами не имеет особого значения, так как большинство волокон обрабатывается размалывающими органами не в полной мере.

Ф. Люде считает, что большинство волокон обрабатывается за счет интенсивного межволоконного трения, а величине зазора он отводит второстепенное значение [65].

Е.Е. Савицкий считает, что увеличение концентрации массы приводит к значительному изменению ее компрессионных и реологических характеристик, которые в итоге и определяют величину оптимального зазора. Он предлагает метод расчета оптимальных величин зазоров при изменении концентрации размалываемой массы, значения которых представлены в таблице 1.2 [14]:

Таблица 1.2 – Оптимальные зазоры при размоле массы высокой концентрации

Волокнистый полуфабрикат	Оптимальный зазор при различной концентрации (мм)				
	10 %	15 %	20 %	25 %	30 %
Сульфатная целлюлоза	0,3	0,45	0,6	0,75	0,9
Полуцеллюлоза	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5

И.З. Верегитеным, М.Н. Смирновым, Г.П. Ершовой изучались вопросы переработки отходов сортирования древесно-массного производства в зависимости от зазоров. Исследователи пришли к выводу, что величину зазора между размалывающими органами следует поддерживать на первой ступени в пределах 0,25 - 0,125 мм, на второй - 0,05 мм [66].

Б.П. Матвеев рекомендует при размолу сульфатной небеленой целлюлозы высокой концентрации в дисковой мельнице поддерживать величину зазора в пределах нескольких миллиметров в зависимости от концентрации массы и окружной скорости размалывающих органов [29].

В целом, вопросы, связанные с влиянием зазора между размалывающими органами на характер размолу массы высокой концентрации рассмотрены не в полной мере и нуждаются в дальнейших исследованиях. До сих пор не было дано точного ответа, каким образом изменение зазора влияет на размол массы высокой концентрации с учетом конструктивных особенностей размалывающих органов.

1.3.2 Окружная скорость размалывающих органов

В исследованиях [46] доказано, что при размолу волокнистых суспензий с увеличением скорости вращения ротора число фибриллированных волокон растет. Данное явление связано с эффектом гидроразмола во время ударного действия размалывающих органов о массу ударное действие размалывающих органов растет пропорционально квадрату скорости [1, 46].

При размолу массы высокой концентрации окружная скорость размалывающих органов является одним из основных факторов, определяющих транспортирующую способность размалывающего аппарата. Рост окружной скорости ротора может достигаться как за счет увеличения диаметра размалывающего органа, так и за счет увеличения частоты вращения ротора размалывающего аппарата [15, 32, 67].

Е. Глазл, рассматривая факторы, влияющие на эффективность размолу целлюлозы в дисковых мельницах, отмечает, что если окружная скорость размалывающего органа понизится ниже определенной величины, то может иметь место забивание канавок гарнитуры массой [68].

В.Н. Лаптев пишет, что с увеличением окружной скорости размалывающих органов возрастает скорость размолу и удельный расход энергии. Для понижения удельного расхода энергии исследователь рекомендует при одновременном росте

окружной скорости размалывающего органа обеспечивать минимально допустимый зазор между размалывающими поверхностями рабочих органов, в таком случае наблюдается снижение удельного расхода энергии. Однако бумагообразующие свойства волокнистого материала будут ниже [36].

А.А. Васильев при размолотке отходов сортирования древесной массы высокой концентрации, исследовал величину удельного расхода энергии, в зависимости от окружной скорости ротора и концентрации размалываемой массы. Анализ этих данных показывает, что концентрация размалываемой массы с ростом окружной скорости размалывающих органов оказывает существенное влияние на величину реализуемого на размол удельного расхода энергии и качественные характеристики размалываемой массы. Установлено, что при окружной скорости ротора 30 м/с происходит забивание мельницы, обусловленное значительным увеличением сопротивления движению массы в рабочем зазоре и недостаточными центробежными силами, способными преодолеть эти сопротивления. Оптимальная окружная скорость вращения ротора дисковой мельницы, при которой обеспечивается транспортировка массы в зоне размолотки, варьируется в пределах 50 м/с. Увеличение концентрации волокнистой массы в процессе размолотки при росте окружной скорости обеспечивает снижение удельного расхода энергии. Увеличение окружной скорости оказывает положительное влияние на увеличение прироста степени помола. Однако прочностные характеристики отливок свидетельствуют о том, что разработка волокнистой массы практически не зависит от окружной скорости ротора [15].

Исследования Б.П. Матвеевым процесса размолотки сульфатной небеленой целлюлозы в дисковой мельнице показали, что увеличение окружной скорости вращения ротора влечет за собой повышение центробежных усилий, которые позволяют снизить зазор между размалывающими органами до одного миллиметра и ниже. Уменьшение зазора между размалывающими поверхностями гарнитур с увеличением окружной скорости ротора мельницы приводит к более интенсивному воздействию ножевых кромок на волокнистый материал. Размол целлюлозы

при концентрации волокнистой массы 20 % до степени помола 40 °ШР показал, что увеличение окружной скорости ротора снижает среднюю длину волокна [29].

Анализ литературных источников показывает, что во время размола массы высокой концентрации при относительно низких окружных скоростях возникает забивание волокнистой массой зоны размалывающих органов. Для исключения данной проблемы рекомендуется повышать окружную скорость размалывающих органов. Однако в таком случае возникает рост температуры размалываемой массы, поэтому необходимо избегать чрезмерного перегрева массы и поддерживать окружную скорость в допустимых пределах.

1.3.3 Влияние температуры нагрева массы на размол

К недостаткам размола при высоких концентрациях массы относят прежде всего разогрев волокнистого материала до высокой температуры, что соответственно оказывает влияние на механические свойства готового продукта, а также на медленный прирост степени помола [35, 36].

При размоле массы высокой концентрации можно выделить две основных причины нагревания массы [69]:

- внутреннее трение в результате многократного деформирования волокон между собой до их разрушения;
- внешнее трение волокон о поверхности размалывающих органов.

Считается, что повышение температуры массы неблагоприятно отражается на процессе размола и свойствах получаемого продукта. Длительность размола при этом возрастает, волокна в большей степени укорачиваются, а гидратация их уменьшается, что приводит к снижению прочности готовой продукции, особенно это касается бумаги [70, 71]. Это явление объясняется тем, что с избыточной температурой у целлюлозного волокна возникает деструкция содержащихся в нем гемицеллюлоз, которые в значительной степени влияют на формирование межволоконных сил связи при отливе бумаги. Экспериментально установлено, что в диапазоне 15 - 54 °С влияние температуры на качество помола незначительно. За-

метное ухудшение качества помола массы во время размола наблюдается при температуре выше 70 °С [61].

Влияние конструктивных особенностей размалывающих органов на нагрев волокнистых суспензий в аппаратах непрерывного действия, таких как дисковая мельница, рассматривалось в исследованиях [72]. Доказано, что конструкция гарнитуры дисковой мельницы оказывает существенное влияние на нагрев волокнистой суспензии в процессе размола. Установлено, что при размоле волокнистой суспензии с использованием конструкции гарнитуры, имеющей непрямолинейную форму ножей (эвольвентную), при всех прочих равных условиях средняя температура нагрева волокнистой суспензии составляет 40 °С. Для конструкции гарнитуры с прямолинейной формой ножей средняя температура нагрева волокнистой суспензии составляет 70 °С. [72].

1.3.4 Влияние конструкции размалывающих органов

Основным рабочим органом при размоле волокнистых полуфабрикатов в дисковых мельницах является ножевая размалывающая гарнитура. Рабочая поверхность гарнитуры оказывает непосредственное воздействие на волокна в процессе их обработки.

Факторы, относящиеся к конструктивным параметрам ножевой гарнитуры, не являются управляемыми в процессе размола, их влияние и характер разработки волокна вызывают большой интерес в связи с необходимостью выявления оптимальных конструктивных параметров ножевой гарнитуры [73].

К конструктивным параметрам ножей гарнитуры относят: количество ножей на поверхности гарнитуры и их длину; ширину ножа; высоту ножа; ширину канавки; угол наклона ножей к радиусу; угол скрещивания между ножами; наличие и расположение перегородок в канавках и ряд других параметров. Данные параметры используются для оценки размалывающей способности дисковых мельниц, среди которых наиболее значимыми являются секундная режущая длина L_s , (м/с),

площадь контакта рабочих поверхностной ножей F , (м), а также секундная размалывающая поверхность F_s , (м²/с) [74].

При размоле волокнистой суспензии низкой концентрации значимыми конструктивными параметрами являются количество и длина ножей на рабочей поверхности гарнитуры. В зависимости от частоты вращения ротора ножевой гарнитуры эти параметры определяют размалывающую способность дисковой мельницы.

До недавнего времени в отношении влияния ширины ножей размалывающей гарнитуры на качество помола массы существовала единая точка зрения: с уменьшением ширины ножей и увеличением секундной режущей длины, усиливается укорачивающее действие на волокна. Однако более глубокие исследования показывают, что влияние ширины ножей на характер обработки массы имеет более сложную зависимость [47, 75 - 77].

В работах А.А. Набиевой, Ю.Д. Алашкевича [46, 47] доказано влияние угла установки ножей к радиусу на величину секундной режущей длины, а также на количество одновременно движущихся точек пересечения контакта ножей ротора с ножами статора, что существенным образом влияет на значение длины волокна, отрезаемой парой ножей за один оборот. А.А. Набиевой вводится новый технологический параметр – циклическая элементарная длина $L_{\omega.эл}$. Показатель циклической элементарной длины для оценки качества помола при различных геометрических параметрах гарнитуры близок к секундной режущей длине, однако качество помола массы будет различное.

Рисунок размалывающей гарнитуры как конструктивный параметр во многом определяющий режим размола и качество получаемого полуфабриката, подбирается исходя из требований к готовой продукции [78 - 87].

Рисунки сопряжения рабочих поверхностей гарнитур ротора и статора по признаку расположения пересекающихся кромок ножей делятся на четыре типа исполнения: двухстороннее, радиальное, одностороннее и комбинированное. В целлюлозно-бумажной промышленности наиболее широкое распространение получили дисковые гарнитуры с двухсторонним исполнением. Диапазон значений

угла наклона ножей режущей кромки к радиусу диска при двухстороннем исполнении, колеблется в широких пределах. По мнению В.И. Ковалева, если направление наклона режущих кромок ножей противоположно направлению вращения ротора, то мельница работает в режиме «прокачивания» массы через зону размола, увеличивается пропускная способность мельницы, что особенно важно при размолу массы высокой концентрации [88, 89].

Одна из основных трудностей процесса размола массы высокой концентрации заключается в достаточно затрудненном перемещении массы в зоне размола. Конструктивные параметры дисковой гарнитуры должны обеспечивать оптимальную скорость и характер перемещения волокнистой массы в зоне размола. А.И. Кондрашов [90] считает, что для обеспечения необходимой производительности и оптимального движения волокнистой массы в зоне размола целесообразно работать в режиме «на выброс»: направление вращения дисковой гарнитуры выбирается в противоположную сторону направлению наклона ножей. Анализ экспериментальных исследований В.Н. Гончарова [57] показывает, что в таком случае в работе размола учувствуют как поверхности ножей, так и участки канавок, частично забитые массой. Размол происходит в основном за счет межволоконного трения в зазоре и трения волокон о поверхности гарнитуры. Рабочие кромки ножей сохраняют функции размола за счет неполного заполнения канавок гарнитуры, а также сжатия массы в канавках ниже уровня рабочей поверхности ножей. При наличии забивания канавок время пребывания и траектория движения частицы массы определяются межножевым зазором.

Учитывая рекомендации В.И. Ковалева, А.И. Кондрашова [89, 90], для интенсификации пути движения волокнистой массы высокой концентрации в рабочем зазоре целесообразно использовать гарнитуры с двухсторонним исполнением рабочих поверхностей. Как уже было сказано ранее при двухстороннем исполнении рабочих поверхностей гарнитур ротора и статора немаловажным конструктивным параметром является угол наклона ножей режущей кромки к радиусу диска. В работе Б.П. Матвеева [29] рекомендуется для оптимальных условий размола сульфатной небеленой целлюлозы из лиственных пород древесины при кон-

центрации от 5 до 30 %, использовать гарнитуры с углом установки ножей 3 °. Масса из зоны размола должна иметь свободный выход. Зазор между ротором и статором должен быть в пределах одного миллиметра.

А.А. Васильев утверждает [15], что траектория движения массы высокой концентрации с учетом частичного забивания в межножевых канавках может быть описана логарифмической спиралью.

Вопросы, связанные с влиянием конструкции ножевых размалывающих гарнитур, имеющих непрямолинейную форму ножей, на характер процесса размола волокнистых суспензий низкой концентрации, исследовались М.В. Шуралевым и В.К. Дубовым. Сравнивая влияние размалывающих гарнитур с прямолинейной и спиральной формой ножей на свойства волокнистых полуфабрикатов, исследователи рекомендуют использовать гарнитуры со спиральным расположением ножей, прежде всего с точки зрения повышения физико-механических характеристик готового продукта. Однако исследователи не дают теоретического обоснования построения спирального ножа размалывающей гарнитуры [91].

В работах В.И. Шуркиной были выявлены закономерности размола волокнистых полуфабрикатов с использованием гарнитуры с криволинейной формой ножей. Доказано, что размалывающая гарнитура с криволинейной формой ножей в отличие от гарнитуры с прямолинейной формой ножей предотвращает скапливание волокнистого полуфабриката в зоне размола [55]. Однако данные исследования проводились при низких концентрациях в процессе размола (в пределах 1 - 3 %).

Следует отметить, что выбор оптимального вида рисунка размалывающей гарнитуры при размоле массы высокой концентрации представляет собой большую сложность. Имеющиеся в литературных источниках сведения об использовании конструкции гарнитуры с прямолинейной формой ножей в процессе размола массы высокой концентрации показывают, что основные сложности при использовании данных гарнитур, связаны, прежде всего, с затрудненной транспортировкой массы в зоне размола. Ряд исследователей [15, 57, 89, 90] рекомендуют при размоле массы высокой концентрации использовать гарнитуры, имеющие

двухстороннее исполнение с непрямолинейной формой ножей (криволинейная, спиральная, эвольвентная). По их мнению, перечисленные формы ножей в сравнении прямолинейными ножами обеспечивают преобладание касательных усилий со стороны активных режущих кромок, что положительно сказывается на качестве помола массы при ее движении в зоне размола за счет преимущественного фибриллирования волокон. Однако данные предположения необходимо теоретически обосновать.

Выводы к первой главе

Из обзора литературных источников следует, что увеличение концентрации массы при размоле влечет за собой следующие положительные особенности:

1. Наблюдается незначительное укорочение волокон.
2. Происходит рост удельной поверхности волокон на 30-50 %, что влечет за собой увеличение способности волокон к образованию межволоконных связей.
3. При размолу массы высокой концентрации волокна при тесном контакте друг с другом подвергаются многократному скручиванию и изгибающему воздействию, в связи с чем, происходит их внутреннее фибриллирование.
4. Изменение концентрации массы при размолу влечет за собой повышение показателей прочности бумаги в среднем на 22–50 %, при этом наблюдается повышение показателей разрывной длины, сопротивления продавливанию и сопротивления раздиранию.
5. При размолу целлюлозы из длиноволокнистых пород древесины рост концентрации массы обеспечивает ряд преимуществ, особенно при выработке мешочной и другой тароупаковочной бумаги.
6. С увеличением концентрации волокнистой массы в зоне размолу доля гидравлической составляющей в суспензии снижается за счет увеличения процентного содержания воздушно-сухого волокна, повышается производительность размалывающего оборудования, снижается удельный расход электроэнергии.
7. С увеличением концентрации волокнистой массы при размолу существенно снижается износ гарнитуры, так как размол волокнистого полуфабриката осуществляется при сравнительно больших зазорах между ножами ротора и статора.
8. Широкое применение размолу массы высокой концентрации получил для целлюлозы из лиственных пород древесины, содержащих большое количество коротких волокон, так как с повышением концентрации в процессе размолу удается в большей степени сохранить исходную длину волокна.
9. Многие высококачественные печатные виды бумаги содержат лиственную целлюлозу. Лиственная целлюлоза дает возможность получить бумагу с рядом

положительных свойств, например более жесткую бумагу для гофрирования.

10. Лиственная целлюлоза обладает лучшей способностью к размолу по сравнению с хвойной, что объясняется повышенным содержанием гемицеллюлоз и присутствием в них полярных групп, особенно ионизированных карбоксильных, таких как уроновые кислоты, связанные с ксиланом. Расход электроэнергии на размол лиственной целлюлозы по сравнению с хвойной несколько ниже при одинаковой степени помола.

11. Вследствие повышенной пористости бумага, содержащая лиственную целлюлозу, отличается большей впитывающей способностью по отношению к типографской краске и повышенной деформацией при увлажнении.

Вместе с тем в литературных источниках других исследователей есть ряд противоречий и вопросов, требующих дальнейших исследований:

1. Не в полной мере обращено внимание на затруднение транспортировки массы в зоне размола.

2. Серьезные противоречия исследователей наблюдаются по вопросам влияния зазора между ножами ротора и статора на процесс размола, в частности исследователи Е. Говард, Б.П. Матвеев, Ю.Д. Алашкевич уделяют большое значение зазору. В то же время А.А. Васильев в своих работах считает, что зазор между ножами статора и ротора не оказывает существенного влияния на процесс размола, это касается и окружной скорости размалывающей установки.

3. При анализе литературных источников не обнаружено изучения влияния конструкции ножевой гарнитуры с окружной формой ножей на качество помола массы и физико-механические характеристики бумажных отливок. В связи с этим представляется актуальным проведение теоретического обоснования конструкции гарнитуры с окружной формой ножей и проведение экспериментальных исследований.

ГЛАВА 2. Теоретическая часть

2.1 Анализ движения волокнистой массы в зоне размола

Размол волокнистой массы высокой концентрации зависит от разных факторов, подлежащих обязательному учёту. Например, высокая концентрация ставит перед разработчиком задачи устранения следующих отрицательных особенностей связанных с ней:

1. Увеличение количества циклов прохождения массы через полость размола в связи с достаточно большими зазорами между ножами ротора и статора, в результате чего разработка волокна осуществляется за счет межволоконного трения, а доля силового воздействия со стороны активных режущих кромок снижается.

2. Линейные сопряжения стенок канавок с основанием ведут к скоплениям массы вдоль линий сопряжения и росту силы сопротивления, которая обуславливает забивание канавок массой заподлицо с поверхностью размола ножевых выступов, в связи с чем проходимость массы через полость размола снижается.

Для устранения этих отрицательных особенностей была разработана конструкция гарнитуры с окружной формой ножевых выступов (рисунок 2.1) [92, 93], что связано с предположением, суть которого в том, что при такой форме выступов:

1. Угол β_x , образованный между касательной к активной стенке канавки и радиусом r_x , проведенным из центра диска в точку касания, может возрастать от начала активной режущей кромки и до ее конца в пределах кольцевой размалывающей зоны.

2. С возрастанием угла β_x на заполняющую межножевую канавку волокнистую массу оказывается касательное силовое воздействие, достаточное для ее продвижения к выходной кромке с преимущественным фибриллированием волокон.

Считаем необходимым проведение аналитического исследования, проверки и математического обоснования данных предположений.

Исследование, проверка и обоснование данных предположений состоят из трёх этапов:

1. Геометрия активных элементов круговых канавок.
 2. Определение характера изменения угла β_x , образованного между касательной к активной стенке канавки и радиусом r_x , проведенным из центра диска в точку касания.
 3. Определение касательной силы P_t , зависящей от угла β_x .
- Рассмотрим каждый этап по отдельности.

2.2 Геометрия активных элементов круговых канавок

Для теоретического обоснования конструкции размалывающей гарнитуры с окружной формой ножей, которая обеспечивала бы качественный помол массы, с преобладающими касательными усилиями со стороны активных кромок с учетом изменения концентрации, межножевого зазора и частоты вращения ротора, необходимо рассмотреть геометрические особенности построения единичного окружного ножа на поверхностях дисков ротора и статора.

На рисунке 2.1 в правом верхнем секторе системы $X - Y$ показан фрагмент фронтальной проекции поверхности окружного ножа на диске ротора. В виде дуги AB с центром кривизны C , расположенным на оси X , показана круговая активная стенка 5 межножевой канавки. Стрелкой показано направление вращения диска ротора. Площадь кольцевой размалывающей поверхности ограничена круговыми входной 2 и выходной 4 кромками.

Круговая кромка 1 является началом круговой фаски, а круговая кромка 2 является, соответственно, началом входа в кольцевую зону размола.

Центр кривизны C режущей кромки 5 расположен на окружности 3 с радиусом $r_2 = OC = a_1$, проведенным из центра O диска.

Радиус кривизны режущей кромки и круговой активной стенки 5 обозначен $r_1 = b$. Касательные $t - t^A$ и $t - t^B$ к дуге AB и радиусы OA и OB образуют, соответ-

ственно, входной $\beta_{вх}$ и выходной $\beta_{вых}$ углы. Перпендикуляр Op к касательной $t - t^A$ является эксцентриситетом или тягой кромки 5.

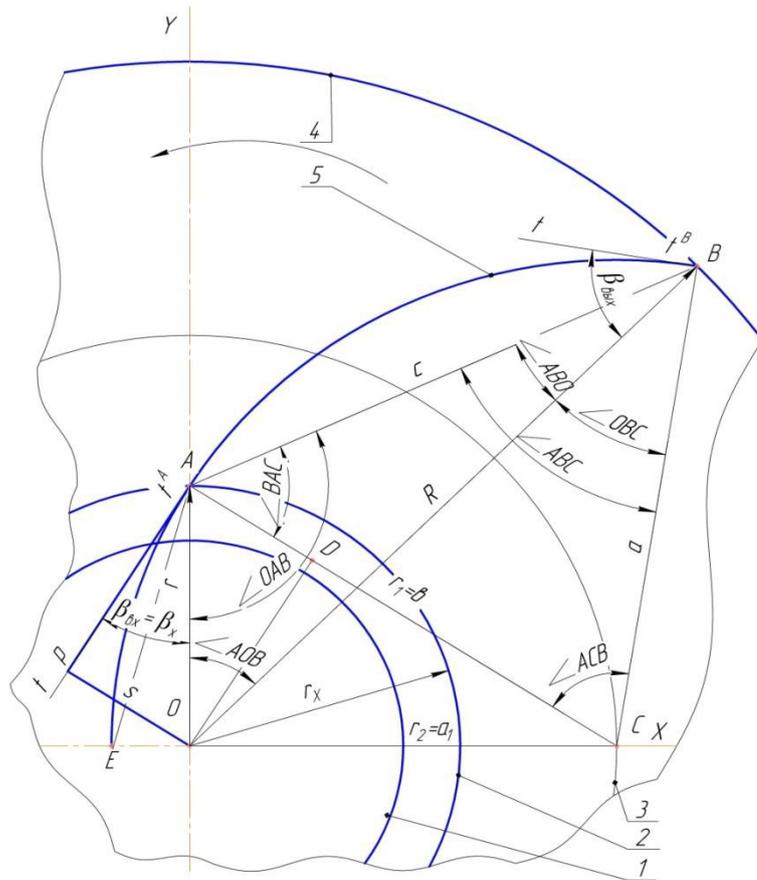


Рисунок 2.1 - Фронтальная проекция окружного ножа на диске ротора

Прежде всего, используя геометрические параметры входной круговой кромки 2, выведем зависимость для определения значения угла β_x .

Из треугольника OAp эксцентриситет:

$$Op = OA \cdot \sin \beta_{вх}. \quad (2.1)$$

Значение угла β_x на входе круговой кромки 2 равно:

$$\sin \beta_{вх} = \frac{Op}{OA} = \frac{Op}{r_x}. \quad (2.2)$$

Если от данного частного примера перейдем к рассмотрению общего случая, то увидим, что при движении от входной круговой кромки 2 диска к выходной кромке 4 эксцентриситет, или тяга $Op_x = s_x = A_x D_x$, будет изменяться вместе с на-

правлением касательной $t^A - t$ и углом β_x , то есть $s_x = OA_x \cdot \sin\beta_x$, следовательно угол β_x будет равен:

$$\beta_x = \arcsin \frac{s_x}{r_x}. \quad (2.3)$$

Для решения данного уравнения по теореме косинусов необходимо найти r_x из косоугольного треугольника OA_xC :

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

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

По теореме синусов найдем $\sin A_x$:

$$\sin A_x = \frac{r_2 \cdot \sin C}{r_x}. \quad (2.6)$$

Подставив в знаменатель (2.6) правую часть (2.5), получим:

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

Поскольку угол pA_xC равен 90° (см. рисунок 2.1), следовательно, угол β_x будет равен:

$$\beta_x = 90^\circ - \angle A_x, \quad (2.8)$$

$$\beta_x = 90^\circ - \arcsin \frac{r_2 \cdot \sin C}{\sqrt{r_1^2 + r_2^2 - 2 \cdot r_1 \cdot r_2 \cdot \cos C}}. \quad (2.9)$$

Для определения характера изменения угла β_x необходимо задаться:

- соотношениями значений r_1 и r_2 с значением радиуса R круговой кромки 4 ;
- диапазоном значений $R - r$, ограничивающим зону размола, на которой значение угла β_x , согласно зависимости 2.9, возрастает.

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

Для определения угла наклона β_x в направлении от центра вращения O к периферии рассмотрим три варианта соотношения значения радиуса кривизны r_1 (активных круговых элементов 5 межножевых канавок) и значения радиуса r_2 (от центра кривизны C до центра O) со значением радиуса R выходной круговой кромки при радиусе входной круговой кромки диска $r = 0,38R$: $r_1 = r_2 = 0,6R$ (см. рисунки 2.2 и 2.3); $r_1 = 0,633R$, $r_2 = 0,6R$ (см. рисунок 2.4 и 2.5); $r_1 = 2R$, $r_2 = 1,732R$ (см. рисунки 2.6 и 2.7). Рисунки 2.2, 2.4 и 2.6 выполнены на базе рисунка 2.1. Рассмотрим каждый вариант.

Вариант первый. На рисунке 2.2 изображен фрагмент фронтальной проекции кольцевой размалывающей поверхности диска ротора с центром O , на которой изображена в форме дуги OA_xB активная круговая стенка 5 (единичного кругового ножевого выступа, условно не показанного на рисунке 2.2). Центр ее кривизны C и центр O расположены на оси X . Метод определения произвольного угла наклона β_x касательной в произвольной точке A_x активной стенки 5 к радиусу r_x поясняется на приводимом ниже примере.

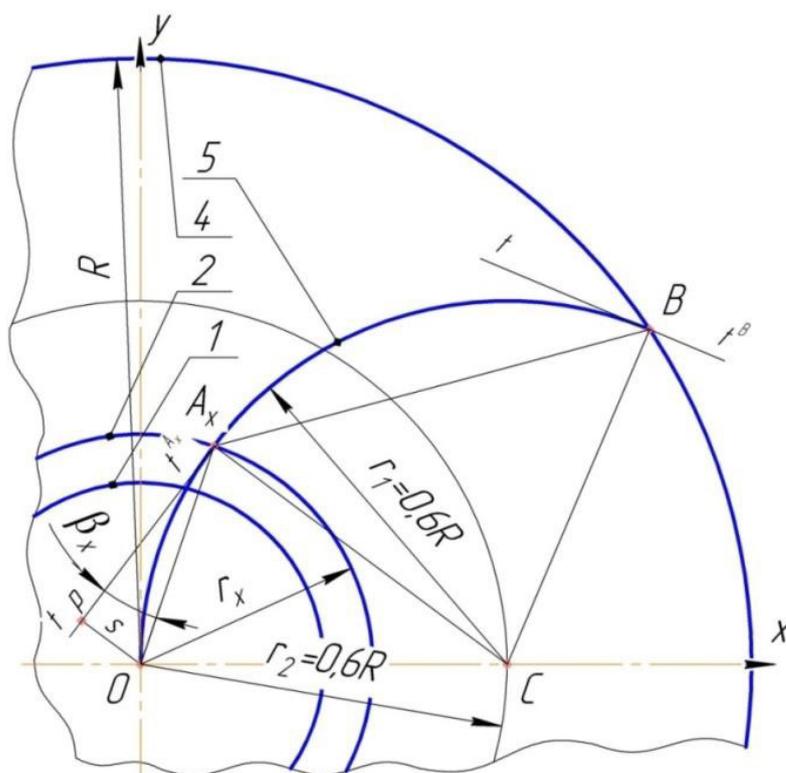


Рисунок 2.2 Фрагмент фронтальной проекции кольцевой размалывающей поверхности диска ротора

В треугольнике OA_xC известны: сторона $A_xC = r_1 = 0,6R$, сторона $OC = r_2 = 0,6R$, угол C задается. Необходимо определить: сторону $OA_x = r_x$, угол A_x и угол β_x .

Сначала по теореме синусов находим угол A_x :

$$\text{Sin}A_x = \frac{r_2 \text{Sin}C}{r_x} . \quad (2.10)$$

По теореме косинусов находим сторону $OA_x = r_x$:

$$r_x^2 = r_1^2 + r_2^2 - 2 \cdot r_1 \cdot r_2 \text{Cos}C . \quad (2.11)$$

Далее определяем угол β_x . Поскольку угол между касательной $t - t^A$ в произвольной точке A_x и радиусом r_x , проведенным из центра O диска в эту точку, равен 90° , то угол β_x между касательной в точке A_x активной стенки 5 и радиусом r_x равен:

$$\beta_x = 90^\circ - \angle A_x . \quad (2.12)$$

Таким же образом рассчитывались углы всех промежуточных точек на стенке 5, после поворота r_x на заданные углы, начиная от точки O и оси X до точки B , лежащей на выходной кромке диска ротора. Результаты решения поставленной выше задачи представлены в приложении А, таблица А.1. На базе данных таблицы А.1 построим график изменения угла β_x при движении вдоль дуги AB активной стенки 5 ножа (см. рисунок 2.3).

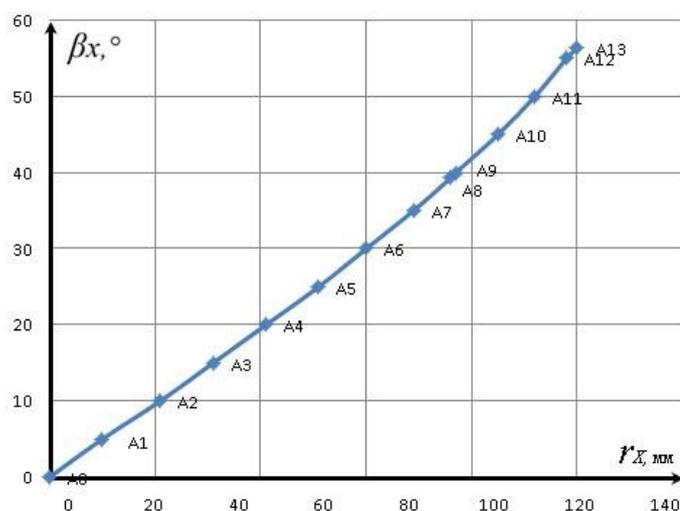


Рисунок 2.3 - График зависимости угла β_x от роста радиуса r_x в направлении от входной кромки диска до выходной кромки

Из рисунка 2.3 следует, что в исходной позиции эксцентриситет круговой активной к стенке OA_xB относительно центра O диска равен нулю, так как она проходит через центр O , и тяга $S = O$. При последующем продвижении от точки O до точки B и далее эксцентриситет и тяга S_x равномерно возрастают, но значение их меньше, чем при наличии эксцентриситета относительно точки O . Одновременно с равномерным возрастанием радиуса r_x равномерно возрастает и угол β_x , от нулевого значения в точке O до максимального в точке B . Главным недостатком варианта 1 является то, что активная стенка OA_xB проходит через центр диска, за счёт чего эксцентриситет и тяга равны нулю. В таком случае на волокнистую массу, заполняющую межножевую канавку, не оказывается силовое воздействие, достаточное для её продвижения к выходной кромке 4 диска ротора.

Второй вариант. Соотношения r и r_2 с R равны, соответственно, $r_1 = 0,633R$, $r_2 = 0,6R$. На рисунке 2.4 изображен фрагмент фронтальной проекции кольцевой размалывающей поверхности диска ротора с центром O , на которой изображена в форме дуги OA_xB , круговая активная стенка 5 единичного кругового ножевого выступа. Центр ее кривизны C и центр O расположены на оси X . Метод определения произвольного угла наклона β_x касательной в точке A_x активной стенки 5 к радиусу r_x поясняется на приводимом ниже способе.

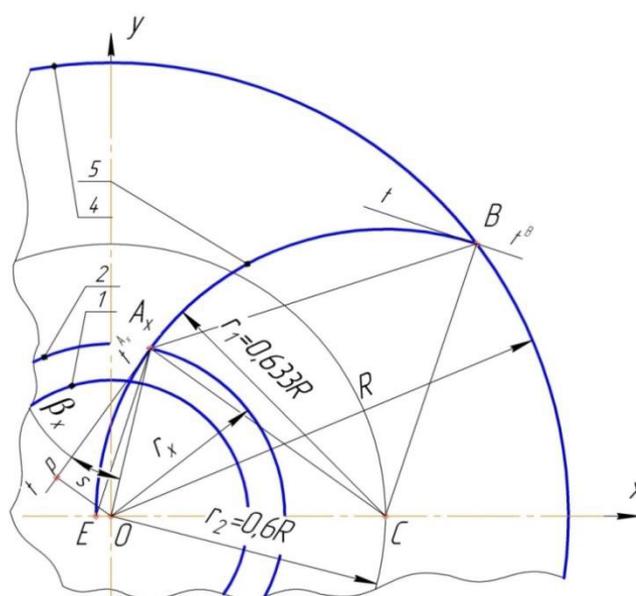


Рисунок 2.4 - Фрагмент фронтальной проекции кольцевой размалывающей поверхности диска ротора

В треугольнике DA_xC известны: сторона $A_xC = DC = r_1 = 0,633R$, сторона $OC = r_2 = 0,6R$, угол C задается. Необходимо определить сторону $DA_x = r_x$, угол A_x и угол β_x .

Сначала определяем угол A_x по теореме синусов:

$$\text{Sin}A_x = \frac{r_2 \text{Sin}C}{r_x}. \quad (2.13)$$

По теореме косинусов находим сторону $DA_x = r_x$:

$$r_x^2 = r_1^2 + r_2^2 - 2 \cdot r_1 \cdot r_2 \text{Cos}C. \quad (2.14)$$

Далее определяем угол β_x . Поскольку угол между касательной $t-t^{A_x}$ в точке A_x и проведенным в нее из центра O диска радиусом r_x равен 90° , то угол β_x между касательной в точке A_x активной стенки 5 и радиусом r_x равен $90^\circ - \angle A_x$.

По такой же методике проводился расчет всех промежуточных точек пересечения, отмеченных на активной стенке единичного ножевого выступа после поворота радиуса r_x на заданные углы, начиная от точки O на оси X до точки B , лежащей на периферийной (выходной) кромке диска ротора. Результаты решения поставленной выше задачи представлены в приложении А, в таблица А.2. На базе данных таблицы А.2 построим график изменения угла β_x при движении вдоль дуги EAB активной стенки 5 ножа (см. рисунок 2.5).

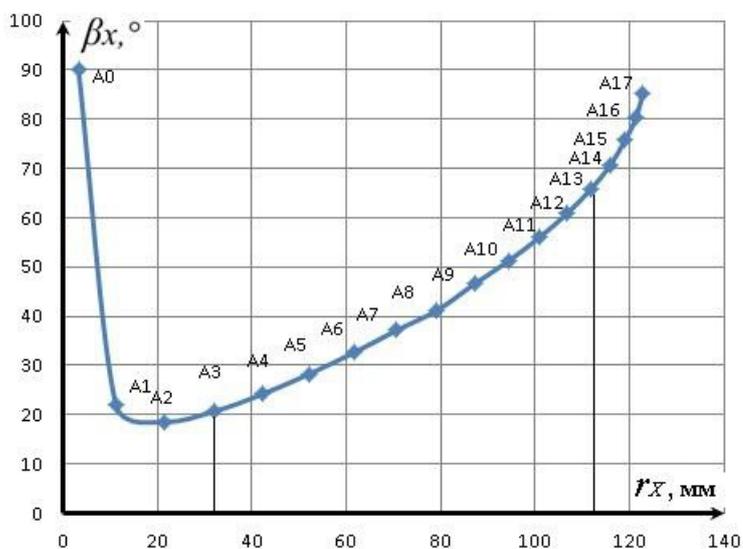


Рисунок 2.5 - График зависимости угла β_x от роста радиуса r_x

Из рисунка 2.5 следует, что одновременно с равномерным возрастанием радиуса r_x при продвижении от точки E до точки A_x угол β_x равномерно убывает, эксцентриситет S круговой активной круговой кромки OA_xB относительно центра O диска равномерно возрастает. От точки A_x и далее угол β_x и эксцентриситет, или тяга S_x , равномерно возрастают. При размоле массы высокой концентрации значение угла β_x должно только равномерно возрастать от минимального на входе в зону размола до максимального на выходе из неё. Достоинством второго варианта является то, что при ширине зоны размола, равной $r_1 - r_2 = (0,633 - 0,6)R$, значение угла β_x , равномерно возрастает от минимального в точке A до максимального в точке B . За счёт этого на волокнистую массу высокой концентрации, заполняющую межножевую канавку, может оказываться силовое воздействие, обеспечивающее ее продвижение в направлении к выходной круговой кромке 4 диска ротора.

Третий вариант. Соотношения r_1 и r_2 с R равны, соответственно, $r_1 = 2R$, $r_2 = 1,732R$. На рисунке 2.6 изображен фрагмент фронтальной проекции кольцевой размалывающей поверхности диска ротора с центром O , на которой изображена в форме дуги OA_xB круговая активная стенка 5 единичного кругового ножевого выступа. Центр ее кривизны C и центр O расположены на оси X . Метод определения произвольного угла наклона β_x касательной в точке A_x активной стенки 5 к радиусу r_x поясняется на приводимом ниже примере.

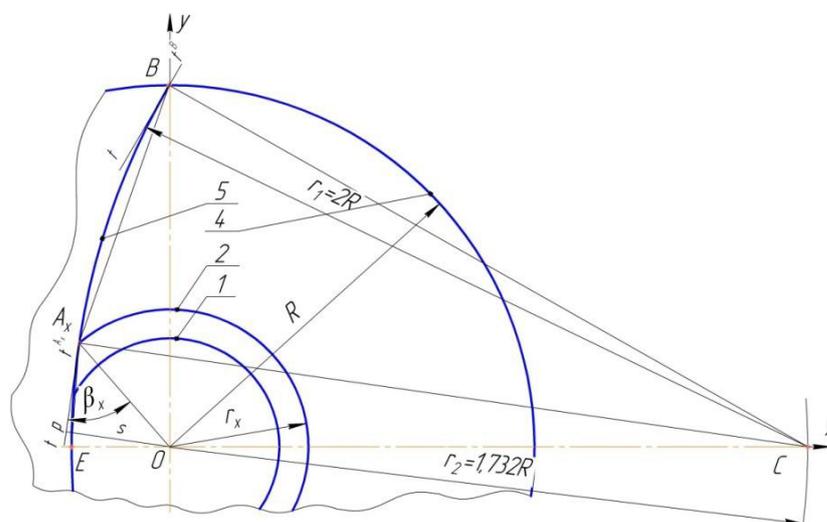


Рисунок 2.6 - Фрагмент фронтальной проекции поверхности размола

В треугольнике DA_xC известны: сторона $A_xC = DC = r_1 = 2R$, сторона $OC = r_2 = 1,732R$, угол C задается. Необходимо определить: сторону $OA_x = r_x$, угол A_x и угол β_x .

Сначала определяем угол A_x по теореме синусов:

$$\text{Sin}A_x = \frac{r_2 \text{Sin}C}{r_x}. \quad (2.15)$$

По теореме косинусов находим сторону $DA_x = r_x$:

$$r_x^2 = r_1^2 + r_2^2 - 2 \cdot r_1 \cdot r_2 \text{Cos}C. \quad (2.16)$$

Далее определяем угол β_x . Поскольку угол между касательной $t-t^{A_x}$ в точке A_x и проведенным в нее из центра O диска радиусом r_x равен 90° , то угол β_x между касательной в точке A_x активной стенки 5 и радиусом r_x равен $90^\circ - \angle A_x$.

По такой же методике проводился расчет всех промежуточных точек пересечения, отмеченных на активной стенке единичного ножевого выступа после поворота радиуса r_x на заданные углы, начиная от точки O на оси X до точки B , лежащей на периферийной (выходной) кромке диска ротора. Результаты решения поставленной выше задачи представлены в приложении А, таблица А.3. На базе данных таблицы А.3, построим график изменения угла β_x при движении вдоль дуги AB активной стенки 5 ножа (см. рисунок 2.7).

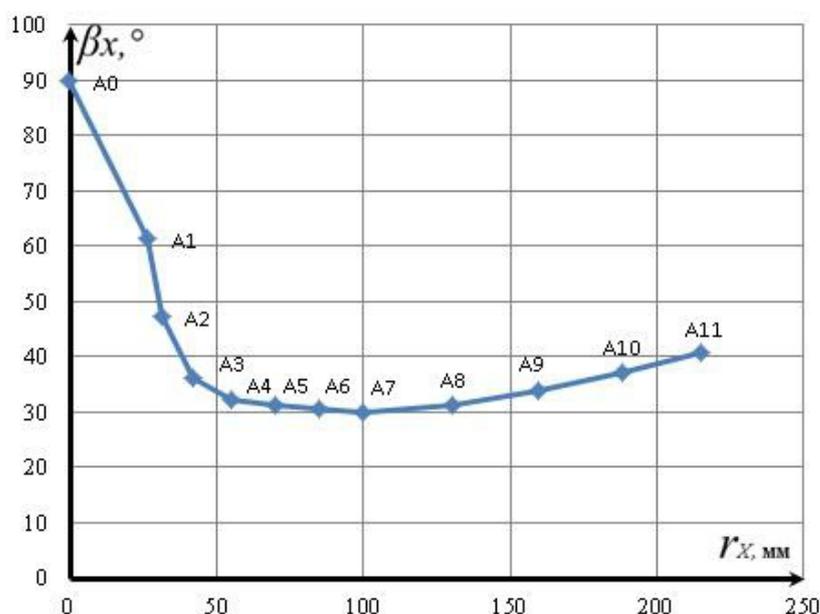


Рисунок 2.7 - График зависимости угла β_x от роста радиуса r_x

Из рисунка 2.7 следует, что в исходной позиции эксцентриситет, или тяга S , круговой активной кромки OA_xB относительно центра O диска, равен $0,267R$. При последующем продвижении от точки O до точки B одновременно с равномерным возрастанием радиуса r_x эксцентриситет, или тяга S_x , равномерно увеличивается, а угол β_x равномерно уменьшается от максимума до минимума.

Недостатком варианта 3 является уменьшение угла β_x за счёт чего на волокнистую массу, заполняющую канавку, не возникает достаточного силового воздействия для ее продвижения к выходной кромке 4 межножевой канавки.

Как уже было отмечено, для наиболее оптимального конструктивного исполнения круговой активной кромки необходимо учитывать ряд условий, при которых с равномерным ростом значения r_x от входной кромки диска до выходной кромки значение угла β_x равномерно увеличивается до максимума (см. вариант 2). В таком случае на волокнистую массу, заполняющую межножевую канавку, оказывается касательное силовое воздействие, достаточное для ее продвижения с преимущественным фибриллизированием. Условия для реализации этого вывода будут представлены в разделе 2.4.

2.4 Определение касательной силы P_τ в зависимости от угла β_x

Задачу решаем на примере закрепленного на приводном валу привода диска ротора размалывающей гарнитуры. На рисунке 2.8 представлен фрагмент фронтальной проекции кольцевой размалывающей поверхности диска ротора с изображением активной стенки 3 в форме дуги. Круговой стрелкой показано направление вращения диска ротора. Площадь кольцевой размалывающей поверхности ограничена круговыми входной 1 и выходной 2 кромками и волнистыми линиями обрыва. Нижний край круговой активной стенки 3 пересекается с входной кромкой 1 и ординатой Y в точке A . Из точки A проведен вектор AE , являющийся эквивалентом окружной силы P^A_o .

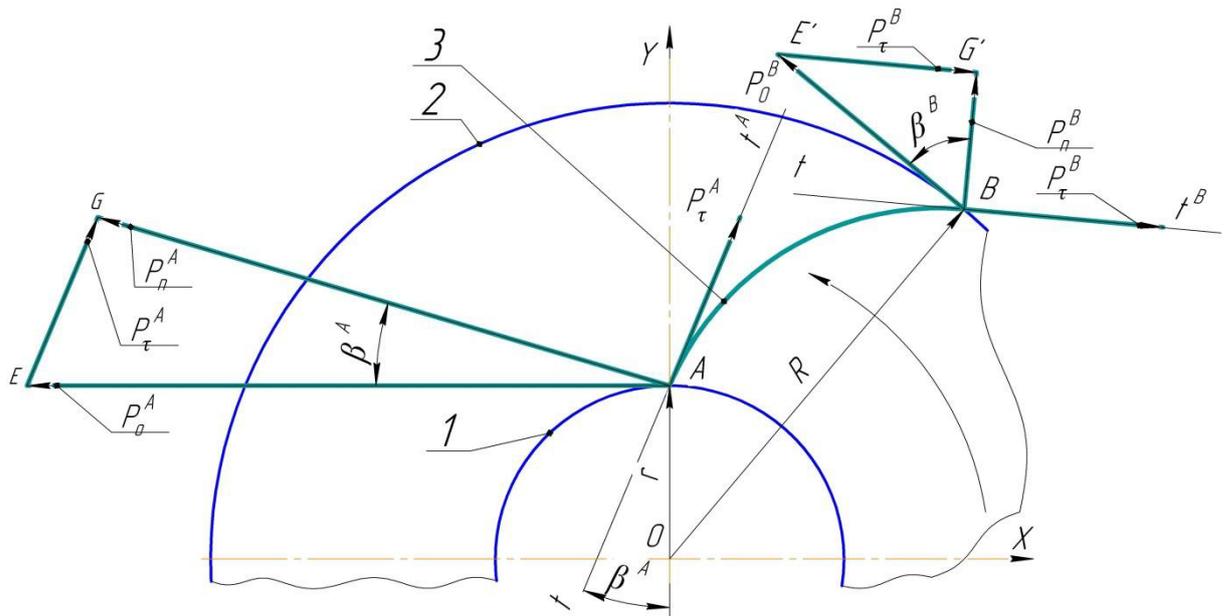


Рисунок 2.8 - Фрагмент фронтальной проекции кольцевой размалывающей поверхности диска ротора

P_O спроецирована на перпендикуляр AG к касательной $t - t^A$. Образовался силовой прямоугольный треугольник AEG , в котором сторона AG является нормальной составляющей P_n^A силы P_O ; EG является касательной составляющей P_τ^A силы P_O . Из точки B проведен вектор BE' , являющийся эквивалентом окружной силы P_O^B . Спроецируем P_O^B на перпендикуляр BG' к касательной $t - t^B$. Образовался силовой прямоугольный треугольник $BE'G'$, в котором сторона $E'G'$ является касательной составляющей P_τ^B силы P_O^B ; BG' является нормальной составляющей P_n^B силы P_O^B . Необходимо учесть ряд особенностей, влияющих на работу закрепленного на ведущем валу привода диска ротора. Особенностью является то, что от входа 1 в кольцевую размалывающую зону до выхода 2 из нее радиус r_x увеличивается от минимального радиуса r в точке A до максимального радиуса R в точке B ; окружная сила P_O приложенная в этих точках (вдоль касательных $t - t^A$ и $t - t^B$) к стенке 3, соответственно уменьшается от максимума P_O^A в точке A до минимума P_O^B в точке B ; Крутящий момент M_{KP} является постоянной величиной от входной точки A в размалывающую зону диска до выходной точки B , то есть в любой точке A_x активной стенки 3 $M_{KP} = P_O^{Ax} r_x = Const$:

$$P_O^{A_x} = \frac{M_{KP}}{r_x}. \quad (2.17)$$

На кромке 4 сила P_O^B минимальна, значит решение ведем именно по ней, но при условии, что значение P_O^B должно обязательно превышать значение силы трения P_{mp} , т.е. $P_O^B > P_{mp}$, а значение угла β должно обязательно превышать значение угла трения материала о стенки канавки в точке А и угла трения между сжатыми волокнами.

Соответственно, должны быть больше и составляющие:

– P_τ^A (силы P_A^O) противодействующей касательной составляющей силы трения, т. е. $P_\tau^A > P_{\tau mp}$;

– P_τ^B (силы P_O^B) противодействующая касательной составляющей силы трения, т. е. $P_\tau^B > P_{\tau mp}$.

