

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



**Петрова Анастасия Алексеевна**

**РАЗМОЛ ВОЛОКНИСТЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМБИНИРОВАННОЙ ГАРНИТУРЫ**

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

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

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

Красноярск – 2025

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВВЕДЕНИЕ.....                                                                                                                                 | 4  |
| ГЛАВА 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И<br>ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ПРОЦЕССА<br>РАЗМОЛА ВОЛОКНИСТЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ ..... | 11 |
| 1.1 Отдельные теоретические представления о ножевом размол<br>волокнистых полуфабрикатов .....                                                | 11 |
| 1.2 Назначение и цель размола.....                                                                                                            | 15 |
| 1.3 Основные параметры процесса размола волокнистых полуфабрикатов<br>в ножевых размалывающих машинах .....                                   | 16 |
| 1.4 Оборудование для размола волокнистой массы .....                                                                                          | 24 |
| Выводы по первой главе.....                                                                                                                   | 36 |
| ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.....                                                                                                             | 38 |
| 2.1 Обоснование геометрии построения ножевой полости размола и<br>рисунка ножевой размалывающей поверхности гарнитуры .....                   | 38 |
| 2.2 Обоснование построения ножей и геометрии их распределения на<br>рабочей поверхности комбинированной гарнитуры .....                       | 45 |
| 2.2.1 Расчет величины шага между режущими кромками ножей, величины<br>межножевых канавок и количества шагов .....                             | 47 |
| 2.2.2 Определение зависимости выходного угла $\beta$ от входного угла $\alpha$ .....                                                          | 48 |
| 2.2.3 Расчет входных углов наклона $\alpha$ режущих кромок ножей единичного<br>сектора к радиусу $r$ .....                                    | 49 |
| 2.3 Определение секундной режущей длины .....                                                                                                 | 50 |
| 2.4 Определение циклической элементарной длины.....                                                                                           | 65 |
| Выводы по второй главе.....                                                                                                                   | 68 |
| ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ .....                                                                                                        | 69 |
| 3.1 Методика проведения эксперимента .....                                                                                                    | 69 |

|                                                                                                                                     |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.1.1 Описание экспериментальной установки.....                                                                                     | 69  |
| 3.1.2 Выбор конструкции комбинированной гарнитуры.....                                                                              | 70  |
| 3.1.3 Характеристики сырья и параметры размола .....                                                                                | 71  |
| 3.1.4 Порядок проведения эксперимента.....                                                                                          | 72  |
| 3.1.5 Определение бумагообразующих свойств волокнистого полуфабриката<br>.....                                                      | 73  |
| 3.1.6 Определение физико-механических характеристик готовых бумажных<br>отливок .....                                               | 74  |
| 3.2 Планирование эксперимента.....                                                                                                  | 75  |
| 3.3 Результаты экспериментальных исследований .....                                                                                 | 78  |
| 3.3.1 Бумагообразующие свойства волокнистого полуфабриката.....                                                                     | 78  |
| 3.3.2 Физико-механические показатели готовых бумажных отливок.....                                                                  | 91  |
| 3.4 Кластерный и факторный анализ выходных параметров эксперимента                                                                  | 98  |
| Выводы к третьей главе.....                                                                                                         | 110 |
| ГЛАВА 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМА РАЗМОЛА....                                                                                | 113 |
| 4.1 Определение оптимального режима процесса размола волокнистого<br>полуфабриката при использовании комбинированной гарнитуры..... | 113 |
| 4.2 Определение экономической эффективности процесса размола с<br>использованием комбинированной гарнитуры .....                    | 116 |
| Выводы к четвертой главе.....                                                                                                       | 121 |
| ВЫВОДЫ.....                                                                                                                         | 122 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....                                                                                                             | 124 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А .....                                                                                                                  | 136 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....                                                                                                                   | 137 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ В .....                                                                                                                  | 140 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Г.....                                                                                                                   | 148 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Д .....                                                                                                                  | 149 |

## ВВЕДЕНИЕ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Задачи исследования:**

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

– прогнозировать качественные показатели получаемой продукции при изменении входных параметров размола (величины зазора между ножами ротора и статора, концентрации волокнистой массы и конструкции гарнитуры) и

технологических параметров комбинированной гарнитуры (секундной режущей и циклической элементарной длины) за счет изменения рисунка ножевой размалывающей поверхности;

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

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

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

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

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

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

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

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

– оценка бумагообразующих свойств волокнистого полуфабриката и физико-механических характеристик бумажных отливок при использовании комбинированной гарнитуры.

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

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

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

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

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

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

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

# **ГЛАВА 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ПРОЦЕССА РАЗМОЛА ВОЛОКНИСТЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ**

## **1.1 Отдельные теоретические представления о ножевом размоле волокнистых полуфабрикатов**

На сегодняшний день бумага и картон вошли в нашу повседневную жизнь настолько прочно, что трудно представить существование современного цивилизованного общества без этой, казалось бы, обыденной и простой продукции. Происходит непрерывный рост применения бумаги в отраслях электроэнергетики, радиоэлектроники, приборостроении и многих других отраслях.

Для развития и роста целлюлозно-бумажной промышленности в нашей стране существуют все необходимые условия: большой запас лесных, энергетических и водных ресурсов, а также постоянное совершенствование технологических процессов целлюлозно-бумажного производства.

В настоящее время целлюлозно-бумажная промышленность в целом выпускает множество видов бумаги различной направленности с различными физико-механическими характеристиками. Такое многотоннажное производство бумаги и картона требует от исследователей и производителей совершенствования процесса измельчения целлюлозных материалов с повышением свойств готового продукта при использовании современного оборудования для размола [32].

В связи с постоянным увеличением объемов потребления данной продукции существует необходимость внедрения новых технологий и повышения эффективности применяемого оборудования, позволяющих обеспечить возникшие потребности в качественной продукции. Устойчивая тенденция роста затрат на изготовление бумажной продукции наблюдается как на этапе производства готового продукта, так и при подготовке полуфабрикатов [57]. Подготовка

волокнистого сырья к отливу, а именно его размол до соответствующих показателей, является важнейшим технологическим этапом и наиболее энергоемкой операцией целлюлозно-бумажного производства [86].

Изучение природы явлений, происходящих при размоле волокнистой массы, и их влияния на процесс формования бумажного полотна и свойства готовой бумаги привело к возникновению различных теорий, описывающих процесс размола.

Существует несколько теорий размола: авторами химической теории размола являются Ч. Кросс и Е. Бивен [81], Х. Швальбе [69]; авторы физической теории размола Дж. Стрейчен [109] и У. Кемпбелл [78]; автор объединенной гипотезы Ж. Кларк [80]; авторы современной теории размола Я. Г. Хинчин [64, 65], С. И. Иванов [24, 25], Н. П. Перекальский [54, 55] и Н. И. Никитин [38].

Современная теория размола «... исходит из положения о том, что в процессе размола растительных волокон в водной среде имеют место как явления механического и гидродинамического воздействия на волокна, так и явления коллоидно-химические, обусловленные морфологическим строением и химическим составом таких волокон» [63, с. 30].

Физическая теория (Дж. Стрейчен, У. Кемпбелл) объясняла свойства, приобретаемые массой после размола, а также прочность готового продукта измельчением волокон. С развитием экспериментальных возможностей исследователи пришли к выводу, что на явления, протекающие при обработке целлюлозных материалов в размалывающих аппаратах, влияют как химические, так и физико-механические процессы.

Наибольшее распространение получила теория Ж. Кларка, объединившая в себе теорию фибрилляции волокна при размоле (Дж. Стрейчен) и идею частичной растворимости целлюлозы в воде (У. Кемпбелл).

Механические воздействия на волокнистую массу, заключающиеся в изменении формы и размеров растительных волокон, деформировании волокон, их внешнем фибриллировании (расчёсывании) с отделением от волокна клеточных оболочек и фибрилл, обеспечивают определенную структуру волокнистого

материала (соответствующий размер волокон по длине, толщине и фракционному составу) для изготовления бумажного листа необходимого строения и плотности.

Для объяснения механизма воздействия ножевой гарнитуры на волокно С. Смитом была предложена теория волокнистых сплетений, согласно которой основной размолом массы осуществляется на кромках ножей ролла [106]. Его выводы были построены на том факте, что при протаскивании через массу ножа на его кромках нависает волокнистая наслойка.