Анализ соотношения сил P_τ^A и P_τ^B . Из прямоугольного треугольника $AEГ$ следует, что $\frac{EG}{AE} = \frac{P_\tau^A}{P_O^A} = \text{Sin}\beta^A$ или $P_\tau^A = P_O^A \cdot \text{Sin}\beta^A$.

Тогда в любой точке A_x касательная составляющая $P_\tau^{A_x} = P_O^{A_x} \cdot \text{Sin}\beta^{A_x}$ или

$$P_O^{A_x} = \frac{P_\tau^{A_x}}{\text{Sin}\beta^{A_x}}. \quad (2.18)$$

Заменив $P_O^{A_x}$ в зависимости (2.18) на правую часть зависимости (2.17), получим:

$$\frac{M_{KP}}{r_x} = \frac{P_\tau^{A_x}}{\text{Sin}\beta^{A_x}}. \quad (2.19)$$

Из (2.19) следует, что в точке А:

$$P_\tau^A = \frac{M_{KP} \cdot \text{Sin}\beta^A}{r}. \quad (2.20)$$

Из прямоугольного треугольника $BE'G'$

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

Тогда

$$P_O^B = \frac{P_\tau^B}{\sin \beta^B}. \quad (2.21)$$

Заменив P_O^B в (2.21) на правую часть зависимости (2.17), получим:

$$\frac{M_{KP}}{R} = \frac{P_\tau^B}{\sin \beta^B}. \quad (2.22)$$

Из (2.22) следует, что

$$P_\tau^B = \frac{M_{KP} \cdot \sin \beta^B}{R}. \quad (2.23)$$

Разделив (2.23) на (2.20), получим

$$\frac{P_\tau^{Bp}}{P_\tau^{Ap}} = \frac{\sin \beta^B \cdot r}{\sin \beta^A \cdot R}. \quad (2.24)$$

Из зависимости (2.24) следует, что

$$P_\tau^B = P_\tau^A \cdot \frac{\sin \beta^B \cdot r}{\sin \beta^A \cdot R}. \quad (2.25)$$

Уравнение (2.25) определяет силовое воздействие в зоне размола за счет касательной составляющей P_τ^A и P_τ^B приняв, что при движении массы в зоне размола могут участвовать нормальные силы и центробежные силы. Для решения поставленной задачи эти силы в данном анализе не учитывались. Учтя касательную составляющую уравнения (2.25), сравним соотношение P_τ^A и P_τ^B для гарнитуры с окружной формой ножей, используя расчетные данные таблицы 2.2.

Исходные данные для расчета: $\sin \beta^A = 0,3847$; $\beta_A = 22,6^\circ$; $\sin \beta^B = 0,8220$; $\beta_B = 54,1^\circ$; $r = 38$ мм; $R = 100$ мм.

Подставив значения этих параметров в зависимость (2.25), получим

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

Учтя касательную составляющую уравнения (2.25), сравним соотношение P_τ^A и P_τ^B для традиционных гарнитур с прямолинейной формой ножей, используемых в эксперименте.

Исходные данные для расчета реальной гарнитуры с прямолинейной формой ножей: $\sin\beta^A = 0,3847$; $\beta_A = 22,6^\circ$; $\sin\beta^B = 0,1426$; $\beta_B = 8,2^\circ$; $r = 38$ мм; $R = 100$ мм.

Подставив значения этих параметров в зависимость (2.25), получим

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

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

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

Таким образом, касательные усилия при перемещении массы в зоне размола для гарнитуры с окружными ножами в 5,7 раза больше, чем для традиционной гарнитуры с прямолинейной формой ножей.

Выводы ко второй главе

Во второй главе диссертационной работы предложена методика обоснования построения окружного ножа с возрастающим углом β_x , образованным между касательной к активной стенке и радиусом r_x , проведенным из центра диска в точку касания. Увеличение угла β_x вдоль активной стенки окружного ножа обеспечивает преобладание касательных усилий. Метод построения окружного ножа с учетом возрастающего угла β_x должен обеспечивать качественную обработку волокнистой массы при ее движении в зоне размола. Для этого необходимо задавать ширину кольцевой зоны размола $R - r = (1 - 0,38)R$, $r_1 = 0,633R$, $r_2 = 0,6R$, [Патент на изобретение № 2761544] в результате чего:

- на её площади значение угла β_x равномерно возрастает от минимального на входе до максимального на выходе;
- на волокнистую массу высокой концентрации возможно оказание силового воздействия, достаточного для ее продвижения по канавке в направлении к выходной круговой кромке диска ротора.

Для гарнитуры с окружной формой ножей касательная сила P_τ^B в среднем в 5,8 раза выше, чем у традиционных гарнитур с прямолинейной формой ножей. Следовательно, конструкция гарнитуры с окружной формой ножей обеспечивает более высокую транспортирующую способность волокнистой массе при ее движении в зоне размола с преимущественным фибриллированием волокон.

ГЛАВА 3. Экспериментальная часть

Для подтверждения эффективности процесса размола волокнистого полуфабриката высокой концентрации с использованием конструкции гарнитуры с окружной формой ножей, в эксперименте исследовались следующие факторы:

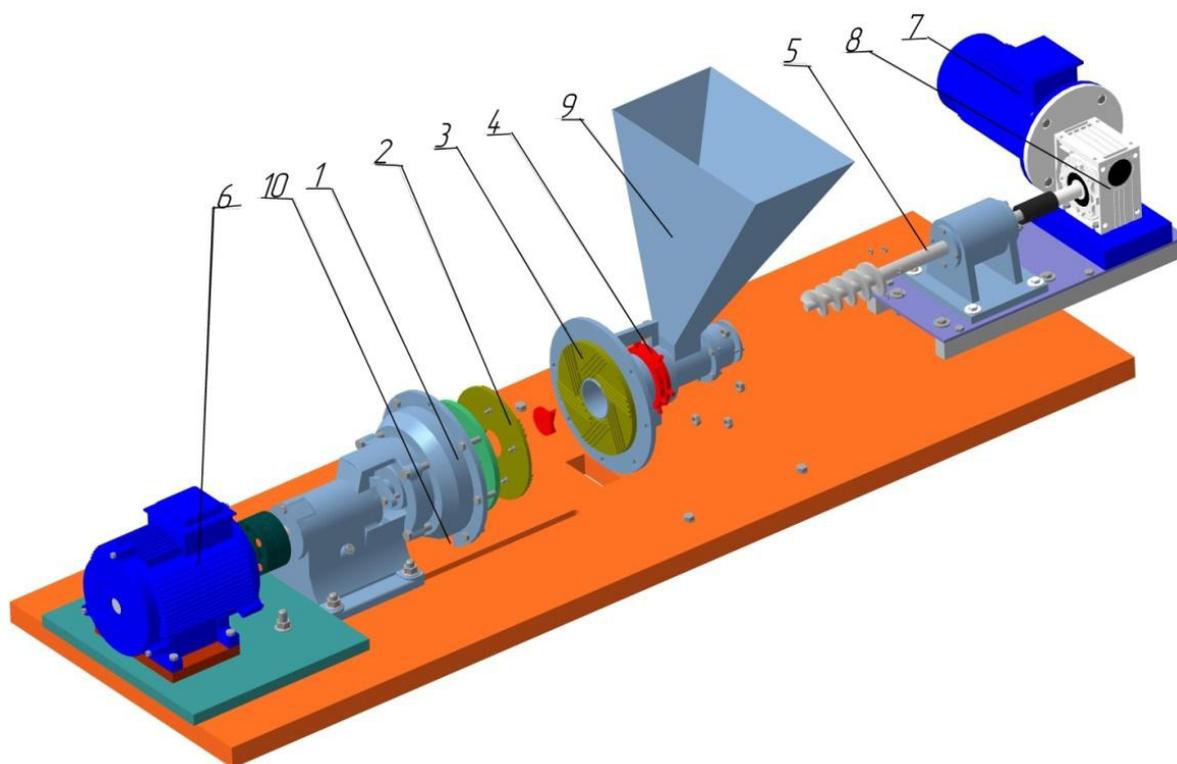
- а.) Частота вращения ротора;
- б.) Величина зазора между ножами ротора и статора;
- в.) Концентрация волокнистой массы;

3.1 Описание экспериментальной установки для размола

Для проведения настоящей работы была разработана лабораторная дисковая мельница для размола массы высокой концентрации, схема которой представлена на рисунке 3.1 [94]. Дисковая мельница состоит из следующих элементов: зона размола 1, состоящая из двух дисков, один из которых подвижен ротор 2, второй неподвижный статор 3; присадочное устройство 4, обеспечивающее регулировку зазора между ножами ротора и статора; шнековый питатель 5, обеспечивающий перемещение массы в зону размола. Вращение диска ротора осуществляется от электродвигателя 6. Перемещение массы в зону размола осуществляется шнековым питателем, привод которого производится от электродвигателя 7 через червячный редуктор 8. Частота вращения ротора дисковой мельницы и шнекового питателя регулируется при помощи частотных преобразователей. Одновременно привод ротора дисковой мельницы позволяет контролировать мощность, расходуемую на размол.

Механизм присадки представляет собой соединение «винт – гайка» с шагом 1 мм. Установка зазора между рабочими поверхностями размалывающих гарнитур осуществляется двумя контргайками. Регулирование необходимого зазора осуществляется следующим образом:

Контргайки обеспечивают перемещение статора 3 вдоль оси. При вращении контргаек по часовой стрелке зазор увеличивается, против часовой стрелки - уменьшается. Для обеспечения величины требуемого зазора имеется набор измерительных щупов, с помощью которых в зависимости от величины перемещения статора вдоль оси измеряется зазор между рабочими поверхностями гарнитур статора 2 и ротора 3. Технические характеристики дисковой мельницы представлены в таблице 3.1.



1 – зона размола; 2 – ротор, 3 – статор, 4 – присадочное устройство; 5 – шнековый питатель; 6 – электродвигатель ротора; 7 – электродвигатель привода шнекового питателя; 8 – червячный редуктор; 9 – бункер; 10 – выходное отверстие

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	0,5 – 1,5
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	40 - 95
Концентрация размалываемой массы, %	10 - 20

Конструктивные особенности размалывающих гарнитур.

При исследовании 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, представленная на рисунке 3.2. На данную конструкцию размалывающей гарнитуры получено два патента на изобретение: № 2761544, № 2761545 [92, 93].

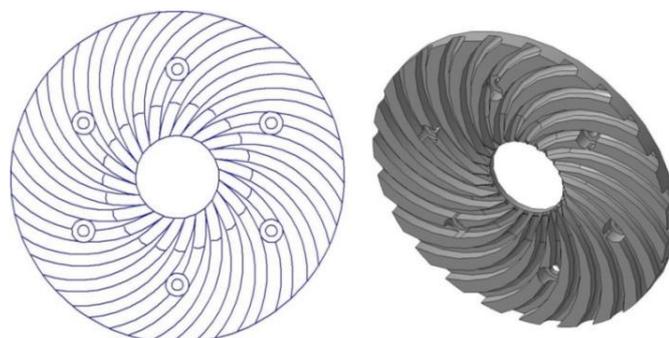


Рисунок 3.2 – Ножевая гарнитура для размола волокнистой массы с окружной формой ножей

Для сравнения результатов эксперимента, проведенного с использованием гарнитуры с окружной формой ножей, дополнительно проводились эксперименты с использованием традиционных гарнитур, одна из которых - секторная гарнитура с прямолинейной формой ножей (рисунок 3.3), а другая – с прямолинейными ножами и равномерным их распределением (рисунок 3.4). Данные гарнитуры отличались между собой шириной, высотой ножа и шириной ячейки.

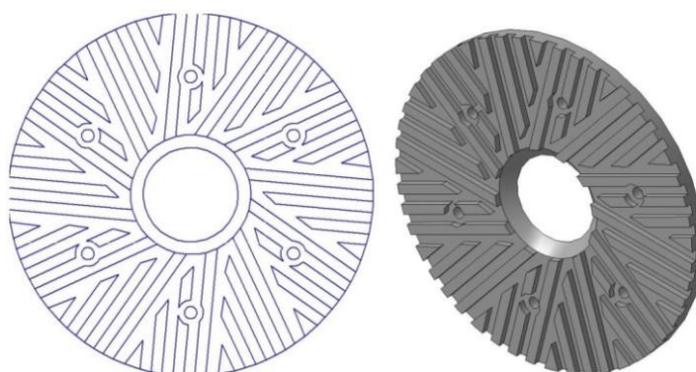


Рисунок 3.3 – Гарнитура секторная с прямолинейной формой ножей

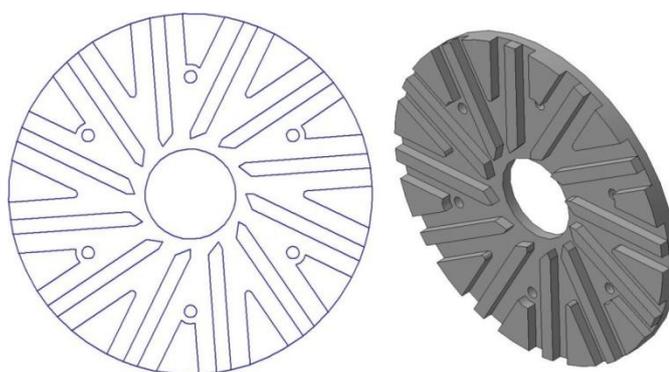


Рисунок 3.4 – Гарнитура с прямолинейными ножами и равномерным их распределением

Технологические параметры гарнитуры с окружной формой ножей и сравнение их с параметрами с прямолинейными ножами представлены в таблице 3.2

Таблица 3.2 – Технологические параметры размалывающих гарнитур

Показатель	Гарнитура		
	с окружной формой ножей	секторная с прямолинейной формой ножей	с прямолинейными ножами и равномерным их распределением
Количество ножей ротора и статора, шт	48	96	48
Суммарная длина режущих кромок ножей, м	1,96	4,4	2,2
Секундная режущая длина при частоте вращения ротора 2000 об/мин, (м/с)	37785	42240	33792
Площадь контакта ножей, м ²	0,019	0,0091	0,007
Секундная размалывающая поверхность при частоте вращения ротора 2000 об/мин, (м ² м/с)	0,63	0,3	0,23
Ширина ножа, мм	-	6	5
Высота ножа, мм	7	4	6
Ширина ячейки, мм	6	6	10
Отношение ширины ножа к высоте ножа	-	1,5	1,6

3.2 Порядок проведения эксперимента

Размолу подвергалась сульфатная беленая целлюлоза из лиственных пород древесины (полуфабрикат АО «Группа Илим» филиал г. Братск) с начальной степенью помола - 15 °ШР. Характеристика волокнистого полуфабриката представлена в таблице 3.3.

Перед проведением эксперимента на дисковой мельнице предварительно замоченные листы целлюлозы подвергались роспуску в дезинтеграторе [3].

Таблица 3.3 – Характеристика волокнистого полуфабриката

Физико-механические характеристики											
Разрывная длина, м		Сопротивление продавливанию, кПа		Сопротивление излому (число двойных перегибов)		Сопротивление раздиранию, мН					
998		55		4		216					
Бумагообразующие свойства											
Средняя длина волокна, мм	Средняя ширина волокна, мкм	Индекс фибрилляции, %	Водоудерживающая способность, %	Грубость, мг/м	Мелочь по площади, %	Фракционный состав средней длины волокна, %					
						0,2–0,3, мм	0,3–0,45, мм	0,45–0,6, мм	0,6–1, мм	1–1,5, мм	1,5–2 мм
0,897	20,3	0,846	147	0,113	2,552	7,142	18,14	40,842	27,446	2,82	0,897

Эксперимент проводился при концентрации волокнистой массы от 10 до 20 %, частоте вращения ротора от 2000 до 2500 об/мин, с интервалом 250 об/мин, величине зазора между ножами ротора и статора от 0,5 до 1,5 мм. В процессе размолла волокнистой массы, через определенное количество пропусков массы через зону размолла осуществлялись замеры прироста степени помола по Шоппер-Риглеру на приборе СР-2. Показания затрачиваемой электроэнергии на размол контроли-

ровались с использованием электросчетчика марки «Энергомера ЦЭ6803В М7 Р31».

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

3.3 Методика проведения эксперимента

3.3.1 Методика определения бумагообразующих свойств волокнистой массы

Для оценки характера процесса размола определялась структура бумагообразующих свойств волокнистой массы с помощью анализатора волокна *Morfi neo* (рисунок 3.5) [95]. Прибор состоит из двух основных частей: гидравлической и оптической. Гидравлическая часть (насос) осуществляет подачу заранее подготовленной волокнистой суспензии с известной концентрацией к оптической измерительной камере. Оптическая измерительная камера предназначена для измерения волокнистой суспензии при концентрации от 25–30 мг (по сухому веществу) в соответствии с ISO 16065-2 [96]. Оптическое разрешение камеры составляет 5 мкм.



Рисунок 3.5 – Анализатор волокна *Morfi neo*.

С помощью анализатора волокна измерялись следующие бумагообразующие показатели: средняя длина волокна, ширина волокна, грубость волокна, индекс фибрилляции, фракционный состав, содержание мелочи.

– Средняя длина волокна

При анализе прибором волокон каждое непересекающееся с другим объектом волокно представляется как последовательность прямолинейных сегментов (F_A, F_B, F_C и т.д.), расположенных вдоль корешка волокна. Длина выпрямленного волокна L_i является суммой длин всех сегментов (рисунок 3.6).

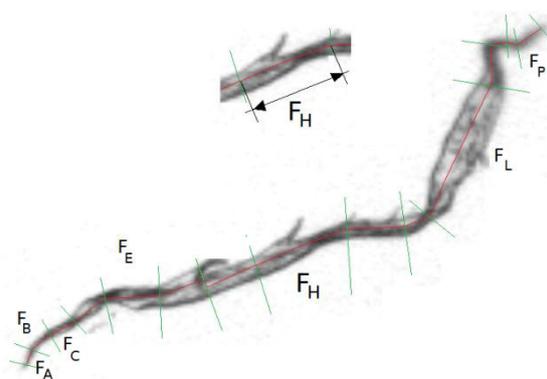


Рисунок 3.6 – Схема распознавания длины выпрямленного участка волокна оптической ячейкой

Средняя длина волокна L_a определяется по следующей формуле:

$$Lp_a = \sum Li / N . \quad (3.1)$$

Где L_i – длина каждого волокна.

– Ширина волокна

Значение ширины, как и длины, рассчитывается для каждого сегмента. Среднее значение всех волокон получается надежным, благодаря нескольким измерениям на каждом волокне.

– 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:

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

Где F_i – сумма длин всех фибрилл, мкм;

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

– **Грубость волокна**

Грубость волокна – масса волокон на единицу длины (мг/м). Прибор вычисляет величину грубости как отношение массы всех волокон к их общей длине. Чтобы определить массу, подсчитывается количество проанализированных изображений. Известный на изображении объем волокон позволяет узнать полный измеренный объем целлюлозы. Поскольку концентрация целлюлозы известна, можно вычислить общую массу.

– **Фракционный состав (Распределение средней длины волокна по классам фракций в процентном содержании)**

Прибор распределяет по фракционному составу все распознанные волокна, в зависимости от их длины в процентном содержании. В проводимых экспериментальных исследованиях было выбрано шесть классов фракций.

– **Мелочь.**

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

– **Водоудерживающая способность**

Помимо перечисленных показателей определялась степень набухания волокон, которая характеризуется показателем водоудерживающей способности. Степень набухания волокон характеризуется показателем водоудерживающей способности, предложенным Джайме [97]. Водоудерживающая способность волокнистой массы заключается в определении оставшейся в ней влаги после центрифугирования при определенных условиях. Содержание влаги после центрифугирования находится по разности массы пробы до сушки и после сушки, W , %

$$W = \frac{B_e - B_c}{B_e} \cdot 100\%. \quad (3.3)$$

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, прочность на излом, сопротивление продавливанию, сопротивление раздиранию.

Перед испытанием физико-механических свойств готовых отливок испытываемые образцы кондиционировали в стандартных атмосферных условиях (относительная влажность воздуха (50 ± 2) %, температура воздуха (23 ± 3) °С), в таких же условиях проводили испытания.

– 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 [98]. Разрывная длина L , м, вычисляется по формуле

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

где λ – длина полоски, м;

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

g – масса испытываемой полоски, кг.

– Сопротивление раздиранию.

Определение величины показателя сопротивления бумаги раздиранию производится методом Эльмендорфа [99]. Метод основан на определении усилия, необходимого для раздираания предварительно надрезанного образца бумаги. Испы-

тание 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 [100]. Испытания проводились на аппарате И-2, в котором испытываемая полоска разрывается от разрушения связи между волокнами.

– **Сопротивление продавливанию**

Определение величины сопротивления продавливанию проводилось по ГОСТ 13525.8-86 «Метод определения сопротивления продавливанию». 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 высокой концентрации, был применен метод активного эксперимента. Полученные таким методом математические зависимости позволяют установить количественные соотношения между входными факторами и выходными параметрами.

Для определения влияния основных технологических факторов процесса размола с использованием гарнитуры с окружной формой ножей на бумагообразующие свойства массы и физико-механические характеристики отливок наиболее достоверным способом математического описания объекта является много-

факторный эксперимент, который позволяет при переходе к каждому следующему опыту варьировать практически 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. Влияние конструкции гарнитуры с окружной формой ножей при варьировании концентрации волокнистой массы, частоты вращения ротора и величины межножевого зазора на бумагообразующие свойства массы и физико-механические показатели бумажных отливок.

2. Влияние конструкций гарнитур с прямолинейной формой ножей при размоле массы высокой концентрации на показатели качества волокнистой массы и физико-механические характеристики бумажных отливок.

3. Проведение факторного анализа выходных параметров.

На первом этапе эксперимента был спланирован и реализован многофакторный эксперимент по В-плану второго порядка. Для построения математической модели процесса размола использован 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 с использованием пакета программы *STATGRAPHICS® Centurion* [101] (приложение Б).

Основные технологические факторы процесса размола, оказывающие наибольшее влияние на бумагообразующие показатели волокнистой массы, а также физико-механические характеристики бумажных отливок, представлены в виде входных факторов X и выходных параметров Y в таблице 3.4.

На втором этапе эксперимента проведен однофакторный дисперсионный анализ для выявления влияния на выходные параметры Y конструкции размалывающей гарнитуры при различной концентрации волокнистой массы [102].

На третьем этапе эксперимента проведен факторный анализ для объяснения корреляций между выходными параметрами Y путем выделения латентных факторов, скрытых в структуре экспериментальных данных [103].

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

В таблице 3.5, согласно плану эксперимента, показаны уровни и шаги варьирования исследуемых факторов.

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	0,5	0,5	1	1,5
Концентрация массы, %	C	5	10	15	20

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

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_{11} X_1^2 + b_{22} X_2^2 + b_{33} X_3^2 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + b_{23} X_2 X_3. \quad (3.6)$$

Коэффициенты уравнений регрессии для каждого выходного параметра приведены в приложении В, таблицы В.1–В.3. В контексте задачи исследования представлялось целесообразным выяснить вклад в дисперсию выходных параметров варьирования переменных факторов. Для этих целей были построены поверхности откликов выходных параметров в зависимости от концентрации волокнистой массы, частоты вращения ротора и величины зазора между ножами ротора и статора при разных значениях степени помола.

3.5 Результаты экспериментальных исследований при использовании конструкции гарнитуры с окружной формой ножей. Регрессионный анализ

3.5.1 Бумагообразующие свойства волокнистой массы

3.5.1.1 Средняя длина волокна

Длина волокон – одна из важнейших характеристик целлюлозы, которая в значительной степени определяет прочность бумажного продукта. Считается, что для обеспечения высоких прочностных характеристик бумажного продукта, необходимо стремиться к сохранности исходной длины волокна на стадии процесса размола [32].

На рисунке 3.7 приведены аксонометрические изображения поверхностей откликов средней длины волокна Li от частоты вращения ротора n , величины зазора между ножами ротора и статора s и концентрации волокнистой массы C , при степени помола 60 °ШР. Поверхности откликов средней длины волокна при других степенях помола представлены в приложении Г, рисунок Г.1.

Изображения поверхностей откликов на рисунке 3.7 наглядно показывают, что переменные факторы процесса размола, такие как частота вращения ротора, зазор между ножами ротора и статора, а также концентрация волокнистой массы в

рассматриваемых диапазонах, не оказывают существенного влияния на изменчивость средней длины волокна.

Сохранность исходной длины волокна связана прежде всего с тем, что волокнистая масса размалывается при достаточно больших зазорах. В таком случае возрастает межволоконное трение. Волокна, находясь в тесном контакте друг с другом, подвергаются многократному скручивающему и изгибающему воздействию. В связи с этим происходит их фибриллирование без значительного укорочения [21].

Более точную оценку изменчивости средней длины волокна в процессе размола позволяет дать фракционный состав волокнистой массы [104, 105].

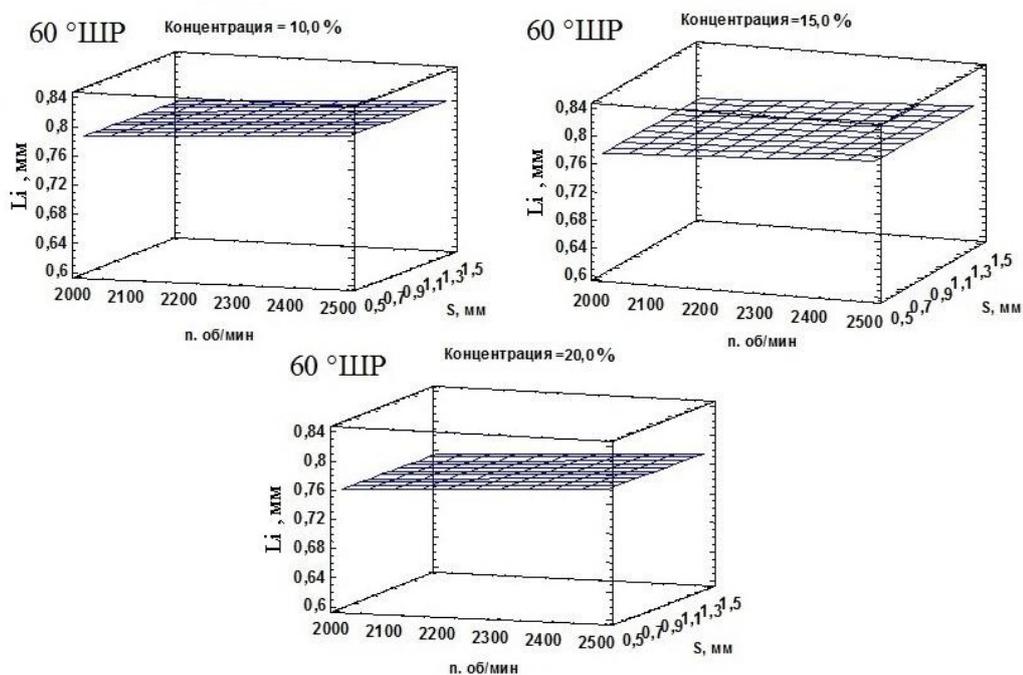


Рисунок 3.7 – Зависимость средней длины волокна от частоты вращения ротора n , величины межножевого зазора s , концентрации волокнистой массы C при степени помола 60 °ШР

3.5.1.2. Фракционный состав

Фракционный состав был разбит на шесть основных классов. Каждый класс содержит долю волокон определенной длины в процентном содержании. Исследовались следующие классы фракционного состава: от 0,2 до 0,3 мм ($fr1$); от 0,3

до 0,45 мм (*fr2*); от 0,45 до 0,6 мм (*fr3*); от 0,6 до 1 мм (*fr4*); от 1 до 1,5 мм (*fr5*) и от 1,5 до 2 мм (*fr6*).

Качественные характеристики изменения поверхностей откликов длины волокон по классам фракций от частоты вращения ротора n , величины межножевого зазора s и концентрации волокнистой массы C носят примерно одинаковый характер, поэтому в далее рассмотрен случай изменения фракционного состава при степени помола 30 °ШР и концентрации волокнистой массы 10 % (рисунок 3.8). Остальные случаи представлены в приложении Г, рисунки Г.2 – Г.7.

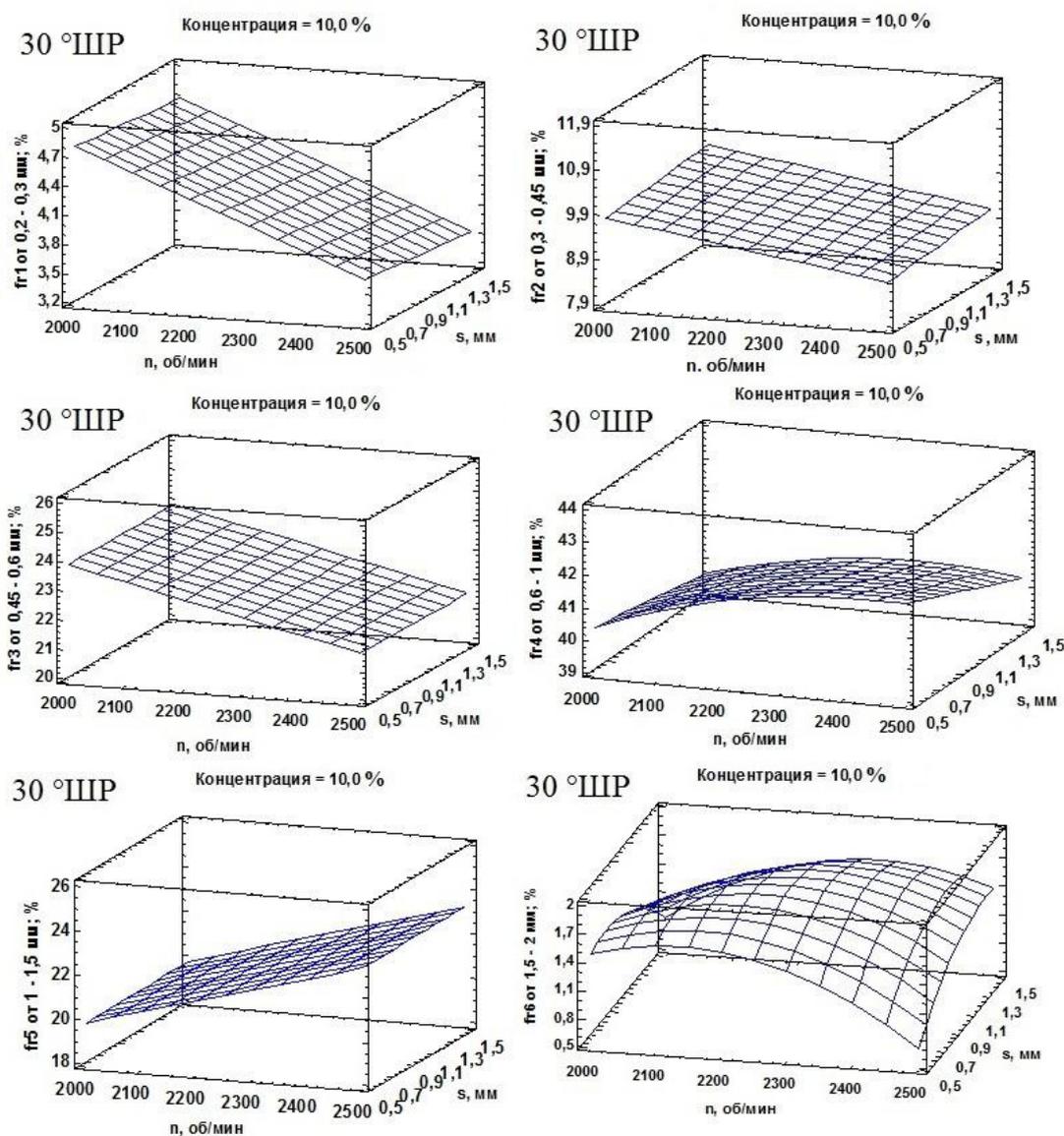


Рисунок 3.8 – Зависимость распределения длины волокон по классам фракций от частоты вращения ротора n , величины межножевого зазора s , при концентрации волокнистой массы 10 % и степени помола 30 °ШР

Из рисунка 3.8 можно наблюдать следующую картину изменения фракционного состава:

1. С увеличением частоты вращения ротора фракции *fr4* и *fr5* увеличивают свое процентное содержание, одновременно с этим наблюдается незначительное сокращение процентного содержания волокон у фракций *fr6*, *fr3*, *fr2* и *fr1*.

2. Величина зазора между ножами ротора и статора не вызывает изменения процентного содержания волокон у основных классов фракций. Исключение составляет фракция *fr6*, которая увеличивает свое процентное содержание с увеличением величины межножевого зазора.

Для наглядного представления изменения процентного содержания фракционного состава на рисунке 3.9 представлена гистограмма распределения длины волокон по классам фракций при частоте вращения ротора 2000 об/мин, межножевом зазоре 1,5 мм и концентрации волокнистой массы 10 %. Данные классы были разбиты на четыре группы, каждая из которых соответствует определенной степени помола. В приложении Г на рисунках Г.8, Г.9 представлены гистограммы распределения длины волокон по классам фракций при концентрации волокнистой массы 15 и 20 %.

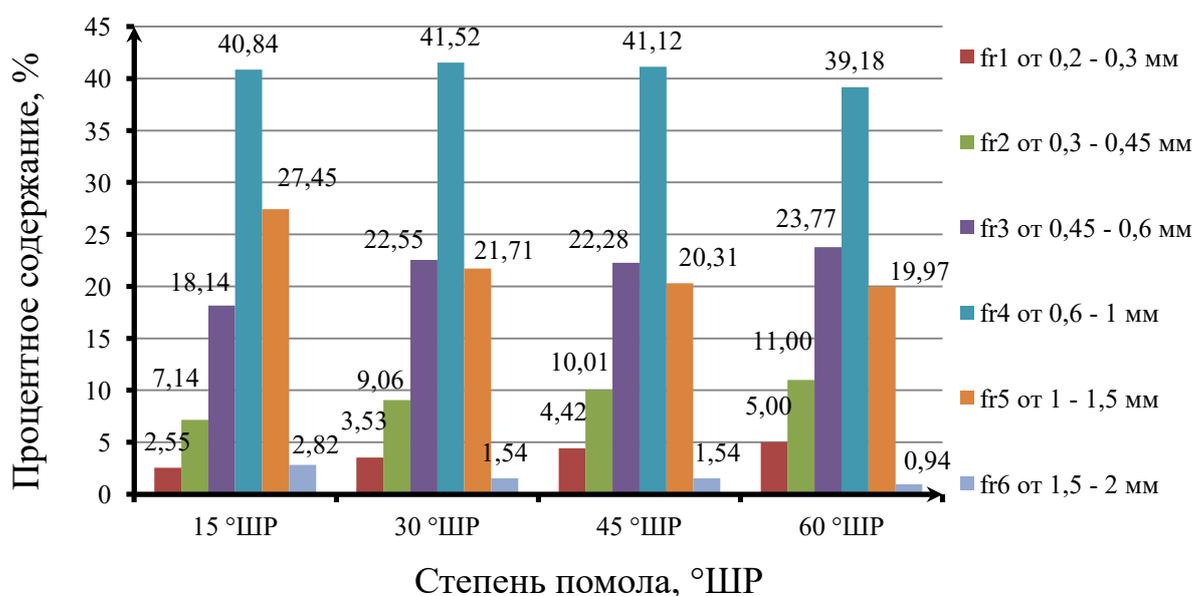


Рисунок 3.9 – Гистограмма распределения длины волокон по классам фракций при частоте вращения ротора 2000 об/мин, величины зазора между ножами ротора и статора 1,5 мм и концентрации волокнистой массы 10 %

В некоторых источниках утверждается [106], что фракционный состав волокнистой массы с ростом степени помола должен незначительно увеличивать процентное содержание коротких волокон. При формировании бумажного листа короткие волокна заполняют промежутки между более длинными волокнами, благодаря чему повышается однородность бумаги. Она приобретает более ровный просвет, становится менее прозрачной и более гладкой.

Из рисунка 3.9 видно, что по мере увеличения степени помола гарнитура авторского исполнения обеспечивает незначительное увеличение процентного содержания коротковолокнистых фракций, таких как $fr3$, $fr2$ и от $fr1$ мм.

3.5.1.3 Грубость волокна

Одним из фундаментальных бумагообразующих свойств помимо длины волокна, по мнению Дж. Кларка, является грубость волокна. Считается, что с увеличением грубости волокна прочность бумажного полотна возрастает [107].

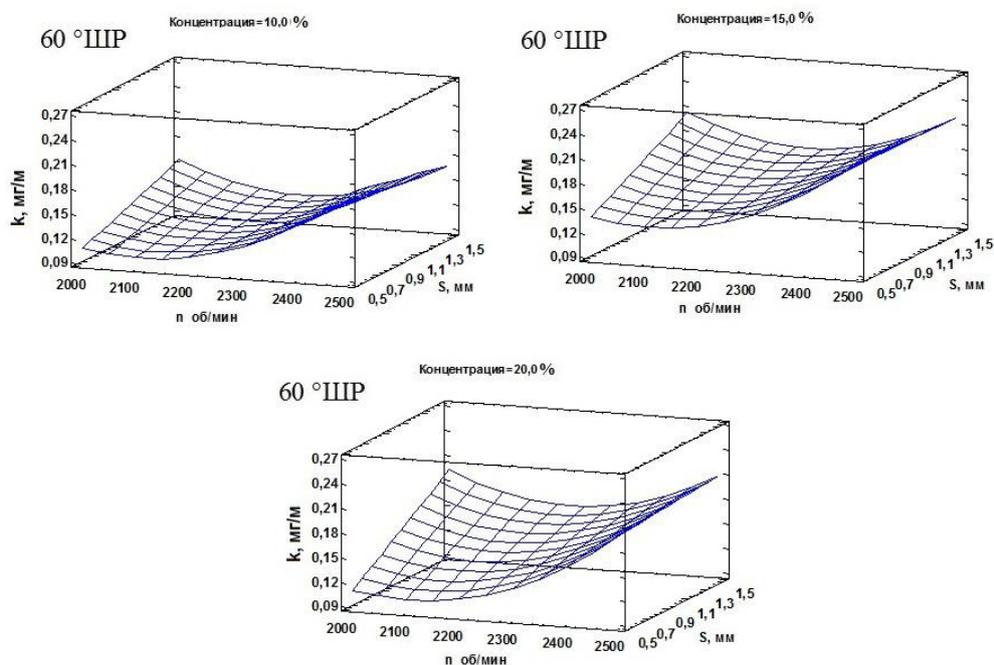


Рисунок 3.10 - Зависимость грубости волокна от частоты вращения ротора n , величины межножевого зазора s при различных концентрациях волокнистой массы C и степени помола 60 °ШР.

В работах Я. В. Казакова и Ю.Д. Алашкевича указывается, что на прочностные свойства бумажного продукта в значительной степени влияют такие свойства волокна как тонкость и гибкость, которые зависят от грубости волокна [47, 104].

Изображения поверхностей откликов грубости волокна, в зависимости от частоты вращения ротора n , величины зазора между ножами ротора и статора s , а также концентрации волокнистой массы C при степени помола 60 °ШР представлены на рисунке 3.10. Поверхности откликов при других степенях помола представлены в приложении Г, рисунок Г.11.

Анализируя рисунок 3.10, можно увидеть тенденцию роста грубости волокна, с увеличением частоты вращения ротора и величины зазора между ножами ротора и статора. Увеличение концентрации волокнистой массы от 10 до 15 % обеспечивает незначительное увеличение грубости волокна.

Причина изменения показателя грубости волокна при варьировании частотой вращения ротора, величиной межножевого зазора и концентрацией волокнистой массы может быть связана с изменением фракционного состава. Анализатор волокна определяет грубость волокна как массу всех распознанных волокон к их общей длине. Иными словами, грубость волокна пропорциональна общей массе всех распознанных волокон и обратно пропорциональна сумме их длин. Как уже было сказано ранее, в процессе размолла массы высокой концентрации некоторая доля волокон в классах фракционного состава уменьшает свою длину (см. рисунки 3.8, 3.9). Следовательно, с изменением фракционного состава грубость волокна тоже будет меняться.

3.5.1.4 Ширина волокна

Единой точки зрения о характере влияния ширины волокна при размолле волокнистой массы на качество готового продукта не существует. Некоторые исследователи склонны полагать [108], что с увеличением ширины волокна увеличиваются прочностные показатели бумажного продукта.

Качественный характер изменения показателя ширины волокна при различных степенях помола носит идентичный характер с незначительными количественными отличиями. Поверхности откликов показателя ширины волокна при различных степенях помола приведены в приложении Г, рисунок Г.12.

На рисунке 3.11 приведены поверхности откликов показателя ширины волокна от концентрации волокнистой массы C , частоты вращения ротора n , величины зазора между ножами ротора и статора s при степени помола 60°ШР .

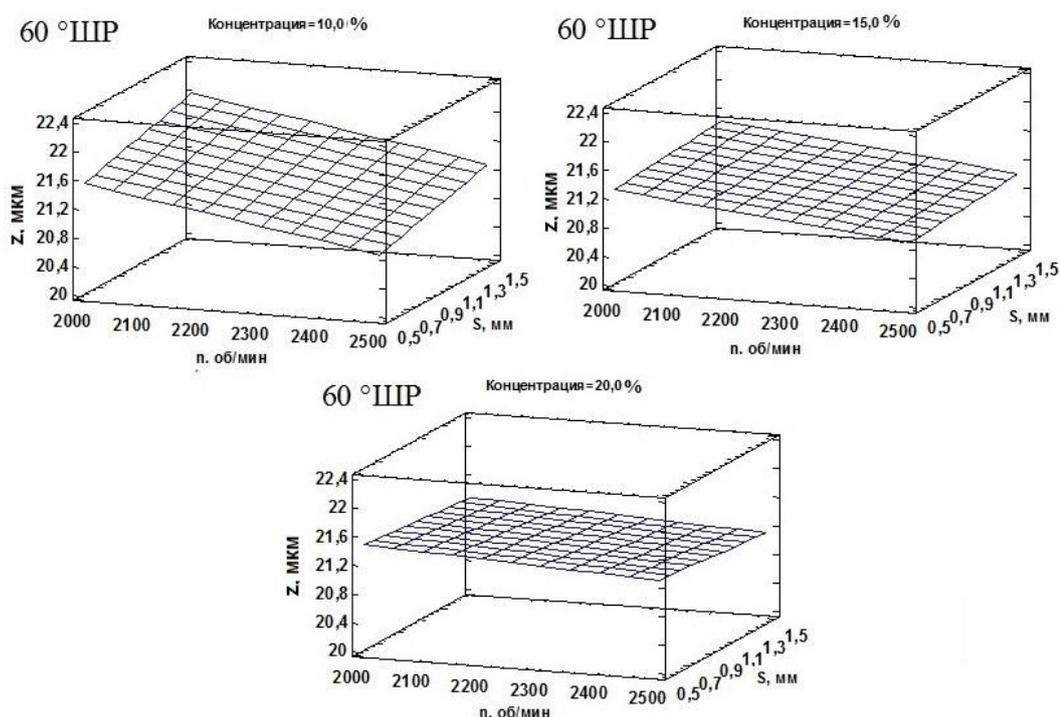


Рисунок 3.11 – Зависимость ширины волокна от частоты вращения ротора n , величины межножевого зазора s и концентрации волокнистой массы C при степени помола 60°ШР

Из рисунка видно, что с ростом концентрации волокнистой массы в процессе размола от 10 до 20 % ширина волокна начинает увеличиваться. Увеличение ширины волокна при концентрации размалываемой массы 10 % наблюдается при уменьшении частоты вращения ротора и увеличении величины зазора между ножами ротора и статора. Дальнейший рост концентрации размалываемой волокнистой массы приводит к тому, что частота вращения ротора и величина зазора между ножами ротора и статора не оказывают существенного влияния на ширину волокна.

3.5.1.5 Водоудерживающая способность

Для оценки качества помола массы широкое распространение получил показатель водоудерживающей способности массы. Считается, что с увеличением показателя водоудерживающей способности волокнистой массы увеличивается степень набухания и гидратации волокон, что, в свою очередь, повышает способность волокон к образованию межволоконных сил связи и получению прочной бумаги [2].

На рисунке 3.12 показаны изображения поверхности откликов водоудерживающей способности W от частоты вращения ротора n , величины зазора между ножами ротора и статора s , концентрации волокнистой массы C при степени помола 60°ШР . Поверхности откликов показателя водоудерживающей способности при других степенях помола представлены в приложении Г, рисунок Г.13.

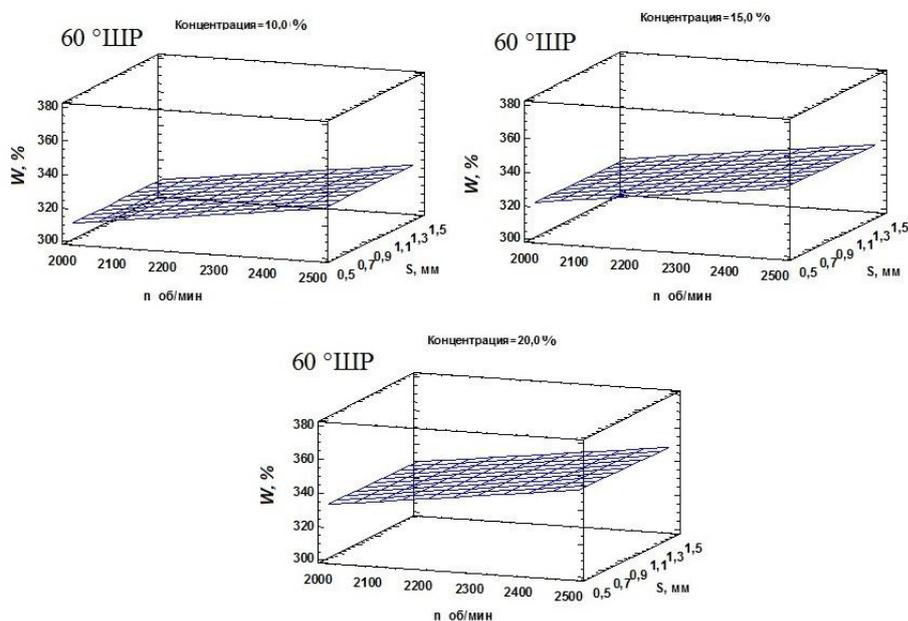


Рисунок 3.12 – Зависимость водоудерживающей способности от частоты вращения ротора n , величины межножевого зазора s и концентрации волокнистой массы C при степени помола 60°ШР

Гарнитура с окружными ножами оказывает благоприятное воздействие на показатель водоудерживающей способности волокнистой массы. Из рисунка 3.12

видно, что изменение водоудерживающей способности в процессе размола наблюдается с изменением частоты вращения ротора и концентрации волокнистой массы. С увеличением частоты вращения ротора и концентрации волокнистой массы водоудерживающая способность возрастает. Величина зазора между ножами ротора и статора не вызывает существенного изменения водоудерживающей способности. Единственный случай, при котором не наблюдается увеличения показателя водоудерживающей способности, возникает при степени помола 30 °ШР (см. приложение Г, рисунок Г.13).

На основании водоудерживающей способности и взаимодействия целлюлозы с водой нельзя четко предсказать взаимосвязь свойств целлюлозы и получаемой из нее бумаги. Но такие предсказания становятся вполне возможными при учете роли фибрилл и показателя индекса фибрилляции [107]. По нашему мнению, индекс фибрилляции оказывает прямое воздействие на природу и прочность межволоконных сил связей, что несомненно должно отразиться на физико-механических характеристиках бумажных отливок. Далее рассмотрим изменение показателя индекса фибрилляции в процессе размола массы высокой концентрации.

3.5.1.6 Индекс фибрилляции

Анализатор волокна, используемый в данном исследовании, способен давать оценку степени фибриллирования волокон, прошедших стадию процесса размола. Степень фибриллирования волокон характеризуется индексом фибрилляции, который определяется анализатором волокна как отношение суммы длин всех фибрилл на каждом волокне к сумме длин всех распознанных волокон (см. формулу 3.2, на стр. 57). Одним из важных достоинств размола волокнистой массы высокой концентрации является сохранение исходной длины волокна, о чем свидетельствуют экспериментальные результаты данной работы и анализ литературных источников. Однако данные о характере изменения индекса фибрилляции волокна

при размоле массы высокой концентрации с учетом конструктивных особенностей размалывающих органов отсутствуют.

На рисунке 3.13 показаны поверхности откликов показателя индекса фибрилляции, в зависимости от частоты вращения ротора n , величины межножевого зазора s и концентрации волокнистой массы C при степени помола 60°ШР . Поверхности откликов показателя индекса фибрилляции при других степенях помола представлены в приложении Г, рисунок Г.14.