Отсюда был сделан вывод, что размолом происходит преимущественно на передних кромках ножей, на которых нависает волокнистый слой, вследствие чего кромки меньше подвержены износу, чем поверхность ножа. В. Бэнкс [75] поддерживал данную теорию, однако, в отличие от теории С. Смита, он предполагал, что кромки покрыты сгустками волокон только на 50–70 %.

Среди исследователей, которые широко обсуждали размолом целлюлозы, был Д. Пейдж [100]. Он утверждал, что больше энергии затрачивается на механические силы при размоле волокнистой массы, тогда как гидродинамические силы контролируют расположение волокон в зоне размола. Это подтверждается тем, что энергия, затрачиваемая на процесс размола, превышает энергию, затраченную на циркуляцию без массы при том же зазоре.

Х. Эспенмиллер [83] придерживался схожего мнения со С. Смитом [106] относительно процесса размола. Его гипотеза пяти стадий размола (рисунок 1.1) описывала работу размалывающего оборудования с точки зрения потребления энергии, концентрации массы и давления в зоне размола в различных точках взаимодействия между волокнистой массой и ножами ротора и статора. Х. Эспенмиллер предполагал, что 90 % затрачиваемой энергии расходуется на размолом на передней кромке ножа, где давление на волокна может достигать 6–30 МПа, что приводит к образованию уплотненного и сжатого слоя волокон.

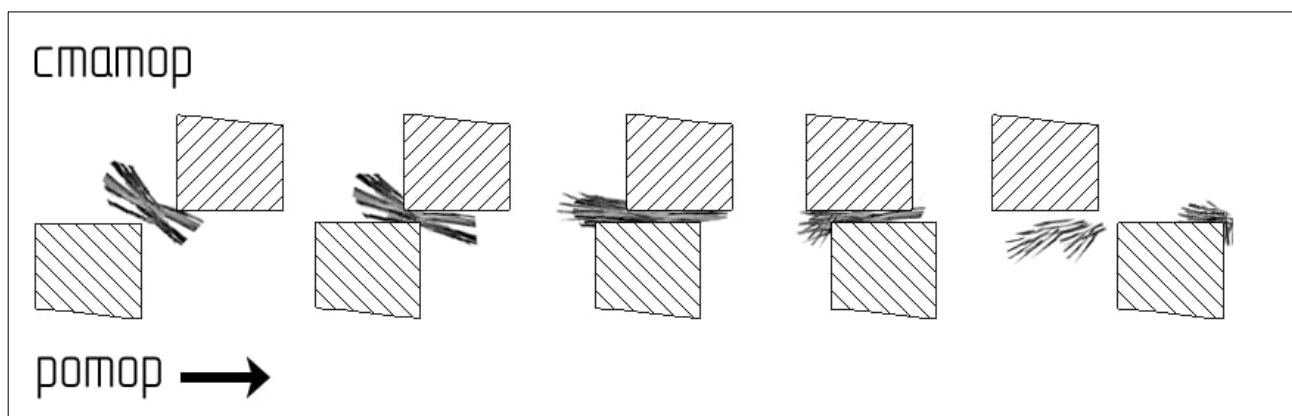


Рисунок 1.1 – Пять стадий размола Эспенмиллера

Согласно данной теории, концентрация волокнистой массы в этой точке может достигать 50–60 % из-за предположения, что большое количество воды выдавливается из пучка волокон. Скользящее же действие вдоль пучка волокон потребляет оставшиеся 10 % энергии размола. Расщепленные волокна в результате первоначального удара между передними кромками дополнительно обрабатываются в этой области путем расслаивания и сплющивания. Когда давление снижается, волокнистый слой впитывает воду и повторно диспергируется до первоначальной концентрации за счет интенсивного гидравлического и перемешивающего воздействия.

Д. Пейдж установил, что действие размалывающего аппарата описывается с точки зрения двух параметров: один для указания количества ударов, получаемых волокнами, и другой для оценки их интенсивности. Существует несколько теорий и моделей анализа размола волокнистых полуфабрикатов низкой концентрации, основанных на данных параметрах.

Основными теориями являются: теория С-фактора, описанная Р. Керекесом и Дж. Сенгером [87]; теория удельной нагрузки на кромку Ф. Вультш и В. Флучер [111], В. Брехт и В. Зиверт [77], а также ее дополнение в виде модели интенсивности и частоты Д. Дэнфорта [82], П. Лейдера, Дж. Рихса и А. Ниссана [90, 91]; модифицированная теория удельной нагрузки на кромку Ф. Мельтцера и П. Сепке [96]; теория удельной нагрузки на поверхность Дж. Лумиайнена [92]; модифицированная теория удельной нагрузки на

поверхность Р. Массельманна [98]; гидродинамическая модель Д. Радославовой, Дж. Ру, Дж. Сильви и Дж. Жориса [102, 103, 104].

Количество имеющихся теорий относительно процесса размола свидетельствует, что механизмы, протекающие во время размола, изучены не в полном объеме, а гипотезы ученых касательно факторов, влияющих на волокнистый материал, разнятся. Несмотря на результаты, достигнутые в сфере размола волокнистых полуфабрикатов, имеющиеся на данный момент представления в этой области исследований являются недостаточными для решения практических задач повышения эффективности размола на производстве и улучшения характеристик готового продукта.

## **1.2 Назначение и цель размола**

Несмотря на многочисленные исследования, определения цели процесса размола разнятся. С. Н. Иванов [25] в своей книге «Технология бумаги» считает, что цель процесса размола состоит в придании волокнам структуры, определенной соотношением размеров волокон по толщине и длине, достижении оптимального фракционного состава для получения требуемого строения, плотности и качества готового бумажного полотна, а также придания волокнистой массе определенной степени гидратации, влияющей на создание межволоконных сил связи и свойства бумаги.

Б. Стинберг [108] указывает, что размол можно рассматривать как один из аспектов процесса «уменьшения размеров и увеличения площади поверхности». Часто данный процесс называют расчесыванием и истиранием, или более общим термином – дроблением.

Набиева А. А. [37] отмечает, что цель размола заключается в обеспечении необходимого фракционного состава волокнистой массы для достижения требуемых показателей бумажного полотна при формовании его на бумагоделательной машине. В процессе размола путем изменения степени дисперсности, расщепления и обработки поверхности волокон волокнистой массе

придаются физико-химические свойства, влияющие на создание межволоконных сил связи. Данные связи, в свою очередь, определяют механическую прочность и другие характеристики готового продукта.

Анализ работ данных исследователей позволяет сделать вывод, что основная цель процесса размола волокнистых полуфабрикатов в сфере целлюлозно-бумажного производства заключается в улучшении свойств волокнистой массы, что способствует повышению качества получаемого продукта, эффективности технологических процессов и сокращению энергозатрат.

### **1.3 Основные параметры процесса размола волокнистых полуфабрикатов в ножевых размалывающих машинах**

Основными параметрами процесса размола, оказывающими влияние на свойства волокнистой массы и эффективность размалывающего оборудования, являются зазор между ножами ротора и статора (удельное давление), концентрация волокнистой массы, частота вращения ротора и температура волокнистой массы во время размола.

Ввиду экстремальных условий внутри размалывающего аппарата проведение реальных измерений затруднено и мало изучено. Сложные связи с электрическими соединениями в водной среде создают трудности при применении датчиков непосредственно в зоне размола.

Новые технологии на основе волоконно-оптических систем, как для датчиков, так и для передачи сигналов, открыли возможности для расширенного применения и изучения физических механизмов в условиях ножевого размола.

Обзор отдельных физических измерений в зоне размола, проведенных различными авторами, представлен в таблице 1.1.

Одним из исследователей, проводивших визуальные наблюдения в зоне размола, был Д. Пейдж. Он и его сотрудники первыми получили микрофотографии волокон в зоне размола с использованием беленой сульфитной целлюлозы.

Таблица 1.1 – Физические измерения в зоне размола

| Переменная / технология         | Размол массы низкой концентрации |                 |
|---------------------------------|----------------------------------|-----------------|
|                                 | Автор                            | Год             |
| Визуальные наблюдения           | Д. Пэйдж [100]                   | 1962/1989       |
|                                 | В. Бэнкс [75]                    | 1967            |
|                                 | В. Н. Гончаров [13]              | 1970/1971       |
|                                 | Т. Фокс [85]                     | 1980            |
| Давление                        | А. А. Хлебников [66]             | 1969            |
|                                 | В. Н. Гончаров [13]              | 1970/1971       |
|                                 | Л. Нордман [99]                  | 1981            |
|                                 | Т. Фокс [85]                     | 1980            |
|                                 | Г. Каукал [79]                   | 1991            |
|                                 | Ю. Д. Алашкевич [2]              | 1986            |
| Сдвигающие силы                 | А. А. Хлебников [66]             | 1969            |
|                                 | В. Н. Гончаров [13]              | 1970/1971       |
| Температура                     | Л. Нордман [99]                  | 1981            |
| Межножевой зазор                | Л. Нордман [99]                  | 1981            |
|                                 | Н. Г. Чистова [67]               | 2000            |
|                                 | У.-Б. Мохлин [97]                | 2006            |
| Время пребывания в зоне размола | А. Арьяс [72, 73]                | 1970, 1971/1980 |
|                                 | Т. Фокс [85]                     | 1980            |
| Вибрации                        | Г. В. Петтерсен [101]            | 1986            |
|                                 | С. Н. Вихарев [7, 9]             | 1990/1993       |

Полученные изображения показали отдельные волокна в зоне размола, а также участки, где волокна полностью отсутствовали, кроме того, наблюдались изображения, содержащие значительное количество волокон, распределенных по всей зоне размола. Таким образом, они сделали вывод, что действие размола направлено на разрушение сгустков волокон, застрявших при сближении ножей ротора и статора в ходе размола.

Для визуального изучения движения потока волокнистой массы в зоне размола Т. Фокс, Р. Бродки и А. Ниссан [84] сконструировали экспериментальный рафинер из прозрачного пластика. Фотосъемка проводилась с помощью высокоскоростной камеры, сфокусированной на нужной части рафинера. В качестве сырья для размола использовалась беленая крафт-целлюлоза из сосны.

Данные показали, что поток был трехмерным и включал по крайней мере первичные, вторичные и третичные потоки (рисунок 1.2).

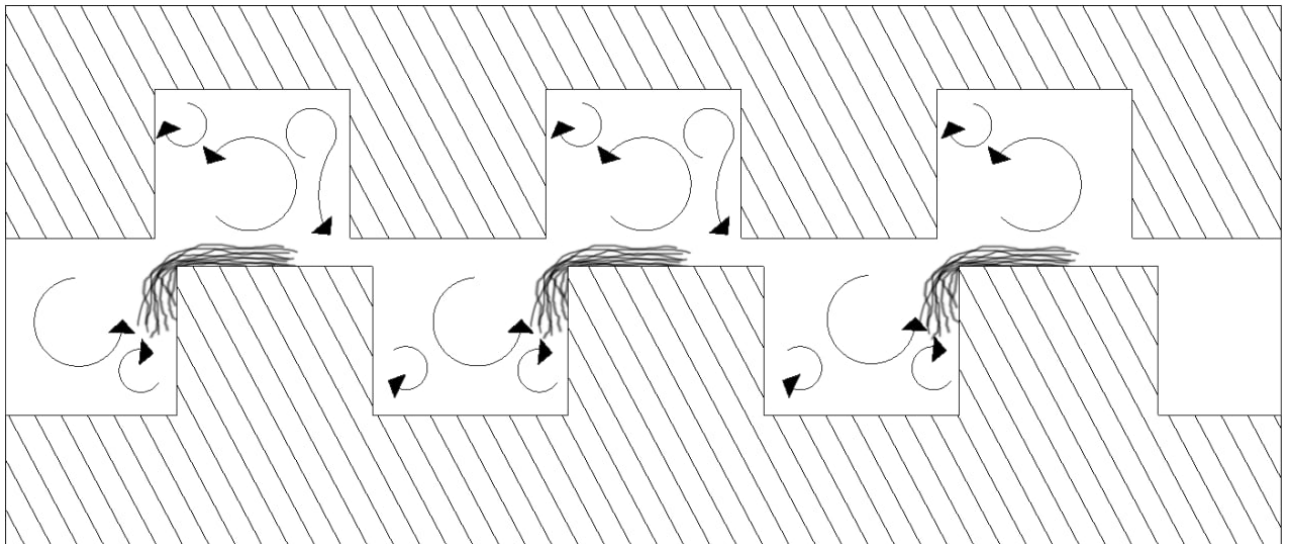


Рисунок 1.2 – Поток волокнистой суспензии в зоне размола

Было замечено, что волокна прикреплялись к передней кромке рабочей поверхности ножа благодаря гидродинамическим силам и подвергались максимальному рафинирующему воздействию.

Т. Фокс, Р. Бродки и А. Ниссан [84] при проведении экспериментов измеряли давление и время пребывания волокнистой массы в зоне размола. Измерение давления показало, что движение ротора вызывало градиенты давления в зоне размола, а его распределение было неравномерным. Т. Фокс [85] утверждал, что между дисками ротора и статора существует градиент давления, который создает поток из канавки статора в зазор между дисками, помогающий удерживать волокна на передней кромке ножей ротора.

Изучением давления в зоне размола занимались такие исследователи, как А. А. Хлебников [66], В. Н. Гончаров [13], Ю. Д. Алашкевич [2]. Исследования А. А. Хлебникова проводились с использованием проволочных тензометров (датчики деформации), заключенных в блоки из оргстекла и закрепленных с каждой стороны ножа в коническом рафинере.

Исследования А. А. Хлебникова показали, что фактическая ширина зоны увеличения давления уменьшалась с увеличением межножевого зазора, а скорость вращения диска ротора и концентрация волокнистой массы влияли на максимальное давление на волокна в зоне размола, причем при увеличении данных параметров давление увеличивалось.

В. Н. Гончаров при проведении исследований на дисковой мельнице использовал специальный двухкомпонентный датчик типа тензометра, элемент датчика (пружинная сталь) был закреплен на рабочей поверхности гарнитуры, а тензометры были подключены к этому элементу.

С помощью данных датчиков, размещенных в трех местах по радиусу дисков, удалось измерить нормальные и тангенциальные силы, действующие на слой волокон в зазоре между дисками, также были измерены осевая сила и крутящий момент, действующие на диск ротора.

Было выявлено, что результаты процесса размола определяются давлением, оказываемым на переднюю часть рабочей поверхности ножей, покрытых волокнами. Так, в ходе исследований, давление достигало 3,5 МПа на передней части ножа, далее давление быстро снижалось после 2–3 мм ширины ножа (зона максимального давления) и выравнивалось на уровне 10–15 % от максимального давления. В. Н. Гончаров заключил, что определяющим фактором является давление, действующее на переднюю часть рабочей поверхности ножа, а не фактическое давление, рассчитанное по геометрической поверхности их контакта.

В. Н. Гончаров также обнаружил, что:

- максимальное давление увеличивается с увеличением ширины ножа из-за большого количества волокон, собранных на передней кромке;
- ширина зоны увеличения давления не зависит от ширины ножей;
- максимальное давление уменьшается в зависимости от радиального расстояния от центра из-за уменьшения толщины слоя волокон на передней кромке вдоль радиуса;
- с увеличением давления происходит рост укорачивания волокон.

В. Н. Гончаров пришел к выводу, что наиболее экономичным способом для достижения максимальных прочностных свойств размалываемой целлюлозы является использование гарнитуры с меньшей шириной ножей, поскольку в данном случае давление снижается и оказывает менее разрушительное влияние на волокна.

Д. Атак [74], исследуя данные работы, заявил, что рабочая ширина ножей примерно соответствует средней длине разрабатываемых волокон целлюлозы и

при использовании такой ширины ножей обрабатывается максимальное количество волокон на единицу доступной площади зоны размола.

Работы исследователей, занимавшихся изучением давления в зоне размола, таких, как Д. М. Мартинес [93, 94], Р. Керекес [87], В. Батчелор [76], Дж. Сенгер и Д. Уэллет [105] в основном поддерживают выводы, сделанные В. Н. Гончаровым и А. А. Хлебниковым относительно того, что пик давления наблюдается на передней кромке ножей.