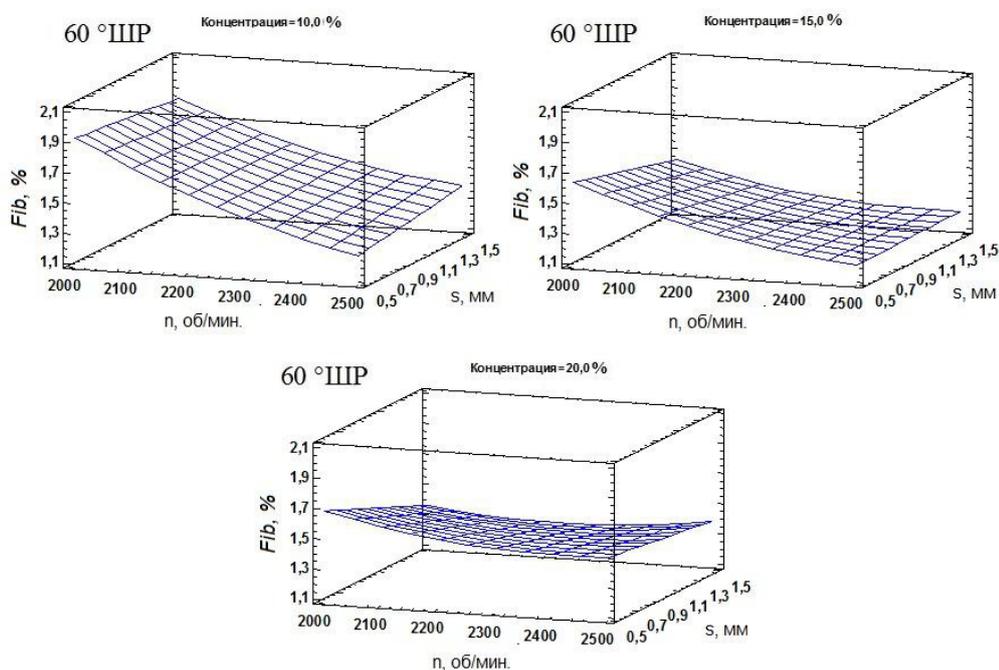


Рисунок 3.13 – Зависимость индекса фибрилляции от частоты вращения ротора n , величины межножевого зазора s и концентрации волокнистой массы C при степени помола 60°ШР

Анализируя рисунок 3.13, можно сделать следующие выводы о характере изменения индекса фибрилляции:

- при концентрации волокнистой массы 10 % уменьшение частоты вращения ротора и увеличение зазора между ножами ротора и статора вызывает увеличение индекса фибрилляции;
- увеличение концентрации волокнистой массы в процессе размола до 20 % приводит к тому, что частота вращения ротора не вызывает изменчивости показателя индекса фибрилляции. Наблюдается сохранность индекса фибрилляции.

По мнению Дж. Кларка, на различных стадиях процесса размола волокнистой массы высокой концентрации может возникать деформация целлюлозного волокна в виде осевого скручивания, которая уменьшает его фибриллирование, в результате чего прочность готового бумажного продукта снижается [107]. Представленные результаты индекса фибрилляции в данном исследовании, наглядно демонстрируют тенденцию его снижения, с ростом частоты вращения ротора и уменьшением величины зазора между ножами ротора и статора, при концентрации волокнистой массы 10 %. В то же время с ростом концентрации волокнистой массы до 20 % падение индекса фибрилляции не возникает, наблюдается его сохранность (см. рисунок 3.13).

На наш взгляд, представляется целесообразным выяснить, каким образом изменение исследуемых показателей бумагообразующих свойств волокнистой массы оказывает влияние на физико-механические характеристики бумажного продукта.

3.5.2 Физико-механические характеристики бумажных отливок

3.5.2.1 Разрывная длина

Показатель разрывной длины является важным механическим показателем бумажного продукта, который зависит от длины волокон, их гибкости, а также силы связи между ними [2]. Изображения поверхностей отливок показателя разрывной длины, в зависимости от частоты вращения ротора n , величины зазора между ножами ротора и статора s и концентрации волокнистой массы C при степени помола 60 °ШР показаны на рисунке 3.14. Характеристики изменения разрывной длины для различных степеней помола представлены в приложении Г, рисунок Г.15.

В процессе размола волокнистой массы при концентрации 10 % на изменчивость разрывной длины бумажных отливок оказывает влияние частота вращения ротора и в меньшей мере величина зазора между ножами ротора и статора. С

уменьшением частоты вращения ротора и увеличением величины зазора между ножами ротора и статора разрывная длина увеличивается.

При концентрации волокнистой массы 15 % понижение разрывной длины наблюдается с увеличением межножевого зазора при частоте вращения ротора 2500 об/мин. Аналогичная картина наблюдается и при концентрации волокнистой массы 20 %.

Более высокие значения показателя разрывной длины были получены при концентрации размалываемой массы 10 %, частоте вращения ротора 2000 об/мин, величине зазора между ножами ротора и статора 1,5 мм и при степени помола 60 °ШР.

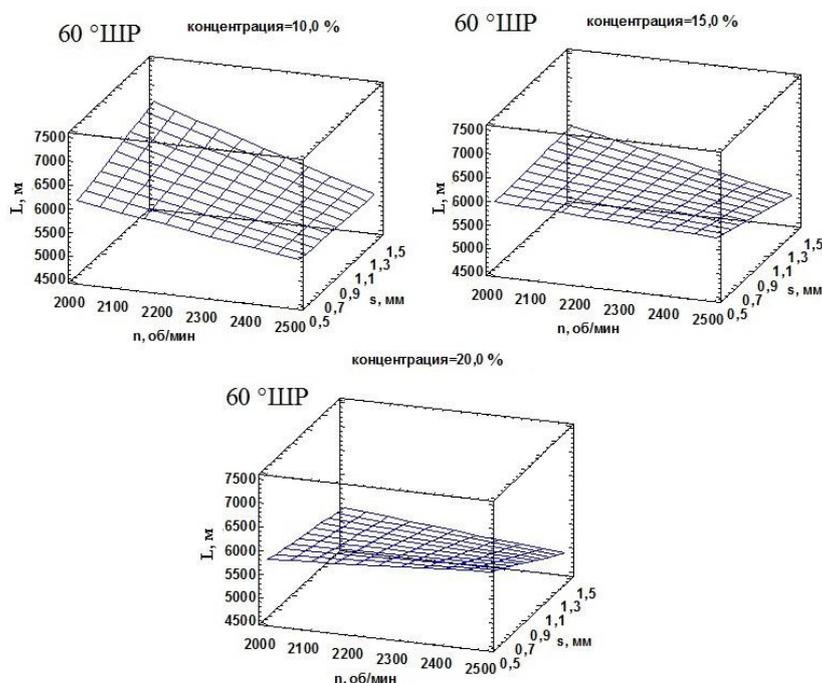


Рисунок 3.14 – Зависимость разрывной длины от частоты вращения ротора n , величины межножевого зазора s и концентрации волокнистой массы C при степени помола 60 °ШР

По мнению Л. Н. Лаптева и И. Н. Халандовского, снижение разрывной длины у бумажных отливок с ростом концентрации размалываемой массы связано с пониженным содержанием в массе мелких волокон, которые действуют как волокнистый наполнитель, заполняя сетку длинных волокон в структуре бумажной отливки [16]. Результаты нашего исследования показывают, что конструкция гарнитуры авторского исполнения с ростом степени помола обеспечивает незначи-

тельное увеличение процентного содержания мелких волокон при концентрации размалываемой массы 10 %, о чем свидетельствуют данные гистограмм распределения фракционного состава (см. рисунок 3.9, приложение Г, рисунки Г.8–Г.9). В результате чего наблюдаются более высокие значения показателя разрывной длины у бумажных отливок, сформированных из волокнистой массы, размолотой при концентрации 10 %.

3.5.2.2 Сопротивление продавливанию

Поверхности откликов показателя сопротивления продавливанию в зависимости от частоты вращения ротора n , величины зазора между ножами ротора и статора s , концентрации волокнистой массы C при степени помола 60 °ШР показаны на рисунке 3.15. Поверхности откликов показателя сопротивления продавливанию для различных степеней помола представлены в приложении Г, рисунок Г.16.

Из рисунка 3.15 видно, что уменьшение показателя сопротивления продавливанию, при концентрации размалываемой массы 10 % обусловлено увеличением частоты вращения ротора и уменьшением величины зазора между ножами ротора и статора.

С увеличением концентрации размалываемой массы до 15 % наблюдается снижение показателя сопротивления продавливанию, а частота вращения ротора и величина зазора между ножами ротора и статора при данной концентрации не оказывают значительного влияния на изменчивость данного показателя.

При размоле волокнистой массы при концентрации 20 % увеличение частоты вращения обеспечивает незначительное повышение показателя сопротивления продавливанию у бумажных отливок.

Более высокими по показателю сопротивления продавливанию оказались бумажные отливки, сформированные из волокнистой массы, размолотой при концентрации волокнистой массы 10 %, частоте вращения ротора 2500 об/мин и ве-

личине зазора между ножами ротора и статора 1,5 мм при степени помола 60 °ШР.

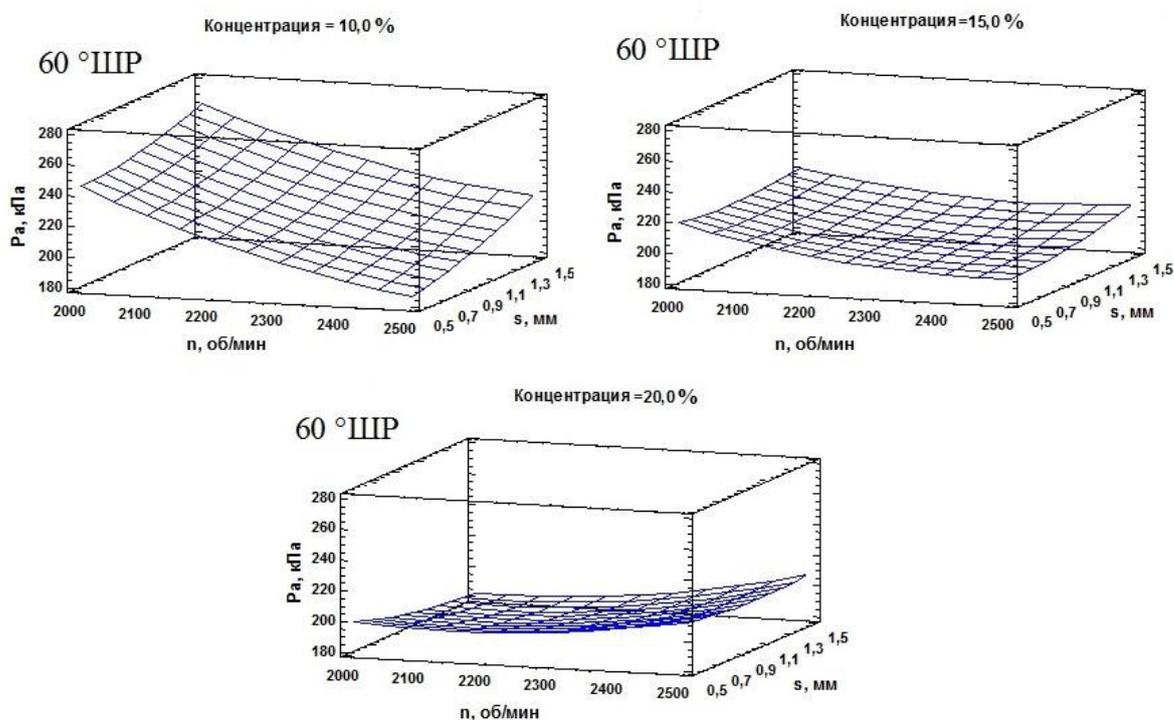


Рисунок 3.15 - Зависимость сопротивления продавливанию от частоты вращения ротора n , величины межножевого зазора s и концентрации волокнистой массы C при степени помола 60 °ШР

Снижение сопротивления продавливанию с ростом концентрации размалываемой массы некоторые исследователи связывают с уменьшением сил межволоконных связей из-за высокой скручиваемости волокон [27].

3.5.2.3 Сопротивление излому

Поверхности откликов показателя сопротивления излому в зависимости от частоты вращения ротора n , величины зазора между ножами ротора и статора s , концентрации волокнистой массы C при степени помола 60 °ШР показаны на рисунке 3.16. Поверхности откликов при различных степенях помола представлены в приложении Г, рисунок Г.17.

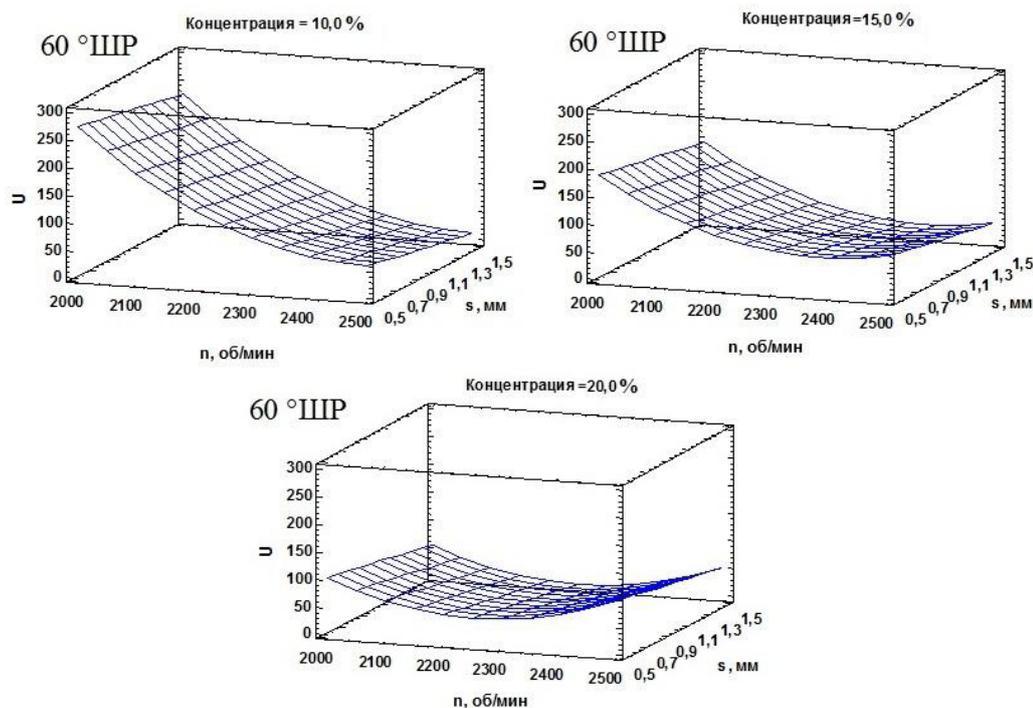


Рисунок 3.16 - Зависимость сопротивления излому от частоты вращения ротора n , величины межножевого зазора s и концентрации волокнистой массы C , при степени помола 60° ШР

При концентрации размалываемой массы 10 % наблюдается максимальное значение показателя сопротивления излому при частоте вращения ротора 2000 об/мин. С ростом частоты вращения ротора наблюдается снижение данного показателя.

Дальнейший рост концентрации размалываемой массы до 15 % с одновременным ростом частоты вращения ротора приводит к постепенному снижению величины сопротивления излому. Величина зазора между ножами ротора и статора на показатель сопротивления излому существенного влияния не оказывает. При концентрации волокнистой массы 20 % наблюдается незначительный рост сопротивления излому с увеличением частоты вращения ротора.

В.И. Комаров, Ю.Д. Алашкевич отмечают, что важным эффектом размола является увеличение гибкости волокна [47, 109]. По мнению Я.В. Казакова, размол увеличивает гибкость волокон и уменьшает их длину, что, с одной стороны, должно увеличивать равномерность структуры при формировании бумаги, а с другой - за счёт образования большого количества мелких волокон уменьшать её

равномерность путём образования флокул, в результате слипания и агрегирования мелочью [104].

При проведении данных исследований выяснилось, что с увеличением концентрации волокнистой массы в процессе размола волокно, практически, сохраняет свою первоначальную длину (см. рисунок 3.7). По мнению И.И. Халандовского, в процессе размола массы высокой концентрации сохранность исходной длины волокон повышает их гибкость и эластичность, что, в свою очередь, влияет на повышение величины сопротивления излому у бумажного продукта. Однако, чрезмерное повышение концентрации волокнистой массы в процессе размола помимо увеличения гибкости волокна, как утверждают Р.А. Рейска и Ю.Г. Бутко, приводит к высокой степени скручиваемости волокон, что вызывает снижение показателя сопротивления излому у бумажной продукции [21].

3.5.2.4 Сопротивление раздиранию

Изображения поверхностей откликов для показателя сопротивления раздиранию, в зависимости от частоты вращения ротора n , величины зазора между ножами ротора и статора s , концентрации волокнистой массы C при степени помола 60 °ШР представлены на рисунке 3.17. Поверхности откликов показателя сопротивления раздиранию при других степенях помола представлены в приложении Г, рисунок Г.18. Из рисунка 3.17 видно, что с увеличением концентрации волокнистой массы от 10 до 20 % наблюдается снижение показателя сопротивления раздиранию.

Наиболее высокое значение показателя сопротивления раздиранию варьируется в пределах 630 мН при концентрации размалываемой массы 10 %, частоте вращения ротора 2000 об/мин и величине зазора между ножами ротора и статора 1,5 мм. С увеличением частоты вращения ротора и уменьшением величины зазора между ножами ротора и статора происходит снижение показателя сопротивления раздиранию.

При концентрации размалываемой массы 15 % частота вращения ротора и величина зазора между ножами ротора и статора практически не влияют на изменение показателя сопротивления раздиранию.

С увеличением концентрации размалываемой массы до 20 % показатель сопротивления раздиранию продолжает снижаться с ростом частоты вращения ротора.

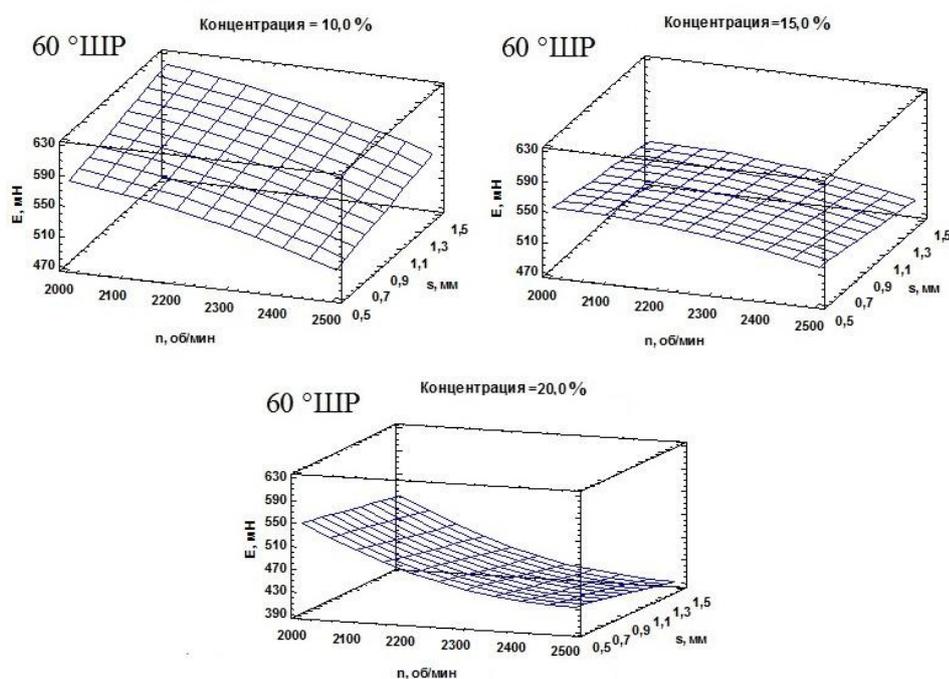


Рисунок 3.17 - Зависимость сопротивления раздиранию от частоты вращения ротора n , величины межножевого зазора s и концентрации волокнистой массы C при степени помола 60 °ШР.

Л.Н. Лаптев считает, что при размоле волокнистой массы высокой концентрации сохранение исходной длины волокна обеспечивает повышение величины сопротивления раздиранию у бумажной продукции, следовательно, чем выше концентрация размалываемой массы, тем выше величина сопротивления раздиранию у бумажных отливок [27]. Понижение величины сопротивления раздиранию с увеличением концентрации размалываемой массы Е.Е. Савицкий объясняет деформацией волокон, вызванной чрезмерным их скручиванием и изогнутостью [51].

Результаты регрессионного анализа показывают, что конструкция гарнитуры с окружной формой ножей с учетом технологических факторов процесса размола обеспечивает следующие особенности исследуемым выходным параметрам:

- с ростом концентраций размалываемой массы от 10 до 20 % наблюдается сохранность исходной длины волокна;

- с ростом частоты вращения ротора фракционный состав показывает увеличение процентного содержания волокон у фракций с размерами от 0,6–1 мм и 1–1,5 мм;

- грубость волокна увеличивается с ростом частоты вращения ротора и увеличением концентрации размалываемой массы до 15 %;

- водоудерживающая способность увеличивается с ростом частоты вращения ротора и концентрации размалываемой массы;

- при величине зазора 1,5 мм, частоте вращения ротора 2000 об/мин и концентрации волокнистой массы 10 % наблюдаются более высокие ширина волокна и индекс фибрилляции;

- высокие показатели физико-механических характеристик наблюдаются у бумажных отливок, сформированных из волокнистой массы, имеющей в своем составе достаточно длинные и широкие волокна с высоким индексом фибрилляции;

Для оценки эффективности использования конструкции гарнитуры авторского исполнения в сравнении с традиционными гарнитурами целесообразно провести их сравнительный анализ на качество помола волокнистой массы и физико-механические характеристики бумажных отливок при оптимальных условиях размола.

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

Для определения оптимальных режимов размола волокнистой массы был применен метод обобщенного параметра оптимизации выходных параметров.

Суть данного метода заключается в объединении нескольких исследуемых выходных параметров в единственный обобщающий параметр оптимизации, по которому определяются наиболее благоприятные факторы процесса размола. В данной работе для оптимизации были выбраны выходные параметры физико-механических характеристик бумажных отливок Y_2 – Y_5 и показатель индекса фибрилляции Y_1 (см. таблицу 3.9).

Таблица 3.9 – Данные выходных параметров и их нормированных значений с обобщенным параметром оптимизации

Наблюдения при 60 °ШР		Выходной параметр					Нормировка выходного параметра					Обобщенный параметр
№	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	$W_{об.}$	
1	1,431	47	5102	212	549	0,297	0,063	0,217	0,301	0,503	0,276	
2	1,369	31	5184	184	523	0,224	0	0,250	0	0,338	0,162	
3	1,374	88	5678	200	601	0,230	0,224	0,450	0,172	0,834	0,382	
4	1,822	150	6460	210	627	0,755	0,467	0,767	0,280	1	0,654	
5	1,313	41	4567	208	601	0,158	0,039	0	0,258	0,834	0,258	
6	2,031	286	7036	277	627	1	1	1	1	1	1	
7	1,342	41	5555	187	470	0,192	0,039	0,4	0,032	0	0,133	
8	1,952	262	5925	242	601	0,907	0,906	0,550	0,624	0,834	0,764	
9	1,307	65	6501	214	471	0,151	0,133	0,783	0,323	0,006	0,279	
10	1,178	98	5678	197	497	0	0,263	0,450	0,140	0,172	0,205	
11	1,339	65	5802	201	523	0,189	0,133	0,500	0,183	0,338	0,269	
12	1,454	96	5473	203	602	0,324	0,255	0,367	0,204	0,841	0,398	
13	1,360	41	5020	186	549	0,213	0,039	0,183	0,022	0,503	0,192	
14	1,505	54	6131	218	523	0,383	0,090	0,633	0,366	0,338	0,362	
15	1,346	48	5576	202	536	0,197	0,067	0,409	0,194	0,420	0,257	
16	1,348	51	5580	206	540	0,199	0,078	0,410	0,237	0,446	0,274	

Первым действием необходимо вычислить частные функции полезности – осуществить переход от натуральных значений выходных параметров к нормированным значениям, при которых все значения данных параметров будут меняться от нуля до единицы для всех наблюдений. Формула для вычисления частных функций полезности имеет следующий вид:

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

Где $y_{тек.}$ – текущее значение для каждого наблюдаемого выходного параметра;

y_{\max} – максимальное значение выходного параметра;

y_{min} – минимальное значение выходного параметра.

Далее вычисляется обобщенный параметр оптимизации как сумма частных функций полезности, деленных на число наблюдаемых выходных параметров:

$$W_{об.} = \frac{\sum_{u=1}^n d_u}{n}. \quad (3.8)$$

Где n – число наблюдаемых выходных параметров.

Стоит отметить, что обобщенные значения параметра оптимизации, близкие единице, будут соответствовать самым высоким значениям выходных параметров Y и тем факторам процесса размола, которые обеспечивают данные условия. В таблице 3.9 представлен обобщенный параметр оптимизации для всех наблюдаемых выходных параметров.

Для определения оптимальных режимов размола находится функция обобщенного параметра оптимизации от входных факторов процесса размола $W = f(x_1, x_2, x_3)$, с помощью регрессионного анализа получается уравнение регрессии.

В нашем случае уравнение регрессии обобщенного параметра оптимизации имеет вид

$$W_{об.} = 13,948 - 0,008 \cdot X_1 + 0,556 \cdot X_2 - 0,505 \cdot X_3 + 0,0000013 \cdot X_1^2 + 0,576 \cdot X_2^2 + 0,004 \cdot X_3^2 - 0,003 \cdot X_1 X_2 + 0,00018 \cdot X_1 X_3 - 0,0678 \cdot X_2 X_3. \quad (3.9)$$

По уравнению регрессии находится максимальное значение обобщенного параметра оптимизации и выбираются те оптимальные решения, которые обуславливают данный максимум. Данные оптимальные решения соответствуют следующим режимам работы дисковой мельницы:

- частота вращения ротора $n = 2000$ об/мин;
- величина зазора между ножами ротора и статора $s = 1,5$ мм;
- концентрация волокнистой массы $C = 10$ %.

Аксонметрическое изображение поверхности отклика обобщенного параметра $W_{об.}$ в зависимости от частоты вращения ротора n , величины зазора между

ножами ротора и статора s и концентрации волокнистой массы C показано на рисунке 3.18.

На рисунке видно, что самое высокое значение $W_{об.}$ наблюдается при частоте вращения ротора 2000 об/мин, величине межножевого зазора 1,5 мм и концентрации волокнистой массы 10 %.

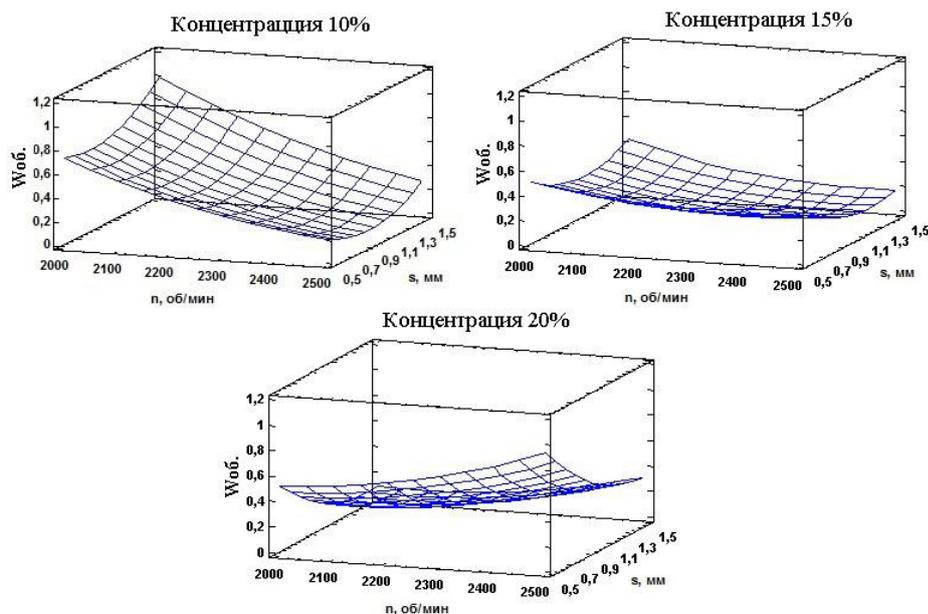


Рисунок 3.18 - Зависимость обобщенного параметра оптимизации $W_{об.}$ от частоты вращения ротора n , величины межножевого зазора s и концентрации волокнистой массы C

3.7. Сравнительный анализ процесса размола волокнистой массы с использованием различных конструкций гарнитур

Для изучения влияния конструкции гарнитуры с окружной и прямолинейной формой ножей на бумагообразующие свойства волокнистой массы и физико-механические характеристики готовой продукции во второй части эксперимента был проведен однофакторный дисперсионный анализ при найденных оптимальных решениях размола. В данном эксперименте использовались следующие виды гарнитур:

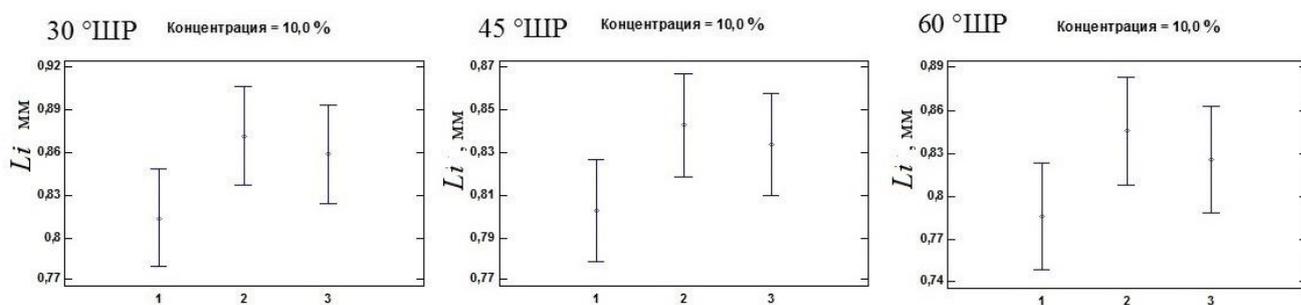
- гарнитура с окружной формой ножей;
- гарнитура секторная с прямолинейной формой ножей;
- гарнитура с прямолинейными ножами и равномерным их распределением.

Обработка экспериментальных исследований проводилась с помощью плана *Single Factor Categorical* пакета программ *STATGRAPHICS® Centurion* [101].

3.7.1 Бумагообразующие свойства волокнистой массы

3.7.1.1 Изменение средней длины волокна

Из рисунка 3.19 можно увидеть тенденцию незначительного сокращения средней длины волокна с ростом степени помола для всех видов исследуемых гарнитур при концентрации размалываемой массы 10 %. По мере увеличения концентрации размалываемой массы наблюдается увеличение средней длины волокна (см. приложение Г, рисунок Г.19).



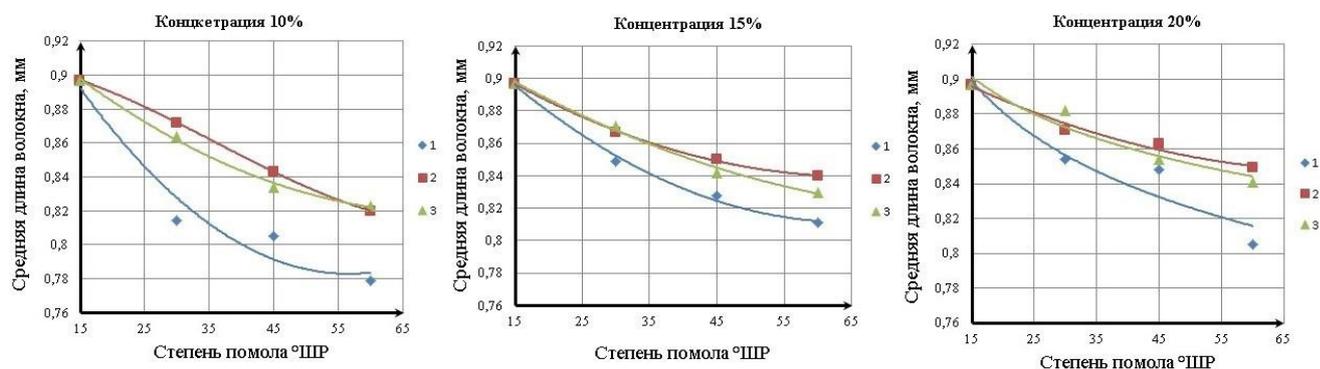
1 – гарнитура с окружной формой ножей, 2 – гарнитура секторная с прямолинейной формой ножей, 3 – гарнитура с прямолинейными ножами и равномерным их распределением

Рисунок 3.19 – Средние значения и 95 %-ные доверительные интервалы изменения средней длины волокна в зависимости от вида гарнитуры при концентрации волокнистой массы 10 %

Для наглядного представления изменения средней длины волокна в процессе размола на рисунке 3.20 представлены графики зависимости изменения средней длины волокна от роста степени помола с учетом конструктивных особенностей размалывающих гарнитур при различных концентрациях волокнистой массы.

С ростом концентрации волокнистой массы от 10 до 20 % в процессе размола наблюдается увеличение средней длины волокна при использовании всех видов конструкций гарнитур. В то же время выяснилось, что с ростом степени помола

независимо от конструкции гарнитуры наблюдается небольшое снижение средней длины волокна.



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

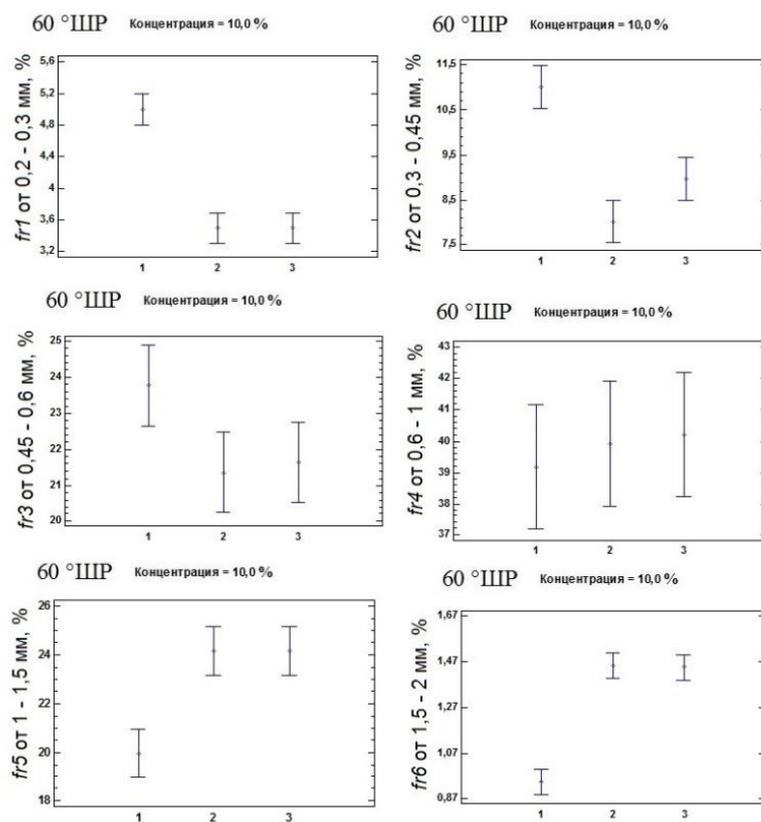
Рисунок 3.20 – Зависимость средней длины волокна от степени помола при различной концентрации волокнистой массы

Для наглядного представления влияния конструкции размалывающей гарнитуры на характер изменения средней длины волокна необходимо рассмотреть изменение фракционного состава волокнистой массы.

3.7.1.2 Изменение фракционного состава

Влияние конструктивных особенностей размалывающих гарнитур на изменение фракционного состава волокнистой массы при концентрации 10 % и степени помола 60 °ШР представлено на рисунке 3.21. Остальные случаи представлены в приложении Г, рисунки Г.20–Г.25.

Из рисунка 3.21 можно видеть, что при использовании конструкции гарнитуры с окружной формой ножей в сравнении с прямолинейной формой наблюдается незначительное снижение процентного содержания волокон у фракций *fr6*, *fr5* и *fr4*. Одновременно с этим фракции с размерами волокон *fr3*, *fr2* и *fr1* увеличивают свое процентное содержание, что в целом должно положительно влиять на однородность бумажного продукта [106].

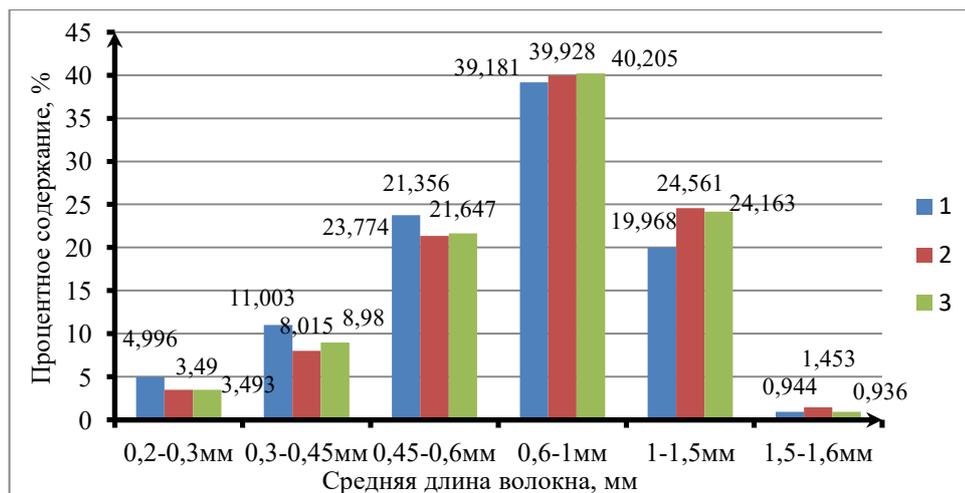


1 – гарнитура с окружной формой ножей, 2 – гарнитура секторная с прямолинейной формой ножей, 3 – гарнитура с прямолинейными ножами и равномерным их распределением

Рисунок 3.21 – Средние значения и 95 %-ные доверительные интервалы изменения длины волокон по классам фракций в зависимости от вида гарнитуры при концентрации волокнистой массы 10 %

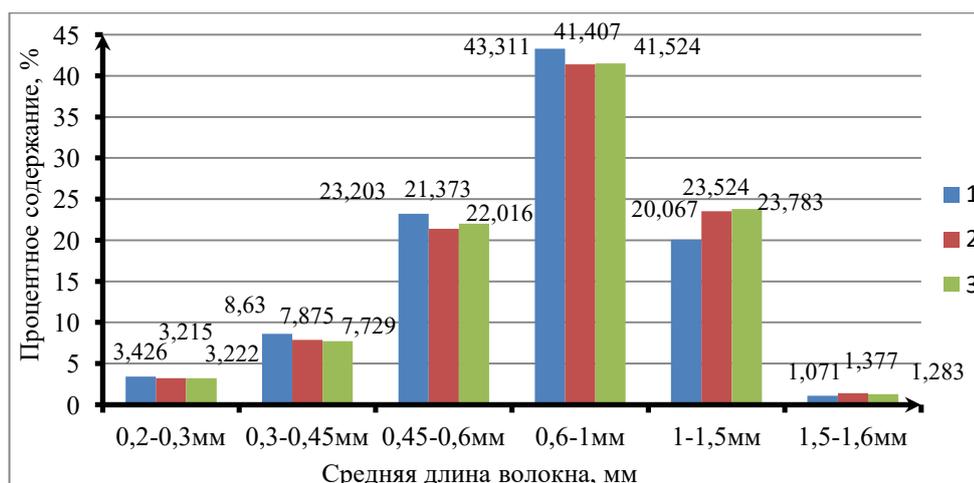
Гистограммы распределения процентного содержания средней длины волокон по классам фракций в процессе размол в зависимости от вида конструкции размалывающей гарнитуры дают более содержательную картину. Поскольку качественные зависимости гистограмм распределения процентного содержания длины волокон по классам фракций с ростом степени помола и изменением концентрации волокнистой массы носят одинаковый характер, а количественные значения имеют незначительные отличия, то далее рассмотрим случай изменения фракционного состава при степени помола 60 °ШР и концентрации волокнистой массы от 10 до 20 % (рисунки 3.22–3.24). Остальные случаи изменения процентного содержания длины волокон по классам фракций представлены в приложении Г, (рисунки Г.26–Г.28). Проанализировав гистограммы распределения процентно-

го содержания длины волокон по классам фракций на рисунках 3.22-3.24, можно отметить, что с ростом концентрации волокнистой массы от 10 до 15 % при использовании гарнитуры с окружной формой ножей наблюдается повышение процентного содержания волокон у фракций размерами от 0,2 до 1 мм. При дальнейшем росте концентрации волокнистой массы до 20 % не наблюдается существенных отличий фракционного состава для всех видов конструкций исследуемых гарнитур.



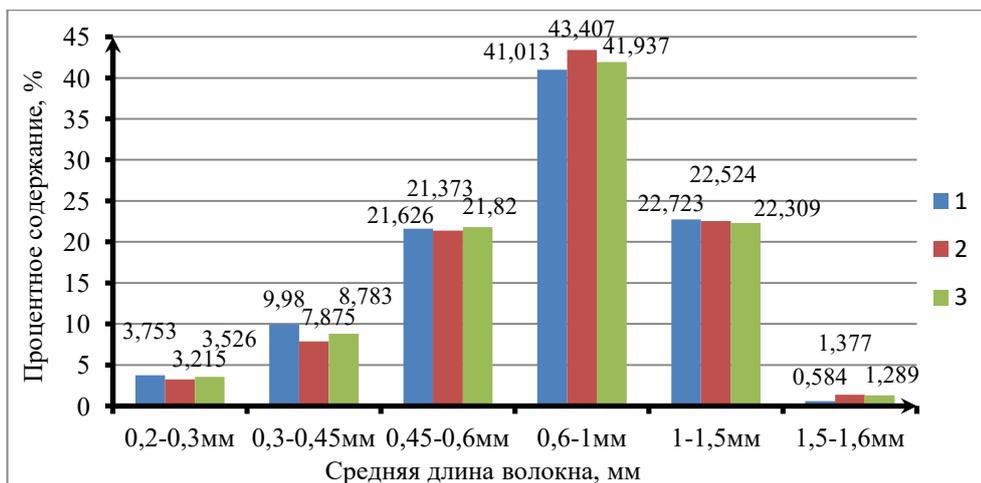
1 – гарнитура с окружной формой ножей, 2 – гарнитура секторная с прямолинейной формой ножей, 3 – гарнитура с прямолинейными ножами и равномерным их распределением

Рисунок 3.22 – Гистограмма распределения длины волокон по классам фракций при концентрации волокнистой массы 10 % и степени помола 60 °ШР



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

Рисунок 3.23 – Гистограмма распределения длины волокон по классам фракций при концентрации волокнистой массы 15 % и степени помола 60 °ШР

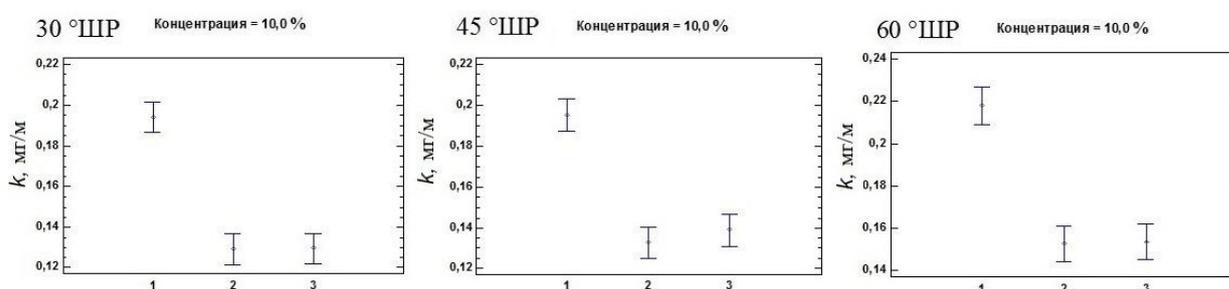


1 – гарнитура с окружной формой ножей, 2 – гарнитура секторная с прямолинейной формой ножей, 3 – гарнитура с прямолинейными ножами и равномерным их распределением

Рисунок 3.24 – Гистограмма распределения длины волокон по классам фракций при концентрации волокнистой массы 20 % и степени помола 60 °ШР

3.7.1.3 Изменение грубости волокна

Качественные характеристики изменения грубости волокна в процессе размола массы высокой концентрации с ростом степени помола носят одинаковый характер независимо от конструкции гарнитур, хотя количественные показатели отличаются. На рисунке 3.25 представлены средние значения грубости волокна в зависимости от конструкции гарнитуры при концентрации волокнистой массы 10 %. Остальные случаи представлены в приложении Г, рисунок Г.30.



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

Рисунок 3.25 – Средние значения и 95 %-ные доверительные интервалы изменения грубости волокна в зависимости от вида гарнитуры при концентрации волокнистой массы 10 %

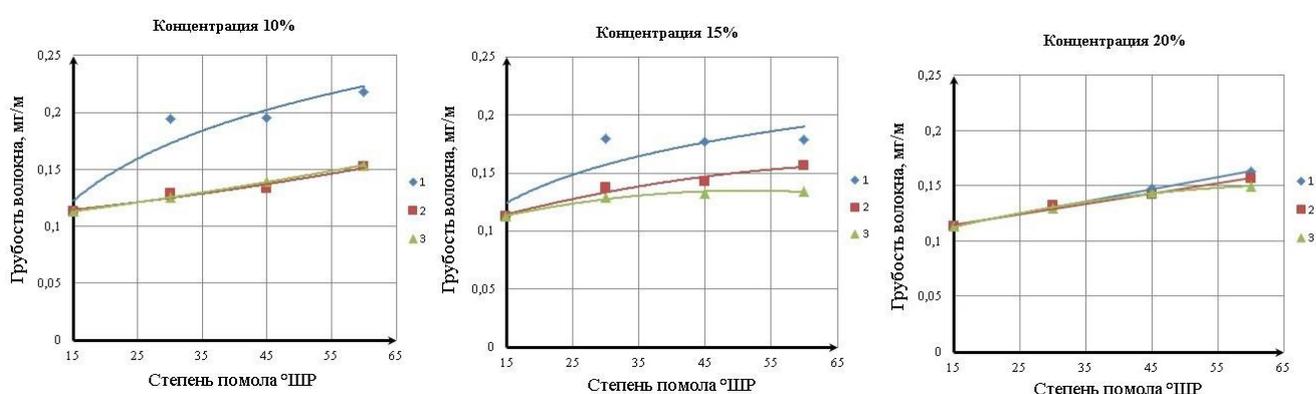
Из рисунка 3.25 видно, что с ростом степени помола наиболее высокая грубость волокна наблюдается у волокнистой массы, размолотой гарнитурой с окружной формой ножей.

Графики зависимости грубости волокна от роста степени помола при различной концентрации волокнистой массы с учетом всех исследуемых конструкций размалывающих гарнитур представлены на рисунке 3.26, из которого следует:

1. Гарнитура, имеющая окружную форму ножей, с ростом степени помола обеспечивает максимальную грубость волокна при концентрации размалываемой массы 10 %.

2. При концентрации размалываемой массы 10 % и 15 % с ростом степени помола до 60 °ШР грубость волокна в среднем на 35 % выше при использовании конструкции гарнитуры с окружной формой ножей, чем у гарнитур с прямолинейной формой ножей.

3. Для всех графиков характерно некоторое понижение грубости волокна с ростом концентрации размалываемой массы.



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

Рисунок 3.26 – Зависимость грубости волокна от степени помола при различной концентрации волокнистой массы

3.7.1.4 Изменение ширины волокна

Размол волокнистой массы при концентрации 10 % показывает, что с ростом степени помола наблюдается слабо выраженная тенденция увеличения ширины

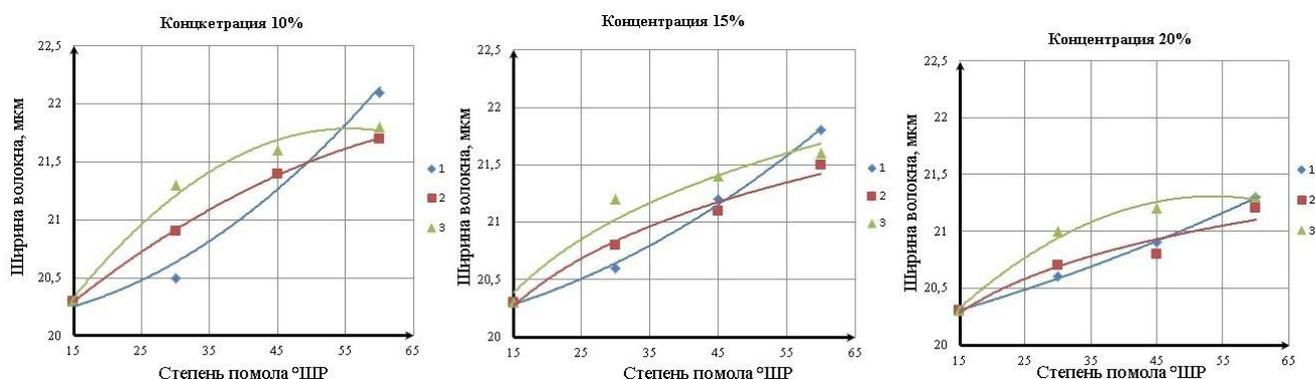
волокна для всех видов исследуемых гарнитур (см. рисунок 3.27). Изменения ширины волокна при более высоких концентрациях приведены в приложение Г, рисунок Г.29.