Исследования Ю. Д. Алашкевича и других ученых [1, 2, 12, 60, 68] показали, что при течении жидкости через межножевой зазор во время перекрытия ножей ротора и статора возникает гидродинамическое давление. Кривая распределения гидродинамического давления по ширине рабочей поверхности ножа асимметрична и ее максимум располагается ближе к середине волокнистого слоя.

В ходе размола температура волокнистой массы постоянно повышается и при длительном и интенсивном размоле может превышать 70 °С. Увеличение температуры массы увеличивает удельный расход электроэнергии, замедляет процесс размола, снижает его качество и способствует образованию садкой массы, что обуславливается меньшим набуханием волокон, вследствие чего они становятся менее пластичными и легче поддаются рубке, нежели расщеплению.

Это приводит к увеличению времени размола, снижению степени гидратации и укорочению волокон. Бумага, изготовленная из массы, размолотой при высоких температурах, отличается пониженной механической прочностью и повышенной пористостью, пухлостью и впитывающей способностью [59].

В своих исследованиях Л. Нордман [99] при измерении температуры в конической мельнице использовал датчики полупроводникового типа, измеряя как температуру массы в канавках, так и на рабочей поверхности ножей.

Сделанные им наблюдения показали, что температура волокнистой массы повышалась при каждом прохождении через зону размола на 1–2 °С, температура массы в канавках при этом всегда была немного ниже (на 0–3 °С), чем на поверхности ножей в соответствующем месте. Также было установлено, что при

уменьшении окружной скорости разность температур между канавками и поверхностью ножей увеличивалась.

Размол различных видов массы показал, что температура зависит от выбранного сырья, так разница температур между канавками и поверхностью ножей для целлюлозы из сосны была меньше по сравнению с целлюлозой из березы. При размолу массы из сосны температура увеличивалась более равномерно, тогда как для массы из березы температура резко увеличивалась в первой части, а затем выравнивалась или даже снижалась ближе к периферии дисков.

Л. Нордман и его коллеги также проводили исследования зазора между дисками ротора и статора с использованием вихретокового датчика, в ходе экспериментов зазор варьировался от 0,01 до 0,40 мм.

В ходе исследований был сделан вывод, что зазор между дисками особенно чувствителен к скорости вращения ротора, однако не была установлена связь между величиной межножевого зазора и качеством разрабатываемого полуфабриката.

Авторы отметили, что зазор между дисками был слишком велик, чтобы предполагать, что отдельные волокна могут застревать в нем и пришли к выводу, что если волокна подвергаются какой-либо механической обработке при размолу, то это происходит относительно пучков или флокул волокон.

Изучая процесс размолу волокнистой массы в ножевых размалывающих машинах, многие исследователи [2, 11, 60] отмечают, что размол волокон за счет прямого силового воздействия происходит при зазорах, сопоставимых с толщиной волокна. Регулировка межножевого зазора позволяет на этапе настройки оборудования изменять характер воздействия на волокно, так при зазоре менее 0,1 мм происходит сильный размол при высоком удельном давлении, 0,1–0,2 мм – средний размол, 0,2–0,4 мм – легкий размол, 0,5–0,6 мм – сильный расчес, 0,6–0,8 мм легкий расчес [59].

Влияние величины зазора между дисками ротора и статора на характер размола волокнистого полуфабриката было экспериментально доказано в работах Ю. Д. Алашкевича [2].

Установлено, что с увеличением давления в зоне размола сокращается время размола и затраты электроэнергии, однако вместе с этим наблюдается уменьшение средней длины волокон и снижение прочности бумаги, таким образом при размоле волокнистых полуфабрикатов необходимо настраивать оптимальный межножевой зазор в зависимости от требований, предъявляемых к готовому продукту.

При изучении влияния окружной скорости на процесс размола С. С. Легоцкий [33, 34] установил, что увеличение скорости способствует повышению набухания, фибрилляции и гидратации волокон. Ю. Д. Алашкевич [2] в своих работах доказал влияние окружной скорости вращения ротора на количество фибриллированных волокон. Получение наиболее фибриллированной массы наблюдалось при размоле на высокоскоростных аппаратах с достижением идентичной степени помола волокнистой массы.

Д. МакДональд и К. Майлз [95] утверждают, что, увеличение интенсивности процесса размола за счет увеличения окружной скорости вращения ротора или уменьшения концентрации волокнистой массы снижает энергозатраты, необходимые для достижения заданной степени помола, однако при этом снижается средняя длина волокна и показатель прочности на разрыв.

М. Статионвала, К. Майлз и А. Карнис [107] обнаружили, что при размоле целлюлозы со скоростью 1800 об/мин затраты электроэнергии на 25% меньше по сравнению с целлюлозой, размолотой при скорости 1200 об/мин при достижении одинаковой степени помола, а прочность на разрыв на 25 % выше, при размоле с большей скоростью.

К.-А. Куре и Йоран Дальквист [88, 89] определили, что увеличение окружной скорости в диапазоне 1800-2900 об/мин увеличивает долю волокон с продольными трещинами в стенке волокна, эти волокна легко сплющиваются и способствуют образованию более плотного и гладкого листа.

В работах В. А. Кожухова [31] и В. И. Шуркиной [70] экспериментально доказано влияние скорости вращения ротора на время размола и среднюю длину волокон. Авторы отмечают, что при повышении окружной скорости время размола снижается, однако наблюдается более интенсивное снижение средней длины волокон.

Концентрация волокнистой массы является важным фактором, влияющим на процесс размола. С. Смит [106] утверждал, что с увеличением концентрации уменьшается механическое воздействие на волокна за счет увеличения толщины образующейся волокнистой прослойки между ножами ротора и статора.

Исследуя влияние изменения концентрации волокнистой массы на процесс размола небеленой сульфатной целлюлозы при давлении 0,5 МПа, С. Н. Иванов в своих работах [24, 25] приводит следующие данные: при уменьшении концентрации массы с 6 до 4 % скорость размола увеличивается на 20–25 %, однако производительность ролла снижается на 25–30 % и увеличивается расход энергии на 10–15 %, при этом происходит снижение длины волокна и показателей разрывной длины и сопротивления раздиранию.

По данным В. И. Шуркиной [70] увеличение концентрации волокнистой массы ведет к увеличению времени размола, при этом наблюдается меньшее укорочение волокон и рост физико-механических характеристик.

Учитывая экспериментально доказанные данные о влиянии на процесс размола таких факторов, как давление в зоне размола (межножевой зазор), концентрация волокнистой массы и окружная скорость вращения ротора можно сделать вывод, что настройка этих факторов на этапе подготовки дисковой мельницы к размолу позволяет получать готовый продукт с необходимыми характеристиками.

Однако стоит отметить, что немаловажным фактором, влияющим на свойства получаемой волокнистой массы, является гарнитура дисковой мельницы, технические характеристики которой могут в значительной степени влиять на характер размола.

## 1.4 Оборудование для размол волокнистой массы

На предприятиях целлюлозно-бумажной промышленности размол волокнистой массы производится в конических, цилиндрических и дисковых мельницах, работа которых основана на принципе скрещающихся ножей и трущихся поверхностей.

Под руководством академика РАО Ю. Д. Алашкевича было разработано множество типов конструкций гарнитур, а также изучено их воздействие на качество получаемой продукции в процессе размол волокнистых полуфабрикатов [5, 29, 37, 30, 71].

Размалывающие гарнитуры дисковых мельниц различаются по геометрии и построению ножей, форме межножевой полости, типу обрабатываемого полуфабриката и другим характеристикам [8, 41, 42, 48].

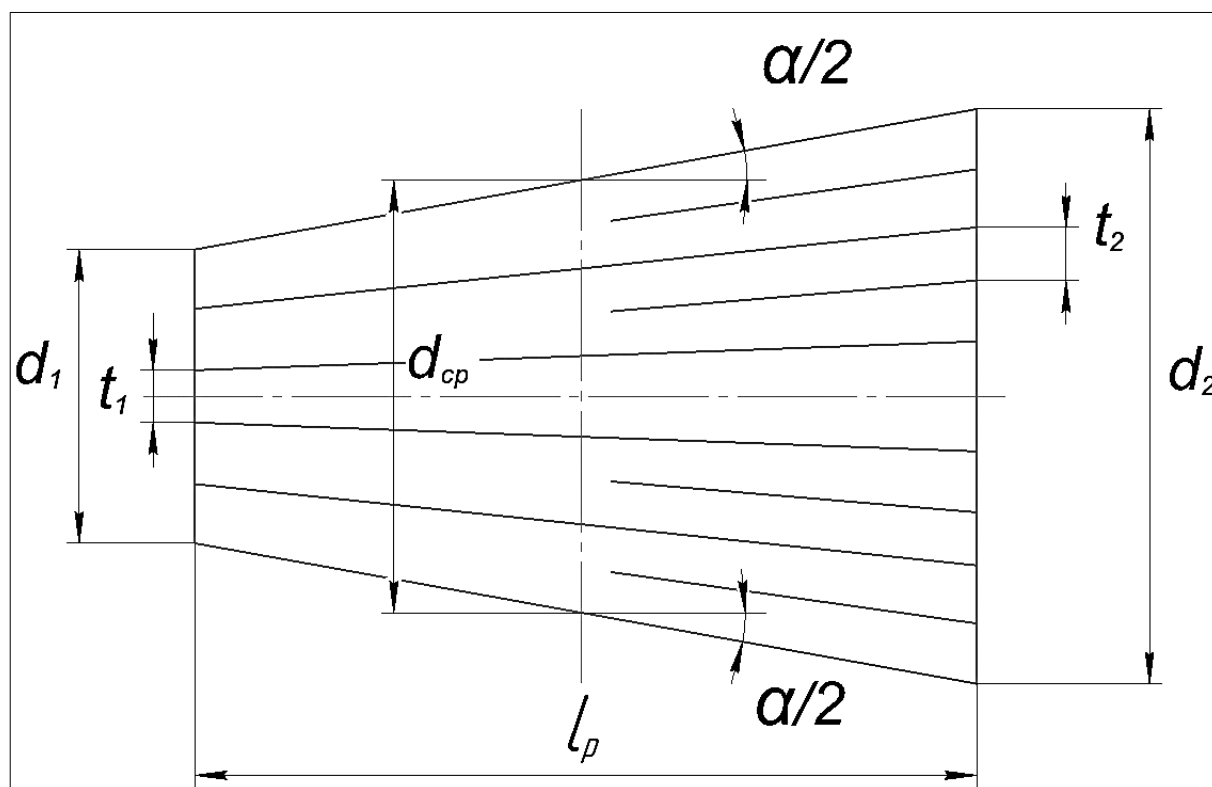
Характер исполнения рисунка ножевой размалывающей поверхности гарнитуры зависит от её геометрии [34]. Определяющими параметрами являются: толщина ножей, ширина и глубина межножевых канавок, наличие перегородок, угол наклона режущих кромок ножей к радиусу диска, вектор их наклона относительно направления вращения гарнитуры, характер расположения относительно центра вращения и угол скрещивания [33].

Общая классификация может включать в себя множество подвидов, в свою очередь классифицированных по различным признакам:

- форма осевого сечения;
- пропускная способность;
- распределение ножей по рабочей поверхности;
- расположение режущих кромок ножей ротора и статора относительно общего центра их дисков;
- угол скрещивания режущих кромок ножей ротора и статора;
- направление движения точки скрещивания режущих кромок ножей;
- характер режима работы.

По форме осевого сечения рисунок может быть выполнен с коническим, плоским и усложнённым радиально-осевым профилем контура осевого сечения диска, образованного рабочей поверхностью гарнитуры при её вращении.

Гарнитуры конусного типа в зависимости от угла конусности делятся на гарнитуры Жордана и гарнитуры Клафлина (рисунок 1.3) [27].



$d_1$  – диаметр входной;  $d_2$  – диаметр выходной;  $d_{cp}$  – диаметр средний;  
 $\alpha$  – угол конусности;  $t_1$  – расстояние (шаг) между режущими кромками соседних основных (длинных) ножей на входе в межножевую размалывающую полость;  $t_2$  – расстояние (шаг) между режущей кромкой основного (длинного) ножа и режущей кромкой вспомогательного ножа (укороченного) на выходе из межножевой размалывающей полости

Рисунок 1.3 – Гарнитура конусного типа

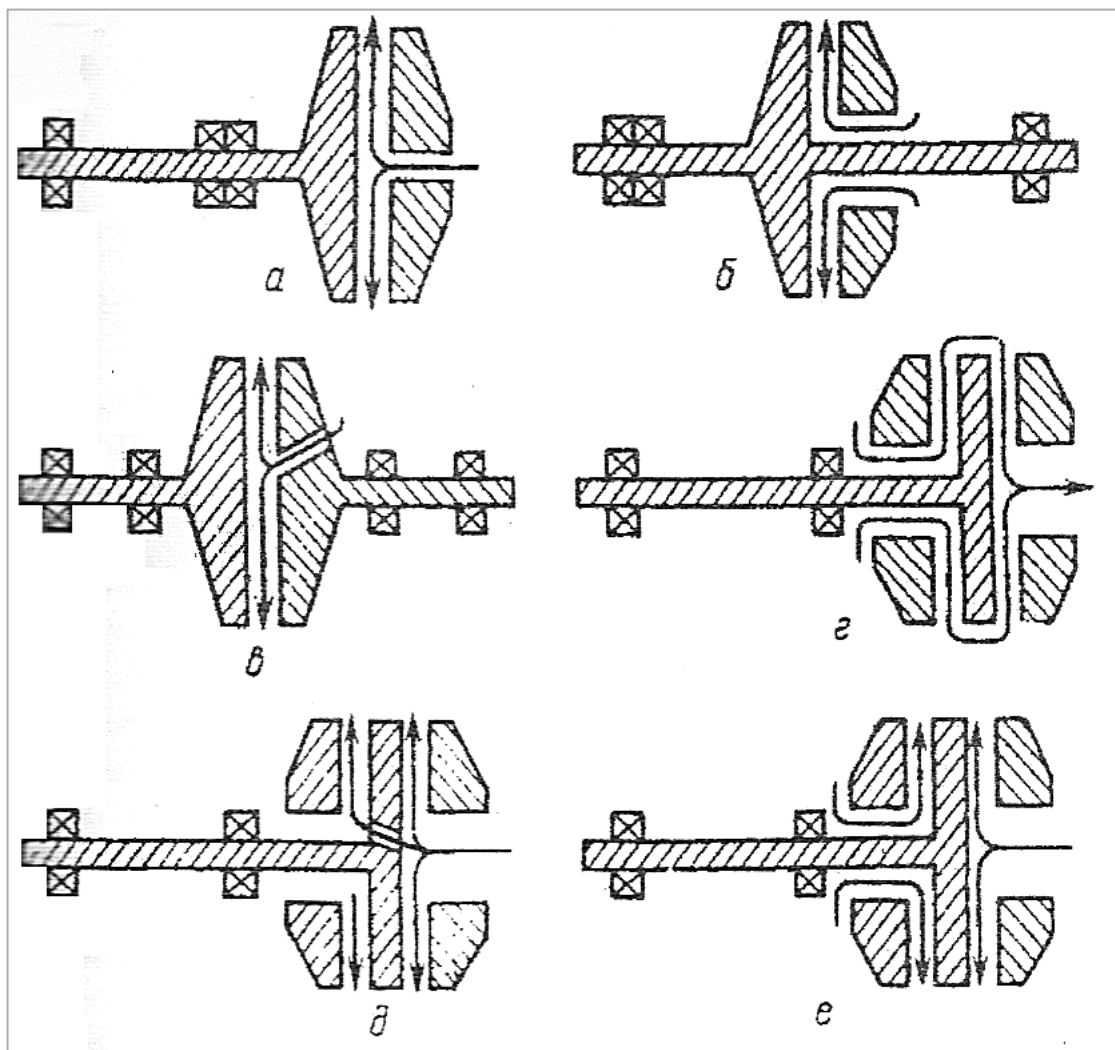
Основные характеристики конических гарнитур Жордана и Клафлина представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Сравнительные характеристики конических гарнитур Жордана и Клафлина