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

Рисунок 3.27 – Средние значения и 95 %-ные доверительные интервалы изменения ширины волокна в зависимости от вида гарнитуры при концентрации волокнистой массы 10 %

На рисунке 3.28 показаны графики зависимости изменения ширины волокна от роста степени помола при различной концентрации волокнистой массы с учетом конструкции размалывающих гарнитур. Из рисунка видно, что с увеличением концентрации размалываемой массы от 10 до 15 % наибольшая ширина волокна с ростом степени помола до 45 °ШПР наблюдается при использовании гарнитуры с прямолинейными ножами и равномерным их распределением. Дальнейший рост степени помола до 60 °ШПР показывает, что волокна становятся шире при использовании конструкции гарнитуры с окружной формой ножей.

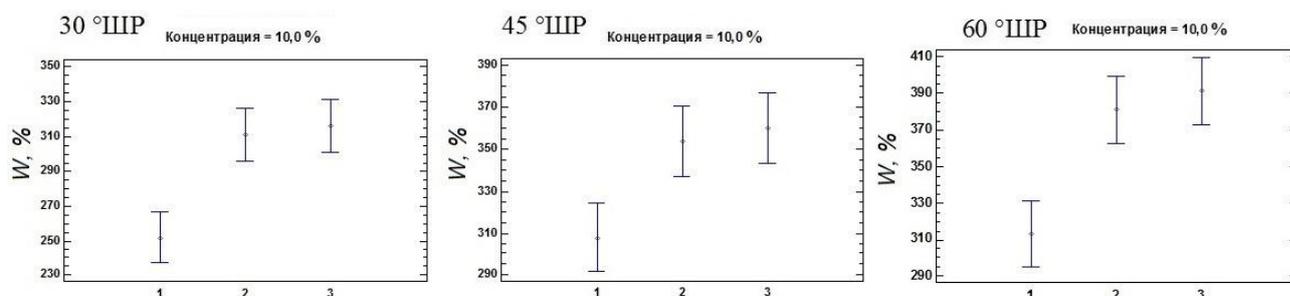


1 – гарнитура с окружной формой ножей, 2 – гарнитура секторная с прямолинейной формой ножей, 3 – гарнитура с прямолинейными ножами и равномерным их распределением

Рисунок 3.28 – Зависимость ширины волокна от степени помола, при различной концентрации волокнистой массы

3.7.1.5 Изменение водоудерживающей способности

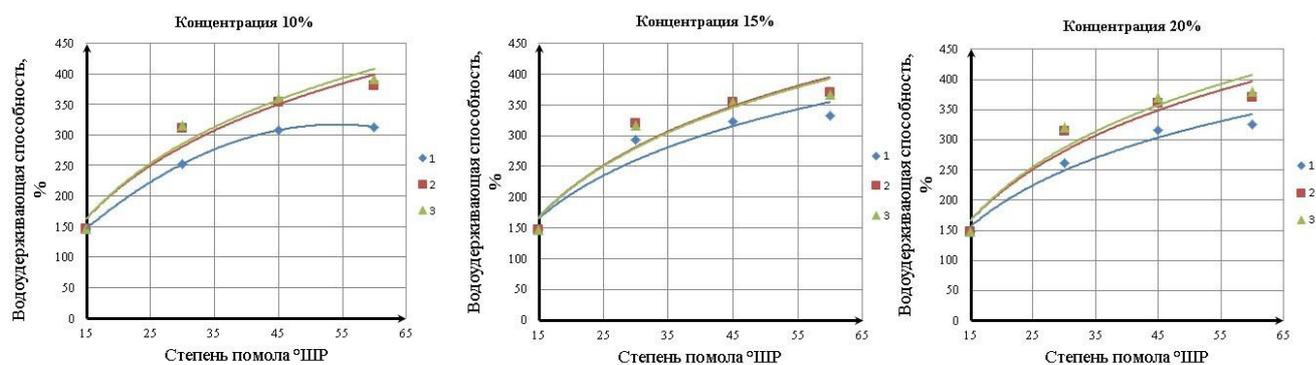
При использовании гарнитуры авторского исполнения наблюдается повышение водоудерживающей способности волокнистой массы с ростом степени помола (см. рисунок 3.29).



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

Рисунок 3.29 – Средние значения и 95 %-ные доверительные интервалы изменения водоудерживающей способности в зависимости от вида гарнитуры при концентрации волокнистой массы 10 %

Для наглядного представления изменения показателя водоудерживающей способности на рисунке 3.30 представлены графики зависимости водоудерживающей способности от роста степени помола при различной концентрации волокнистой массы с учетом всех исследуемых конструкций размалывающих гарнитур.



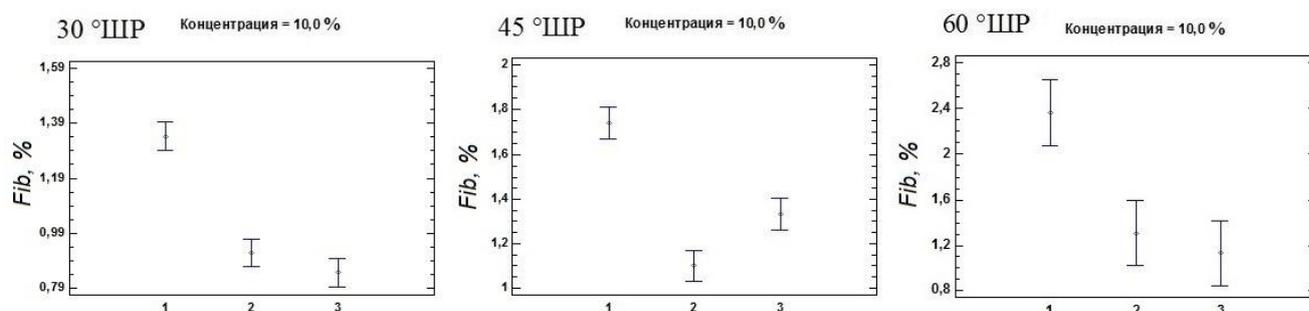
1 – гарнитура с окружной формой ножей, 2 – гарнитура секторная с прямолинейной формой ножей, 3 – гарнитура с прямолинейными ножами и равномерным их распределением

Рисунок 3.30 – Зависимость водоудерживающей способности от степени помола при различной концентрации волокнистой массы

Водоудерживающая способность увеличивается с ростом степени помола и концентрации размалываемой массы при использовании всех видов исследуемых гарнитур. Что касается количественных зависимостей, то у конструкции гарнитуры с окружной формой ножей они ниже, что положительно должно сказаться при отливе бумаги на сетке бумагоделательной машины.

3.7.1.6 Изменение индекса фибрилляции

Изменение показателя индекса фибрилляции влияет на физико-механические характеристики бумажных отливок. С увеличением индекса фибрилляции все исследуемые физико-механические характеристики у бумажных отливок возрастают. По нашему мнению, гарнитура с окружной формой ножей за счет своих конструктивных особенностей обеспечивает более высокое внутреннее фибриллирование волокнам в результате чего наблюдается повышение показателя индекса фибрилляции.



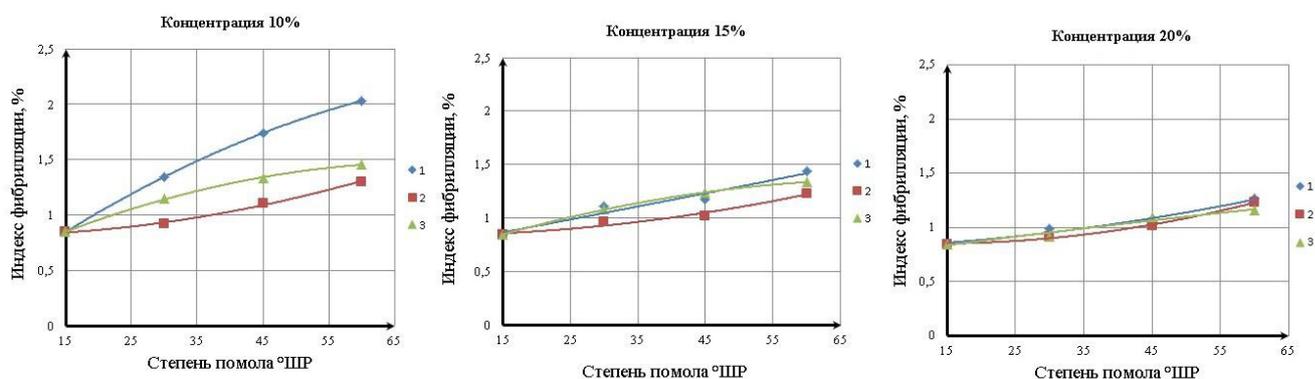
1 – гарнитура с окружной формой ножей, 2 – гарнитура секторная с прямолинейной формой ножей, 3 – гарнитура с прямолинейными ножами и равномерным их распределением

Рисунок 3.31 – Средние значения и 95 %-ные доверительные интервалы изменения индекса фибрилляции в зависимости от вида гарнитуры при концентрации волокнистой массы 10 %

Сравнительный анализ экспериментальных данных, полученных при использовании гарнитур с окружной и прямолинейной формой ножей при концентрации

размалываемой массы 10 % показывает, что с ростом степени помола индекс фибрилляции возрастает при использовании всех конструкций размалывающих гарнитур (см. рисунок 3.31). В то же время конструкция гарнитуры с окружными ножами при равных степенях помола обеспечивает более высокие количественные значения показателя индекса фибрилляции в сравнении с гарнитурами с прямолинейной формой ножей.

Графики зависимости индекса фибрилляции от роста степени помола, при различной концентрации волокнистой массы с учетом всех исследуемых конструкций размалывающих гарнитур представлены на рисунке 3.32.



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

Рисунок 3.32 – Зависимость индекса фибрилляции от степени помола при различной концентрации волокнистой массы

По результатам рисунка 3.32 можно сделать следующие выводы:

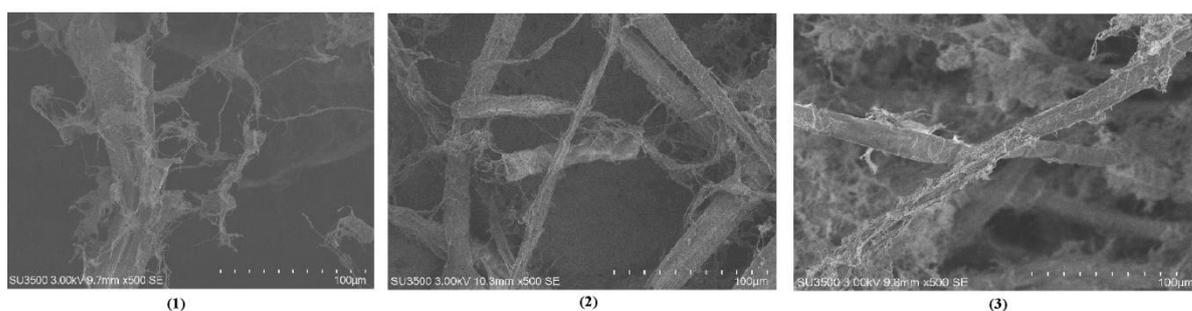
1. При размоле волокнистой массы с концентрацией 10 % наблюдается максимальное значение показателя индекса фибрилляции при использовании гарнитуры с окружной формой ножей. Количественные значения индекса фибрилляции при использовании традиционных видов гарнитур с прямолинейной формой ножей при равных степенях помола значительно ниже, чем при использовании гарнитуры с окружной формой ножей.

2. С увеличением концентрации размалываемой массы до 15 % у гарнитуры с окружной формой ножей при равных степенях помола значение индекса фибрил-

ляции практически совпадает со значениями, получаемыми при использовании традиционной гарнитуры с прямолинейными ножами и равномерным их распределением.

3. При размоле волокнистой массы с концентрацией 20 % для всех видов используемых гарнитур количественное значение индекса фибрилляции при равных степенях помола совпадает.

При использовании конструкции гарнитуры с окружной формой ножей волокна более фибриллированы. Снимки электронной микроскопии, полученные с помощью микроскопа *SEM Hitachi SU 3500*, иллюстрирующие эффективность разработки волокон при использовании гарнитуры с окружной формой ножей, представлены на рисунке 3.33.



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

Рисунок 3.33 – Снимки электронной микроскопии волокон (500-кратное увеличение), размолотых при концентрации волокнистой массы 10 % до 60 °ШР

Из рисунка видно, что после процесса размола при использовании гарнитуры с окружной формой ножей целлюлозное волокно имеет длинные «распушенные» фибриллы. У волокон, размолотых при использовании традиционных видов гарнитур с прямолинейной формой ножей, тоже имеются фибриллы, однако они значительно короче и менее «распушены».

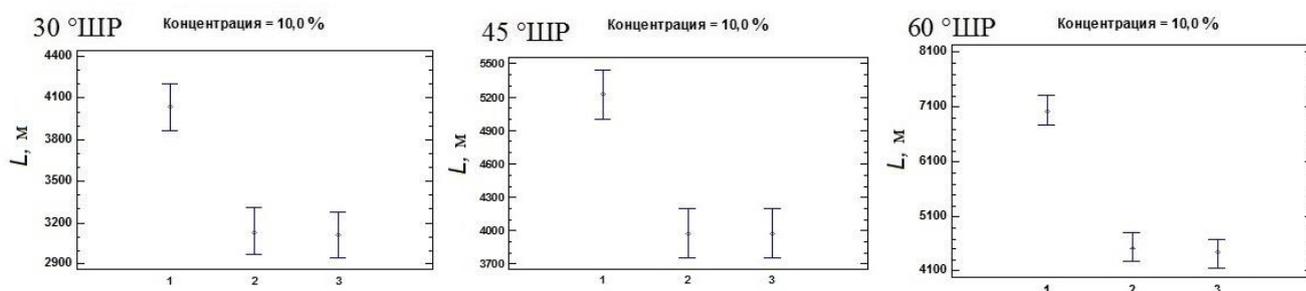
В связи с тем, что с увеличением концентрации размалываемой массы при использовании различных видов конструкций размалывающих гарнитур имеются

отличия бумагообразующих свойств, необходимо рассмотреть, каким образом изменяются физико-механические характеристики бумажных отливок.

3.7.2 Физико-механические характеристики бумажных отливок

3.7.2.1 Изменение разрывной длины

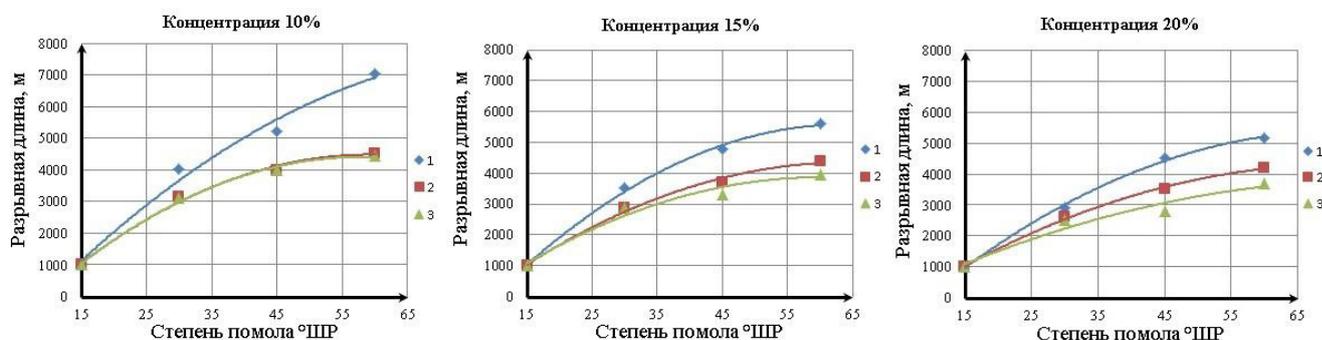
При концентрации размалываемой массы 10 % с ростом степени помола наблюдается увеличение разрывной длины при использовании всех конструкций размалывающих гарнитур (см. рисунок 3.34). Аналогичная картина наблюдается с ростом концентрации размалываемой массы (см. приложение Г, рисунок Г.33).



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

Рисунок 3.34 – Средние значения и 95 %-ные доверительные интервалы изменения разрывной длины в зависимости от вида гарнитуры при концентрации волокнистой массы 10 %

Графики зависимости разрывной длины от роста степени помола, при различной концентрации волокнистой массы с учетом всех исследуемых конструкций размалывающих гарнитур представлены на рисунке 3.35.



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

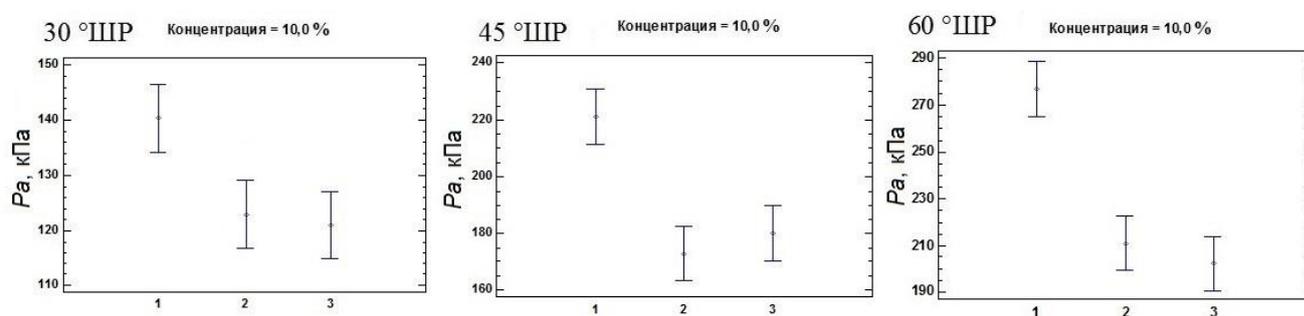
Рисунок 3.35 – Зависимость разрывной длины от степени помола, при различной концентрации волокнистой массы

С ростом степени помола до 60 °ШР гарнитура, имеющая окружную форму ножей, при размоле волокнистой массы концентрацией от 10 до 20 % имеет более высокие количественные показатели разрывной длины, в том числе:

- по сравнению с секторной гарнитурой с прямолинейной формой ножей на 32 %.
- по сравнению с гарнитурой с прямолинейными ножами и равномерным их распределением на 27 %.

3.7.2.2 Изменение сопротивления продавливанию

На рисунке 3.36 представлены данные показателя сопротивления продавливанию для каждой исследуемой размалывающей гарнитуры при концентрации волокнистой массы 10 % с различной степенью помола. Из рисунка видно, что с ростом степени помола волокнистой массы наблюдается увеличение сопротивления продавливанию, причем гарнитура с окружными ножами обеспечивает более высокие значения данного показателя. Изменение показателя сопротивления продавливанию при других концентрациях размалываемой массы представлены в приложении Г, рисунок Г.34.



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

Рисунок 3.36 – Средние значения и 95 %-ные доверительные интервалы изменения сопротивления продавливанию в зависимости от вида гарнитуры при концентрации волокнистой массы 10 %

Графики зависимости сопротивления продавливанию от роста степени помола при различной концентрации волокнистой массы с учетом всех исследуемых конструкций размалывающих гарнитур представлены на рисунке 3.37, по результатам которого можно сделать следующие выводы:

- при концентрациях размалываемой массы 10 % и 15 %, гарнитура с окружными ножами в сравнении с традиционными гарнитурами с прямолинейной формой ножей при равных степенях помола обеспечивает более высокие значения показателя сопротивления продавливанию;
- при размоле волокнистой массы с концентрацией 20 % для всех видов исследуемых гарнитур показатель сопротивления продавливанию с ростом степени помола количественно равен.



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

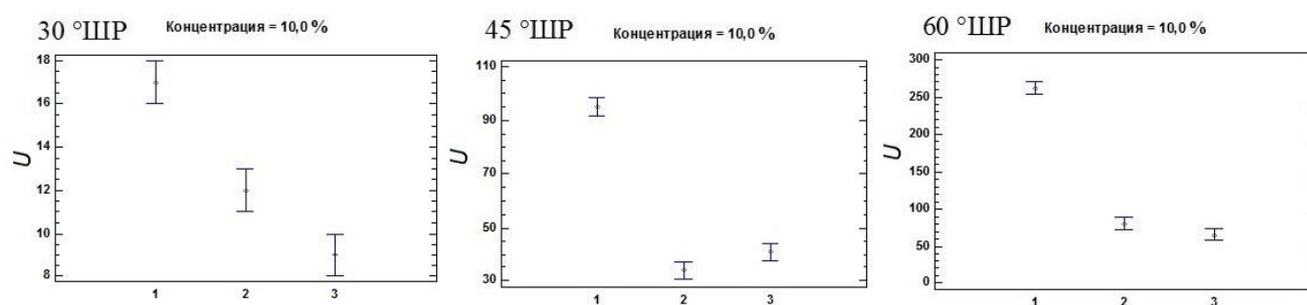
Рисунок 3.37 – Зависимость сопротивления продавливанию от степени помола при различной концентрации волокнистой массы

3.7.2.3 Изменение сопротивления излому

Качественные характеристики сопротивления излому у бумажных отливок в зависимости от конструкции гарнитуры при концентрации размалываемой массы

от 10 до 20 % имеют одинаковый характер, однако количественные показатели отличаются. Наиболее высокие показатели сопротивления излому наблюдаются при использовании конструкции гарнитуры с окружной формой ножей (см. приложение Г, рисунок Г.35).

На рисунке 3.38 представлены данные сопротивления излому для каждой исследуемой размалывающей гарнитуры при концентрации волокнистой массы 10 %. Из рисунка видно, что с ростом степени помола наблюдается увеличение показателя сопротивления излому для всех видов исследуемых гарнитур.



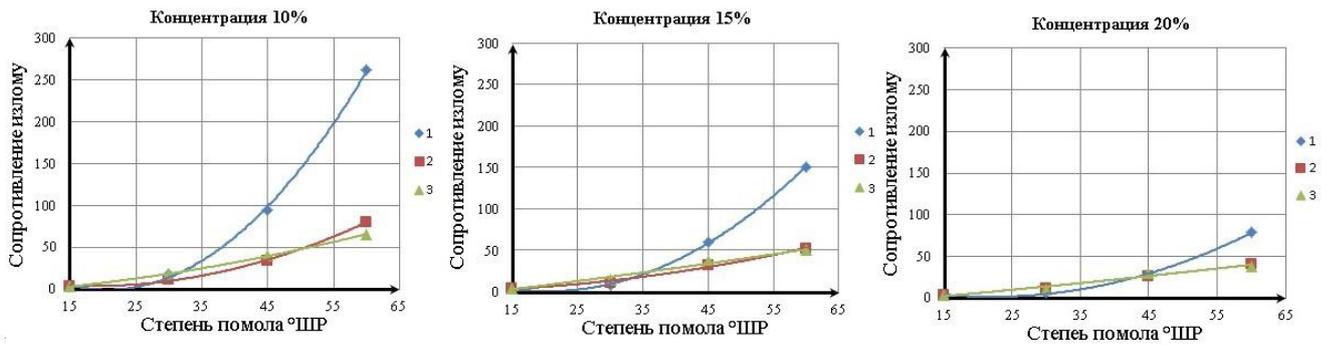
1 – гарнитура с окружной формой ножей, 2 – гарнитура секторная с прямолинейной формой ножей, 3 – гарнитура с прямолинейными ножами и равномерным их распределением

Рисунок 3.38 – Средние значения и 95 %-ные доверительные интервалы изменения сопротивления излому в зависимости от вида гарнитуры при концентрации волокнистой массы 10 %

Графики зависимости сопротивления излому от роста степени помола, при различной концентрации волокнистой массы с учетом всех исследуемых конструкций размалывающих гарнитур представлены на рисунке 3.39, по результатам которого можно сделать следующие выводы:

- гарнитура с окружной формой ножей в сравнении с прямолинейными ножами обеспечивает более высокие значения показателя сопротивления излому у бумажных отливок, сформированных из волокнистой массы, размолотой при концентрации 10 % и 15 %.

- при концентрации размалываемой массы 20 % значения показателя сопротивления излому, независимо от конструкции размалывающей гарнитуры, практически количественно равны;

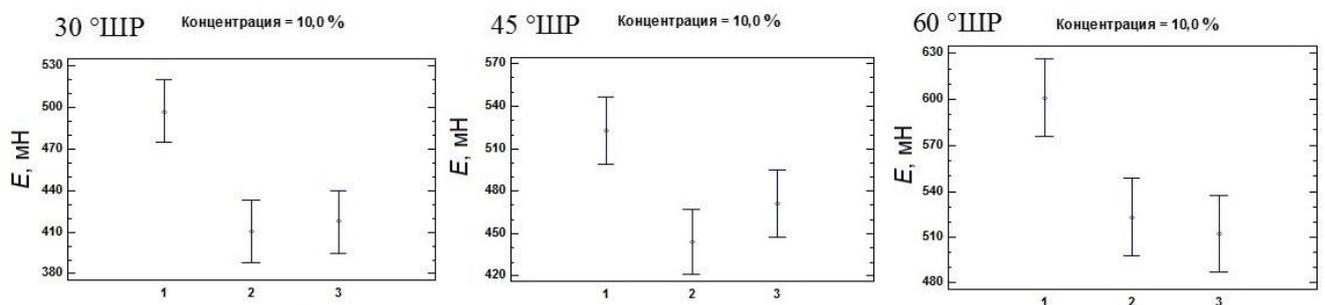


1 – гарнитура с окружной формой ножей, 2 – гарнитура секторная с прямолинейной формой ножей, 3 – гарнитура с прямолинейными ножами и равномерным их распределением

Рисунок 3.39 – Зависимость сопротивления излому от степени помола при различной концентрации волокнистой массы

3.7.2.4 Изменение сопротивления раздиранию

На рисунке 3.40 представлены данные сопротивления раздиранию для каждой исследуемой размалывающей гарнитуры при концентрации волокнистой массы 10 %. Из рисунка видно, что при равных степенях помола конструкция гарнитуры с окружными ножами в сравнении с прямолинейными ножами обеспечивает более высокие значения сопротивления раздиранию. Характеристики сопротивления раздиранию при других концентрациях волокнистой массы представлены в приложении Г, рисунок Г.36.

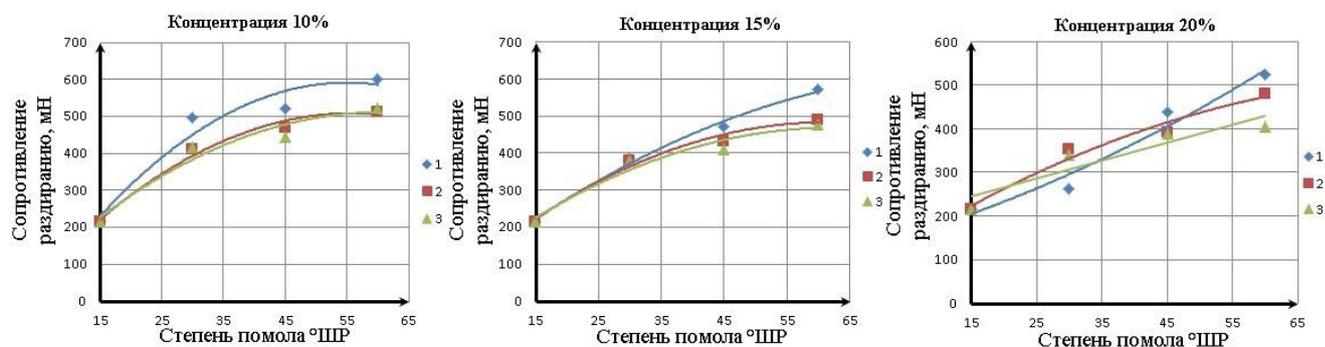


1 – гарнитура с окружной формой ножей, 2 – гарнитура секторная с прямолинейной формой ножей, 3 – гарнитура с прямолинейными ножами и равномерным их распределением

Рисунок 3.40 – Средние значения и 95 %-ные доверительные интервалы изменения сопротивления раздиранию в зависимости от вида гарнитуры при концентрации волокнистой массы 10 %

Графики зависимости сопротивления раздиранию от роста степени помола при различной концентрации волокнистой массы с учетом всех исследуемых конструкций размалывающих гарнитур представлены на рисунке 3.41, по результатам которого можно сделать следующие выводы:

- при концентрациях размалываемой массы 10 % и 15 % показатель сопротивления раздиранию при использовании гарнитуры с окружной формой ножей в сравнении с прямолинейными ножами имеет более высокое значение;
- при концентрации размалываемой массы 20 % конструкция гарнитуры с окружными ножами обеспечивает более высокие значения показателя сопротивления раздиранию при степени помола 60 °ШР.



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

Рисунок 3.41 – Зависимость сопротивления раздиранию от степени помола при различной концентрации волокнистой массы

3.8 Факторный анализ выходных параметров

При регрессионном анализе процесса размола волокнистых полуфабрикатов высокой концентрации исследовалось влияние технологических и конструктивных факторов размольной установки на выходные параметры. При этом не всегда в полной мере давалась оценка взаимосвязи исследуемых выходных параметров между собой. Учитывая достаточно большое количество выходных параметров, в диссертационной работе представляется целесообразным провести факторный анализ структуры связей между выходными параметрами.

Факторный анализ ориентирован на объяснение корреляций между выходными параметрами (признаками) путем выделения латентных факторов, скрытых в структуре экспериментальных данных [103, 110].

Полагаем, что состояние изучаемого объекта характеризуется выходными параметрами Y_1, Y_2, \dots, Y_m . Их дисперсии и ковариации образуют $m \times m$ матрицу $V = \{c_{ij}\}$ с дисперсиями на главной диагонали (при $i = j$) и ковариациями вне главной диагонали (при $i \neq j$). Наличие ковариаций между выходными параметрами указывает на существование общих свойств, в большей или меньшей степени присущих выходным параметрам. Эти общие свойства называются простыми факторами. Задача факторного анализа заключается в построении модели в виде линейной регрессии на основании информации, заключенной в ковариационной матрице V :

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

В выражении 3.10 переменные f_j – простые факторы. Коэффициенты l_{ij} называются нагрузкой j -го фактора в i -й переменной, t – это число латентных факторов. Слагаемые ε_i – остатки, представляющие собой источники отклонений, действующие только на Y_i . Они называются специфическими факторами. Дисперсии остатков обозначим через v_i . На число простых факторов накладывается ограничение, обусловленное числом степеней свободы $(m + t) < (m - t)^2$

Таким образом, факторная модель (3.10) содержит в себе следующую основную гипотезу факторного анализа: множество коррелированных переменных Y_i ($i = 1, 2, \dots, m$) можно описать меньшим числом простых факторов f_j ($j = 1, 2, \dots, t$) и множеством независимых остатков ε_i ($i = 1, \dots, m$).

Сформируем матрицу нагрузок $L = \{l_{ij}\}$, элементами которой являются факторные нагрузки, и диагональную матрицу $V = \{v_i\}$ с остаточными дисперсиями на диагонали. Из выражения (3.10) следует, что ковариационная матрица может быть выражена через нагрузки и остаточные дисперсии:

$$V = LL^* + V. \quad (3.11)$$

Где L^* - операция транспонирования матрицы L .

Состоятельные и эффективные оценки L и V получаются по методу максимального правдоподобия. На практике обычно используются приближенные методы расчетов. Одним из самых простых и в то же время эффективных методов оценки факторных нагрузок является итерационный метод. Итерационный процесс относительно быстро сходится к оценкам, близким к оценкам максимального правдоподобия и достаточным для многих прикладных целей.

Обратим внимание на важную особенность выражения (3.11). При умножении L справа на любую ортогональную матрицу размера $t \times t$ произведение LL^* не изменяется. Следствием этого является существование бесчисленного множества решений, удовлетворяющих равенству (3.11) и равноценных со статистической точки зрения. Поиск наилучшей модели (3.10) проводится 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 простые факторы приобретают физическую содержательность.

В данном исследовании факторные нагрузки вычислялись методами итеративных общностей (минимальных остатков, *minres*) и квадратов коэффициентов множественной корреляции факторов (*multiple R²*) с помощью пакета программы *STATGRAPHICS[®] Centurion*. Для ортогонального преобразования факторных нагрузок использовался критерий «варимакс», при котором вращение пространства простых факторов осуществляется с таким расчетом, чтобы наибольшее число элементов в столбцах матрицы нагрузок оказалось близким к 0 или 1.

Как было сказано ранее, между выходными параметрами (бумагообразующие свойства волокнистой массы и физико-механические характеристики бумажных оливок) существуют корреляционные связи. Многие коэффициенты корреляции данных связей статистически значимы, хотя и не велики по абсолютной величине [103, 111].

Существование корреляционных связей между выходными параметрами обусловлено различными факторами. Например, при размоле волокнистой массы степень помола будет являться одним из факторов, определяющим всю суммар-

ную изменчивость как бумагообразующих свойств волокон, так и физико-механических характеристик бумажных отливок. Если это единственный фактор, который влияет на все выходные параметры, то коэффициенты корреляции будут близки к единице. Но если коэффициенты корреляции содержат больше факторов, объясняющих их изменчивость, тогда матрица корреляции может содержать более сложную комбинацию корреляций.

Факторный анализ позволяет проанализировать матрицу корреляции между выходными параметрами на предмет количества скрытых (латентных) факторов, необходимых для объяснения наблюдаемых корреляции.

В данном исследовании факторный анализ проводился для семнадцати показателей выходных параметров (таблица 3.9). Матрица корреляции представлена в приложении Д.

На рисунке 3.42 показан график собственных чисел матрицы корреляции в порядке убывания относительно их факторов. Горизонтальная линия отделяет статистически значимые собственные числа от случайных чисел. Числа, находящиеся выше горизонтальной линии, необходимо включить в анализ. Это говорит о том, что только два скрытых фактора определяют существенную долю суммарной дисперсии анализируемых показателей. Следовательно, на этой стадии анализа имеет смысл рассмотрение двухфакторной модели структуры корреляции.

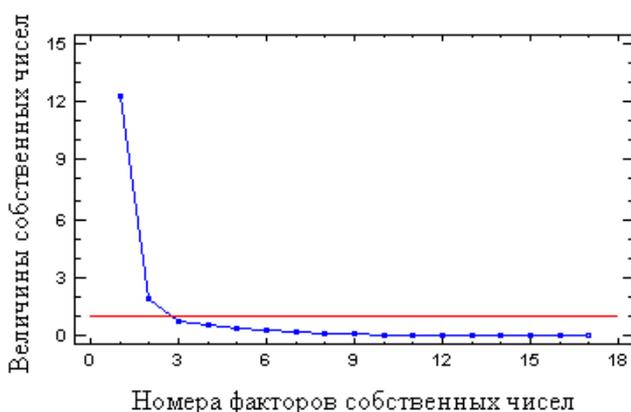


Рисунок 3.42 – Собственные числа матрицы корреляции (в порядке их убывания)

Факторные нагрузки для двухфакторной модели приведены в таблице 3.9. Первый из выделенных факторов обуславливает около 72 % дисперсии наблю-

давшихся показателей, второй – около 11 %. Общая доля суммарной дисперсии всех семнадцати наблюдаемых показателей, обусловленная влиянием двух скрытых факторов, составляет 83 % от их полной дисперсии. Факторные нагрузки для двухфакторной модели представлены в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Факторные нагрузки для двухфакторной модели

Показатель выходных параметров		Факторная нагрузка		Общий вклад
		Фактор 1	Фактор 2	
Y_1	Средняя длина волокна	-0,735	-0,247	0,602
Y_2	Средняя ширина волокна, мкм	0,908	0,150	0,848
Y_3	Индекс фибрилляции, %	0,971	-0,104	0,954
Y_4	Водоудерживающая способность, %	0,801	0,522	0,916
Y_5	Грубость волокна, мг/м	0,195	0,818	0,708
Y_6	Фракция от 0,2 – 0,3 мм, %	0,956	-0,063	0,918
Y_7	Фракция от 0,3 – 0,45 мм, %	0,910	-0,036	0,829
Y_8	Фракция от 0,45 – 0,6 мм, %	0,881	0,204	0,818
Y_9	Фракция от 0,6 – 1 мм, %	-0,119	0,767	0,603
Y_{10}	Фракция от 1 - 1,5 мм, %	-0,906	-0,195	0,859
Y_{11}	Фракция от 1,5 - 2 мм, %	-0,706	-0,561	0,814
Y_{12}	Мелочь по площади, %	0,936	0,199	0,917
Y_{13}	Разрывная длина, м	0,809	-0,262	0,724
Y_{14}	Сопротивление продавливанию, кПа	0,917	0,299	0,930
Y_{15}	Сопротивление раздиранию, мН	0,952	0,201	0,948
Y_{16}	Сопротивление излому	0,915	0,209	0,882
Y_{17}	Степень помола, °ШР	0,878	0,342	0,889
Доля от суммарной дисперсии, %		72,202	11,126	83,328

Расположение наблюдаемых показателей в двухмерном факторном пространстве показано на рисунке 3.43.

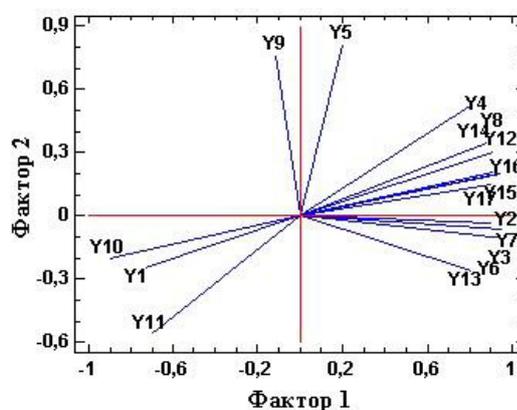


Рисунок 3.43 – Расположение контролируемых показателей в пространстве двух скрытых факторов

Из рисунка 3.43 видно, что наблюдаемые показатели разбились на две группы вдоль координатных осей для каждого из факторов. Первый фактор, расположенный на оси абсцисс, характеризует изменчивость таких показателей, как степень помола, большая часть фракционного состава, физико-механические характеристики, средняя длина волокна, ширина волокна, индекс фибрилляции, водоудерживающая способность и содержание мелочи. Второй фактор, расположенный на оси абсцисс, характеризует изменчивость таких показателей как фракция с размерами волокон от 0,6–1 мм и грубость волокна.

Природа первого фактора может быть связана со степенью фибриллирования волокон, так как данный фактор коррелирует между собой такие важные бумагообразующие свойства волокнистой массы, как степень помола, длина волокна, индекс фибрилляции, водоудерживающая способность, ширина волокна и большая часть фракционного состава. Причем длинноволокнистые фракции и средняя длина волокна объединены в отдельный кластер с отрицательной корреляцией. Второй кластер имеет положительную корреляцию и объединяет коротковолокнистые фракции, индекс фибрилляции, степень помола, водоудерживающую способность и физико-механические характеристики.

Природу второго фактора сложно интерпретировать, поскольку он обуславливает 11 % изменчивости от общей дисперсии наблюдавшихся показателей и объединяет такие выходные параметры, как фракцию с размерами волокон от 0,6–1 мм и грубость волокна. Можно сделать предположение, что природа данного фактора связана с морфологическими свойствами волокна, однако оно нуждается в дальнейшем подтверждении.

Таким образом, при проведении исследований процесса размола волокнистой массы высокой концентрации с использованием конструкции гарнитуры с окружающей формой ножей можно с высокой долей вероятности утверждать, что наблюдаемые выходные показатели могут быть объединены по степени фибриллирования волокон, которая в значительной степени определяет прочностные свойства бумаги.

Выводы к третьей главе

По результатам экспериментальных исследований процесса размола сульфатной блененой целлюлозы из лиственных пород можно сделать следующие выводы:

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

– с ростом частоты вращения ротора от 2000 до 2500 об/мин волокно практически не подвергается рубке, что обеспечивает сохранность его исходной длины. Анализ фракционного состава показывает увеличение процентного содержания фракций с размерами волокон от 1 до 1,5 мм и от 0,6 до 1 мм. Наблюдается увеличение грубости и ширины волокна, возрастает водоудерживающая способность волокнистой массы. При концентрации размалываемой массы 20 %, рост частоты вращения ротора обуславливает увеличение показателей сопротивления продавливанию и излому;

– с увеличением зазора между ножами ротора и статора процесс размола характеризуется интенсивным фибриллированием волокна, о чем свидетельствуют высокие значения показателя индекса фибрилляции. При концентрации размалываемой массы 10 % с увеличением величины зазора наблюдается увеличение показателей разрывной длины, сопротивления продавливанию и сопротивления раздиранию;

– увеличение концентрации волокнистой массы при размоле на гарнитуре с окружными ножами обеспечивает сохранность средней длины волокна, что подтверждается и результатами фракционного анализа. При этом, с ростом концентрации наблюдается увеличение процентного содержания фракции от 1 до 1,5 мм. Индекс фибрилляции волокон снижается с увеличением концентрации массы, что, на наш взгляд, объясняется повышением доли скрученных волокон при размоле на концентрациях 15 % и 20 %, что подтверждается в работах [107].

2. Полученные при оптимизации процесса размола данные говорят о том, что при использовании конструкции гарнитуры с окружной формой ножей наиболее высокие показатели физико-механических характеристик наблюдаются у бумажных отливок, сформированных из волокнистой массы, размолотой при концентрации 10 %, частоте вращения ротора 2000 об/мин и величине зазора между ножами ротора и статора 1,5 мм.

3. Проведенный для оценки влияния рисунка гарнитуры в процессе размола массы высокой концентрации на бумагообразующие свойства и физико-механические характеристики бумажных отливок однофакторный эксперимент показал:

– при использовании всех видов конструкций гарнитур с ростом концентрации размалываемой волокнистой массы от 10 до 20 % наблюдается увеличение средней длины волокна;

– при использовании конструкции гарнитуры с окружной формой ножей с ростом концентрации размалываемой массы от 10 до 15 % наблюдается повышение процентного содержания волокон у фракций размерами от 0,2 до 1 мм;

– при концентрации размалываемой массы 10 и 15 % с ростом степени помола до 60 °ШР грубость волокна в среднем на 35 % выше при использовании конструкции гарнитуры с окружной формой ножей, чем у гарнитур с прямолинейной формой ножей;

– наибольшая ширина волокна при концентрации размалываемой массы от 10 до 15 % с ростом степени помола до 45 °ШР наблюдается с использованием секторной гарнитуры с прямолинейной формой ножей. Однако дальнейший рост степени помола до 60 °ШР показывает, что волокна становятся шире при использовании конструкции гарнитуры с окружной формой ножей;

– при использовании всех видов конструкций гарнитур с ростом концентрации размалываемой массы от 10 до 20 %, наблюдается увеличение водоудерживающей способности. Что касается количественных зависимостей, то у конструкции гарнитуры с окружной формой ножей они ниже в среднем на 40 %;

– максимальное значение индекса фибрилляции наблюдается при концентрации размалываемой массы 10 % с использованием конструкции гарнитуры с окружной формой ножей. При размоле волокнистой массы с концентрацией 20 % для всех видов используемых гарнитур количественное значение индекса фибрилляции с ростом степени помола совпадает;

– с ростом концентрации размалываемой массы от 10 до 20 % конструкция гарнитуры с окружной формой ножей обеспечивает более высокие показатели разрывной длины, в том числе: по сравнению с секторной гарнитурой с прямолинейной формой ножей на 32 %, по сравнению с гарнитурой с прямолинейными ножами и равномерным их распределением на 27 %.

– при концентрации размалываемой массы 10 % и 15 % гарнитура с окружными ножами в сравнении с традиционными гарнитурами с прямолинейной формой ножей при равных степенях помола обеспечивает более высокие значения показателя сопротивления продавливанию. При размоле волокнистой массы с концентрацией 20 % для всех видов исследуемых гарнитур показатель сопротивления продавливанию с ростом степени помола количественно равен. Примерно аналогичная картина наблюдается для показателей сопротивления излому и раздиранию.

Проведенный на выявление корреляционных связей между исследуемыми выходными параметрами факторный анализ показал, что при размоле волокнистых полуфабрикатов высокой концентрации степень фибрилляции волокон оказывает важную роль на бумагообразующие свойства массы и физико-механические характеристики бумажных отливок. По результатам исследования выяснилось, что степень фибрилляции волокон обуславливает 72 % изменчивости всех наблюдаемых показателей от их полной дисперсии.

ГЛАВА 4. Оценка технико–экономической эффективности процесса размола для различных конструкций гарнитур

Оценка экономической эффективности процесса получения волокнистого полуфабриката при размоле с использованием гарнитуры с окружной формой ножей выполнена для полученных оптимальных значений процесса размола:

- частота вращения ротора $n = 2000$ об/мин;
- величина зазора между ножами ротора и статора $s = 1,5$ мм;
- концентрация волокнистой массы $C = 10$ %.

Расчет приведен в сравнении с данными, полученными при использовании секторной гарнитуры с прямолинейной формой ножей и гарнитуры с прямолинейными ножами и равномерным их распределением.

Экономический эффект при использовании гарнитуры с окружной формой ножей должен обеспечивать:

- а.) снижение времени и удельного расхода электроэнергии на размол;
- б.) экономию электроэнергии в денежном выражении.

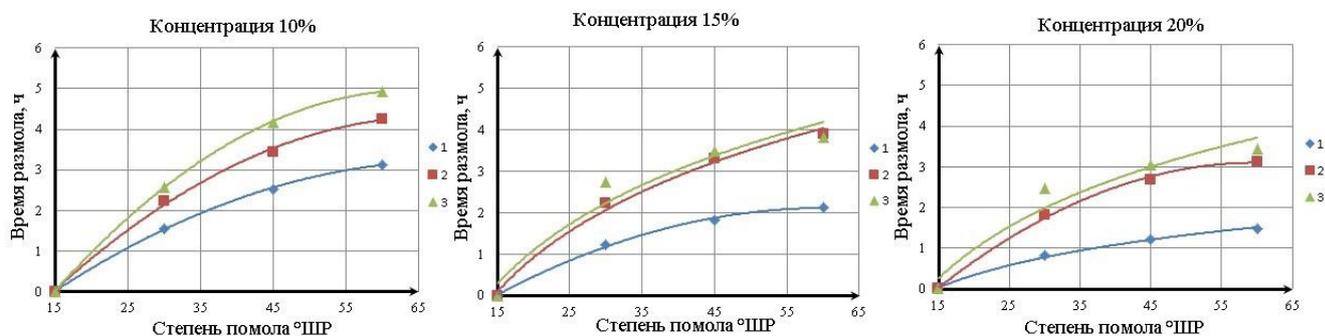
По ходу проведения эксперимента для каждого пропуска волокнистой массы через зону размола фиксировалось время до достижения требуемой степени помола. Данная процедура осуществлялась для всех конструкций гарнитур, используемых в эксперименте.

На рисунке 4.1 представлены графики зависимости времени размола волокнистого полуфабриката от роста степени помола для всех исследуемых конструкций гарнитур при различных концентрациях волокнистой массы. Из рисунка видно, что при оптимальных условиях размола конструкции гарнитуры с окружными ножами для достижения требуемой степени помола необходимо значительно меньше времени на размол, чем для гарнитуры с прямолинейными ножами. С ростом концентрации размалываемой массы для достижения требуемой степени помола 60 °ШР затраты времени на размол уменьшаются:

– для гарнитуры с окружной формой ножей при концентрации размалываемой массы 20 % время размола составляет 1,48 часа, что на 52 % меньше, чем при концентрации 10 %;

– для секторной гарнитуры с прямолинейной формой ножей при концентрации размалываемой массы 20 % время размола составляет 3,13 часа, что на 26 % меньше, чем при концентрации 10 %;

– для гарнитуры с прямолинейной формой ножей и равномерным их распределением при концентрации размалываемой массы 20 % время размола составляет 3,43 часа, что на 30 % меньше, чем при концентрации 10 %.



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

Рисунок 4.1 – Зависимость времени размола от степени помола при различной концентрации волокнистой массы

Расчет удельного расхода электроэнергии на размол при достижении требуемой степени помола определялся по формуле

$$E_{уд.} = \frac{Q_{кон.} - Q_{нач.}}{M} . \quad (4.1)$$

Где $Q_{нач.}$ – показания электросчётчика в начале процесса размола, кВт·ч;

$Q_{кон.}$ – показания электросчетчика в конце процесса размола, кВт·ч;

$M = 0,0006$ т – масса размалываемой целлюлозы по абсолютно сухому веществу.