| Характеристики                            | Гарнитура Жордана                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Гарнитура Клафлина                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Угол конусности                           | 11–26°                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 40–60°                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Допустимая концентрация волокнистой массы | 3–4 %                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 5–6 %                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Скорость мельницы                         | 10–15 м/с                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 25–35 м/с                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Применение                                | Вторая ступень основного, массного размола                                                                                                                                                                                                                                                                      | Первая ступень предварительного размола целлюлозы, а также размол рафинёрной древесной массы                                                                                                                                                                                                                       |
| Характер размола                          | Преобладание эффекта фибрилляции                                                                                                                                                                                                                                                                                | Преобладание эффекта укорочения волокон                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Требования к точности механизма присадки  | Упрощаются за счёт малого угла конусности – требуемая величина осевого хода ротора существенно превышает задаваемое приращение зазора                                                                                                                                                                           | Ужесточаются за счёт большого угла конусности – величина осевого хода ротора приближается к заданному приращению зазора и, следовательно, существенно уменьшается                                                                                                                                                  |
| Недостатки                                | <i>Отклонение от соосности:</i> этот недостаток выражается особенно заметно за счёт малых значений угла конусности, поскольку вертикальная составляющая смещения осей всегда значительно ниже горизонтальной.                                                                                                   | <i>Отклонение от соосности:</i> этот недостаток менее заметен за счёт больших значений угла конусности, поскольку вертикальная составляющая смещения осей существенно увеличивается, а горизонтальная уменьшается.                                                                                                 |
|                                           | <i>Замедление продвижения массы от входа к периферии и увеличение времени её прохождения через размалывающую полость:</i> данный недостаток выражается особенно заметно, поскольку, за счёт малых значений угла конусности, горизонтальная составляющая центробежной силы всегда значительно ниже вертикальной. | <i>Замедление продвижения массы от входа к периферии и увеличение времени её прохождения через размалывающую полость:</i> данный недостаток менее заметен, поскольку, за счёт больших значений угла конусности, горизонтальная составляющая существенно возрастает и приближается по значению к центробежной силе. |

На данный момент большей популярностью пользуются дисковые мельницы, которые, исходя из количества зон размола и вращающихся размалывающих поверхностей, делятся на четыре группы (рисунок 1.4):

- однодисковые мельницы (вращается одна размалывающая поверхность – рисунок 1.5);
- двухдисковые мельницы (обе размалывающие поверхности вращаются на встречу друг другу);
- сдвоенные мельницы (между двумя статичными дисками вращается один диск, имеющий две размалывающие поверхности);
- многодисковые мельницы.



а, б – однодисковые; в – двухдисковые; г, д, е – сдвоенные

Рисунок 1.4 – Варианты исполнения дисковых мельниц

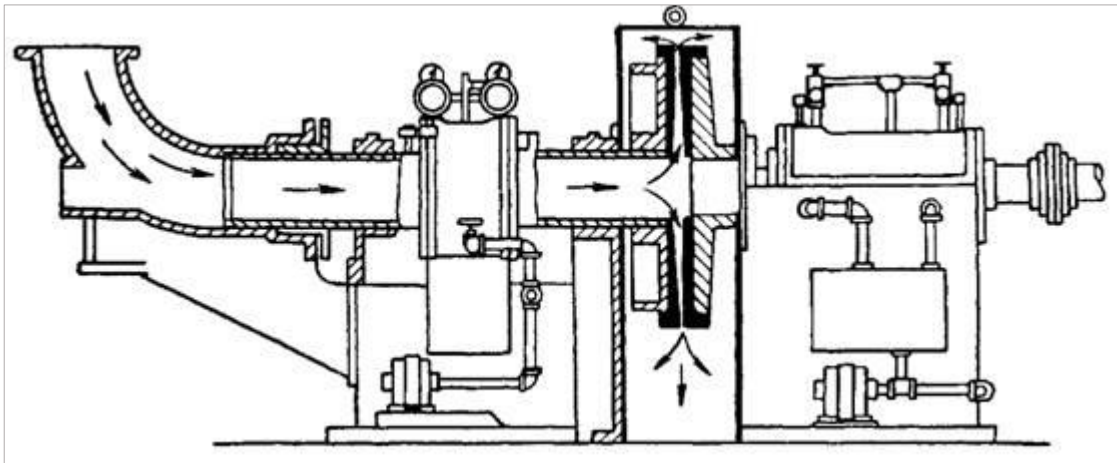


Рисунок 1.5 – Однодисковая мельница

Основным рабочим органом дисковой мельницы является ножевая размалывающая гарнитура с преимущественно прямолинейной формой режущих кромок. Существует большое многообразие размалывающих гарнитур дисковых мельниц, отличающихся по профилю, геометрическому построению ножевой поверхности, виду обрабатываемого сырья и другим признакам [29, 43, 44, 45, 47].

Гарнитуры дисковых мельниц лишены недостатков, описанных для конических гарнитур. Благодаря плоской форме осевого сечения износ режущих кромок ножей происходит более равномерно, а настройка межножевого зазора поддается более точному контролю [28], однако требования к точности механизма присадки возрастают. В отличие от гарнитур конических мельниц несоосность дисковых гарнитур не влияет на величину межножевого зазора и распределение нагрузки по рабочей поверхности дисков.

Недостатком гарнитур дисковых мельниц является быстрое прохождение волокнистой суспензии через полость размола, вследствие чего требуемая степень помола волокнистой массы достигается увеличением циклов прохождения, а также возрастание требований к механизму присадки при установке и регулировании зазора между ножами ротора и статора.

В отличие от конических, гарнитуры дисковых мельниц имеют более обширную область применения и позволяют получать древесную массу из щепы, производить размол древесных отходов и горячий размол целлюлозы, а также подготавливать волокнистые полуфабрикаты низкой и высокой концентрации.

Дисковые гарнитуры, благодаря технологическим особенностям, позволяют получать бумагу и картон с высокими физико-механическими характеристиками, имеют на 15–25 % меньшие затраты электроэнергии и более удобное техническое обслуживание при замене гарнитуры дисковой мельницы.

Одним из вариантов исполнения гарнитуры дисковой мельницы является гарнитура с усложненным радиально-осевым профилем – комбинированная гарнитура (рисунок 1.6).

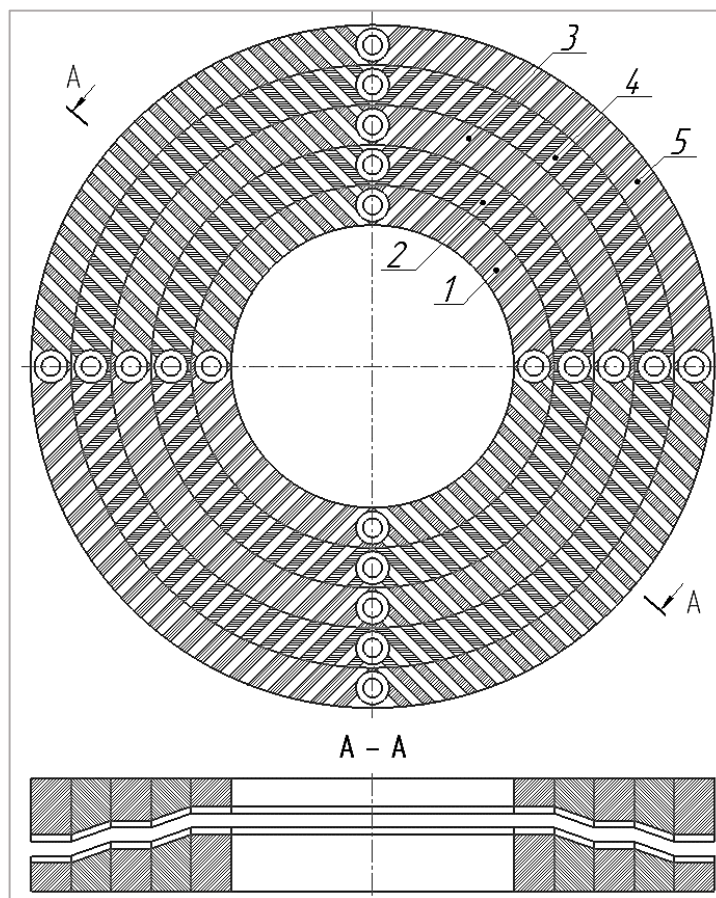


Рисунок 1.6 – Гарнитура с усложненным радиально-осевым профилем – комбинированная гарнитура

Данный вариант дисковой гарнитуры [46] был разработан на кафедре Машин и аппаратов промышленных технологий СибГТУ под руководством академика РАО Ю. Д. Алашкевича.