Использував уравнение (4.1), на рисунке 4.2 были представлены графики зависимости удельного расхода электроэнергии от роста степени помола для всех

исследуемых конструкций гарнитур при различных концентрациях волокнистой массы, в том числе для оптимальных условий размола.



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

Рисунок 4.2 – Зависимость удельного расхода энергии от степени помола при различной концентрации волокнистой массы

В процессе размола волокнистой массы выяснилось, что удельный расход электроэнергии с ростом степени помола ниже при использовании конструкции гарнитуры с окружной формой ножей, причем с ростом концентрации размалываемой массы удельный расход электроэнергии уменьшается:

- для гарнитуры с окружной формой ножей при концентрации размалываемой массы 20 % удельный расход электроэнергии составляет 5177 кВт·ч/т, что на 26 % меньше, чем при концентрации 10 %;

- для секторной гарнитуры с прямолинейной формой ножей при концентрации размалываемой массы 20 % удельный расход электроэнергии составляет 6233 кВт·ч/т, что на 21 % меньше, чем при концентрации 10 %;

- для гарнитуры с прямолинейной формой ножей и равномерным их расположением при концентрации размалываемой массы 20 % удельный расход электроэнергии составляет 5877 кВт·ч/т, что на 25 % меньше, чем при концентрации 10 %.

Затраты на электроэнергию в денежном выражении составят:

$$z_{эл}^к = \frac{Q_{эл} K_1 K_2 T_{эф} Ц}{K_3} \quad (4.2)$$

где $Q_{эл}$ – расход электроэнергии, кВт·ч;

K_1 – коэффициент, учитывающий использование рабочего времени оборудования;

K_2 – коэффициент, учитывающий использование двигателя по мощности;

K_3 – коэффициент полезного действия двигателя в сети;

$T_{эф}$ – эффективный фонд рабочего времени оборудования, ч;

C – стоимость 1 кВт·ч электроэнергии, руб.;

$C = 4,55$ руб. [112].

Для оптимального режима проведения размола волокнистой массы на гарнитуре с окружной формой ножей затраты

$$Z_{эл}^{K1} = \frac{4,21 \cdot 0,95 \cdot 0,9 \cdot 7564 \cdot 4,55}{0,95} = 130400 \text{ руб.}$$

Для размола, проведенного с использованием традиционной секторной гарнитуры с прямолинейной формой ножей затраты

$$Z_{эл}^{K2} = \frac{4,72 \cdot 0,95 \cdot 0,9 \cdot 7564 \cdot 4,55}{0,95} = 146197 \text{ руб.}$$

Для размола, проведенного с использованием традиционной гарнитуры с прямолинейными ножами и равномерным их распределением затраты

$$Z_{эл}^{K3} = \frac{4,74 \cdot 0,95 \cdot 0,9 \cdot 7564 \cdot 4,55}{0,95} = 146816 \text{ руб.}$$

Определим величину экономии электроэнергии за счет реализации гипотезы о возможности интенсификации процесса размола при использовании ножевой гарнитуры с окружной формой ножей:

1. По сравнению с традиционной секторной гарнитурой с прямолинейной формой ножей:

$$\Delta Z_1 = Z_{эл}^{K2} - Z_{эл}^{K1}; \quad (4.3)$$

$$\Delta Z_1 = 146197 - 130400 = 15797 \text{ руб.}$$

2. По сравнению с традиционной гарнитурой с прямолинейными ножами и равномерным их распределением:

$$\Delta z_2 = z_{\text{ЭП}}^{K3} - z_{\text{ЭП}}^{K1}; \quad (4.4)$$

$$\Delta z_2 = 146816 - 130400 = 16416 \text{ руб.}$$

Выводы к четвертой главе

Экономический эффект в результате проведенных исследований при оптимальных условиях процесса размола с использованием гарнитуры с окружной формой ножей составил экономию:

– времени размола по сравнению с традиционной секторной гарнитурой с прямолинейной формой ножей 22 %; по сравнению с традиционной гарнитурой с прямолинейными ножами и равномерным их распределением 36 %;

– удельных затрат электроэнергии по сравнению с традиционной секторной гарнитурой с прямолинейной формой ножей 10 %; по сравнению с традиционной гарнитурой с прямолинейными ножами и равномерным их распределением 12 %

– электроэнергии в денежном выражении по сравнению с традиционной секторной гарнитурой с прямолинейной формой ножей 15,7 тыс. руб.; по сравнению с традиционной гарнитурой с прямолинейными ножами и равномерным их распределением 16,4 тыс. руб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

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

3. Проведенный многофакторный эксперимент с использованием гарнитуры авторского исполнения показал, что при концентрации размалываемой массы от 10 до 20 % с ростом частоты вращения от 2000 до 2500 об/мин волокно практически не подвергается рубке, в отдельных случаях наблюдается незначительное увеличение коротковолокнистых фракций. Одновременно с этим наблюдается повышение водоудерживающей способности массы и грубости волокна. Величина зазора между ножами ротора и статора оказывает влияние на индекс фибрилляции

волокна и его ширину. При концентрации размалываемой массы 10 % с увеличением межножевого зазора индекс фибрилляции возрастает, а волокна становятся шире. При этом наблюдается рост физико-механических характеристик бумажных отливок.

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

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

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

Библиографический список

1. 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.
2. Иванов, С. Н. Технология бумаги / С. Н. Иванов. – Изд. 2-е, переработ. – Москва : Лесная промышленность, 1970. – 720 с. – Текст : непосредственный.
3. Фляте, Д. М. Свойства бумаги / Д. М. Фляте. – Изд. 3-е, переработанное и дополненное. – Москва : Лесная промышленность, 1986. – 680 с. – Текст : непосредственный.
4. Перекальский, Н. П. Сущность процесса размола / Н. П. Перекальский, В. Ф. Фмалтенков. – Текст : непосредственный // труды ЛТИ ЦБП. – 1956. – Вып. 4. – С. 5-19.
5. Никитин, Н. И. Химия целлюлозы и древесины : монография / Н. И. Никитин. – Москва : Академия наук СССР, 1962. – 711 с. – Текст : непосредственный.
6. Рязанова, Т. В. Химия древесины : учебное пособие для студентов вузов / Т. В. Рязанова, Н. А. Чупрова, Е. В. Исаева ; отв. ред. О. Н. Еременко. – Красноярск : СибГТУ, 2011. – Ч. 1: Строение и свойства древесины. Экстрактивные вещества. – 2011. – 159 с. – Текст : непосредственный.
7. Basic effects of pulp refining on fiber properties – a review / S. Gharehkhani, E. Sadeghinezhad, S. N. Kazi [and other]. – Text : direct // Carbohydrate polymers. – 2015. – P. 785-803.
8. Kang, T. Role of external fibrillation in pulp and paper properties : doctoral thesis / T. Kang. – Finland : Helsinki University of Technology, 2007. – 52 p. – Text : direct.

9. Low consistency refining of eucalyptus pulp: effects on surface chemistry and interaction with FWAs / H.-Y. Mou, B. Li, E. Heikkilä [and other]. – Text : direct // BioResources. – 2013. – № 8(4). – P. 5995-6013.

10. Advanced studies on the topochemistry of softwood fibres in low-consistency refining as analyzed by FE-SEM, XPS, and ToF-SIMS / H.-Y. Mou, E. Iamazaki, H. Zhan [and other]. – Text : direct // BioResources. – 2013. – № 8(2). – P. 2325-2336.

11. Эмертон, Х. В. Наружный слой вторичной стенки / Х. В. Эмертон. – Текст : непосредственный // Основные представления о волокнах, применяемых в бумажном производстве : Материалы симпозиума. – Москва : Гослесбумиздат, 1962. – С. 41-59.

12. Бюхер, Г. Прерывистость в микроскопической структуре древесных волокон. Основные представления о волокнах, применяемых в бумажном производстве / Г. Бюхер. – Москва : Гослесбумиздат. – 1962. – 155 с. – Текст : непосредственный.

13. Фрей-Висслинг, А. Общая структура волокон / А. Фрей-Висслинг. – Текст : непосредственный // Основные представления о волокнах, применяемых в бумажном производстве : Материалы симпозиума. – Москва : Гослесбумиздат, 1962. – С. 9-13.

14. Об оптимальных зазорах при размолу массы высокой концентрации в дисковых мельницах / Е. Е. Савицкий, И. М. Халандовский, Л. Н. Лаптев [и др.]. – Текст : непосредственный // Сборник трудов ВНИИЦБ. – 1976. – С. 18-21.

15. 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.

16. Халандовский, И. Н. Размол сульфатной целлюлозы из лиственной древесины при высокой концентрации / И. Н. Халандовский, Л. Н. Лаптев, Н. Е. Трухтенкова. – Текст : непосредственный // Бумажная промышленность. – 1972. – № 6. – С. 5-7.

17. Халандовский, И. Н. Влияние концентрации массы на размол сульфатной целлюлозы из сосны / И. Н. Халандовский, Л. Н. Лаптев, Т. А. Генслер. – Текст : непосредственный // Труды ВНИИБа. – 1973. – С. 109-116.
18. West, W. High consistency paper stock refining / W. West. – Text : direct // Paper Trade Journal. – 1964. – № 10. – P. 34-35.
19. Jackson, M. High consistency refining / M. Jackson. – Text : direct // TAPPI. – 1964. – V. 47, № 6. – P. 313.
20. Nakada, K. Laboratory test on HCR / K. Nakada, S. Akino, J. Tsutsui. – Text : direct // Japan pulp and paper. – 1977. V. 15. – P. 43-52.
21. Рейска, Р. А. Размол березовой сульфатной целлюлозы высокой концентрации / Р. А. Рейска, Ю. Г. Бутко. – Текст : непосредственный // Бумажная промышленность. – 1972. – № 3. – С. 4-5.
22. Размол массы высокой концентрации : сб. рефератов по зарубежным материалам / Всесоюз. науч.- исслед. ин-т целлюлоз.-бум. пром-сти ; сост. С. М. Сахаров. – Москва : Лесная промышленность, 1971. – 64 с. – Текст : непосредственный.
23. Лаптев, В. Н. Исследование размола отходов древесномассного производства на дисковой мельнице : специальность 05.21.03 : дис. ... канд. тех. наук. – Ленинград : ЛТИ ЦБП, 1969. – 223 с. – Текст : непосредственный.
24. D. H. Page. – Text : direct // Pulp and Paper Magazine of Canada. – 1966. – № 1. – P. нет страниц.
25. West, W. B. High Consistency Refining of Fibers / W. B. West. – Text : direct // TAPPI. – 1964. – № 5. – P. 313-317.
26. Rosenfeld, J. Hoffman. – Text : direct // Zellstoff und Papier. – 1965. – № 4. – P. 104-111.
27. Лаптев, Л. Н. Новое в технологии размола массы на дисковых мельницах / Л. Н. Лаптев, И. Н. Халандовский. – Текст : непосредственный // сб. науч. тр. ВНИИБа, ВНПОбумпрома. – Ленинград : ВНИИБ. – 1980. – С. 157-171.

28. 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.

29. 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.

30. W. C. Mejer. – Text : direct // Paper Trade Journal. – 1967. – № 5. – P. 40-41.

31. 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.

32. Корда, И. Размол бумажной массы : учеб. для вузов / И. Корда, З. Либнар, И. М. Прокоп. – Москва : Лесная промышленность, 1967. – 421 с. – Текст : непосредственный.

33. Neue Maschine zur Herstellung von Kraftsackpapier angelaufen / нет автора. – Text : direct // Allgemeine Papier-Rundschau. – 1969. – № 1. – P. 6, 8-10.

34. Uddeholms's giant new sack kraft machine in production / Нет автора. – Text : direct // World's Paper Trade Review. – 1969. – № 3. – P. 171.

35. Fahey, M. D. Mechanical treatment of chemical pulps / M. D. Fahey. – Text : direct // Tappi. – 1970. – V. 53, № 11. – P. 2050-2064.

36. Лаптев, В. Н. Исследование размола массы при различной концентрации / В. Н. Лаптев. – Текст : непосредственный // Химическая переработка древесины. – 1969. – № 36. – С. 6-8.

37. Рублев, А. И. Дисковые мельницы : обзорная информация / А. И. Рублев, А. И. Кондратов, А. Б. Литвинов. – Москва : ВНИПИЭИлеспром, 1971. – 56 с. – Текст : непосредственный.

38. Ситов, Н. Н. Разработка нового способа размола массы высокой концентрации между валами : специальность 05.21.03 «Технология и оборудование химической переработки биомассы дерева; химия древесины» : диссертация на со-

искание ученой степени кандидата технических наук / Николай Николаевич Ситов. – Ленинград, 1984. – 217 с. – Текст : непосредственный.

39. Использование фротопальпера в системах приготовления волокнистой массы. – Бумага и целлюлоза : Экспресс-информация. – 1978. – Вып. 6. – Текст : непосредственный.

40. Nilsson, H. A. Totally new concept in stock refining the Vargo beater / H. Nilsson. – Text : direct // Paper Trade Journal. – 1970. – P. 54-56.

41. Vargo-Kvarnen, Нет инициалов автора нет названия статьи / Vargo-Kvarnen. – Text : direct // Svensk Pappers tidning. – 1970. – P. 141-143.

42. Washburn, O. V. Changes in web structure on pressing and drying / O. V. Washburn, I. G. Brechanam. – Text : direct // Pulp and Paper magazine of Canada. – 1964. – № 9. – P. 400-408.

43. Ревнивцев, В. И. Совершенствование технологии пропитки и размола древесной щепы с помощью виброинерционных аппаратов / В. И. Ревнивцев, В. И. Сорокин, Г. А. Денисов, Л. П. Зарогацкий. – Текст : непосредственный // Бумажная промышленность. – 1984. – № 2. – С. 13.

44. Авторское свидетельство № 937578 Российская Федерация. Устройство для механической обработки волокнистого материала : № 2963339/29-12 : заявл. 23.07.1980 : опубл. 23.06.1982 / Сорокин, В. И., Зарогацкий, Л. П. – 1982. – Бюллетень № 23. – Текст : непосредственный.

45. Гаузе, А. А. Машины для размола и сортирования бумажной массы : конспект лекций / А. А. Гаузе, В. Н. Гончаров. – Ленинград, 1975. – Текст : непосредственный.

46. Набиева, А. А. Оценка влияния и совершенствование основных технологических параметров ножевых размалывающих машин : специальность 05.21.03 : дис. ... канд. тех. наук : защищена 24.09. 04 / А. А. Набиев. – Красноярск : СибГТУ, 2004. – 222 с. – Текст : непосредственный.

47. Алашкевич Ю.Д. Основы теории гидродинамической обработки волокнистых материалов в размольных машинах: дис. ... доктора технических наук. Красноярск, 1986. 361

48. Влияние способа размола на бумагообразующие свойства волокна / Ю. Д. Алашкевич, В. Г. Васютин, Ф. И. Мицкевич, Л. В. Мансурова. – Текст : непосредственный // Машины и аппараты целлюлозно-бумажного производства : межвуз. сб. науч. тр. – Санкт-Петербург : ЛТИ, 1996. – С. 28-32.

49. Мицкевич, Ф. И. Влияние конструктивных параметров дисковой мельницы на свойства волокнистой массы / Ф. И. Мицкевич, Т. В. Красильникова, Ю. Д. Алашкевич. – Текст : непосредственный // Машины, конструирование, расчеты и оборудование целлюлозно-бумажных производств : межвуз. сб. науч. тр. – Ленинград. – 1979. – № 7. – С. 82-37.

50. 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.

51. Бывшев, А. В. Механическое диспергирование волокнистых материалов : учеб. пособие / А. В. Бывшев, Е. Е. Савицкий. – Красноярск : КГУ, 1991. – 216 с. – Текст : непосредственный.

52. Каган, В. Л. Исследование влияния гидродинамических явлений в ячейках гарнитуры на размол волокнистой массы в ножевых машинах : специальность 05.21.03 : дис. ... канд. техн. наук / В. Л. Каган. – Красноярск, 1978. – 157 с. – Текст : непосредственный.

53. Веретнов, А. К. Исследование влияния силовых воздействий на процесс размола целлюлозы в ножевых машинах и разработка конструкции гарнитура для ее гидродинамической обработки : специальность 05.21.03 : дис. ... канд. техн. наук / А. К. Веретнов. – Красноярск, 1973. – 159 с. – Текст : непосредственный.

54. Кожухов, В. А. Размол волокнистых полуфабрикатов в размольных ножевых машинах при ударном воздействии на волокно : специальность 05.21.03 : дис. ... канд. техн. наук : защищена 10.04.15 / В. А. Кожухов. – Красноярск, 2015. – 161 с. – Текст : непосредственный.

55. Шуркина, В. И. Совершенствование ножевого размола волокнистых растительных полимеров в целлюлозно-бумажном производстве : специальность 05.21.03 «Технология и оборудование химической переработки биомассы дерева;

химия древесины» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Валентина Ивановна Шуркина. – Красноярск, СибГТУ, 2016. – 145 с. – Текст : непосредственный.

56. Алашкевич, Ю. Д. Влияние параметров ножевых размалывающих машин на качество помола волокнистых полуфабрикатов / Ю. Д. Алашкевич, Ф. И. Мицкевич. – Текст : непосредственный // Перспективы развития химической промышленности в Красноярском крае : тез. докл. краевой науч. конф. – Красноярск, 1982. – С. 54-56.

57. Гончаров, В. Н. Исследование силового воздействия ножевой гарнитуры дисковой и конической мельниц на волокна в процессе размола : специальность 05.21.03 : дис. ... канд. тех. наук / В. Н. Гончаров. – Ярославль, 1972. – 172 с. – Текст : непосредственный.

58. Справочник бумажника технолога : в 4 томах. Том 1 / редактор: С. А. Пузырева. – Москва ; Ленинград : Гослесбумиздат, 1956. – 549 с. – Текст : непосредственный.

59. Beating. – Text : direct // Summaries of papers «Pulp and Paper Journal». – 1964. – № 13. – P. 52-56.

60. Stephens, J.R. / Pulp and Paper Mag. Can. – 1971. – №4. – P. 63 - 70.

61. Howard, E. P. / South Pulp and Paper Manufacturing. – 1969. – № 4. – P. 50, 52-54, 56-57.

62. Henderson, T. The influence of refining at high consistency on paper properties / T. Henderson, J. Barton, H. Erfurt. – Text : direct // A report at the International conference. Cambridge. – 1965. – P. 875.

63. Rosenfeld, K. Ein neues Verfahren zur Mahlung bei hohen Stoffdichten Oberhall 20% / K. Rosenfeld, J. Hoffman. – Text : direct // Das Papier. – 1965. – № 20. – P. 58-66.

64. Ryrberg, G. Mahlung im Einscheibenrefiner bei hoher stattdichte / G. Ryrberg. – Text : direct // Wochenblatt fur Papierfabrication. – 1967. – № 16. – P. 643.

65. Luhde, F. Zerkleinerungscharakter beider Holzdefibrierung und Schitrelmahlung in den Scheibenmuhlen / F. Luhde. – Text : direct // Das Papier. – 1962. – № 11. – P. 655-663.

66. Верегитин, И. З. Комбинированное применение дефибреров и дисковых мельниц при производстве древесной массы для газетной бумаги / И. З. Верегитин. – Москва : ЦНИИТЭИлеспром. – 1968. – 36.с. – Текст : непосредственный.

67. W. Herbert, P. Z. Marsh. – Text : direct // Tappi. – 1968. – № 5. – P. 149-156.

68. E. Zlast. – Text : direct // Pap. Technol. – 1972. – № 2. – P. 102-105.

69. May, W. A theory of chip refining – the origin of fibre length / W. May. – Text : direct // Pulp and Magazine of Canada. – 1973. – № 1. – P. 70-77.

70. Рюхин Н.В. Бумажная промышленность. – 1952. – №2ю – С. 22 - 26.
Noll A.

71. A. E. Noll. – Text : direct // Paper – Fabrikant. – 1937. – P. 393.

72. Гончаров, А. В. Влияние температуры нагрева волокнистой массы в зоне размола ножевой гарнитуры / А. В. Гончаров, О. Н. Федорова, Р. А. Марченко, Ю. Д. Алашкевич. – Текст : непосредственный // Решетневские чтения. – Красноярск : СибГУ – 2019. – С. 85-86.

73. W. Herbert, P. Z. Marsh, Co Black Clauson. – Text : direct // Pulp and Paper. – 1967. – № 39. – P. 33-34.

74. Легоцкий, С. С. Новые виды размалывающих гарнитур дисковых мельниц : Обзор. информ. / С. С. Легоцкий. – Москва, 1985. – 43 с. – Текст : непосредственный.

75. Левинский, И. В. Работа новых советских роллов / И. В. Левинский. – Текст : непосредственный // Бумажная промышленность. – 1939. – № 1. – С. 7-11.

76. Schmidt, S. Tendinte in procesul de machinare / S. Schmid. – Text : direct // Celluloza Si Hirtie. – 1966. – № 11. – P. 433-439.

77. Быстрицкий, И. Статистическая закономерность садкого помола : 05.21.03 : дис. ... канд. техн. наук / И. Быстрицкий. – Ленинград, 1939. – 187 с. – Текст : непосредственный.

78. Патент №2314379. Российская Федерация, МПК51 D21D1/30, B02C 7/12. Размалывающая гарнитура для дисковой мельницы / Алашкевич Ю. Д., Ковалев В. И., Кожухов В. А.; заявитель и патентообладатель: Сибир. госуд. технолог. ун-т № 2006121632/12. ; заявл. 19.06.2006; опубл. 10.01.2008, Бюл. № 1. – 5 с.

79. Патент №2314380 Российская Федерация, МПК D21D1/30, B02C 7/12. Размалывающая гарнитура дисковой мельницы / Алашкевич Ю. Д., Ковалев В. И., Карбышев М. А., Кожухов В. А., Барановский В. П.; заявитель и патентообладатель : Сибир. госуд. технолог. ун-т № 2006121708/12. ; заявл. 19.06.2006. ; опубл. 10.01.2008, Бюл. № 1. – 4 с.

80. Киселев, С. С. Эксплуатация и ремонт дисковых и конических мельниц / С. С. Киселев, В. Ф. Пашинский. – Москва : Лесная промышленность, 1979. – 208 с. – Текст : непосредственный.

81. Патент № 2556534 Российская Федерация, МПК B02C 7/12 (2006.01). Размалывающая гарнитура для дисковой мельницы : № 2014103760/12 : заявл. 04.02.2014 : опубл. 10.07.2015 / Алашкевич Ю. Д., Ковалев В. И., Шуркина В. И. ; заявитель СибГТУ. – 9 с. : ил. – Текст : непосредственный.

82. Патент № 2227826 Российская Федерация, МПК D21D 1/30 (2006.01), B02C 7/12 (2006.01). Размалывающая гарнитура для дисковой мельницы : № 2003122252/12 : заявл. 16.07.2003 : опубл. 27.04.2004 / Алашкевич Ю. Д., Ковалев В. И., К. Х. Саргсян, А. А. Набиева, В. Н. Щербаков ; заявитель СибГТУ. – 7 с. : ил. – Текст : непосредственный.

83. Патент № 2227825 Российская Федерация, МПК D21D 1/30 (2006.01), B02C 7/12 (2006.01). Размалывающая гарнитура дисковой мельницы : № 2003122181/12 : заявл. 15.07.2003 : опубл. 27.04.2004 / Алашкевич Ю. Д., Ковалев В. И., Невзоров А. И. ; заявитель СибГТУ. – 5 с. : ил. – Текст : непосредственный.

84. Патент № 2227826 Российская Федерация, МПК D21D 1/30 (2006.01), B02C 7/12 (2006.01). Размалывающая гарнитура для дисковой мельницы : № 2003122252/12 : заявл. 16.07.2003 : опубл. 27.04.2004 / Алашкевич Ю. Д., Ковалев В. И., К. Х. Саргсян, А. А. Набиева, В. Н. Щербаков ; заявитель СибГТУ. – 7 с. : ил. – Текст : непосредственный.

85. Патент № 2262384 Российская Федерация, МПК В02С 7/12 (2006.01), D21D 1/30 (2006.01). Размалывающая гарнитура дисковой мельницы : № 2004122055/03 : заявл. 21.07.2004 : опубл. 20.12.2005 / Алашкевич Ю. Д., Спариш С. В., Ковалев В. И., Браун В. В. ; заявитель СибГТУ. – 14 с. : ил. – Текст : непосредственный.

86. Влияние углов наклона ножей при размоле массы высокой концентрации / А. В. Ушаков, Ю. Д. Алашкевич, В. А. Кожухов, К. А. Хохлов. – Текст : непосредственный // Лесной и химический комплексы - проблемы и решения : сб. материалов по итогам Всерос. науч.-практ. конф. – Красноярск, 2020. – С. 354-356.

87. Факторы процесса размола волокнистых полуфабрикатов высокой концентрации / А. В. Ушаков, Ю. Д. Алашкевич, В. А. Кожухов [и др.]. – Текст : непосредственный // Современная целлюлозно-бумажная промышленность. Актуальные задачи и перспективные решения. – Санкт-Петербург, 2020. – С. 73-78.

88. Алашкевич, Ю. Д. Влияние рисунка гарнитуры на процесс размола волокнистых полуфабрикатов : монография : в 2 ч. / Ю. Д. Алашкевич, В. И. Ковалев, А. А. Набиева ; ред. В. Н. Щербаков. – Красноярск : СибГТУ. – 2010. – Ч. 1. – 168 с. – Текст : непосредственный.

89. 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.

90. Кондрашов, А. И. Повышение эффективности работы дисковых мельниц / А.И. Кондрашов, А.Б. Литвинов, Ф.Х. Сандлер. – Текст : непосредственный // Бумажная промышленность. – 1973. – № 2. – С. 16-17.

91. Шуралев, М. В. Исследование влияния спиральной размольной гарнитуры на свойства волокнистых полуфабрикатов, используемых в композиции высококачественной бумаги : специальность 05.21.03 «Технология и оборудование химической переработки биомассы дерева; химия древесины» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Максим Витальевич Шуралев. – Архангельск, САФУ, 2011. – 116 с. – Текст : непосредственный.

92. Патент № 2761545 С1 Российская Федерация, МПК D21D 1/30, B02C 7/00. Размалывающая гарнитура : № 2021112036 : заявл. 26.04.2021: опубл. 09.12.2021 / Алашкевич Ю. Д., Ковалев В. И., Кожухов В. А., Ушаков А. В. ; заявитель СибГУ им. М.Ф. Решетнева. – 10 с. – Текст : непосредственный.

93. Патент № 2761544 С1 Российская Федерация, МПК D21D 1/30, B02C 7/12. Размалывающая гарнитура : № 2020138309 : заявл. 23.11.2020: опубл. 09.12.2021 / Алашкевич Ю. Д., Ковалев В. И., Кожухов В. А., Ушаков А. В. ; заявитель СибГУ им. М.Ф. Решетнева. – 9 с. – Текст : непосредственный.

94. Размол волокнистых материалов высокой концентрации в дисковой мельнице / А. В. Ушаков, Ю. Д. Алашкевич, В. А. Кожухов, Р. А. Марченко. – Текст : непосредственный // Хвойные бореальной зоны. – 2019. – Т. 37, № 6. – С. 471-474.

95. Анализатор волокна MorFi Compact для измерения морфологических характеристик волокон, костры и мелочи. – Текст : электронный // РТА - Санкт-Петербург : сайт. – URL: <https://pta-spb.ru/лабораторное-оборудование-для-цбп/анализатор-волокна-morfi-compact>.

96. ISO 16065-2:2014 Pulps — Determination of fibre length by automated optical analysis — Part 2: Unpolarized light method

97. Сергеева, А. С. Технологический контроль целлюлозно-бумажного производства : учебное пособие для вузов / Сергеева А. С. – Москва : Лесная промышленность, 1969. – 216 с. – Текст : непосредственный.

98. ГОСТ ИСО 1924-1-96 Бумага и картон. Определение прочности при растяжении. Часть 1. Метод нагружения с постоянной скоростью : межгосударственный стандарт : дата введения 2000.01.01 / разработан УкрНИИБом. – Текст : электронный // Электронный фонд правовой и научно-технической информации : сайт. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200018150> (дата обращения : 30.05.2022).

99. ГОСТ 13525.3-97 (ИСО 1974-90) Полуфабрикаты волокнистые и бумага. Метод определения сопротивления раздиранию (метод Эльмендорфа) : межгосударственный стандарт : дата введения 2001-07-01 / разработан УкрНИИБом. –

Текст : электронный // Электронный фонд правовой и научно-технической информации : сайт. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200019844> (дата обращения : 30.05.2022).

100. ГОСТ ИСО 5626-97 Бумага. Определение прочности на излом при многократных перегибах (методы Шоппера, Ломаржи, Келер-Молина, MIT) : национальный стандарт Российской Федерации : дата введения 2001.01.07. – Москва : Издательство стандартов, 2001. – 25 с. – Текст : непосредственный.

101. Пен, Р. З. Планирование эксперимента в Statgraphics Centurion / Р. З. Пен. Красноярск : СибГТУ, 2014. – 292 с. – Текст : непосредственный.

102. Пен, Р. З. Статистические методы моделирования и оптимизации процессов целлюлозно-бумажного производства : учебное пособие / Р. З. Пен – Красноярск : КГУ, 1982. – 192 с. – Текст : непосредственный.

103. Пен, Р. З. Факторный анализ результатов эксперимента / Р. З. Пен. – Текст : непосредственный // Заводская лаборатория. – 1972. – № 1. – С. 70-73.

104. Казаков, Я. В. Характеристики деформативности как основополагающий критерий в оценке качества целлюлозно-бумажных материалов : специальность 05.21.03 : диссерт. ... докт. тех. наук / Я. В. Казаков. – Архангельск, САФУ. – 2015. – 175 с. – Текст : непосредственный.

105. Комаров, В. И. Жесткость при изгибе целлюлозно-бумажных материалов. Анализ методов измерения и влияния технологических факторов – Текст : непосредственный / В. И. Комаров // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 1994. – № 3. – С. 133-142.

106. Сборник трудов Центрального научно-исследовательского института бумаги. Исследования в области технологии бумаги. – Москва : 1980. – 233 с. – Текст : непосредственный.

107. 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.

108. Легоцкий, С. С. Размалывающее оборудование и подготовка бумажной массы / С. С. Легоцкий, В. Н. Гончаров. – Москва : Лесная промышленность. – 1990. – 224 с. – Текст : непосредственный.

109. Комаров, В. И. Деформация и разрушение волокнистых целлюлозно-бумажных материалов / В. И. Комаров. – Архангельск : Архангельского государственного технического университета, 2002. – 440 с. – Текст : непосредственный.

110. Морозова, О. Г. Принципы оптимизации качества воды водоема – охладителя Березовской ГРЭС-1 для технологических целей и аквакультуры : монография / О. Г. Морозова, Р. З. Пен, Ю. П. Фоменко. – Красноярск : СФУ, 2011. – 185 с. – Текст : непосредственный.

111. Харман, Г.Г. Современный факторный анализ / Г. Г. Харман. - 1-е изд. - Статистика, 1972. - 489 с. - Текст: непосредственный.

112. Об установлении тарифов на электрическую энергию, поставляемую публичным акционерным обществом «Красноярскэнергосбыт» (г. Красноярск, ИНН 2466132221) : Приказ министерства тарифной политики Красноярского края от 17 декабря 2021 года № 73-э. – Текст : электронный // Красноярский край. Официальный интернет портал правовой информации. – [URL:http://zakon.krskstate.ru/doc/82133](http://zakon.krskstate.ru/doc/82133)

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица А.1 – Характер изменения β_x в зависимости от изменения угла C , при $r_1 = r_2 = 0,6R$

Номер точки	Точка пересечения радиуса r_x с кромкой	Радиусы, мм (R)			Значения углов, °		
		проведённый из центра O диска в точку касания A_x касательной $t - t_{Ax}$ с режущей кромкой AB $r_x^2 = r_1^2 + r_2^2 - 2 \cdot r_1 \cdot r_2 \cos C$	кривизны режущей кромки, r_1	расстояние OC , от центра O диска до центра кривизны C режущей кромки AB , r_2	C_x	A_x	β_x
1	A_0	0	$r_1 = r_2 = (0,6R)$	$r_1 = r_2 = (0,6R)$	0	0	0
2	A_1	10,458 (0,1R)			10	85	5
3	A_2	20,837 (0,21R)			20	80	10
4	A_3	$r_{\text{блх}} = 38$ (0,38R)			30	75	15
5	A_4	41,042 (0,41R)			40	70	20
6	A_5	50,714 (0,51R)			50	65	25
7	A_6	60 (0,6R)			60	60	30
8	A_7	68,829 (0,69R)			70	55	35
9	A_8	77,134 (0,77R)			80	50	40
10	A_9	84,852 (0,85R)			90	45	45
11	A_{10}	91,925 (0,92R)			100	40	50
12	A_{11}	98,298 (0,98R)			110	35	55
13	A_{12}	$r_{\text{блх}} = 100$ (R)			112,885	33,557	53,442
14	A_{13}	103,923 (1,04R)			120	30	60
15	A_{14}	108,956 (1,09R)			130	25	65
16	A_{15}	112,763 (1,13R)			140	20	70
17	A_{16}	115,911 (1,16R)			150	15	75
18	A_{17}	118,176 (1,18R)			160	10	80

Таблица А.2 - Характер изменения β_x в зависимости от изменения угла C при $r_1 = 0,633R$, $r_2 = 0,6R$

Номер точки	Точка пересечения радиуса r_x с кромкой	Радиусы, мм (R)			Значения углов, °		
		проведённый из центра O диска в точку касания A_x касательной $t - t_{Ax}$ с режущей кромкой AB $r_x^2 = r_1^2 + r_2^2 - 2 \cdot r_1 \cdot r_2 \cos C$	кривизны режущей кромки, r_1	расстояние от центра O диска до центра кривизны C режущей кромки AB , r_2	C_x	A_x	β_x
1	A_0	3,3·(R)	$r_1 = 63,3 = 0,633R$	$r_2 = 60 = 0,6R$	0	0	90
2	A_1	11,237 (0,11 R)			10	67,990	22,009
3	A_2	21,656 (0,22 R)			20	71,369	18,638
4	A_3	32,071 (0,32 R)			30	69,295	20,704
5	A_4	$r_{bx} = 38$ (0,38 R)			35,773	67,372	22,627
6	A_5	42,284 (0,42 R)			40	65,794	24,205
7	A_6	52,194 (0,52 R)			50	61,715	28,284
8	A_7	61,716 (0,62 R)			60	57,345	32,654
9	A_9	70,773 (0,71 R)			70	42,850	47,114
10	A_{10}	79,296 (0,79 R)			80	40,826	49,173
11	A_{11}	87,217 (0,87 R)			90	38,533	51,466
12	A_{11}	94,477 (0,95 R)			100	36,286	53,713
12	A_{13}	$r_{blyx} = 100$ (R)			108,363	36,924	54,175
14	A_{14}	101,019 (1,01 R)			110	36,073	55,926
15	A_{15}	106,793 (1,07 R)			120	30,885	62,114
16	A_{16}	111,756 (1,12 R)			130	25,715	66,284
17	A_{17}	115,869 (1,16 R)			140	20,558	71,441
18	A_{18}	119,101 (1,19 R)			150	15,410	75,589

Таблица А.3 - Характер изменения β_x в зависимости от изменения угла C при $r_1 = 2R, r_2 = 1,732R$

Номер точки	Точка пересечения радиуса r_x с кромкой	Радиусы, мм (R)			Значения углов, °		
		проведённый из центра O диска в точку касания A_x касательной $t - t_{Ax}$ с режущей кромкой AB $r_x = r_1^2 + r_2^2 - r_1 \cdot r_2 \cdot \text{Cos}C$	кривизны режущей кромки, r_l	расстояние от центра O диска до центра кривизны C режущей кромки AB, r_2	C_x	A_x	β_x
1	A_0	26,794 (0,27R)	200 (2R)	1,732-R	0	0	90
2	A_1	31,330 (0,31R)			5	28,804	61,195
3	A_2	42,077 (0,42R)			10	45,626	44,373
4	A_3	55,485 (56R)			15	53,894	36,105
5	A_4	69,972 (0,7R)			20	57,844	32,155
6	A_5	84,906 (0,83R)			25	59,555	30,444
7	A_6	$r_{\text{вых}} = 100$ (1R)			30	60	30
8	A_7	130,103 (1,03R)			40	58,841	31,158
9	A_8	159,581 (1,6R)			50	56,246	33,753
10	A_9	188,039 (1,88R)			60	52,911	37,088
11	A_{10}	215,183 (2,15R)			70	49,145	40,854
12	A_{11}	240,768 (2,41R)			80	45,109	44,890
13	A_{12}	264,575 (2,65R)			90	40,893	49,106
14	A_{13}	286,410 (2,86R)			100	36,552	53,447
15	A_{14}	306,097 (3,06R)			110	32,122	57,877
16	A_{15}	323,482 (3,24R)			120	27,626	62,373
17	A_{16}	338,428 (3,38R)			130	23,082	66,917
18	A_{17}	350,817 (3,5R)			140	18,503	71,496

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Таблица Б.1 – Матрица планирования эксперимента

Номер опыта	Число факторов		
	X_1	X_2	X_3
1	2500 об/мин	1,5 мм	20 %
2	2000 об/мин	1,5 мм	20 %
3	2500 об/мин	0,5 мм	20 %
4	2000 об/мин	0,5 мм	20 %
5	2500 об/мин	1,5 мм	10 %
6	2000 об/мин	1,5 мм	10 %
7	2500 об/мин	0,5 мм	10 %
8	2000 об/мин	0,5 мм	10 %
9	2500 об/мин	1 мм	15 %
10	2000 об/мин	1 мм	15 %
11	2250 об/мин	1,5 мм	15 %
12	2250 об/мин	0,5 мм	15 %
13	2250 об/мин	1 мм	20 %
14	2250 об/мин	1 мм	10 %

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Таблица В.1 – Коэффициенты b_{ij} уравнений регрессий и статистические параметры выходных параметров при степени помола 30 °ШР

Коэффициенты регрессии	Выходные параметры															
	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6	Y_7	Y_8	Y_9	Y_{10}	Y_{11}	Y_{12}	Y_{13}	Y_{14}	Y_{15}	Y_{16}
	Значения коэффициентов															
b_0	0,775	27,401	13,871	255,057	2,606	18,489	20,625	36,198	-22,439	-22,603	-29,489	21,333	6298,67	11143	1415	2918
b_1	$3,68 \cdot 10^{-5}$	-0,002	-0,007	0,173	-0,002	-0,004	-0,001	-0,002	0,043	0,015	0,029	-0,004	-4,572	-2,715	-0,782	-1,78
b_2	0,012	1,04	-0,662	-23,62	0,311	-0,12	0,268	-0,098	1,486	0,011	-3,457	1,534	-43	4349	-22,189	36,2
b_3	0,002	-0,409	-0,408	-14,578	0,034	-1,078	-1,073	-1,301	1,919	3,277	0,039	-1,361	-101,04	-381	-35,553	-39,86
b_{11}	-	-	$1 \cdot 10^{-6}$	-	6,522	-	-	-	$-8,1 \cdot 10^{-6}$	-	$7,1 \cdot 10^{-6}$	-	0,008	-	0,001	0,002
b_{22}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-1,007	-	-	-	14,344	-
b_{33}	-	0,007	0,006	-	-0,001	0,017	0,035	0,045	-0,0491	-0,043	-	0,03	-	-	0,143	-
b_{12}	-	-	0,004	-	-0,001	-	-	-	-0,001	$-8,8 \cdot 10^{-4}$	0,002	-	-	-1,399	0,024	-
b_{13}	-	0,001	$9,42 \cdot 10^{-5}$	0,006	-	0,002	-	-	$-2,5 \cdot 10^{-4}$	-	-	0,002	0,042	0,197	0,014	0,021
b_{23}	-	-0,06	-0,022	1,38	0,003	-	-	-	0,121	-	-0,039	-0,108	-	-98,75	-3,5	-5,2
Коэффициент детерминации R^2 , %	77,33	86,128	87,260	87,518	85,372	84,793	79,599	84,371	85,116	87,559	82,627	87,977	85,641	88,699	84,387	87,57

Таблица В.2 – Коэффициенты b_{ij} уравнений регрессий и статистические параметры выходных параметров при степени помола 45 °ШР

Коэффициенты регрессии	Выходные параметры															
	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6	Y_7	Y_8	Y_9	Y_{10}	Y_{11}	Y_{12}	Y_{13}	Y_{14}	Y_{15}	Y_{16}
	Значения коэффициентов															
b_0	0,775	27,758	3,173	60,052	1,377	5,672	11,214	31,607	-17,751	49,685	-29,489	17,993	1718,56	5670,47	1245,65	3796
b_1	$3,68 \cdot 10^{-5}$	-0,119	0,001	0,181	-0,001	$-6,9 \cdot 10^{-4}$	-0,008	-0,006	0,055	-0,026	0,029	-0,005	-1,209	-2,222	-0,765	-2,583
b_2	0,012	-0,008	-0,613	54,56	0,008	1,776	2,747	-4,858	-5,674	-7,311	-3,457	-3,594	-51	1428,9	-41,162	-36,4
b_3	0,002	2,45	-0,341	-1,764	0,039	-0,193	-0,388	-0,177	-0,271	0,643	0,039	-0,612	-23,145	438,64	-15,464	-32,37
b_{11}	-	-	$8,2 \cdot 10^{-7}$	$-4,42 \cdot 10^{-5}$	-	-	-	-	$-1,2 \cdot 10^{-5}$	$8,1 \cdot 10^{-6}$	$7,1 \cdot 10^{-6}$	-	$2,04 \cdot 10^{-4}$	-	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$4,8 \cdot 10^{-4}$
b_{22}	-	-	0,096	-	-	-	-	-	1,884	-	-1,00	-	-	-	29,931	-
b_{33}	-	-	0,005	-0,251	$-6,78 \cdot 10^{-4}$	0,009	0,018	-	$-7,09 \cdot 10^{-3}$	-	-	0,013	-	-9,514	0,019	-
b_{12}	-	-0,007	$3,75 \cdot 10^{-4}$	-0,023	-	-	-	$2,07 \cdot 10^{-3}$	-	-	0,002	$2,3 \cdot 10^{-3}$	0,037	-	0,009	-
b_{13}	-	$9 \cdot 10^{-5}$	$9,19 \cdot 10^{-5}$	0,005	$-9 \cdot 10^{-6}$	-	-	0,002	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$-5,4 \cdot 10^{-4}$	-	$1,2 \cdot 10^{-4}$	0,010	-	0,007	0,0158
b_{23}	-	-0,065	-0,035	-0,19	0,002	-0,112	-0,166	-0,325	0,186	0,487	-0,039	-0,076	-2,15	-122,9	-3,25	-
Коэффициент детерминации $R^2, \%$	79,33	82,438	89,729	86,579	79,464	83,38	84,962	86,782	91,844	82,402	82,627	81,407	89,961	85,978	84,244	86,238

Таблица В.3 – Коэффициенты b_{ij} уравнений регрессий и статистические параметры выходных параметров при степени помола 60 °ШР

Коэффициенты регрессии	Выходные параметры															
	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6	Y_7	Y_8	Y_9	Y_{10}	Y_{11}	Y_{12}	Y_{13}	Y_{14}	Y_{15}	Y_{16}
	Значения коэффициентов															
b_0	0,736	27,401	13,872	443,311	2,606	18,369	20,625	49,064	-22,439	-23,066	-29,489	21,333	6196,67	11143	1588	714
b_1	$3,84 \cdot 10^{-5}$	-0,002	-0,007	-0,161	-0,002	$-4,62 \cdot 10^{-3}$	$-1,8 \cdot 10^{-3}$	$-8,9 \cdot 10^{-3}$	0,043	0,015	0,029	-0,004	-4,572	-2,715	-0,999	0,332
b_2	-0,038	1,04	-0,662	183,637	0,311	-	0,268	2,961	1,486	-	-3,457	1,534	59	4349	60,5	169,75
b_3	-0,002	-0,409	-0,408	-9,471	0,034	-1,078	-1,073	-2,165	1,919	3,308	0,039	-1,361	-94,24	-381	-31,25	-73,444
b_{11}	-	-	$-1,1 \cdot 10^{-6}$	-	6,522	-	-	-	$-8,1 \cdot 10^{-6}$	-	$-1,7 \cdot 10^{-6}$	-	$8,27 \cdot 10^{-4}$	-	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$
b_{22}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-1,007	-	-	-	-	-
b_{33}	-	0,007	$6,87 \cdot 10^{-3}$	-	-0,001	0,017	0,035	0,045	-0,049	-0,043	-	0,03	-	-	-	-
b_{12}	-	-	$4 \cdot 10^{-4}$	-0,023	$-1,51 \cdot 10^{-4}$	-	-	-	-0,001	-	0,002	-	-	-1,399	-	-
b_{13}	-	0,001	-0,408	0,005	-	$2,3 \cdot 10^{-4}$	-	$4,3 \cdot 10^{-4}$	$-2,5 \cdot 10^{-4}$	$-8,8 \cdot 10^{-4}$	-	0,002	0,042	0,197	0,014	0,015
b_{23}	-	-0,06	-0,022	-	0,003	-	-	-0,197	0,121	-	-0,039	-0,108	-6,8	-98,75	-3,5	-13,05
Коэффициент детерминации $R^2, \%$	78,372	86,128	83,767	80,829	79,372	83,742	76,599	80,431	77,116	76,921	78,627	77,977	88,208	84,699	82,203	86,281

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Результаты регрессионного анализа

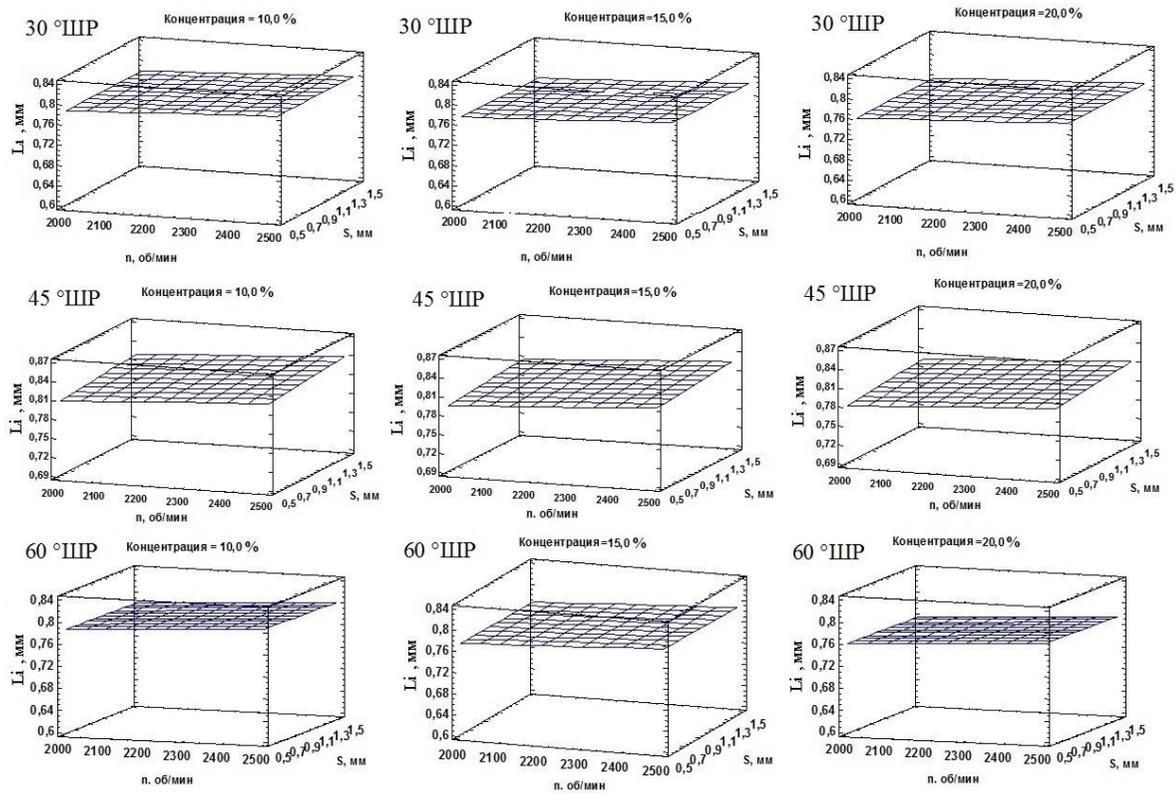


Рисунок Г.1 – Зависимость средней длины волокна от частоты вращения ротора n , величины межножевого зазора s , концентрации волокнистой массы C при степени помола 30 °ШР, 45 °ШР и 60 °ШР.

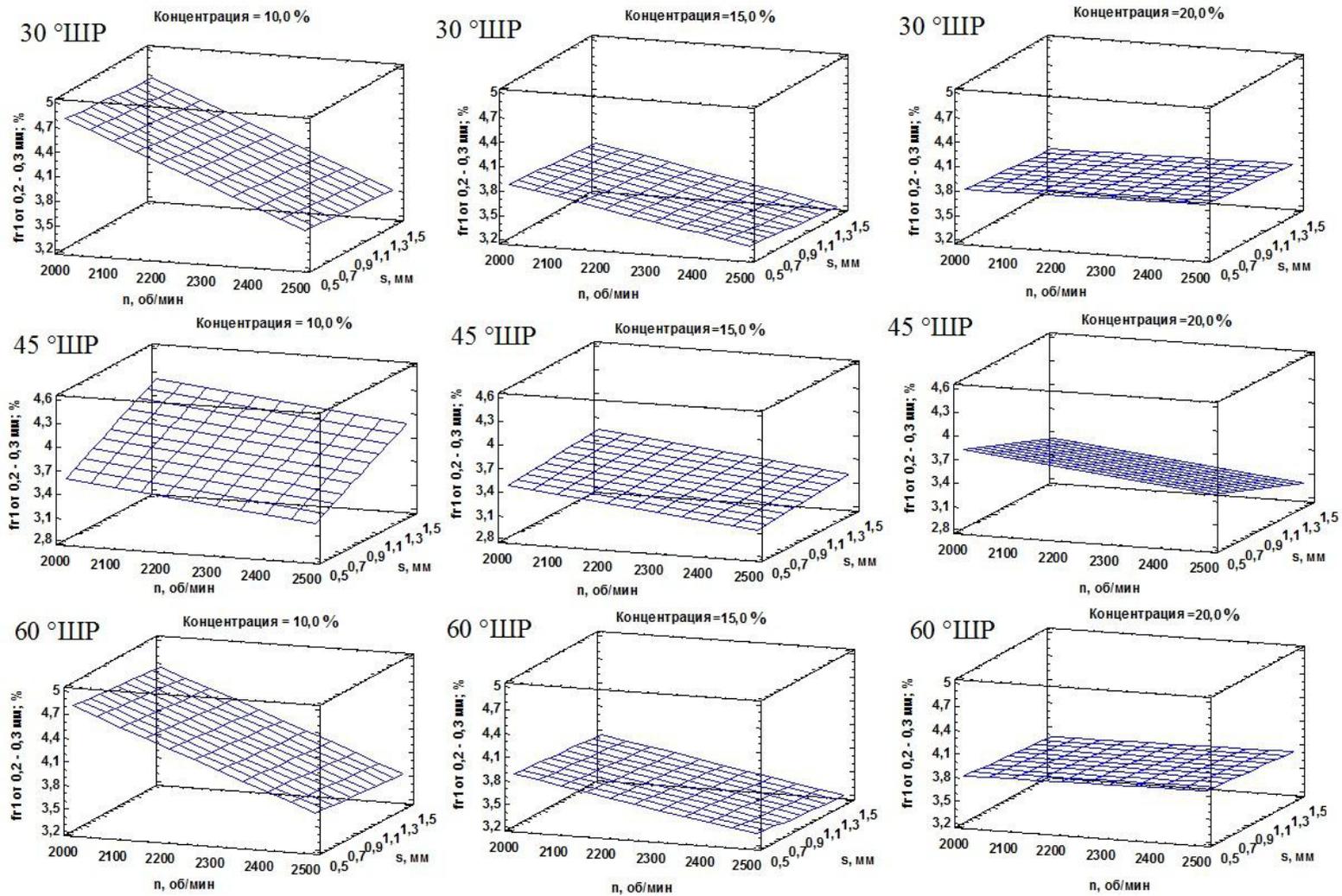


Рисунок Г.2 – Зависимость фракции $fr1$ от 0,2 – 0,3 мм от частоты вращения ротора n , величины межжевого зазора s , концентрации волокнистой массы C при степени помола 30 °ШП, 45 °ШП и 60 °ШП.

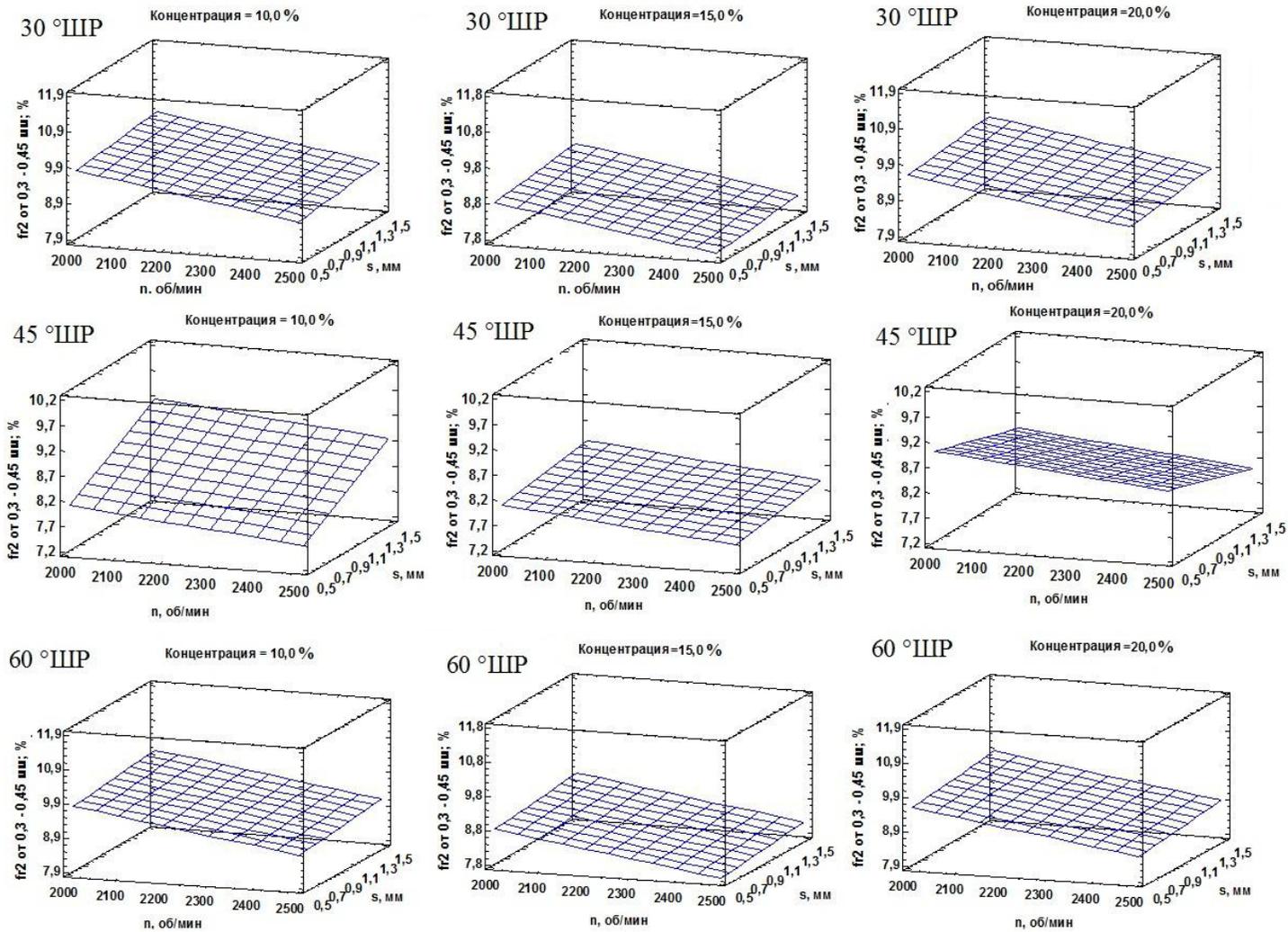


Рисунок Г.3 – Зависимость фракции fr_2 от 0,3 – 0,45 мм от частоты вращения ротора n , величины межножевого зазора s , концентрации волокнистой массы C при степени помола 30 °ШР, 45 °ШР и 60 °ШР.

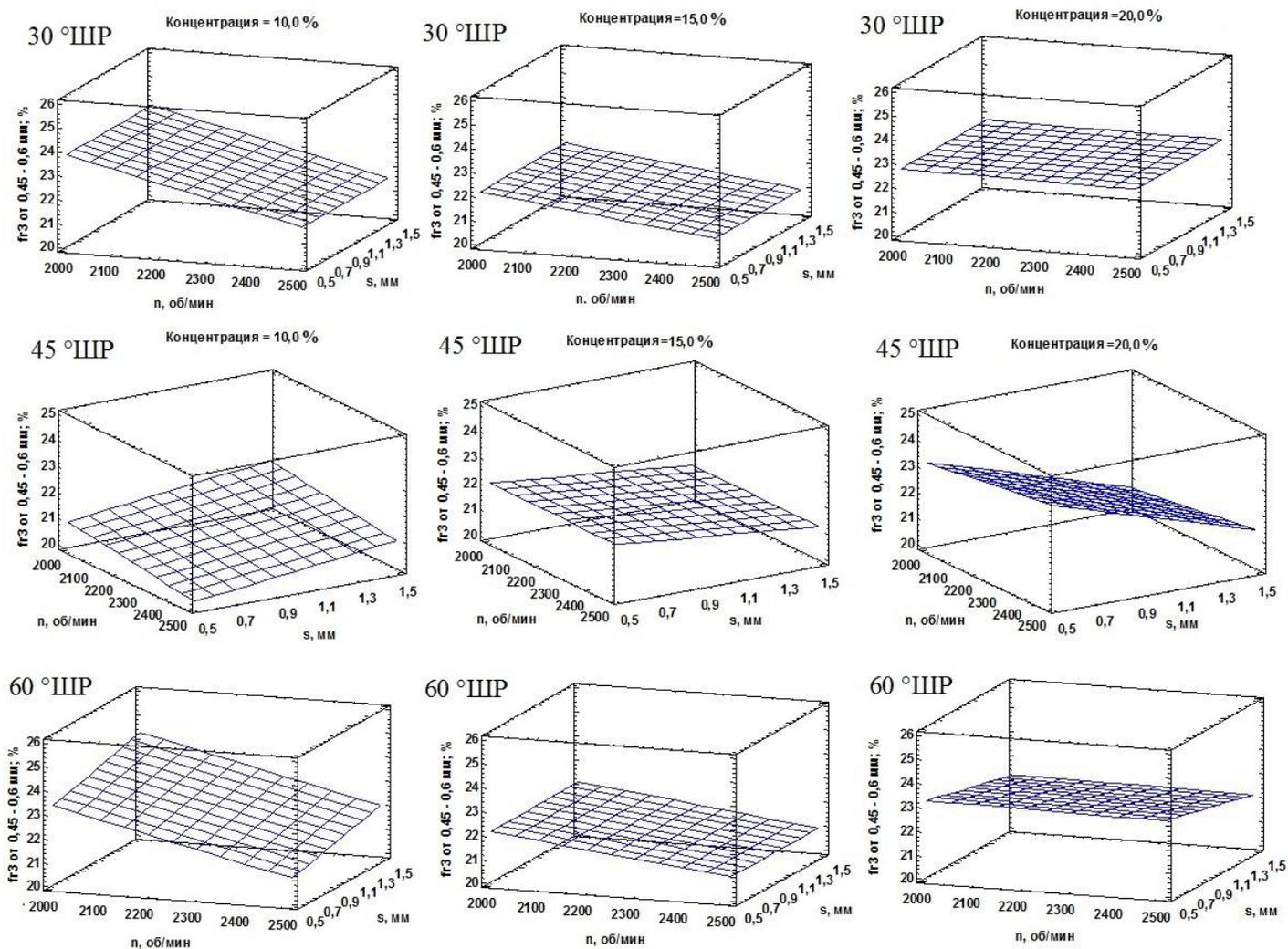


Рисунок Г.4 – Зависимость фракции fr_3 от 0,45 – 0,6 мм от частоты вращения ротора n , величины межжевого зазора s , концентрации волокнистой массы C при степени помола 30 °ШП, 45 °ШП и 60 °ШП.

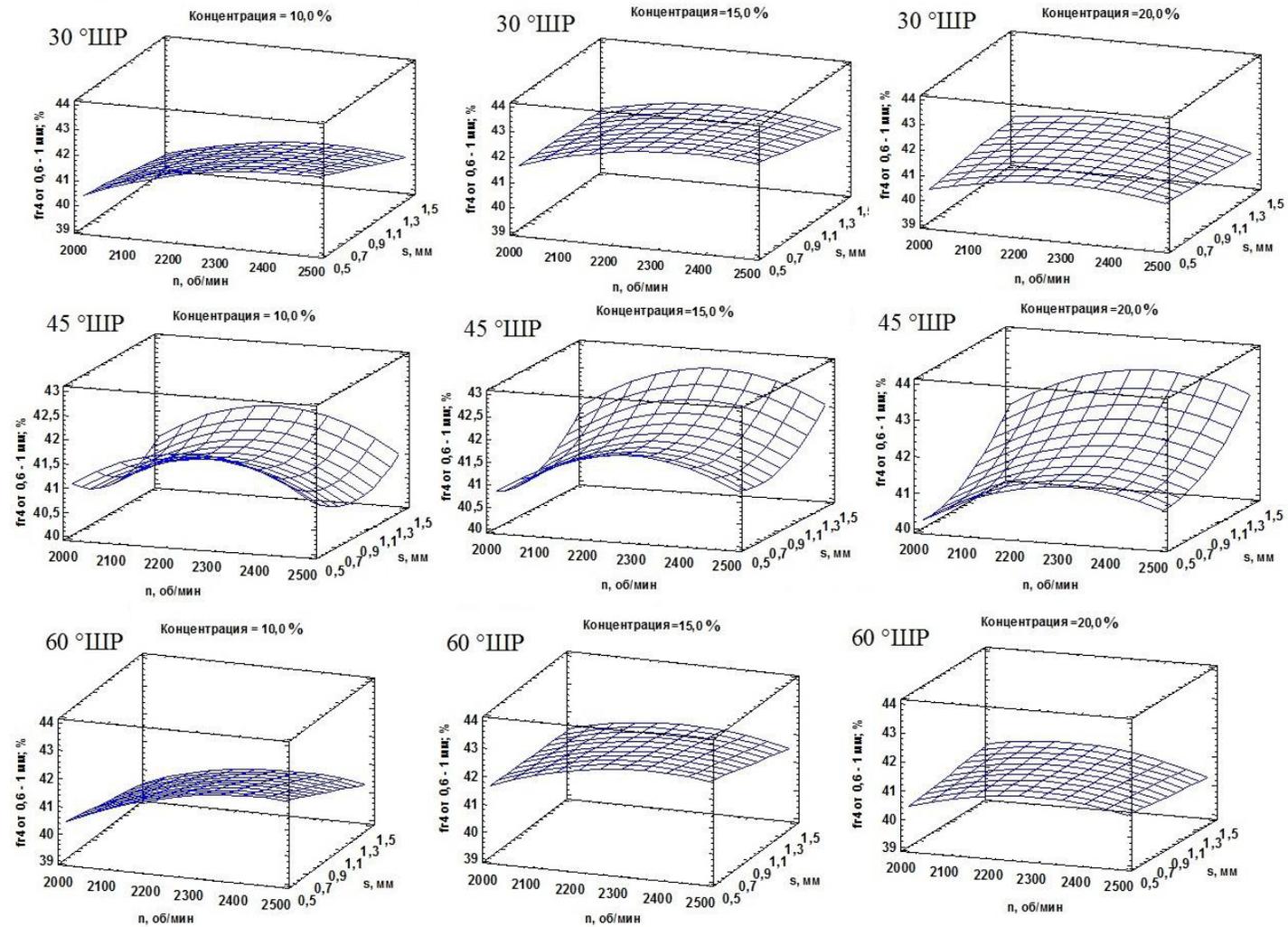


Рисунок Г.5 – Зависимость фракции fr_4 от 0,6 – 1 мм от частоты вращения ротора n , величины межножевого зазора s , концентрации волокнистой массы C при степени помола 30 °ШР, 45 °ШР и 60 °ШР.

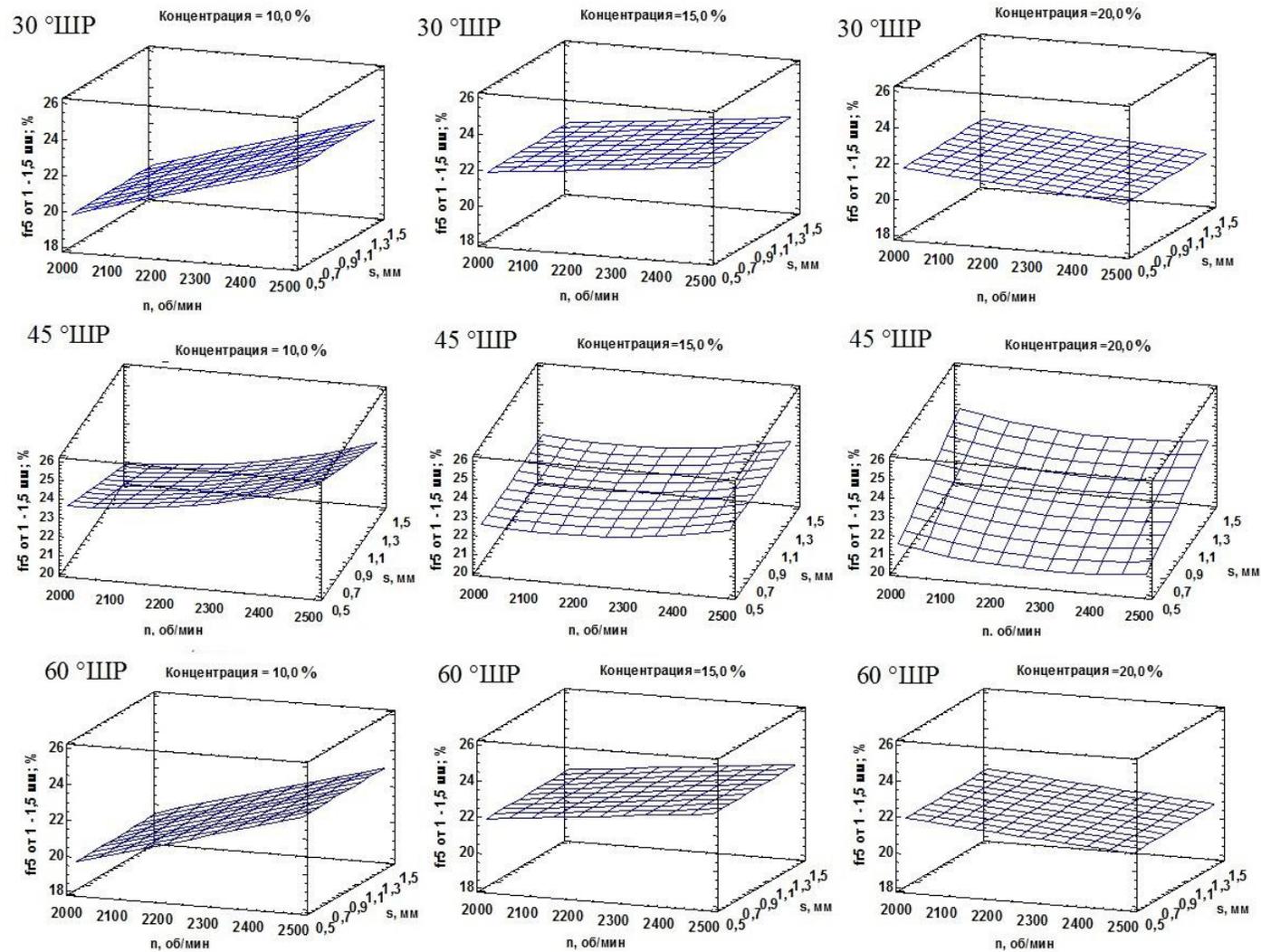


Рисунок Г.6 – Зависимость фракции fr_5 от 1 - 1,5 мм от частоты вращения ротора n , величины межложевого зазора s , концентрации волокнистой массы C при степени помола 30 °ШР, 45 °ШР и 60 °ШР.

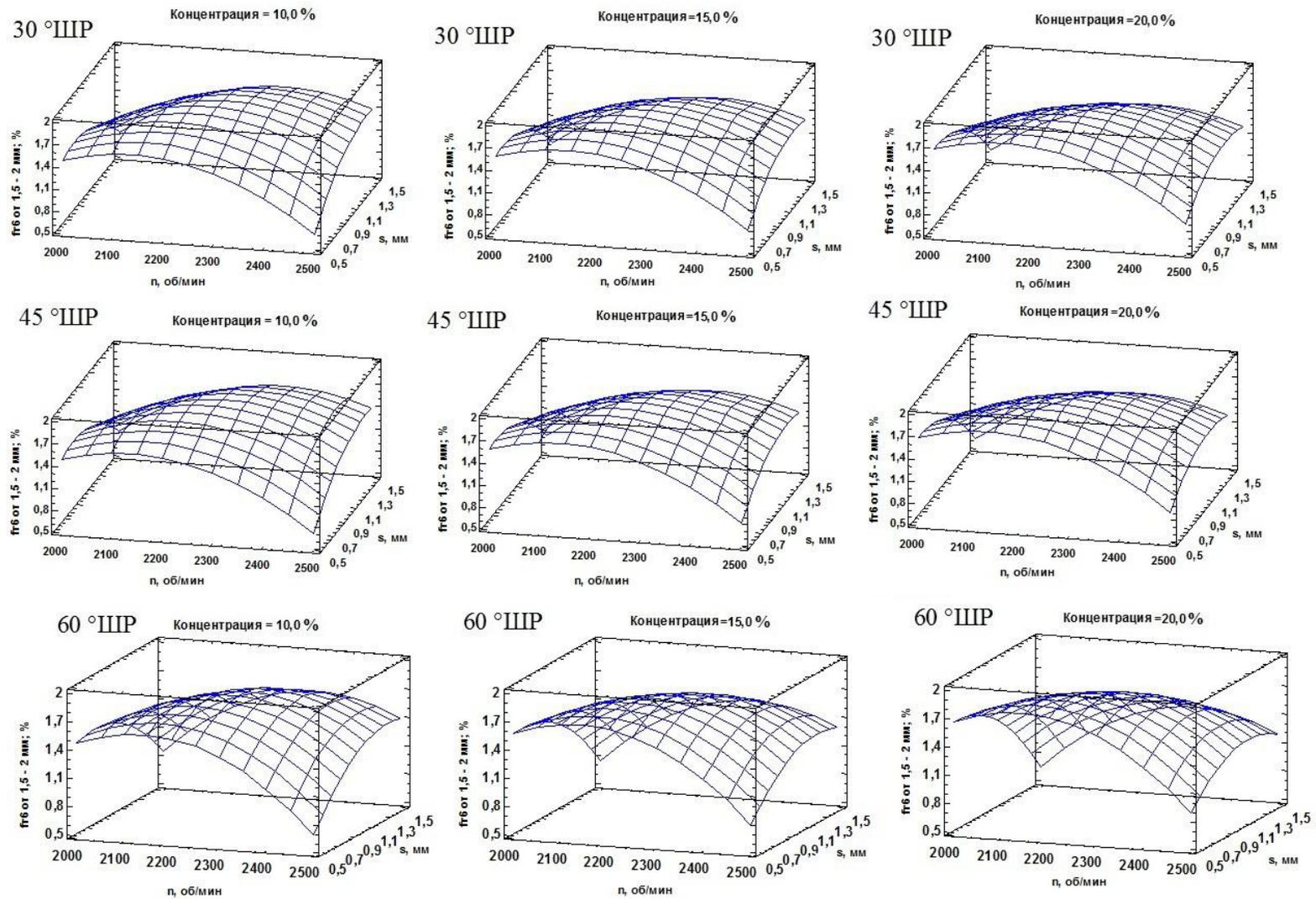


Рисунок Г.7 – Зависимость фракции fr_5 от 1,5 - 2 мм от частоты вращения ротора n , величины межжелеваго зазора s , концентрации волокнистой массы C при степени помола 30 °ШР, 45 °ШР и 60 °ШР.

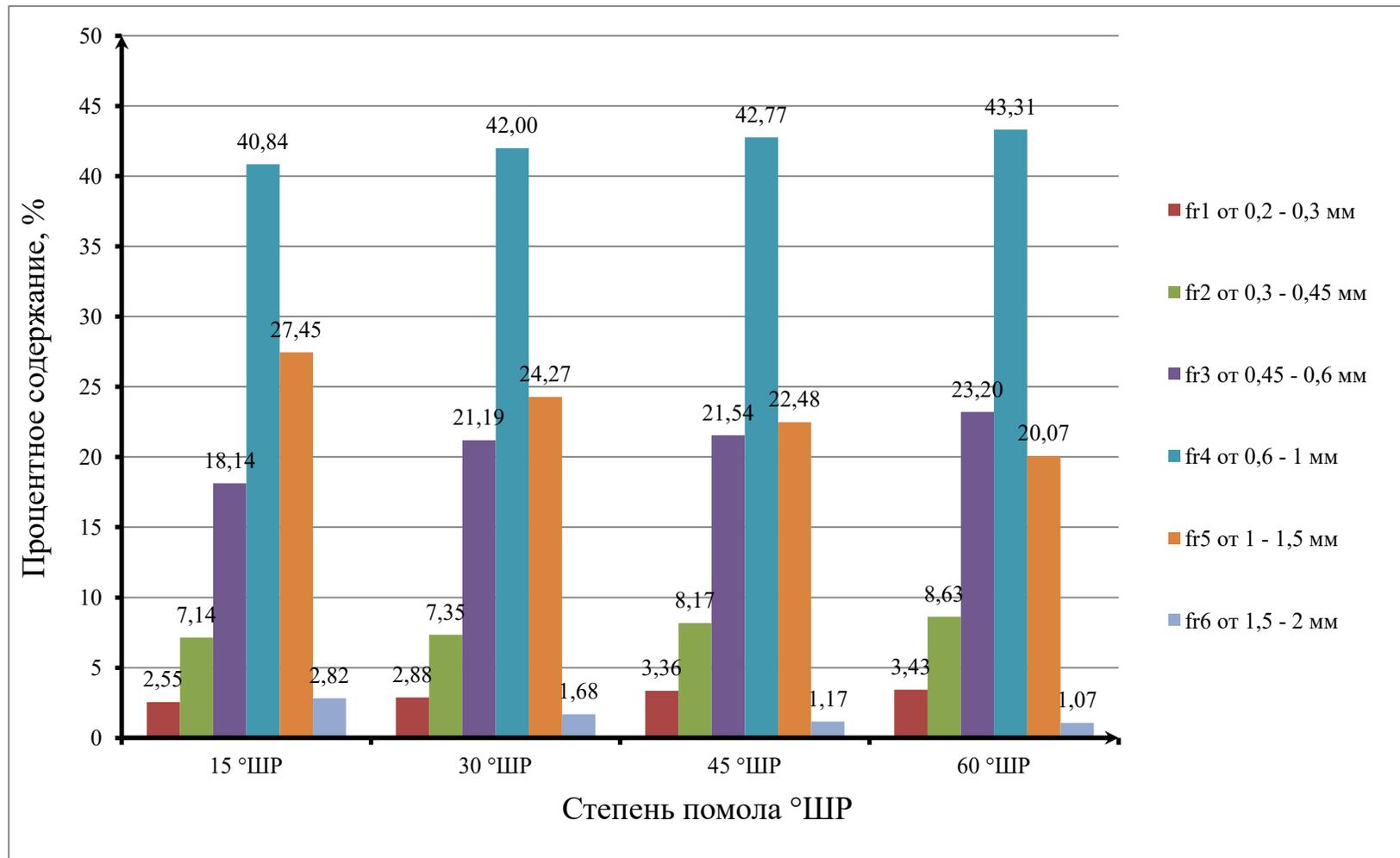


Рисунок Г.8 – Гистограмма распределения длины волокон по классам фракций при частоте вращения ротора 2000 об/мин, величины зазора между ножами ротора и статора 1,5 мм и концентрации волокнистой массы 15%.

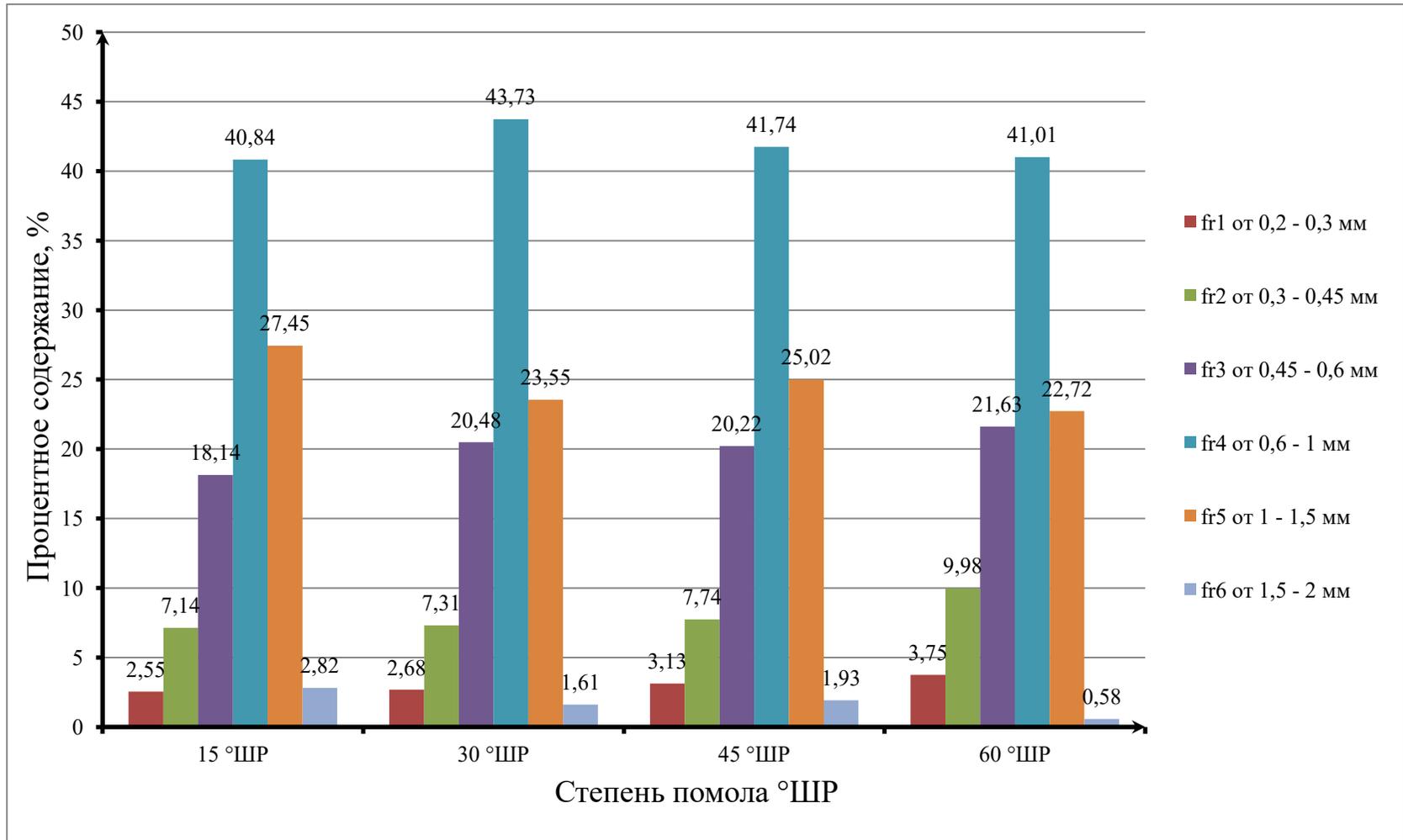


Рисунок Г.9 – Гистограмма распределения длины волокон по классам фракций при частоте вращения ротора 2000 об/мин, величины зазора между ножами ротора и статора 1,5 мм и концентрации волокнистой массы 20 %.

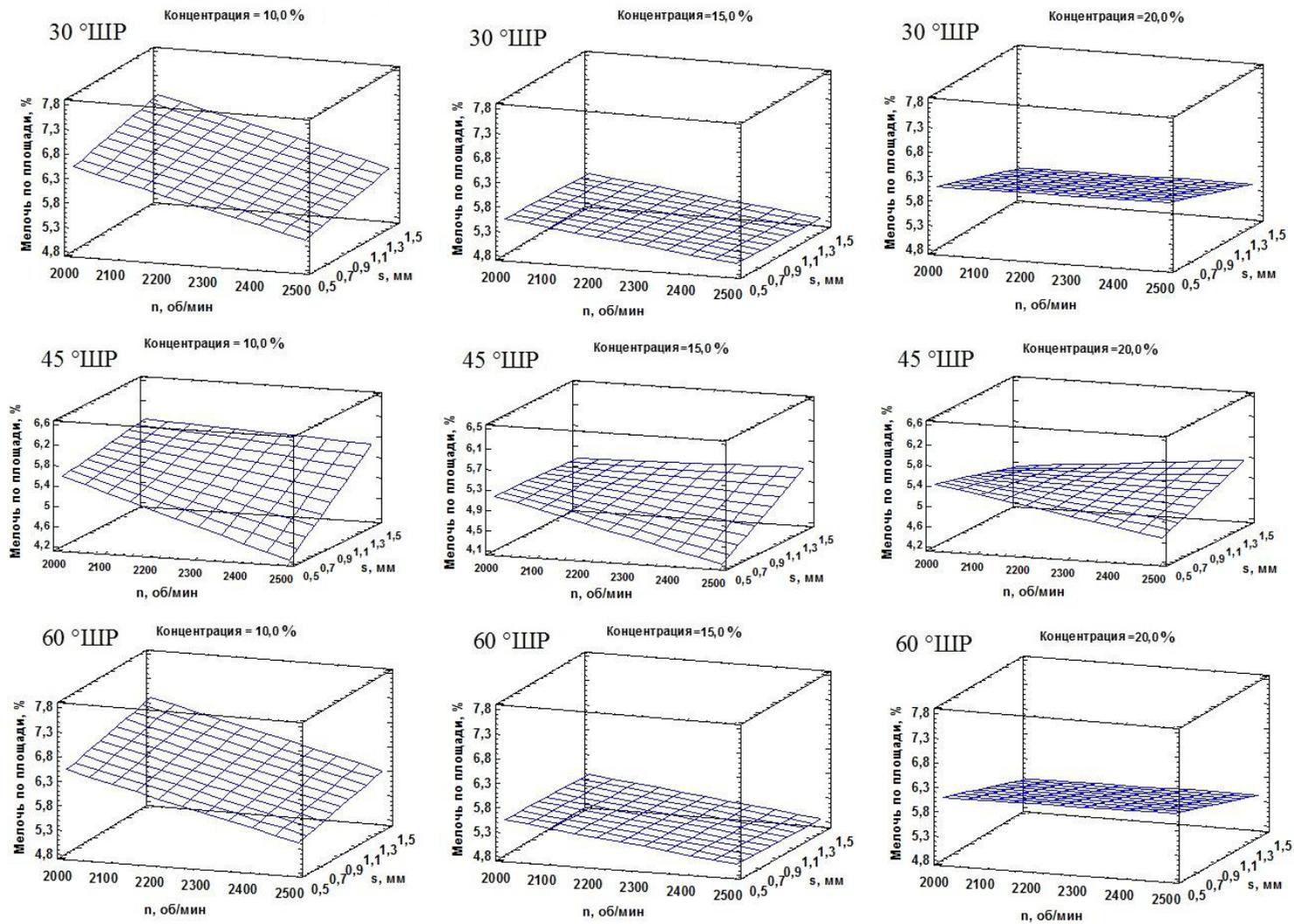


Рисунок Г.10 – Зависимость мелочи по площади от частоты вращения ротора n , величины межножевого зазора s , концентрации волокнистой массы C при степени помола 30 °ШР, 45 °ШР и 60 °ШР.

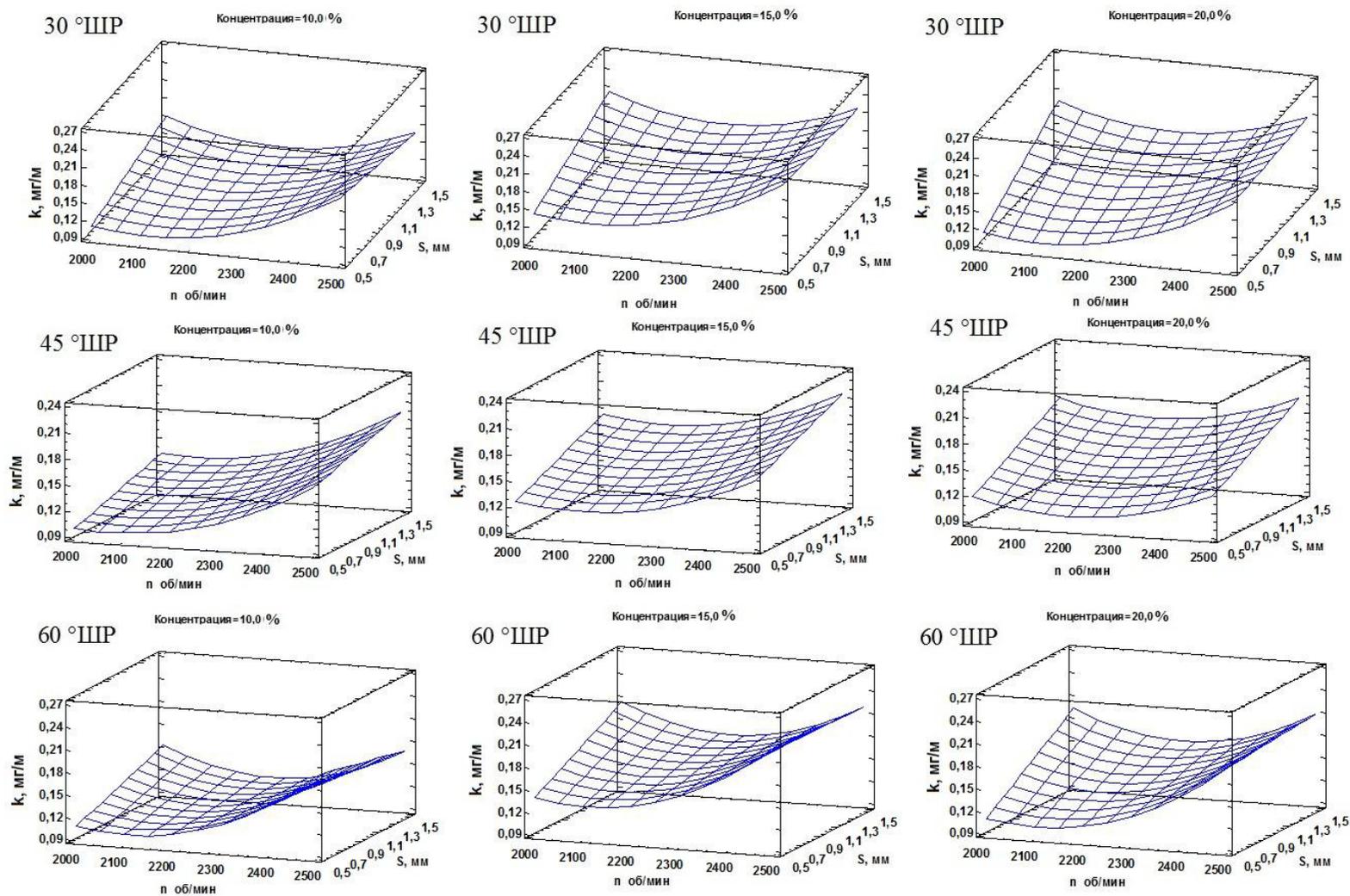


Рисунок Г.11 – Зависимость грубости волокна от частоты вращения ротора n , величины межножевого зазора s , концентрации волокнистой массы C при степени помола 30 °ШР, 45 °ШР и 60 °ШР.

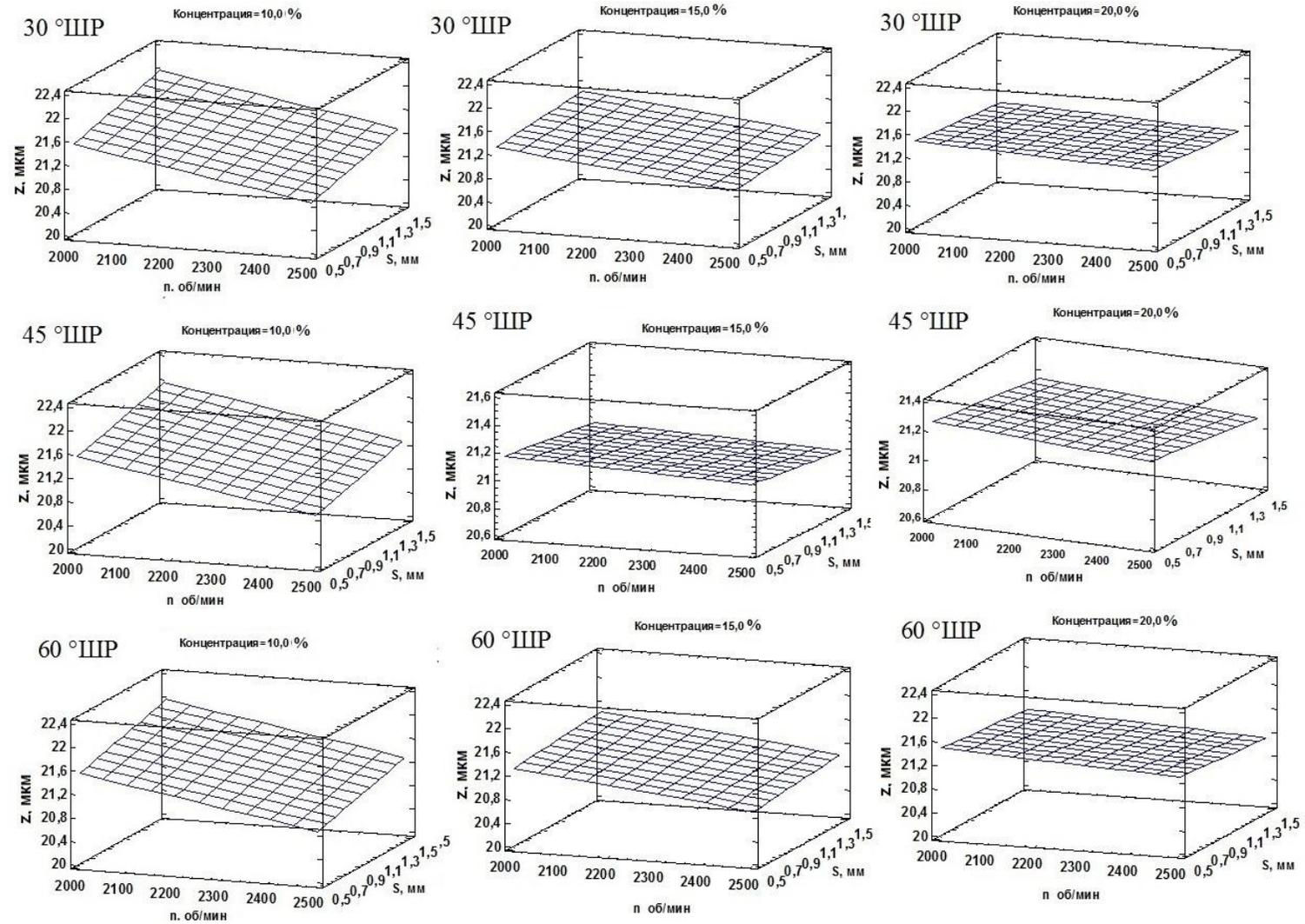


Рисунок Г.12 – Зависимость ширины волокна от частоты вращения ротора n , величины межножевого зазора s , концентрации волокнистой массы C при степени помола 30°ШР, 45°ШР и 60°ШР.

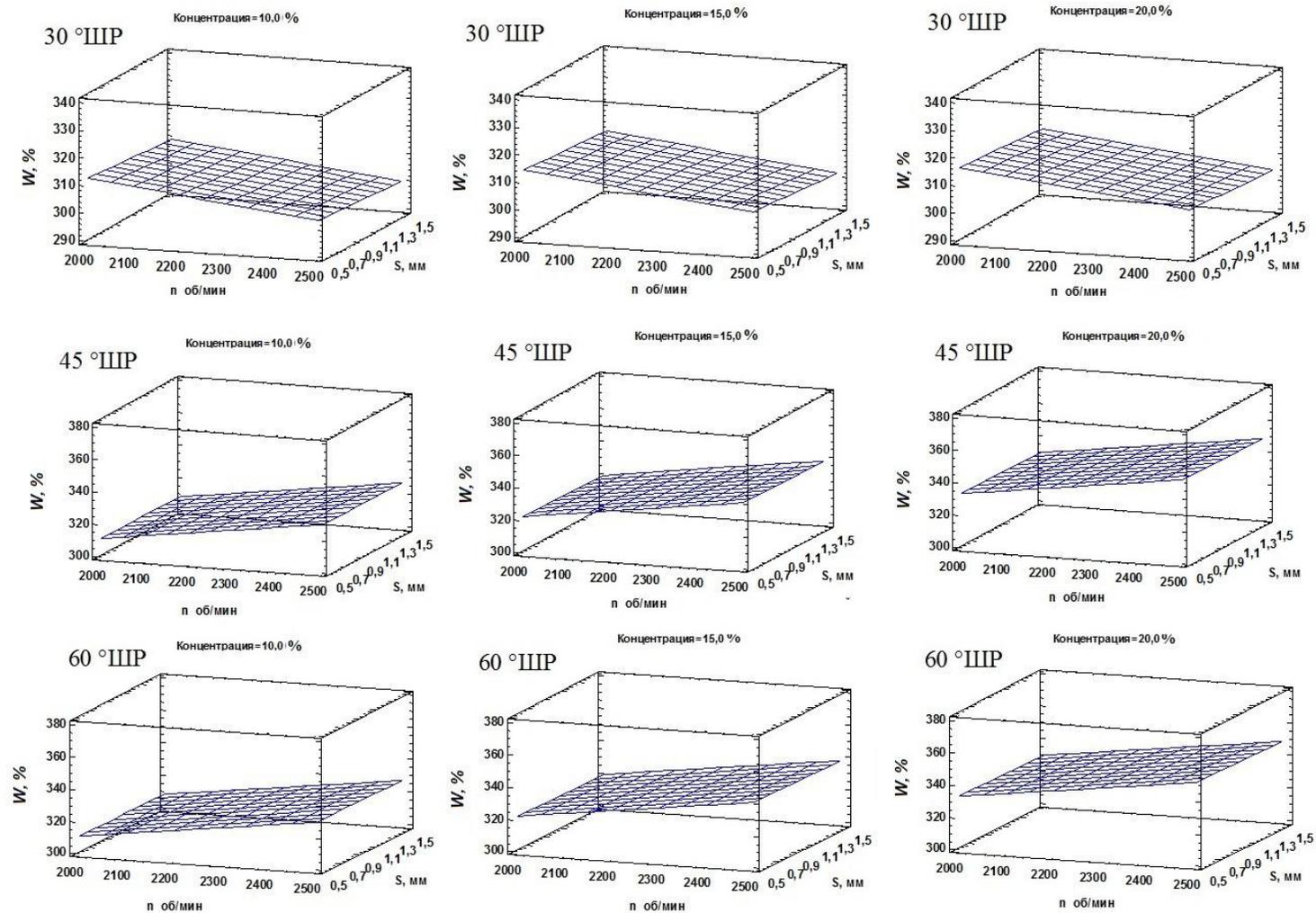


Рисунок Г.13 – Зависимость водоудерживающей способности от частоты вращения ротора n , величины межножевого зазора s , концентрации волокнистой массы C при степени помола 30 °ШР, 45 °ШР и 60 °ШР.