Гарнитура представляет закрепленные на дисках ротора и статора концентрические кольца с параллельными ножевыми выступами, которым в поперечном сечении придана разновысокая прямоугольная форма. Гарнитура

разделена на четыре сектора, а линия профиля представляет ломаную линию, при этом кольца, имеющие наклонную поверхность к центру диска, являются взаимозаменяемыми для ротора и статора.

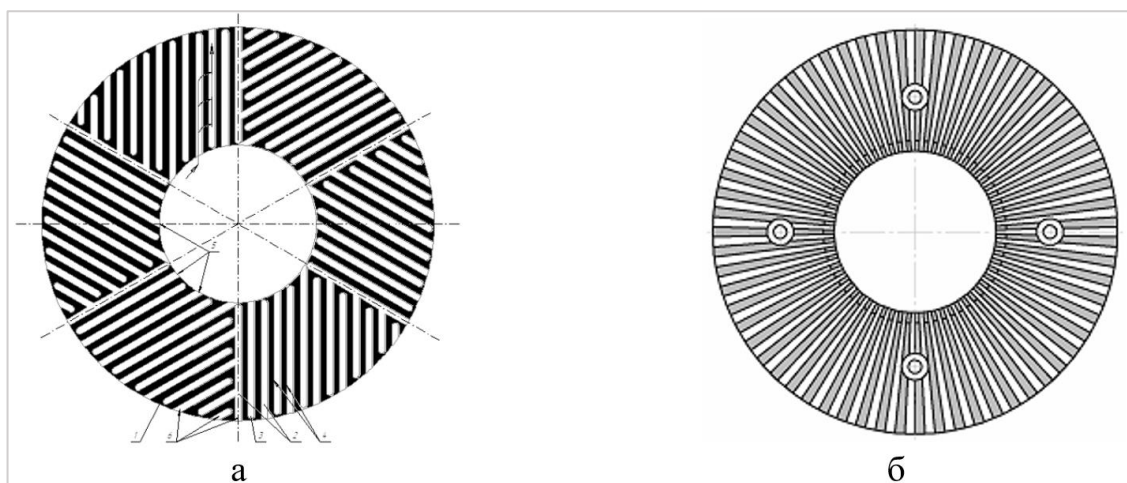
Комбинированной гарнитуре присущи те же положительные признаки, как и стандартным дисковым гарнитурам с плоской полостью размола. Конструктивные особенности комбинированной гарнитуры позволяют на стадии настройки рисунка ножевой поверхности задать режим движения волокнистой суспензии, углы пересечения и наклона режущих кромок к радиусу и центру дисков соответственно.

Использование комбинированной гарнитуры позволяет:

- регулировать скорость прохождения волокнистой массы через полость размола и интенсивность размола, что позволяет влиять на время обработки полуфабриката;
- в зависимости от вида используемого материала и его концентрации настраивать рисунок ножевой поверхности и интенсифицировать процесс размола;
- повысить эффективность процесса размола благодаря выбору необходимого режима из имеющегося спектра траекторий движения волокнистой суспензии через полость размола;
- уменьшить затраты на электроэнергию благодаря более эффективному использованию механических и гидродинамических сил, воздействующих на волокнистый материал за один цикл обработки;
- повысить производительность размола при сохранении его качества путем сокращения количества циклов обработки волокнистого полуфабриката.

По пропускной способности гарнитуры дисковых мельниц делятся на гарнитуры с открытым и закрытым периферийным выходом (рисунок 1.7).

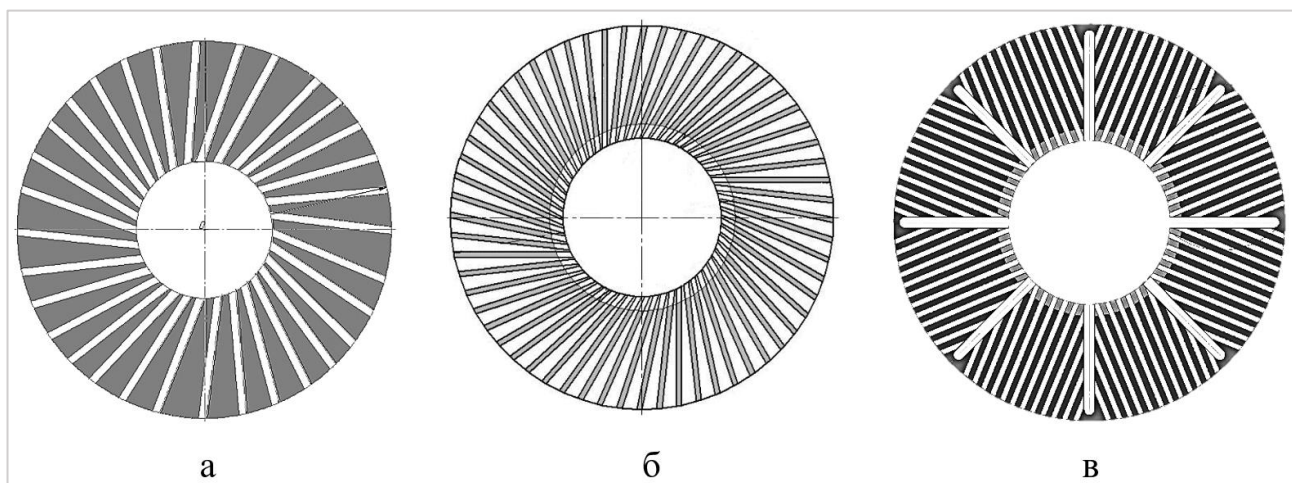
Гарнитуры с открытым периферийным выходом отличаются особенностью уменьшения живого сечения от центра к периферии соответственно изменению фракционного состава обрабатываемого материала при его прохождении через размалывающую полость, чаще всего гарнитуры данного типа используются на стадии предварительного размола.



а-гарнитура с частично закрытыми канавками со стороны входа и выхода: 1 – нож; 2 – межножевые канавки, закрытые со стороны входа; 3 – межножевые канавки, закрытые со стороны выхода; 4 – режущие кромки смежных ножей; 5 – вход в канавки; 6 – выход из канавок, б – гарнитура с открытыми канавками со стороны входа и выхода

Рисунок 1.7 – Виды гарнитуры по пропускной способности

По распределению ножей на рабочей поверхности гарнитуры дисковых мельниц делятся на гарнитуры с равномерным распределением ножей и распределением ножей по секторам (рисунок 1.8).



а – гарнитура с равномерным распределением ножей при переменной ширине; б – гарнитура с равномерным распределением ножей при постоянной ширине; в – гарнитура с распределением ножей по составляющим ее секторам

Рисунок 1.8 – Виды гарнитуры по распределению ножей на рабочей поверхности

В гарнитурах с равномерным распределением ножи образуют одинаковые углы с радиусом, проведенным из центра диска к точке пересечения. Гарнитуры данного типа могут быть выполнены с постоянной шириной межножевых канавок (рисунок 1.8, а).

В этом случае ширина ножей увеличивается от центра к периферии, однако, учитывая, что при размоле волокнистого полуфабриката большую роль оказывает количество режущих кромок с нависшей на них волокнистой наслойкой, такое исполнение ведет к снижению режущей длины, физико-механических свойств готового продукта и технико-экономических показателей, а характер размола преобладает в направлении рубки волокон.

Второй вариант исполнения гарнитур данного типа - с постоянной шириной ножей (рисунок 1.8, б). В этом случае ширина канавок увеличивается от центра к периферии, однако при таком исполнении уменьшаются количество ножей, площадь размалывающей поверхности, секундная режущая длина и размалывающая способность гарнитуры, однако на практике свободную часть рабочей поверхности на периферии диска заполняют укороченными ножами, не пересекающими внутреннюю окружную кромку и образующими с радиусом такой же угол, как и главные ножи.

При секторном исполнении гарнитуры (рисунок 1.8, в) геометрия распределения ножей по рабочей поверхности может быть разнообразной. Для наиболее широко используемого в целлюлозно-бумажной промышленности исполнения рисунка рабочих поверхностей секторной гарнитуры дисковой мельницы характерно максимально плотное распределение ножей на размалывающей поверхности единичного сектора гарнитуры, чему способствует постоянная ширина ножей и межножевых канавок вдоль радиуса.