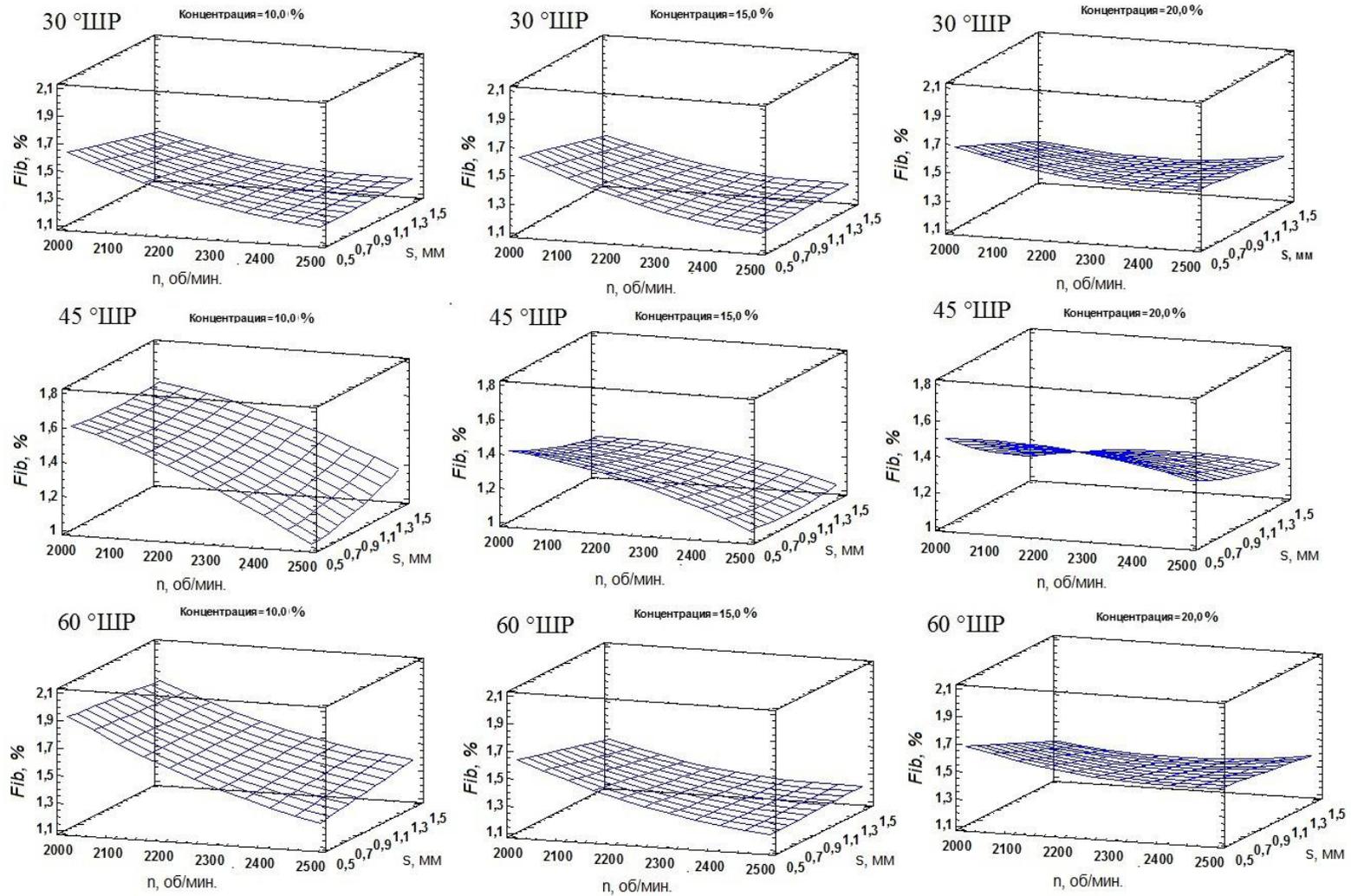


Рисунок Г.14 – Зависимость индекса фибрилляции от частоты вращения ротора n , величины межножевого зазора s , концентрации волокнистой массы C при степени помола 30 °ШП, 45 °ШП и 60 °ШП.

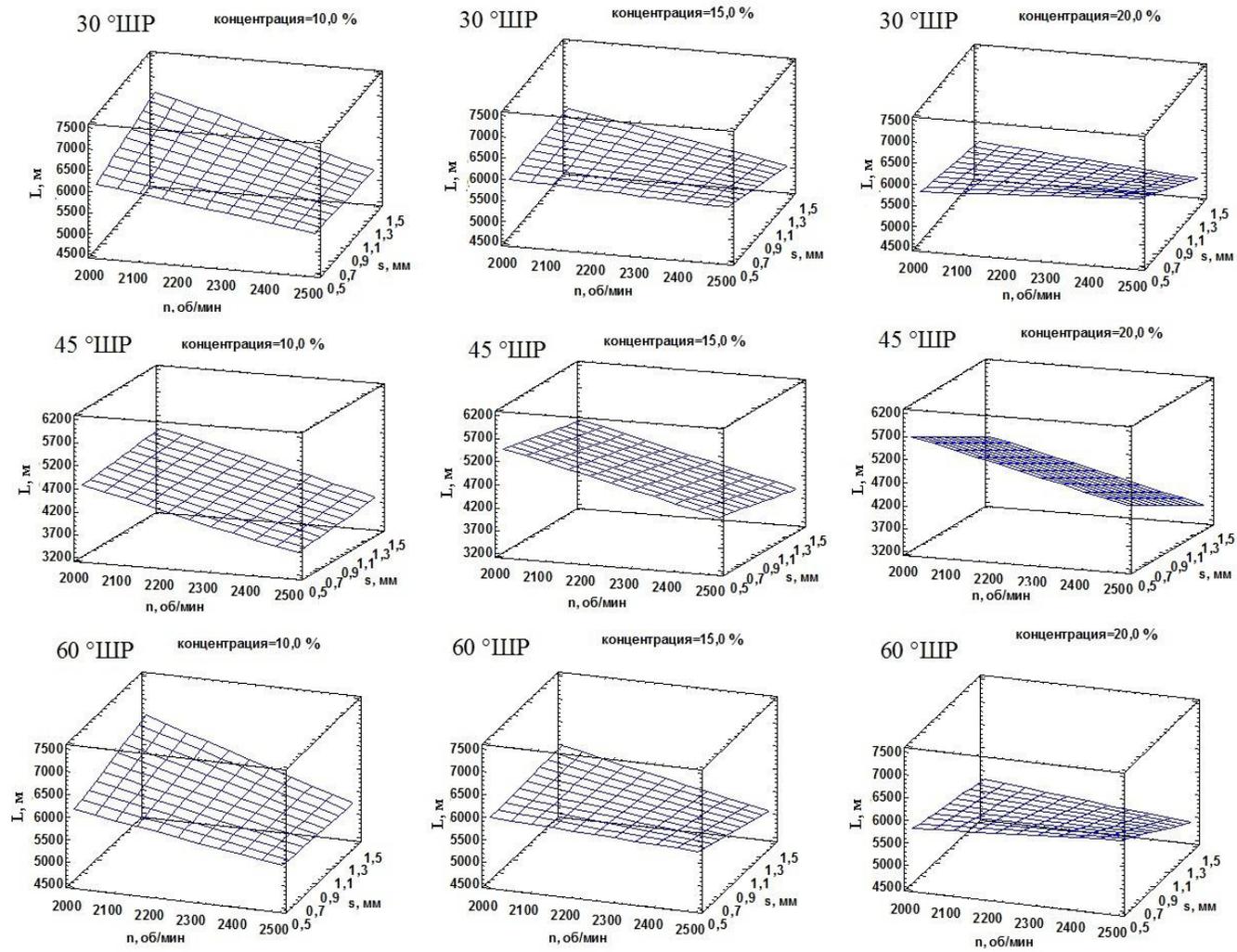


Рисунок Г.15 – Зависимость разрывной длины от частоты вращения ротора n , величины межножевого зазора s , концентрации волокнистой массы C при степени помола 30 °ШР, 45 °ШР и 60 °ШР.

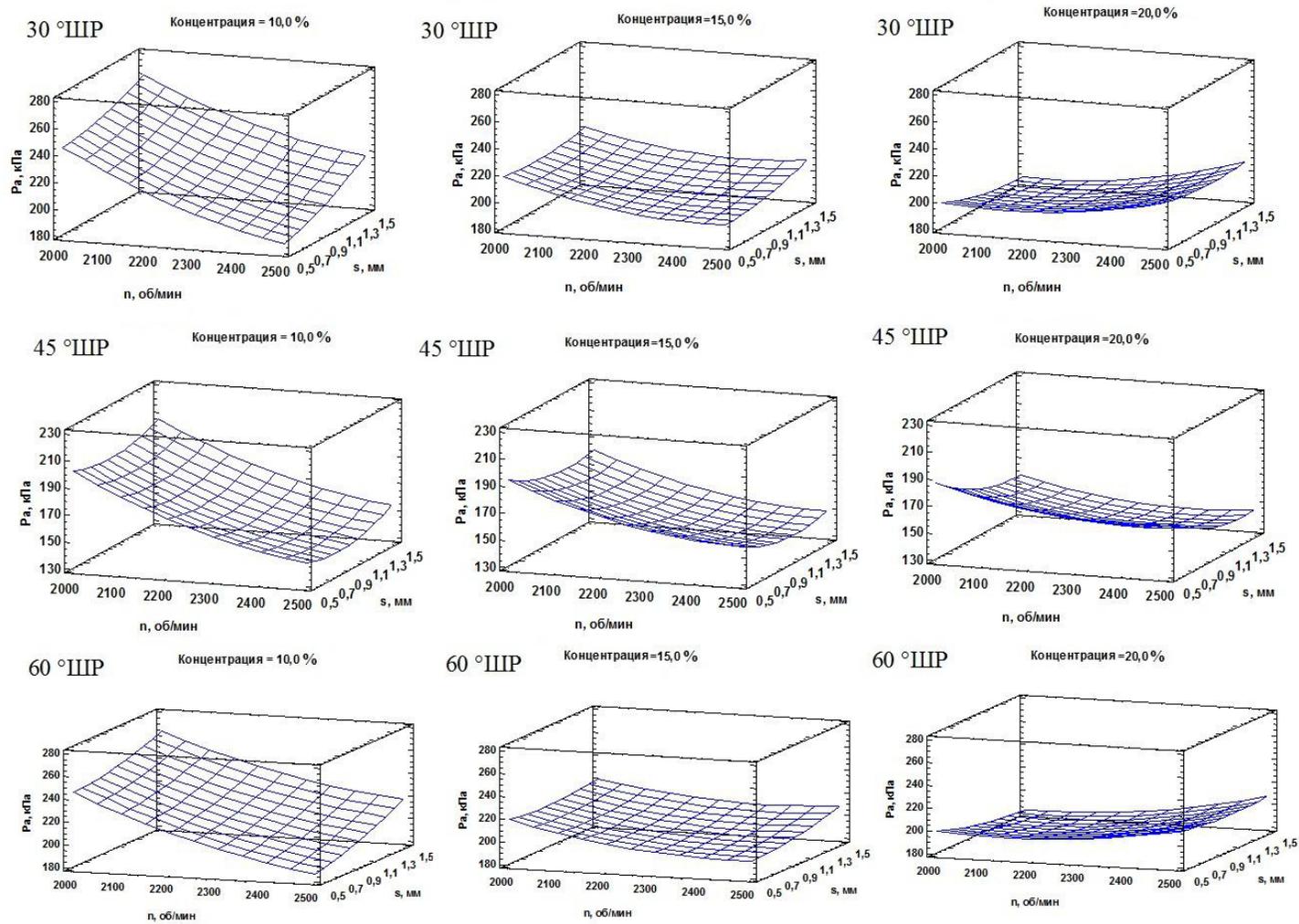


Рисунок Г.16 – Зависимость сопротивления продавливанию от частоты вращения ротора n , величины межножевого зазора s , концентрации волокнистой массы C при степени помола 30 °ШР, 45 °ШР и 60 °ШР.

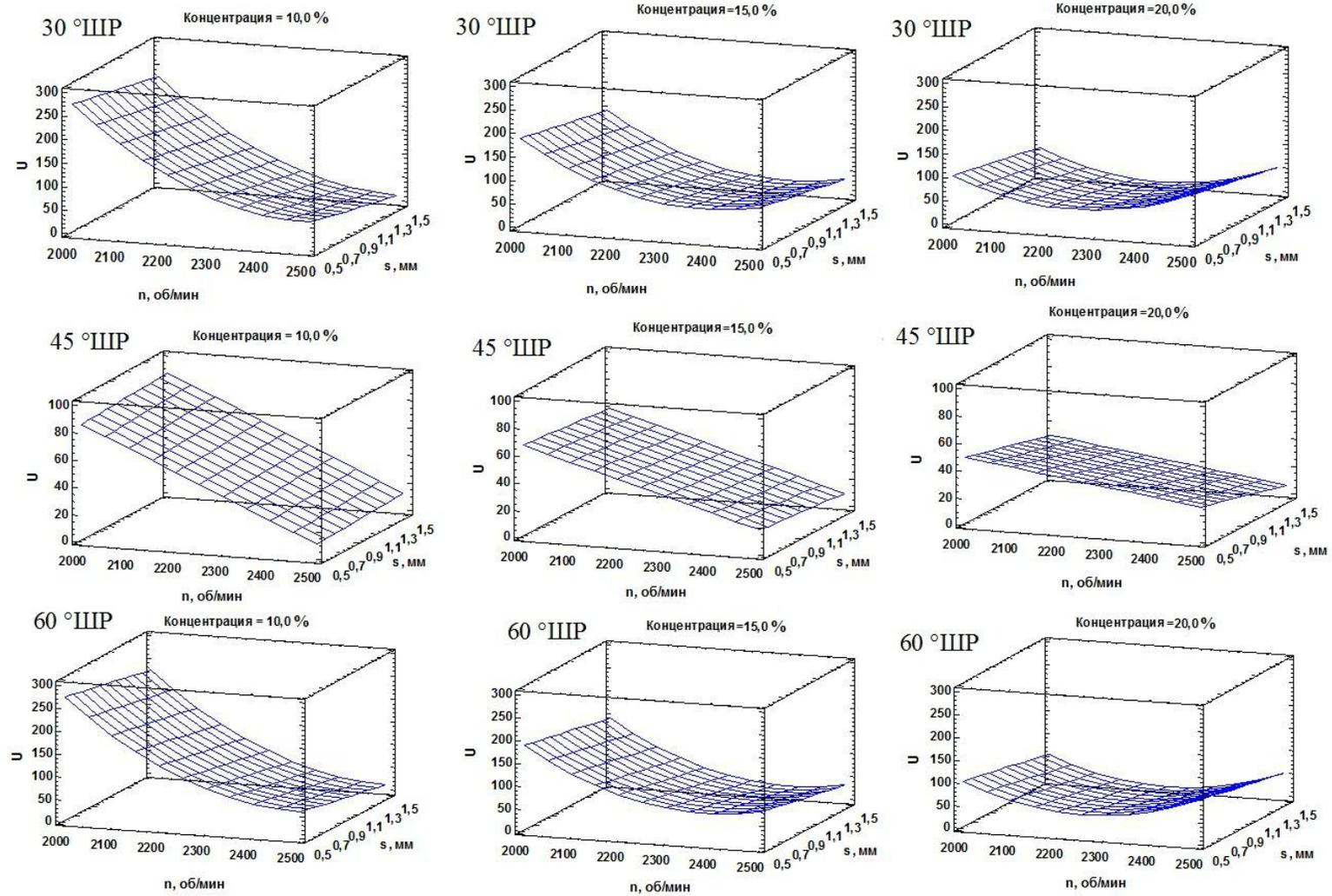


Рисунок Г.17 – Зависимость сопротивления излому от частоты вращения ротора n , величины межножевого зазора s , концентрации волокнистой массы C при степени помола 30 °ШП, 45 °ШП и 60 °ШП.

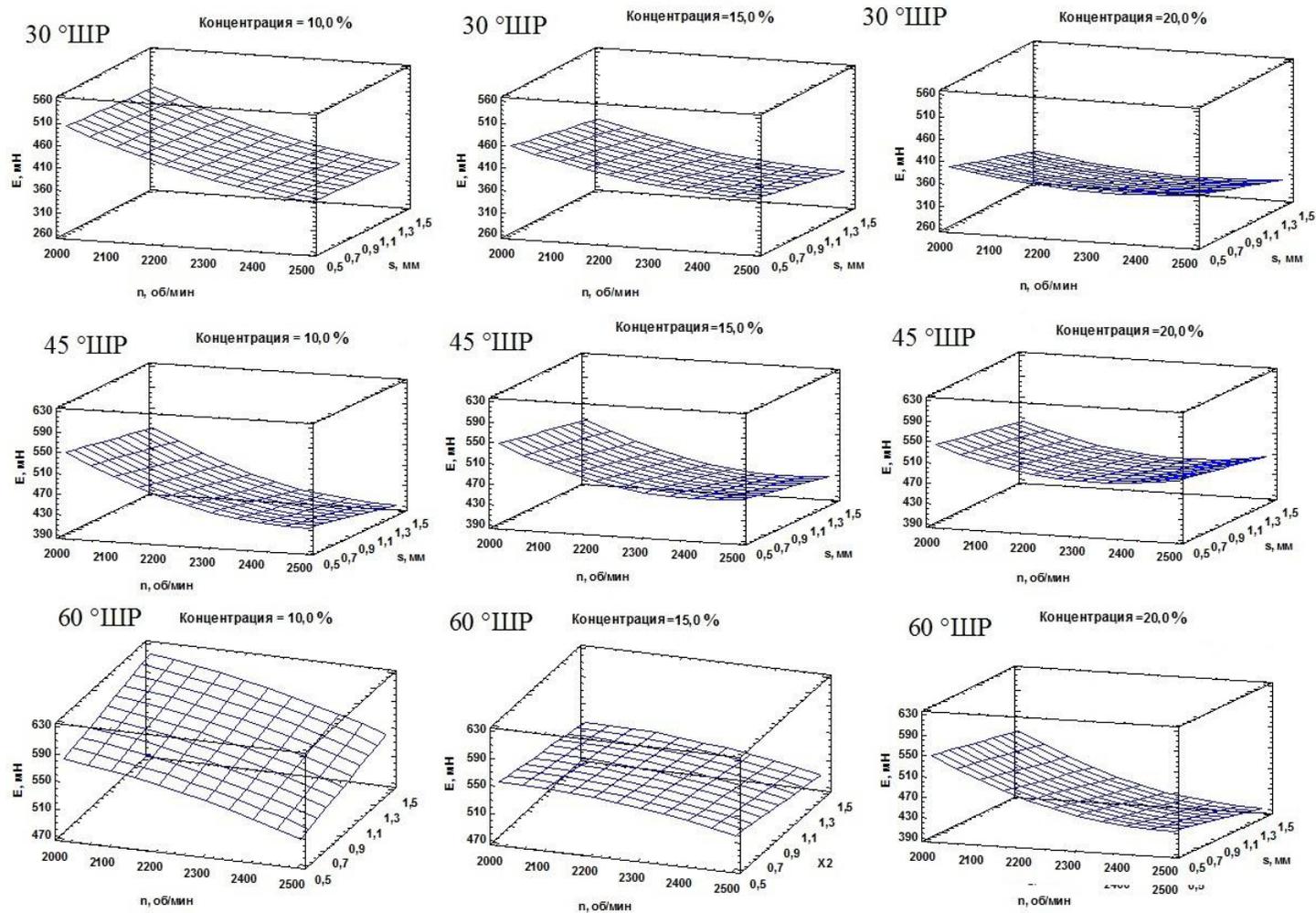
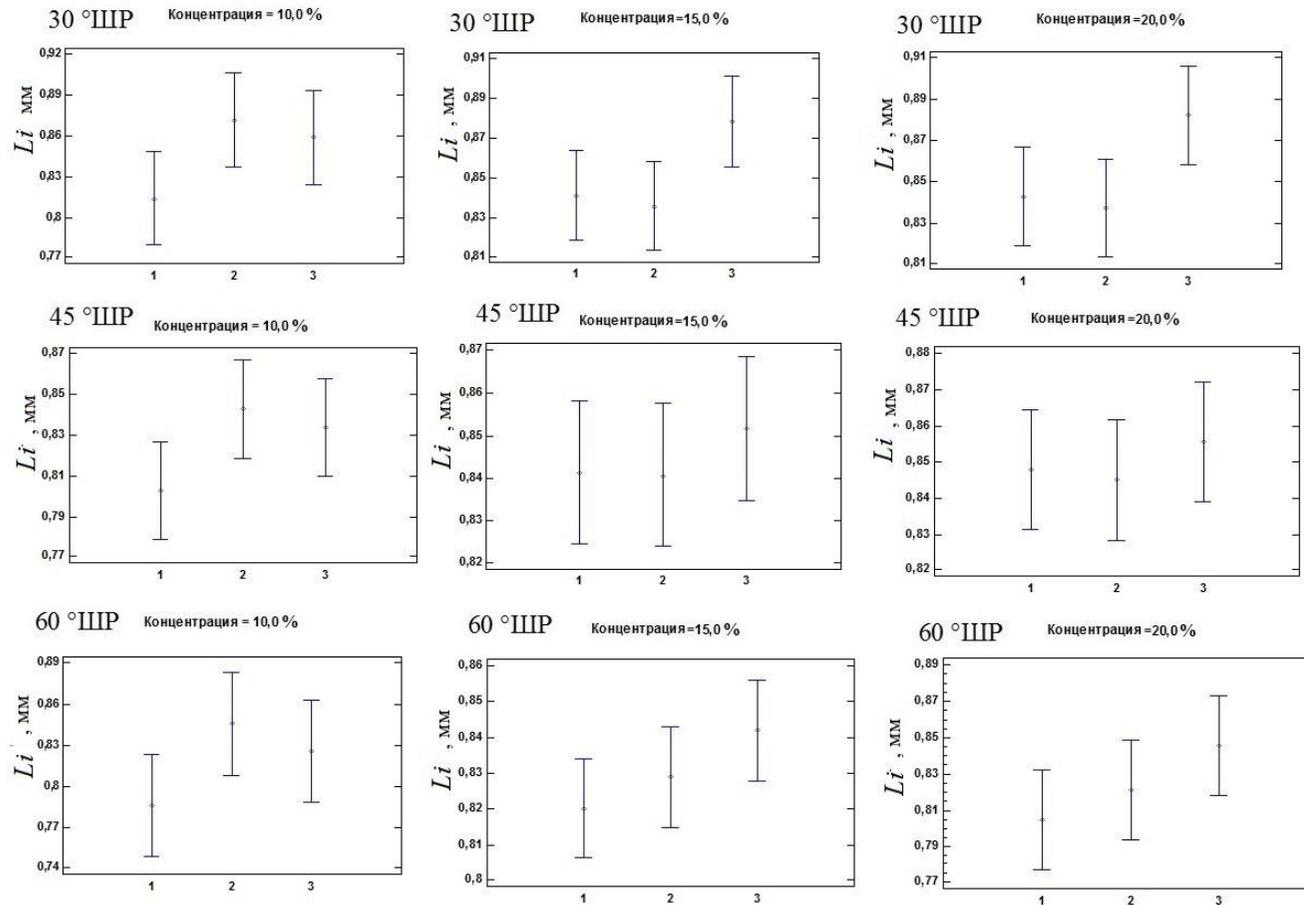
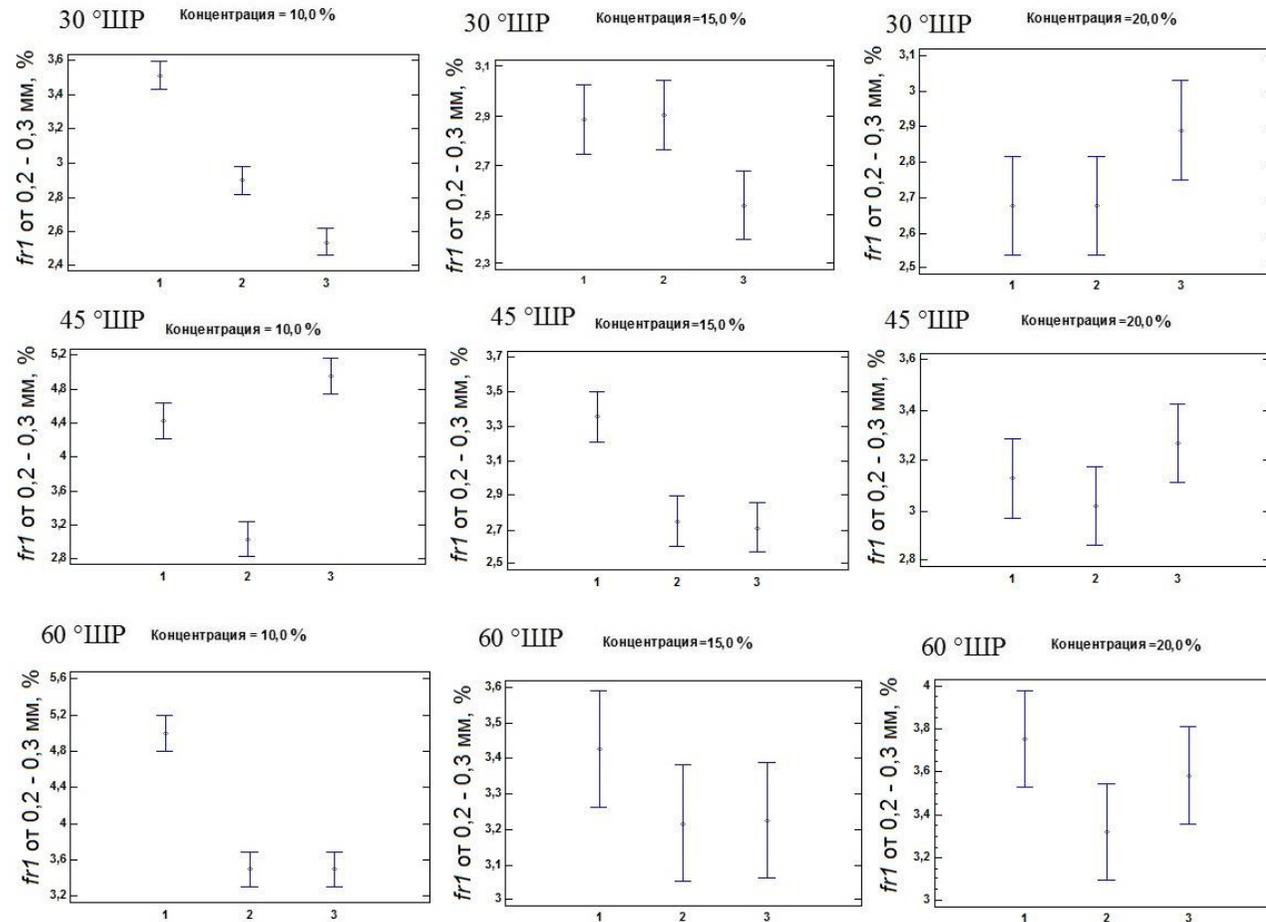


Рисунок Г.18 – Зависимость сопротивления раздиранию от частоты вращения ротора n , величины межреберного зазора s , концентрации волокнистой массы C при степени помола 30 °ШР, 45 °ШР и 60 °ШР.



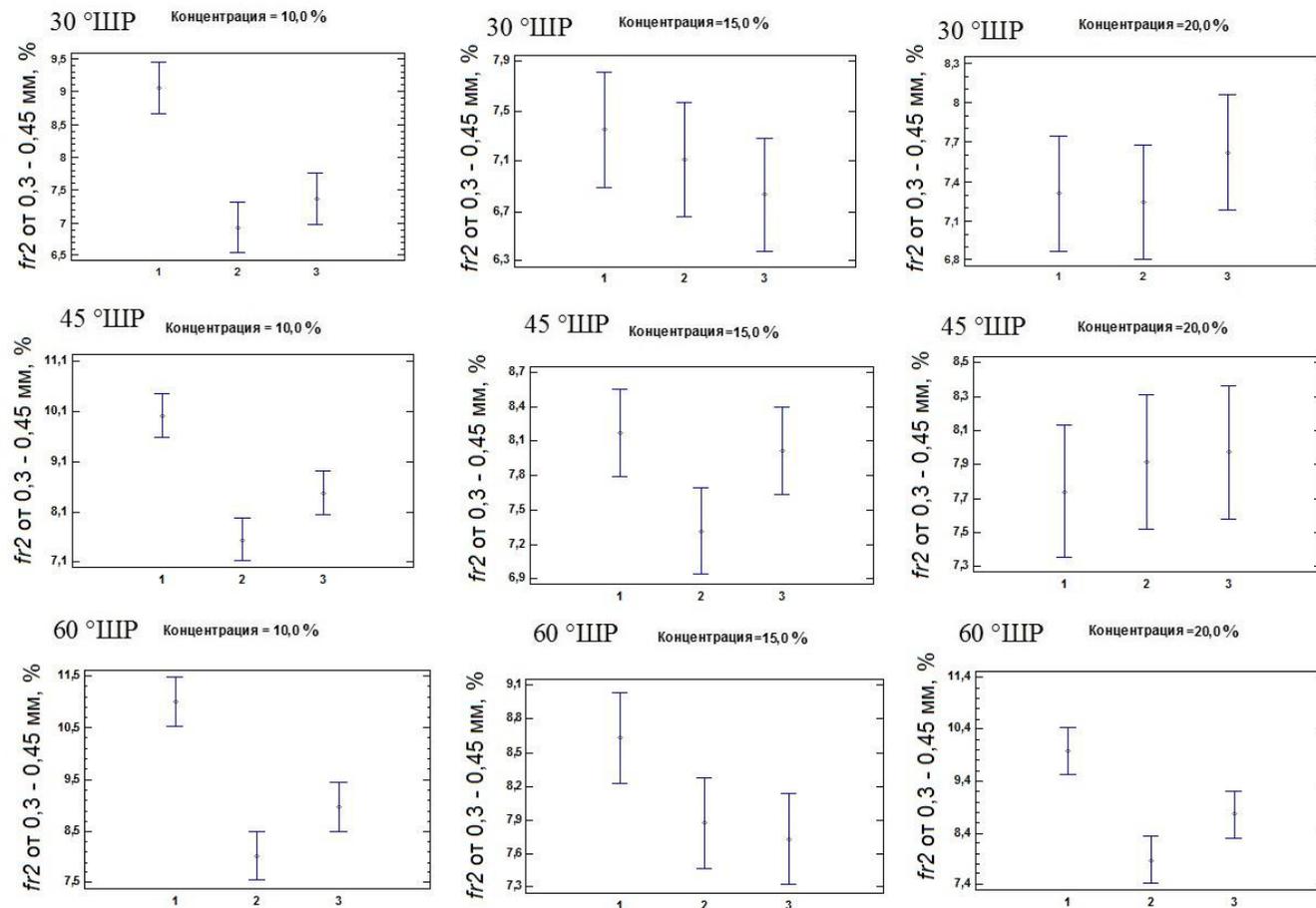
1 – гарнитура с окружной формой ножей, 2 – гарнитура секторная с прямолинейной формой ножей, 3 – гарнитура с прямолинейными ножами и равномерным их распределением

Рисунок Г.19 – Средние значения и 95 % - ные доверительные интервалы средней длины волокна зависимости от вида гарнитуры при концентрации волокнистой массы 10, 15 и 20%



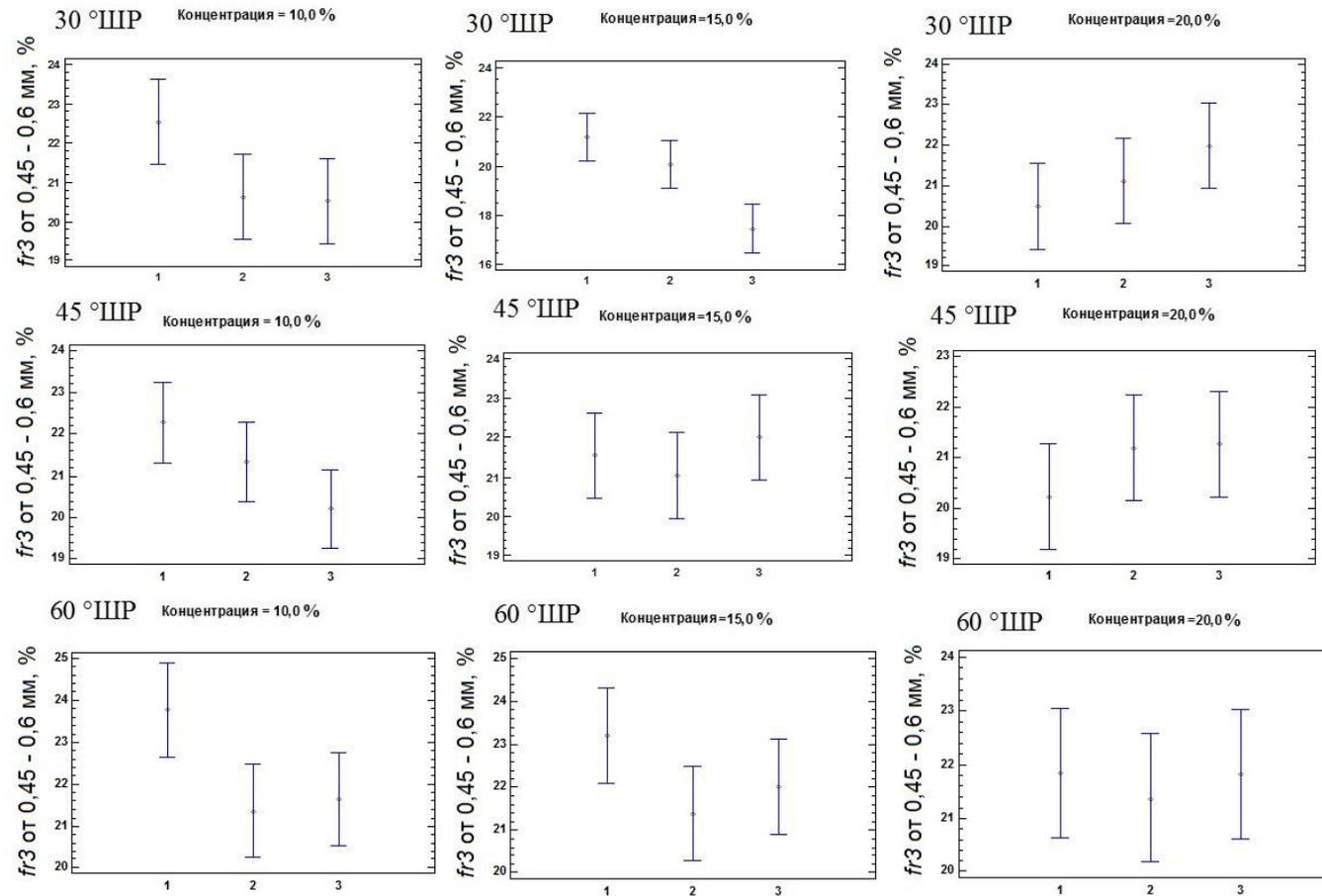
1 – гарнитура с окружной формой ножей, 2 – гарнитура секторная с прямолинейной формой ножей, 3 – гарнитура с прямолинейными ножами и равномерным их распределением

Рисунок Г.20 – Средние значения и 95 % - ные доверительные интервалы фракции $fr1$ от 0,2 – 0,3 мм в зависимости от вида гарнитуры при концентрации волокнистой массы 10, 15 и 20%



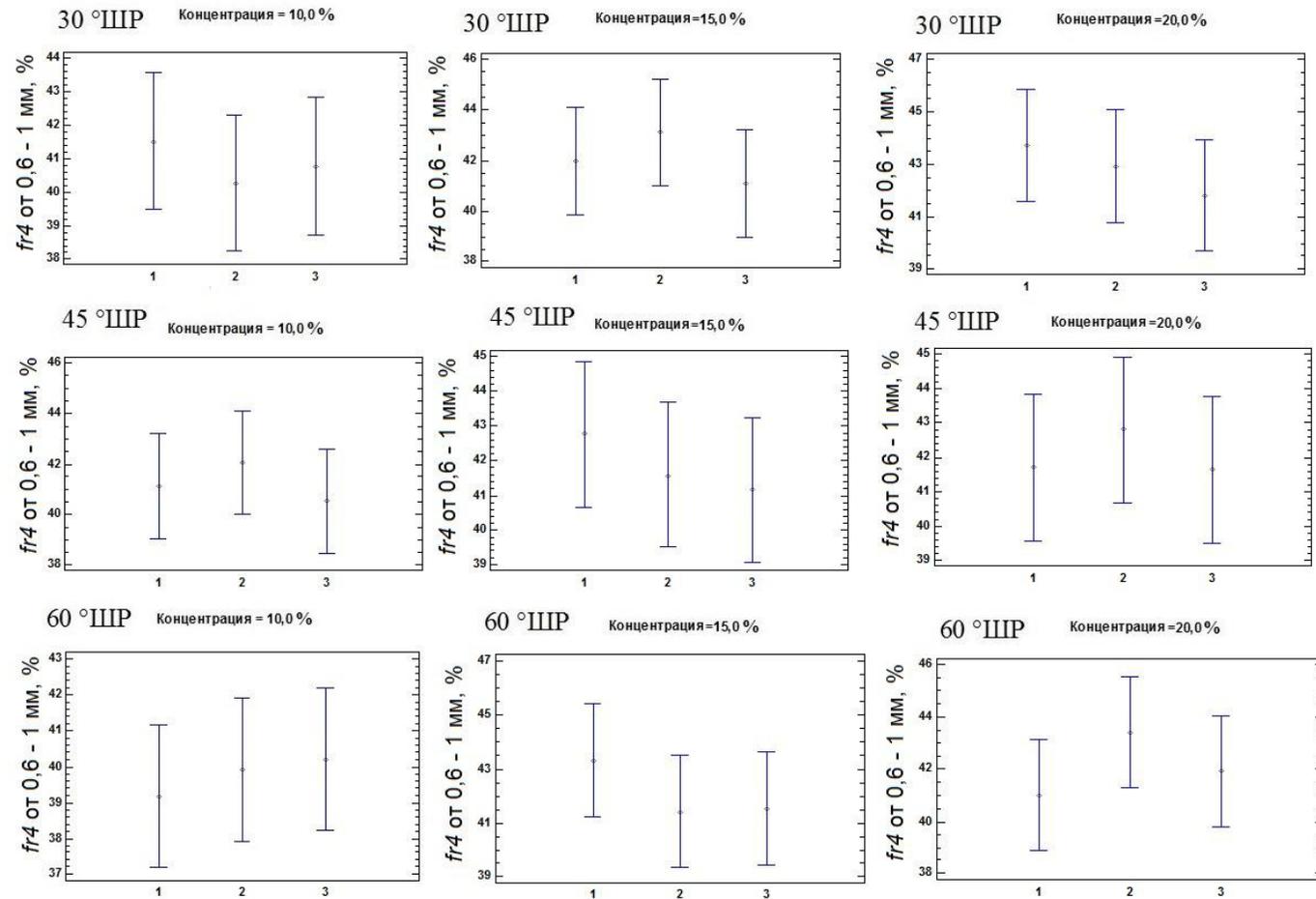
1 – гарнитура с окружной формой ножей, 2 – гарнитура секторная с прямолинейной формой ножей, 3 – гарнитура с прямолинейными ножами и равномерным их распределением

Рисунок Г.21 – Средние значения и 95 % - ные доверительные интервалы фракции fr_2 от 0,3 – 0,45 мм в зависимости от вида гарнитуры при концентрации волокнистой массы 10, 15 и 20%



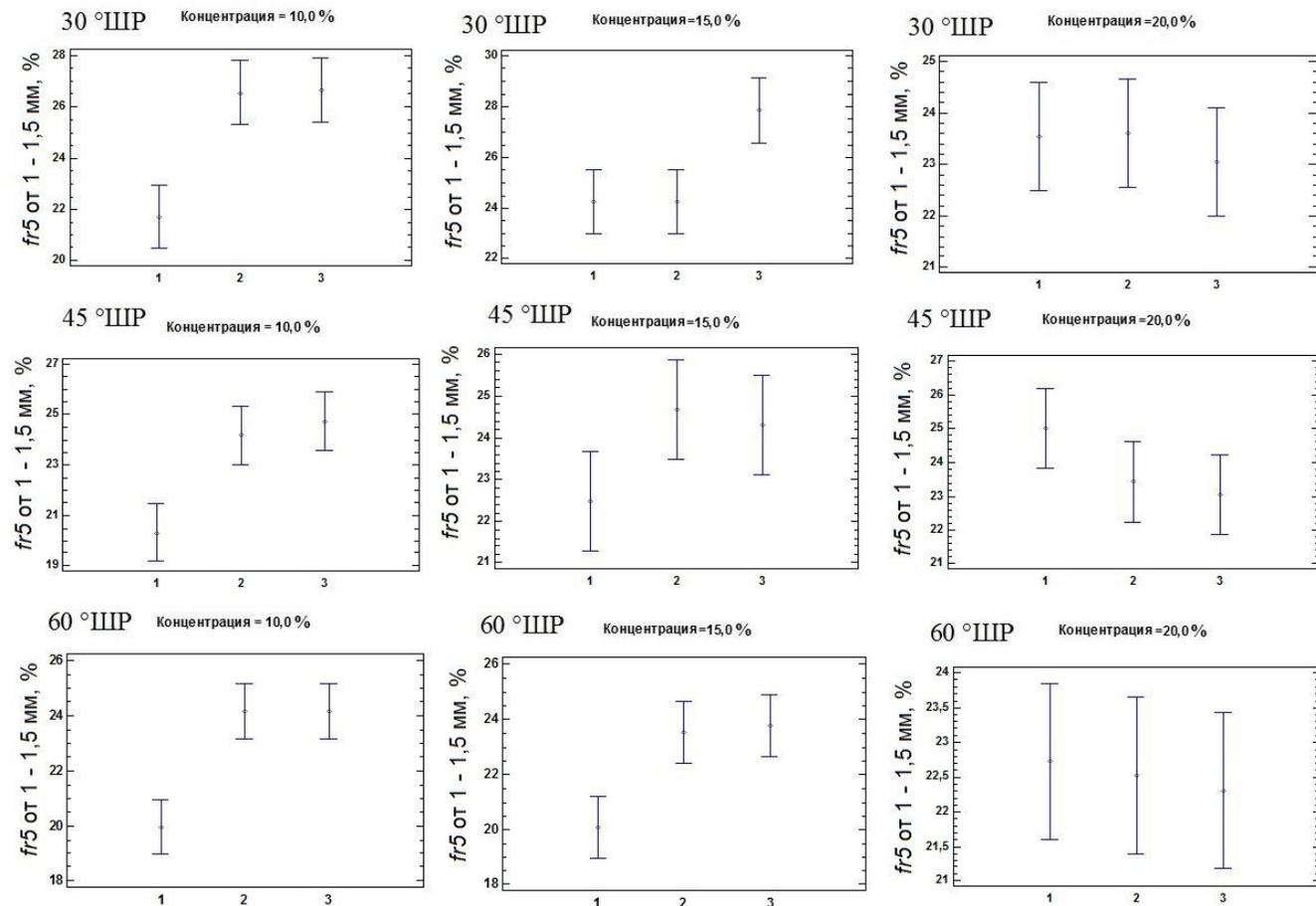
1 – гарнитура с окружной формой ножей, 2 – гарнитура секторная с прямолинейной формой ножей, 3 – гарнитура с прямолинейными ножами и равномерным их распределением

Рисунок Г.22 – Средние значения и 95 % - ные доверительные интервалы фракции fr_3 от 0,45 – 0,6 мм в зависимости от вида гарнитуры при концентрации волокнистой массы 10, 15 и 20%



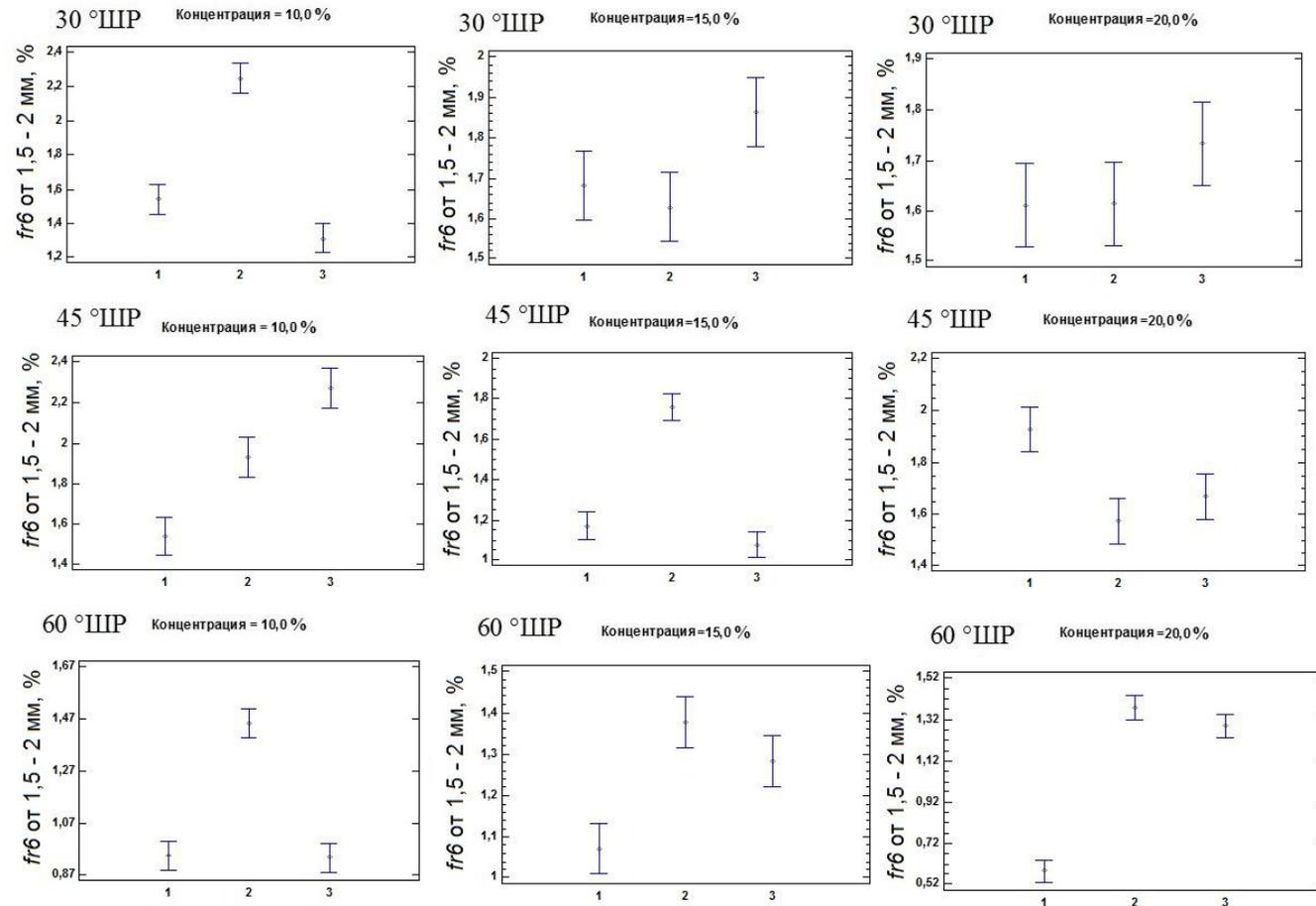
1 – гарнитура с окружной формой ножей, 2 – гарнитура секторная с прямолинейной формой ножей, 3 – гарнитура с прямолинейными ножами и равномерным их распределением

Рисунок Г.23 – Средние значения и 95 % - ные доверительные интервалы фракции fr_4 от 0,6 – 1 мм в зависимости от вида гарнитуры при концентрации волокнистой массы 10, 15 и 20%



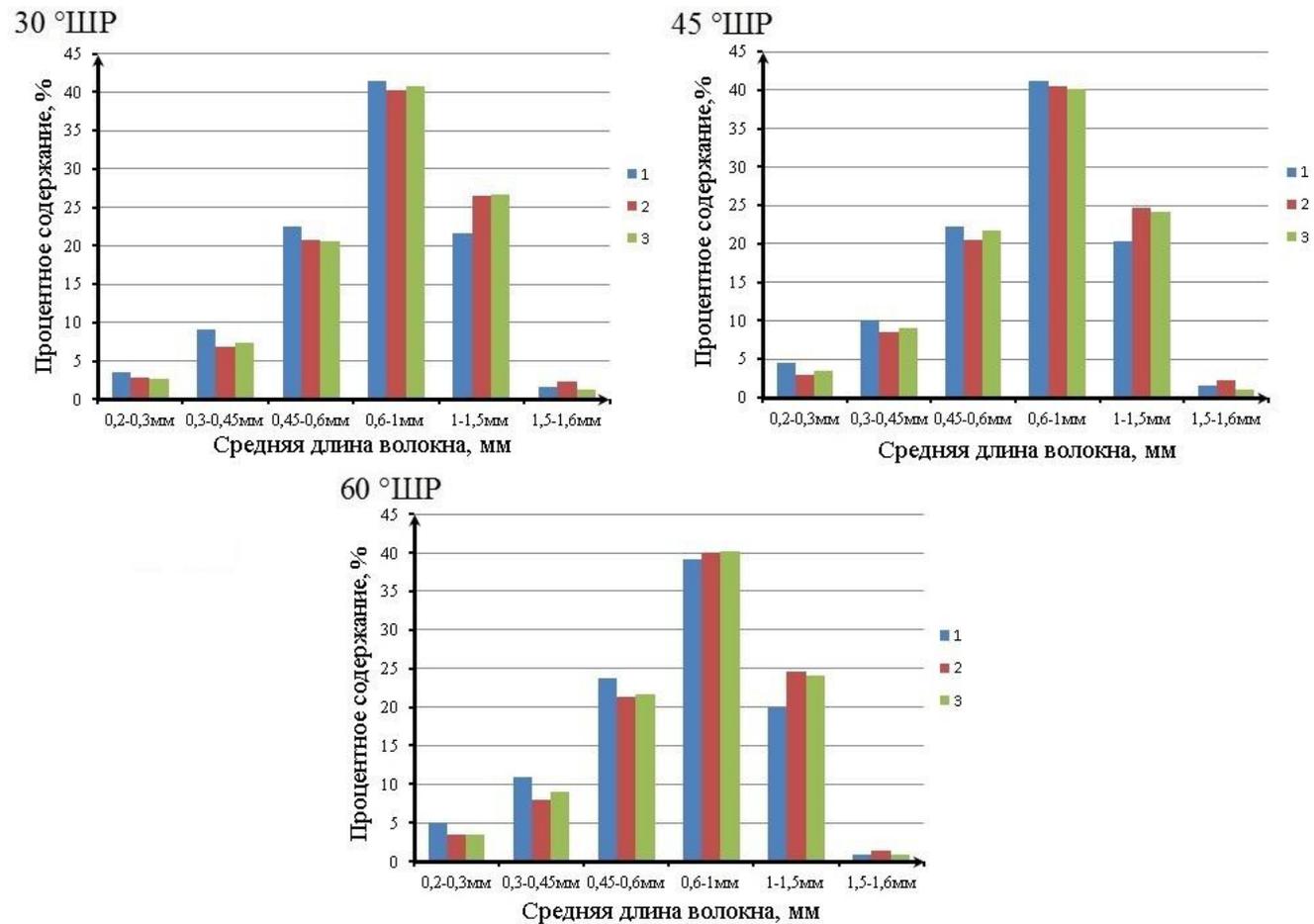
1 – гарнитура с окружной формой ножей, 2 – гарнитура секторная с прямолинейной формой ножей, 3 – гарнитура с прямолинейными ножами и равномерным их распределением

Рисунок Г.24 – Средние значения и 95 % - ные доверительные интервалы фракции fr_5 от 1 – 1,5 мм в зависимости от вида гарнитуры при концентрации волокнистой массы 10, 15 и 20%



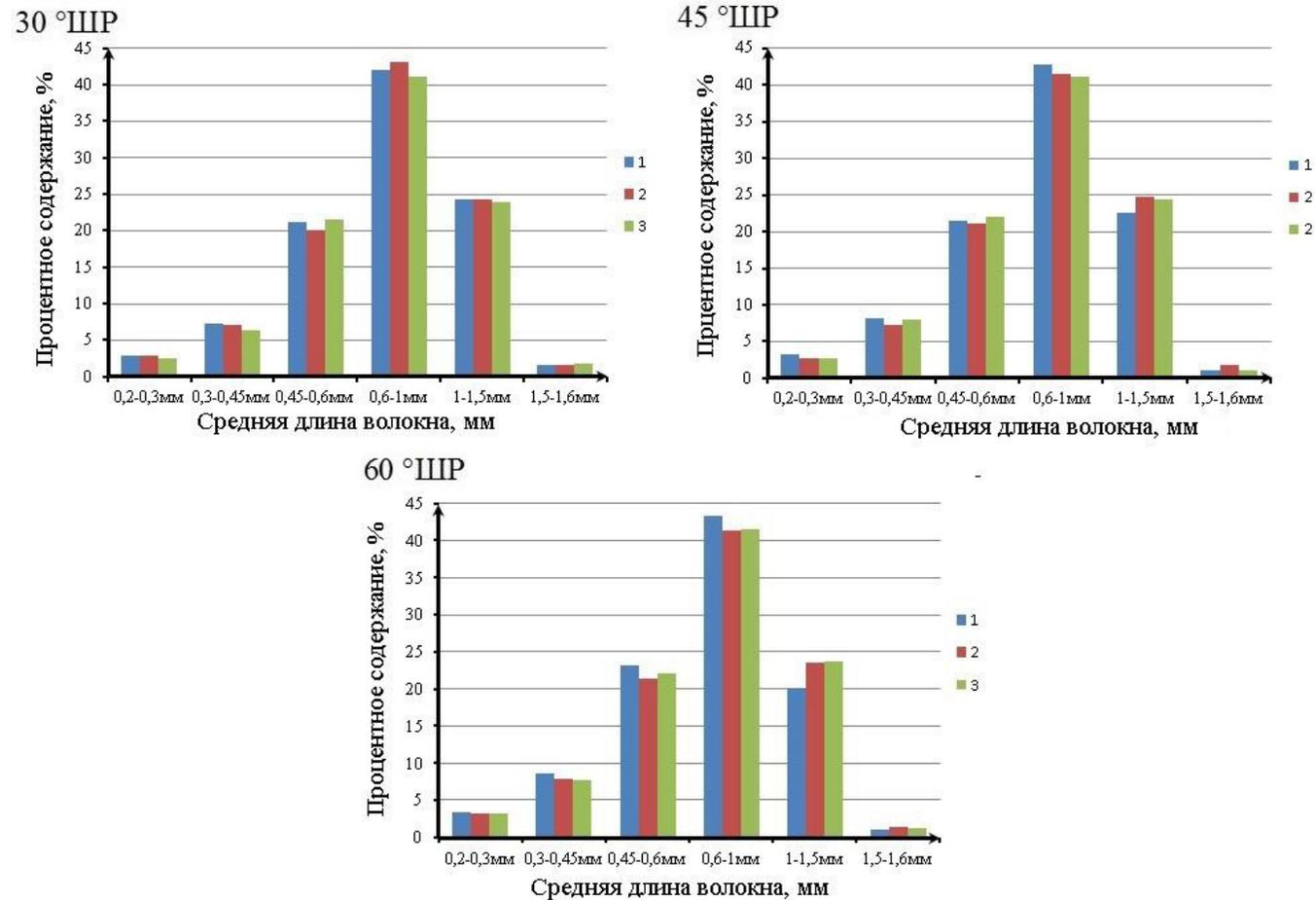
1 – гарнитура с окружной формой ножей, 2 – гарнитура секторная с прямолинейной формой ножей, 3 – гарнитура с прямолинейными ножами и равномерным их распределением

Рисунок Г.25 – Средние значения и 95 % - ные доверительные интервалы фракции fr_6 от 1 – 1,5 мм в зависимости от вида гарнитуры при концентрации волокнистой массы 10, 15 и 20 %



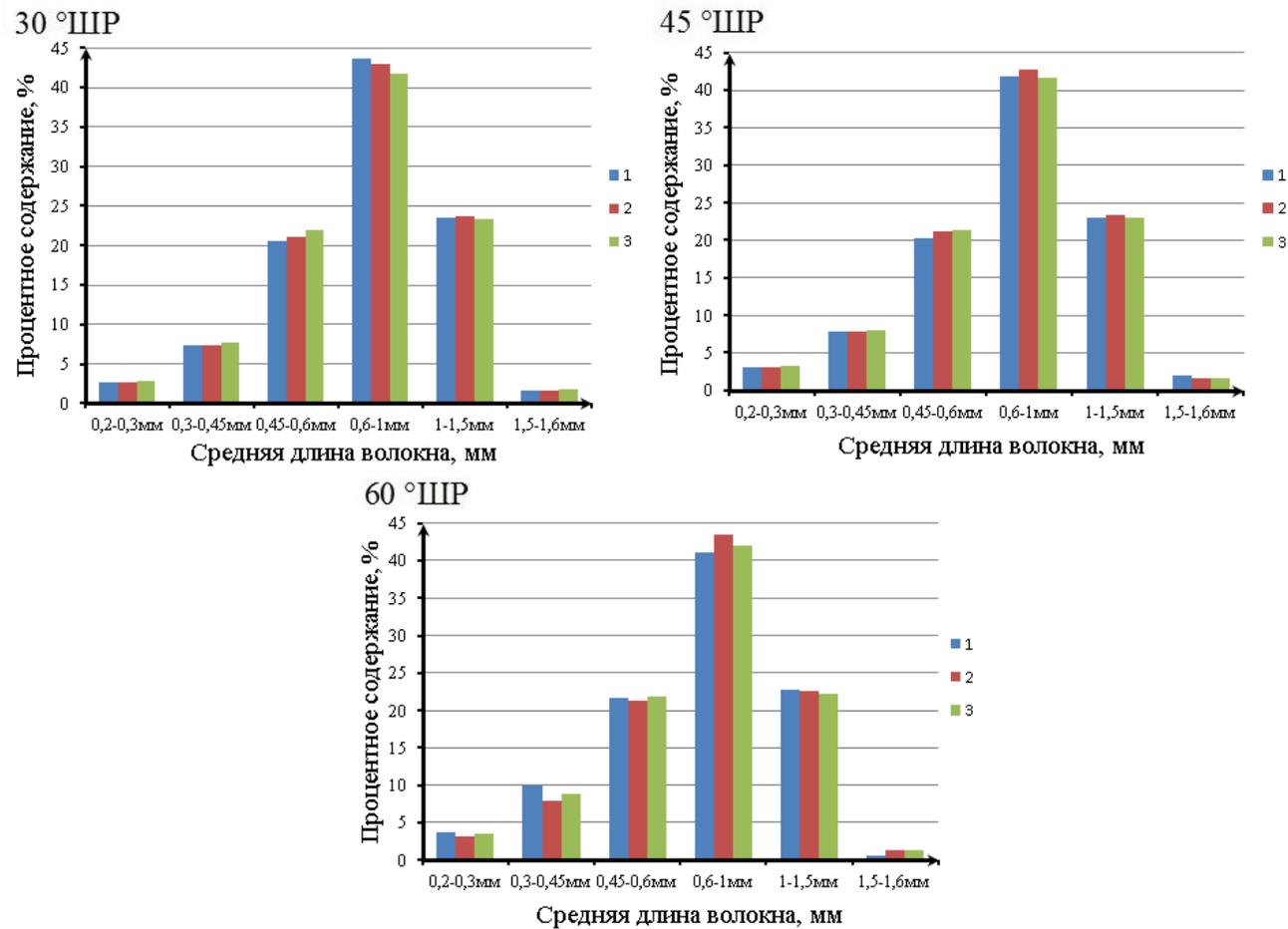
1 – гарнитура с окружной формой ножей, 2 – гарнитура секторная с прямолинейной формой ножей, 3 – гарнитура с прямолинейными ножами и равномерным их распределением

Рисунок Г.26 – Гистограмма распределения длины волокон по классам фракций при частоте вращения ротора 2000 об/мин, величины зазора между ножами ротора и статора 1,5 мм и концентрации волокнистой массы 10 %.



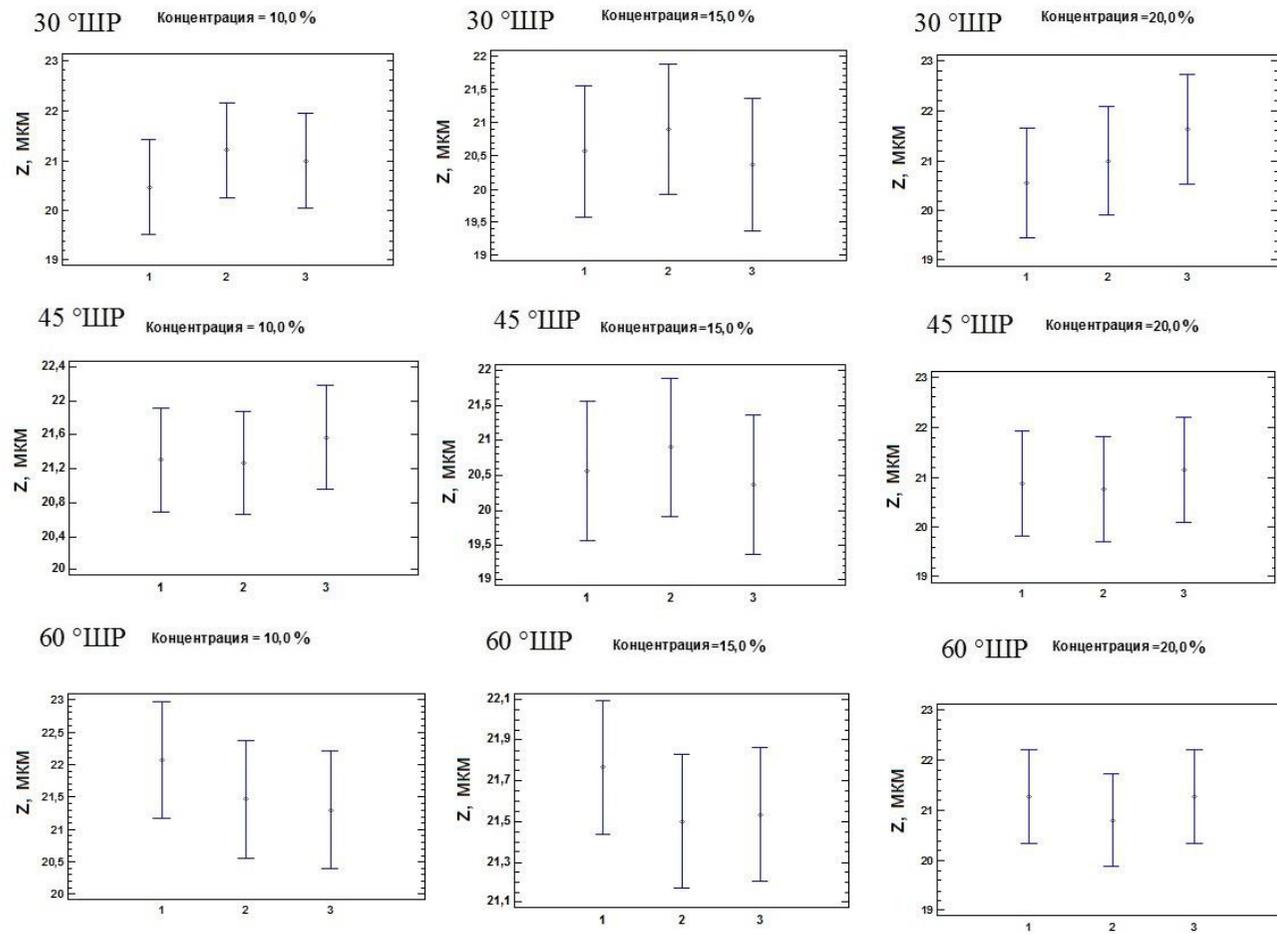
1 – гарнитура с окружной формой ножей, 2 – гарнитура секторная с прямолинейной формой ножей, 3 – гарнитура с прямолинейными ножами и равномерным их распределением

Рисунок Г.27 – Гистограмма распределения длины волокон по классам фракций при частоте вращения ротора 2000 об/мин, величины зазора между ножами ротора и статора 1,5 мм и концентрации волокнистой массы 15 %.



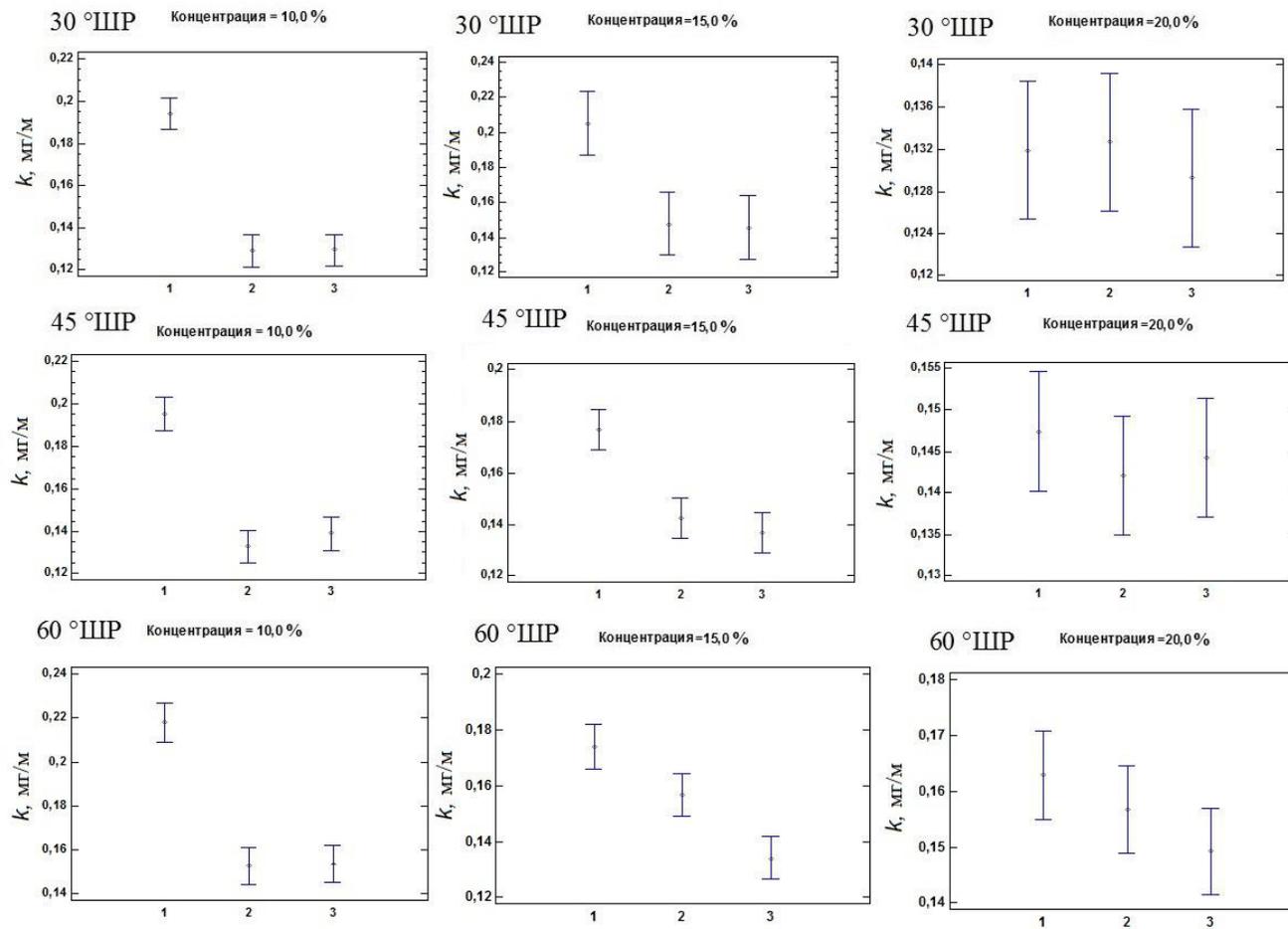
1 – гарнитура с окружной формой ножей, 2 – гарнитура секторная с прямолинейной формой ножей, 3 – гарнитура с прямолинейными ножами и равномерным их распределением

Рисунок Г.28 – Гистограмма распределения длины волокон по классам фракций при частоте вращения ротора 2000 об/мин, величины зазора между ножами ротора и статора 1,5 мм и концентрации волокнистой массы 20 %.



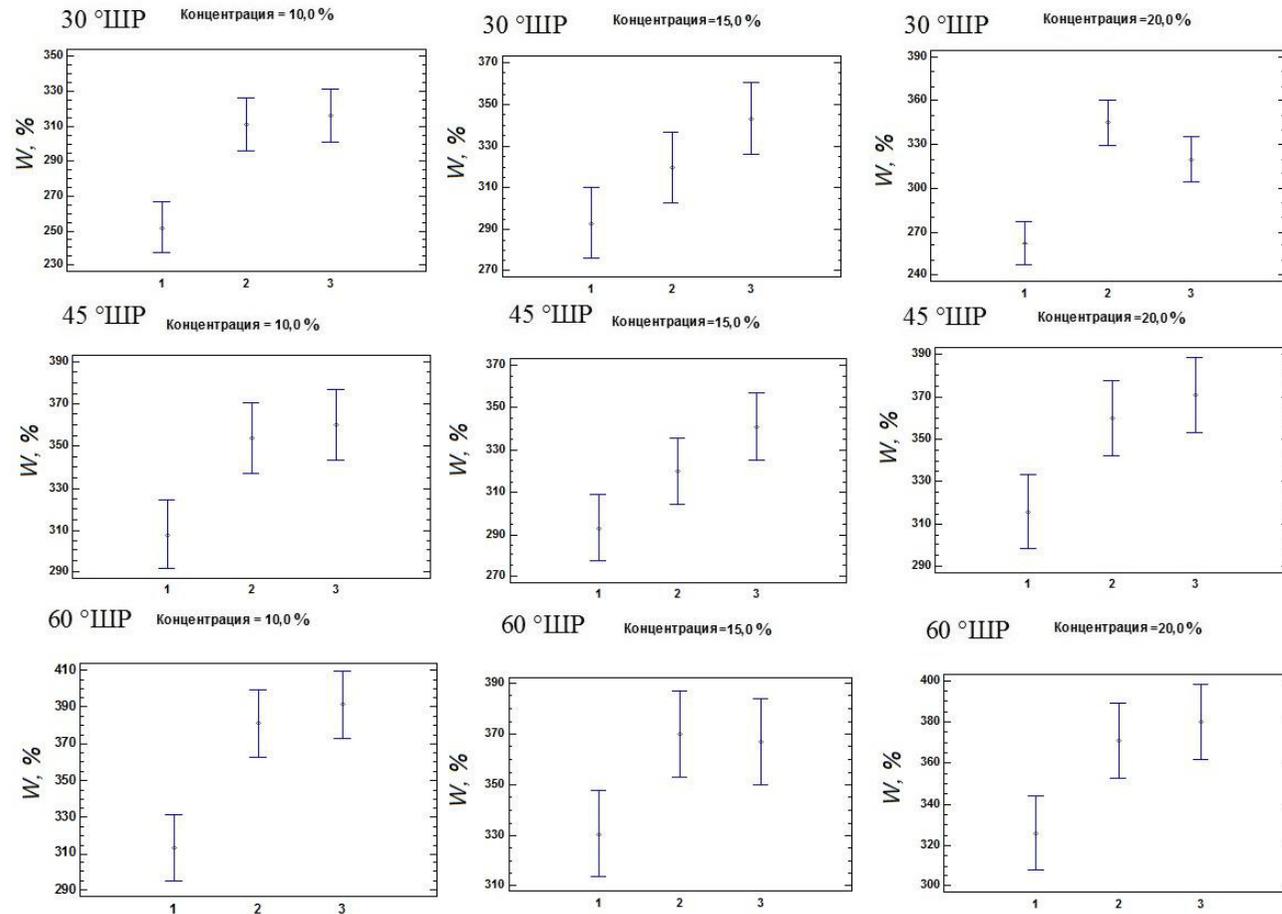
1 – гарнитура с окружной формой ножей, 2 – гарнитура секторная с прямолинейной формой ножей, 3 – гарнитура с прямолинейными ножами и равномерным их распределением

Рисунок Г.29 – Средние значения и 95 % - ные доверительные интервалы ширины волокна в зависимости от вида гарнитуры при концентрации волокнистой массы 10, 15 и 20 %



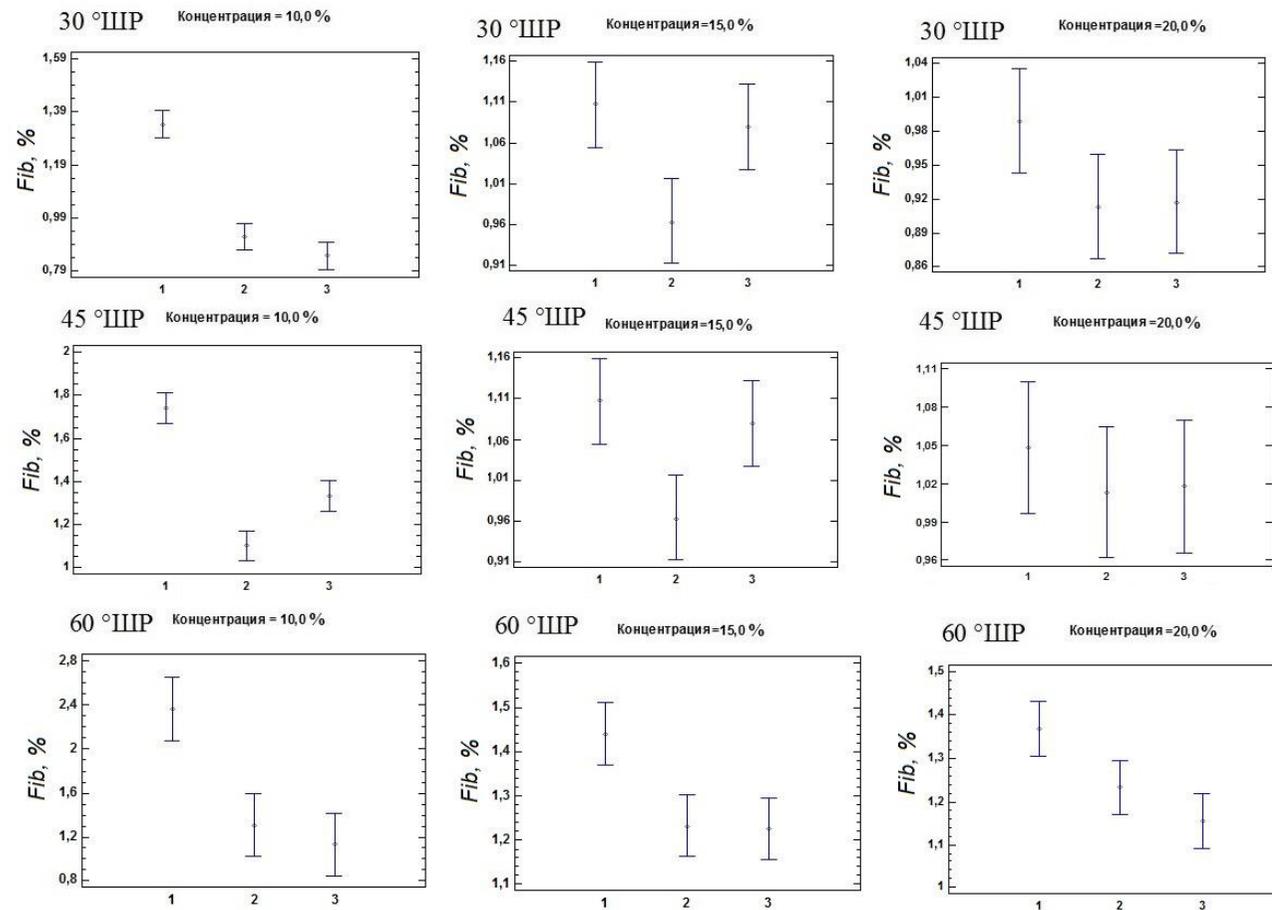
1 – гарнитура с окружной формой ножей, 2 – гарнитура секторная с прямолинейной формой ножей, 3 – гарнитура с прямолинейными ножами и равномерным их распределением

Рисунок Г.30 – Средние значения и 95 % - ные доверительные интервалы грубости волокна в зависимости от вида гарнитуры при концентрации волокнистой массы 10, 15 и 20 %



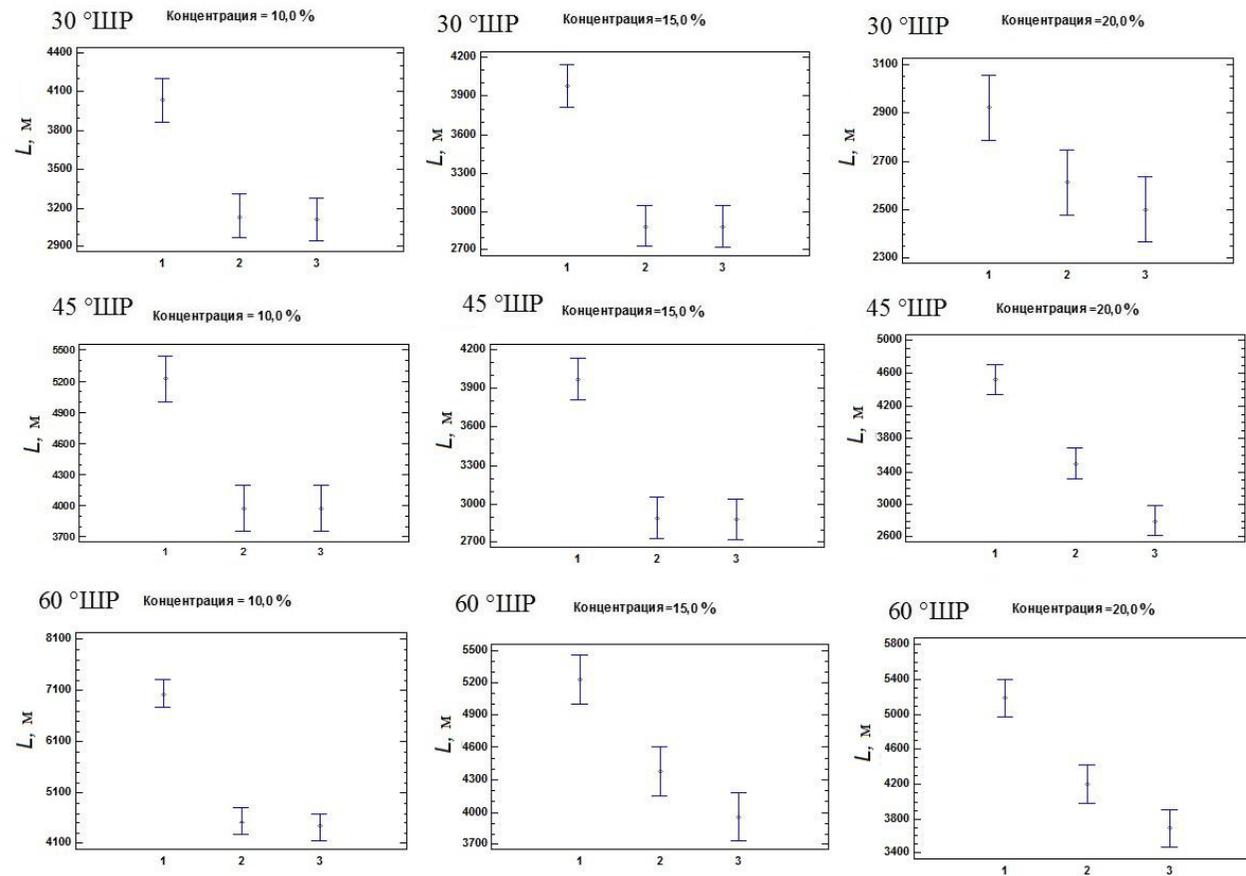
1 – гарнитура с окружной формой ножей, 2 – гарнитура секторная с прямолинейной формой ножей, 3 – гарнитура с прямолинейными ножами и равномерным их распределением

Рисунок Г.31 – Средние значения и 95 % - ные доверительные интервалы водоудерживающей способности в зависимости от вида гарнитуры при концентрации волокнистой массы 10, 15 и 20 %



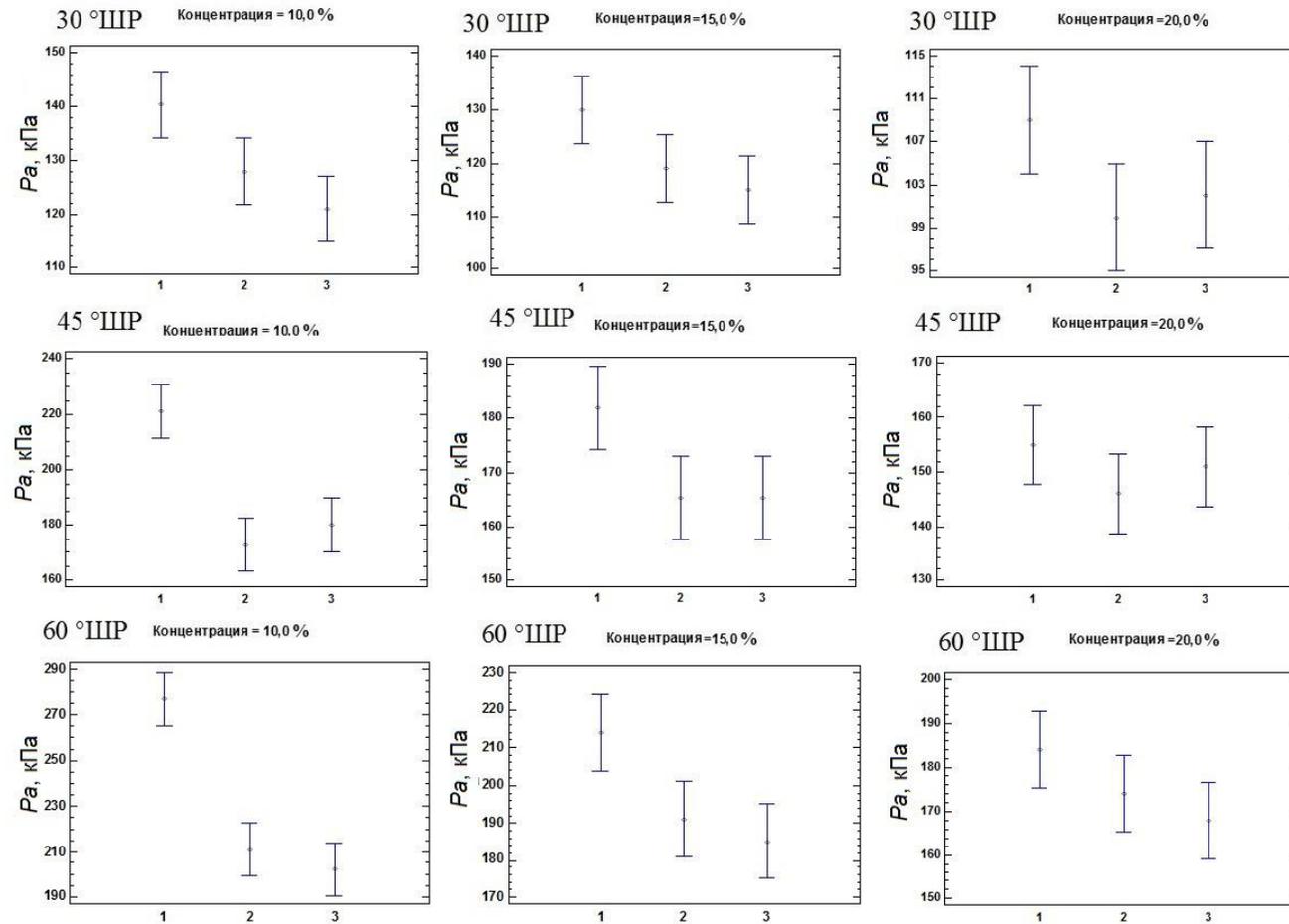
1 – гарнитура с окружной формой ножей, 2 – гарнитура секторная с прямолинейной формой ножей, 3 – гарнитура с прямолинейными ножами и равномерным их распределением

Рисунок Г.32 – Средние значения и 95 % - ные доверительные интервалы индекса фибрилляции в зависимости от вида гарнитуры при концентрации волокнистой массы 10, 15 и 20 %



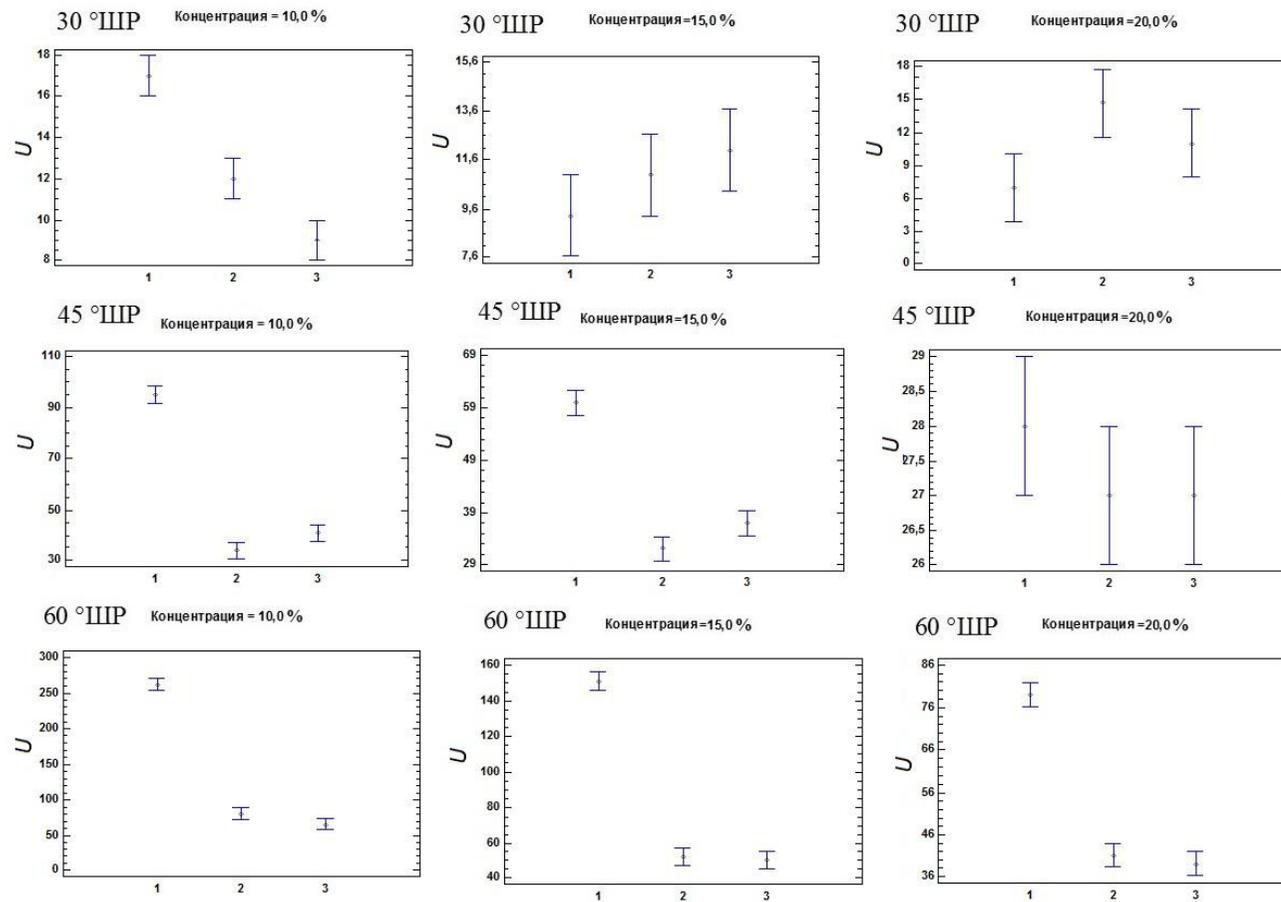
1 – гарнитура с окружной формой ножей, 2 – гарнитура секторная с прямолинейной формой ножей, 3 – гарнитура с прямолинейными ножами и равномерным их распределением

Рисунок Г.33 – Средние значения и 95 % - ные доверительные интервалы разрывной длины в зависимости от вида гарнитуры при концентрации волокнистой массы 10, 15 и 20 %



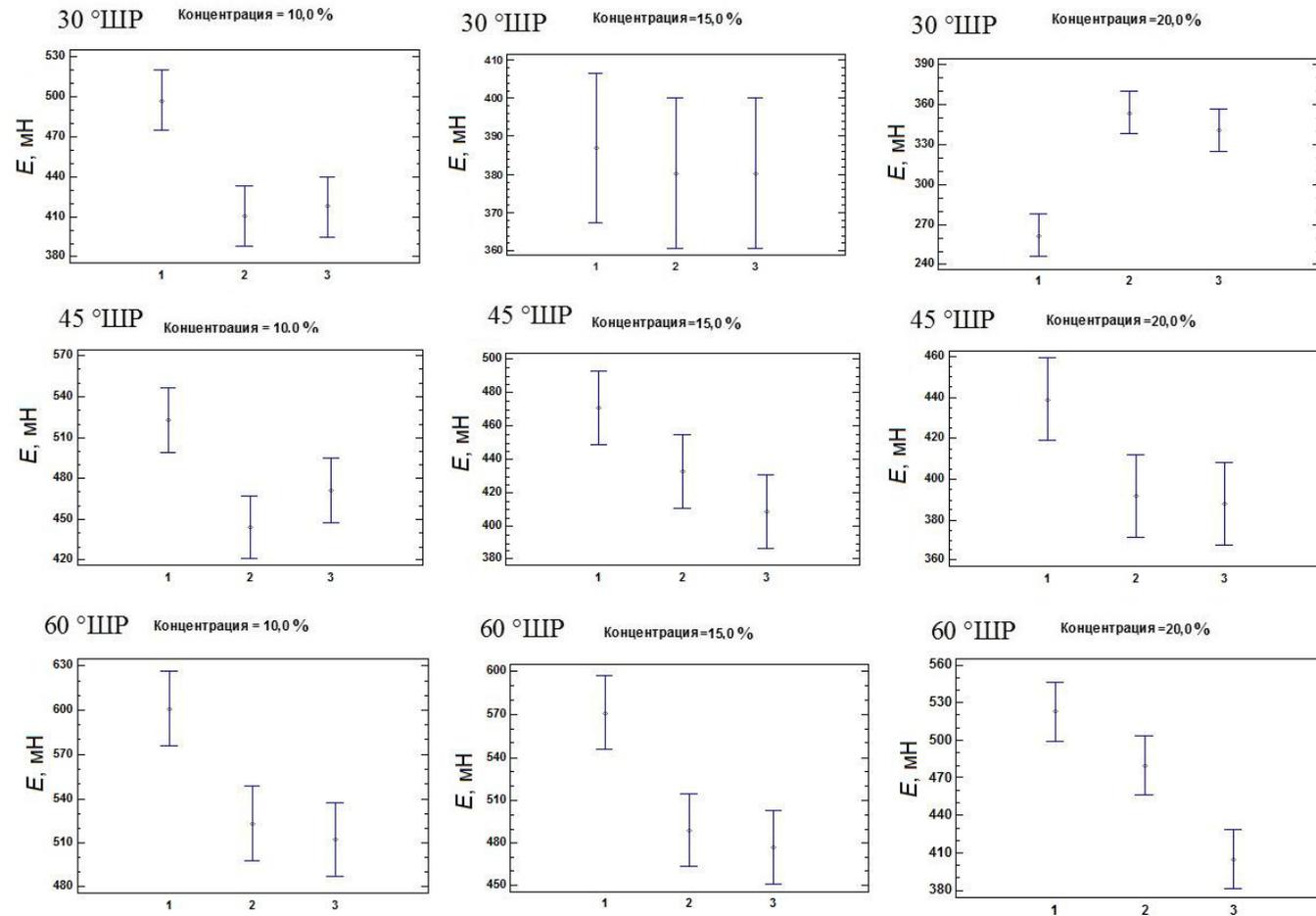
1 – гарнитура с окружной формой ножей, 2 – гарнитура секторная с прямолинейной формой ножей, 3 – гарнитура с прямолинейными ножами и равномерным их распределением

Рисунок Г.34 – Средние значения и 95 % - ные доверительные интервалы сопротивления продавливанию в зависимости от вида гарнитуры при концентрации волокнистой массы 10, 15 и 20 %



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

Рисунок Г.35 – Средние значения и 95 % - ные доверительные интервалы сопротивления излому в зависимости от вида гарнитуры при концентрации волокнистой массы 10, 15 и 20 %



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

Рисунок Г.36 – Средние значения и 95 % - ные доверительные интервалы сопротивления раздиранию в зависимости от вида гарнитуры при концентрации волокнистой массы 10, 15 и 20 %

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Таблица Д.1 – Матрица корреляции

	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6	Y_7	Y_8	Y_9	Y_{10}	Y_{11}	Y_{12}	Y_{13}	Y_{14}	Y_{15}	Y_{16}	Y_{17}
Y_1		-0,749	-0,681	-0,749	-0,216	-0,647	-0,632	-0,736	-0,114	0,733	0,649	0,666	0,436	-0,703	0,697	0,698	-0,683
		(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)
		0	0	0	0,108	0	0	0	0,399	0	0	0	0	0	0	0	0
Y_2	-0,749		0,820	0,846	0,312	0,812	0,800	0,859	-0,060	-0,837	0,706	0,835	0,673	0,888	0,890	0,832	0,833
	(56)		(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)
	0		0	0	0,019	0	0	0	0,659	0	0	0	0	0	0	0	0
Y_3	-0,681	0,820		0,705	0,059	0,947	0,902	0,809	-0,108	-0,865	0,628	0,905	0,834	0,851	0,909	0,868	0,817
	(56)	(56)		(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)
	0	0		0	0,661	0	0	0	0,425	0	0	0	0	0	0	0	0
Y_4	-0,749	0,846	0,705		0,595	0,706	0,639	0,824	0,226	-0,822	-0,788	0,821	0,473	0,913	0,888	0,873	0,901
	(56)	(56)	(56)		(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)
	0	0	0		0	0	0	0	0,092	0	0	0	0	0	0	0	0
Y_5	-0,216	0,312	0,059	0,595		0,172	0,132	0,264	0,355	-0,253	0,578	0,393	0,011	0,431	0,375	0,328	0,519
	(56)	(56)	(56)	(56)		(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)
	0,108	0,019	0,661	0		0,202	0,331	0,048	0	0,059	0	0,002	0,930	0	0	0,013	0
Y_6	-0,647	0,812	0,947	0,706	0,172		0,895	0,769	-0,145	-0,832	0,670	0,917	0,818	0,844	0,898	0,842	0,822
	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)		(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)
	0	0	0	0	0,202		0	0	0,285	0	0	0	0	0	0	0	0
Y_7	-0,632	0,800	0,902	0,639	0,132	0,895		0,796	-0,089	-0,845	0,717	0,866	0,696	0,784	0,825	0,768	0,746
	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)		(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)
	0	0	0	0	0,331	0		0	0,514	0	0	0	0	0	0	0	0
Y_8	-0,736	0,859	0,809	0,824	0,264	0,769	0,796		0,050	-0,954	-0,72	0,839	0,560	0,851	0,829	0,861	0,767
	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)		(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)

Продолжение таблицы Д.1

	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6	Y_7	Y_8	Y_9	Y_{10}	Y_{11}	Y_{12}	Y_{13}	Y_{14}	Y_{15}	Y_{16}	Y_{17}
	0	0	0	0	0,048	0	0		0,711	0	0	0	0	0	0	0	0
Y_9	-0,114	-0,060	-0,108	0,226	0,355	-0,145	-0,089	0,050		-0,123	-0,362	0,058	-0,191	0,094	0,020	0,028	0,084
	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)		(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)
	0,399	0,659	0,425	0,092	0,007	0,285	0,514	0,711		0,364	0,006	0,666	0,158	0,488	0,882	0,837	0,534
Y_{10}	0,733	-0,837	-0,865	-0,822	-0,253	-0,832	-0,845	-0,954	-0,123		0,719	-0,872	-0,622	-0,864	-0,867	-0,863	-0,795
	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)		(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)
	0	0	0	0	0,059	0	0	0	0,364		0	0	0	0	0	0	0
Y_{11}	0,649	-0,706	-0,628	-0,788	-0,578	-0,670	-0,71	-0,729	-0,362	0,719		-0,813	-0,437	-0,770	-0,746	-0,708	-0,763
	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)		(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0		0	0
Y_{12}	-0,666	0,835	0,905	0,821	0,393	0,917	0,866	0,839	0,058	-0,872	-0,813		0,763	0,893	0,922	0,877	0,873
	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)		(56)	(56)	(56)	(56)	(56)
	0	0	0	0	0,002	0	0	0	0,666	0	0		0	0	0	0	0
Y_{13}	-0,4363	0,6730	0,8341	0,4739	0,0119	0,8184	0,6964	0,5604	-0,191	-0,622	0,437	0,763		0,657	0,730	0,640	0,635
	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)		(56)	(56)	(56)	(56)
	0	0	0	0	0,930	0	0	0	0,158	0	0	0		0	0	0	0
Y_{14}	-0,703	0,888	0,851	0,913	0,431	0,844	0,784	0,851	0,094	-0,864	0,770	0,893	0,657		0,972	0,927	0,947
	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)		(56)	(56)	(56)
	0	0	0	0	0	0	0	0	0,488	0	0	0	0		0	0	0
Y_{15}	-0,697	0,890	0,909	0,888	0,375	0,898	0,825	0,829	0,020	-0,867	0,746	0,922	0,730	0,972		0,943	0,957
	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)		(56)	(56)
	0	0	0	0	0,004	0	0	0	0,882	0	0	0	0	0		0	0
Y_{16}	-0,698	0,832	0,868	0,873	0,328	0,842	0,768	0,861	0,028	-0,863	0,708	0,877	0,640	0,927	0,943		0,911
	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)		(56)
	0	0	0	0	0,013	0	0	0	0,837	0	0	0	0	0	0		0
Y_{17}	-0,683	0,833	0,817	0,901	0,519	0,822	0,746	0,767	0,084	-0,795	0,763	0,873	0,635	0,947	0,957	0,911	
	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	(56)	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0,534	0	0	0	0	0	0	0	0