Такое распределение ножей по поверхности единичного сектора позволяет увеличить количество ножей, размалывающую способность гарнитуры, общую режущую длину и направить характер размола в сторону фибрилляции волокон.

Исследования показывают, что при секторном распределении ножей режущая длина больше, чем при равномерном на 10–15 % [49].

При построении рисунков ножевой поверхности гарнитур секторного типа необходимо выполнение следующих условий:

1. необходимо соблюдать параллельность ножей при сохранении их толщины и ширины межножевых канавок от центра к периферии диска;

2. обеспечить возможность прямого сообщения межножевых канавок с входной полостью размола, а также пересечение ножей с входной окружной кромкой диска гарнитуры;

3. режущие кромки ножей должны быть параллельны одной из образующих единичного сектора;

4. вектор наклона режущих кромок ножей, при выполнении третьего условия, должен быть противоположен вращению диска ротора.

Стоит отметить, что выполнение второго условия невозможно при прямолинейном исполнении ножевых кромок, так как часть межножевых канавок ограничивается боковыми сегментами сектора и не имеет возможности прямого сообщения с входной полостью размола, за счет чего затрудняется поступление волокнистой суспензии в данную зону размола. Однако данная проблема решается при выполнении четвертого условия, а именно при работе гарнитуры в режиме прокачивания волокнистой массы.

По расположению режущих кромок ножей ротора и статора относительно общего центра их дисков гарнитуры имеют следующие исполнения:

- двухстороннее: при наложении размалывающих поверхностей дисков ротора и статора друг на друга направление наклона режущих кромок ножей противоположно, а их эксцентриситеты располагаются с разных сторон относительно центра вращения;

- одностороннее: режущие кромки ножей диска ротора и статора расположены эксцентрично, с одной стороны относительно центра вращения;

- зеркальное: при наложении размалывающих поверхностей дисков ротора и статора друг на друга направление наклона режущих кромок ножей одинаково, а их эксцентриситеты располагаются с одной стороны относительно центра вращения;

- комбинированное: может чередовать представленные выше варианты, как в статическом положении, так и в динамике.

По углу скрещивания режущих кромок ножей ротора и статора гарнитуры могут быть выполнены:

- с углом скрещивания  $0^\circ$ : данный вариант возможен при радиальном и не радиальном исполнении рисунка размалывающей поверхности, при этом наблюдается сильное режущее действие при минимальной энергоёмкости размола;
- с углом скрещивания  $3-7^\circ$ : данный вариант возможен при одностороннем и двухстороннем исполнении рисунка размалывающей поверхности, при этом наблюдаются оптимальные воздействия на волокнистый полуфабрикат и энергоёмкость размола;
- с углом скрещивания  $30-60^\circ$ : данный вариант возможен при одностороннем и двухстороннем исполнении рисунка размалывающей поверхности, при этом наблюдается увеличение таких физико-механических показателей, как сопротивление раздиранию, разрывная длина, сопротивление излому, при снижении энергоёмкости размола.

По направлению движения точки скрещивания режущих кромок ножей гарнитуры делятся на гарнитуры с:

- периферийным исполнением: данный вариант возможен при одностороннем исполнении, если входной угол ножей ротора *больше* входного угла ножей статора, и двухстороннем исполнении, если ножи ротора наклонены *против направления* его вращения, а ножи статора *против направления* его гипотетического вращения, в любом случае точка скрещивания режущих кромок ножей ротора и статора движется от центра к периферии дисков, тем самым продвигая массу к выходу из полости размола;
- центральным исполнением: данный вариант возможен при одностороннем исполнении, если входной угол ножей ротора *меньше* входного угла ножей статора, и двухстороннем исполнении, если ножи ротора наклонены *в направлении* его вращения, а ножи статора *в направлении* его гипотетического вращения, в любом случае точка скрещивания режущих кромок ножей ротора и статора движется от периферии к центру дисков.

Направление наклона режущих кромок ножей диска ротора и статора влияет на характер режима работы гарнитуры и делится на:

– прокачивающий режим: наблюдается у гарнитур с двухсторонним и периферийным исполнением, повышает пропускную способность мельницы за счет продвижения массы от центра к периферии дисков;

– удерживающий режим: наблюдается у гарнитур с двухсторонним центральным исполнением, увеличивает время нахождения волокнистого материала в зоне размола за счет движения точки скрещивания режущих кромок ножей от периферии к центру дисков;

– смешанный режим: возможен при одностороннем исполнении, если ножи ротора наклонены *в направлении* его вращения, а ножи статора *против направления* его гипотетического вращения, и не радиальном, когда углы скрещивания режущих кромок ножей равны  $0^\circ$ , данный вариант мало изучен и практически не применяется в целлюлозно-бумажном производстве.

Таким образом, рассмотренные варианты исполнения рисунка ножевой поверхности и полости размола гарнитур дисковых мельниц демонстрируют важность выбора конструктивных параметров размалывающего оборудования, в дальнейшем влияющих на характер обработки волокнистого полуфабриката, механические характеристики готового продукта и экономическую эффективность производственных процессов.

## **Выводы по первой главе**

Проведенный анализ исследований в области размол волокнистых полуфабрикатов в ножевых размалывающих машинах показал, что существование имеющихся теорий, описывающих процесс размол, свидетельствует о том, что процессы, протекающие при размоле волокнистых полуфабрикатов, требуют дальнейшего изучения, а гипотезы ученых касательно факторов, влияющих на процесс размол, разнятся.

Учитывая экспериментально доказанные данные о влиянии на процесс размол таких факторов, как давление в зоне размол (межножевой зазор), концентрация волокнистой массы и окружная скорость вращения ротора можно сделать вывод, что настройка этих факторов на этапе подготовки дисковой мельницы к размолу позволяет получать готовый продукт с необходимыми характеристиками. Установлено, что с увеличением давления в зоне размол сокращается время размол и затраты электроэнергии, однако вместе с этим наблюдается уменьшение средней длины волокон и снижение прочности бумаги, таким образом, при размоле волокнистых полуфабрикатов необходимо настраивать оптимальный межножевой зазор в зависимости от требований, предъявляемых к готовому продукту.

Стоит отметить, что немаловажным фактором, влияющим на свойства получаемой волокнистой массы, является гарнитура дисковой мельницы, технические характеристики которой могут в значительной степени влиять на характер размол.

Рассмотренные варианты исполнения рисунка ножевой поверхности и полости размол гарнитур дисковых мельниц демонстрируют важность выбора конструктивных параметров размалывающего оборудования, в дальнейшем влияющих на характер обработки волокнистого полуфабриката, физико-механические характеристики готового продукта и экономическую эффективность производственных процессов.

Несмотря на результаты, достигнутые в сфере размол волокнистых полуфабрикатов, имеющиеся в настоящее время представления в этой области исследований являются недостаточными для решения практических задач повышения эффективности размол на производстве и улучшения характеристик готового продукта. В частности, в данный момент не решен вопрос оперативного изменения рисунка ножевой размалывающей поверхности гарнитуры.

Решение данной проблемы заключается в изменении конструктивного исполнения рабочих органов дисковой мельницы, позволяющего изменять технологические параметры гарнитуры с одним набором диска ротора и статора. Конструктивные особенности комбинированной гарнитуры позволяют на стадии настройки рисунка ножевой размалывающей поверхности задать режим движения волокнистой суспензии, углы пересечения и наклона режущих кромок к радиусу и центру дисков соответственно.

## ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Для решения теоретических задач необходимо:

- обосновать построение рабочей поверхности гарнитуры дисковой мельницы;
- разработать механизм регулирования различных рисунков рабочей поверхности гарнитуры;
- рассчитать геометрию расположения режущих кромок ножей ротора и статора комбинированной гарнитуры;
- определить зависимости выходного угла  $\beta$  от входного угла  $\alpha$  фронтальной проекции режущей кромки размалывающей поверхности единичного сектора комбинированной гарнитуры;
- рассчитать секундную режущую и циклическую элементарную длину комбинированной гарнитуры;
- установить зависимость показателя циклической элементарной длины от углов поворота диска ротора относительно диска статора.

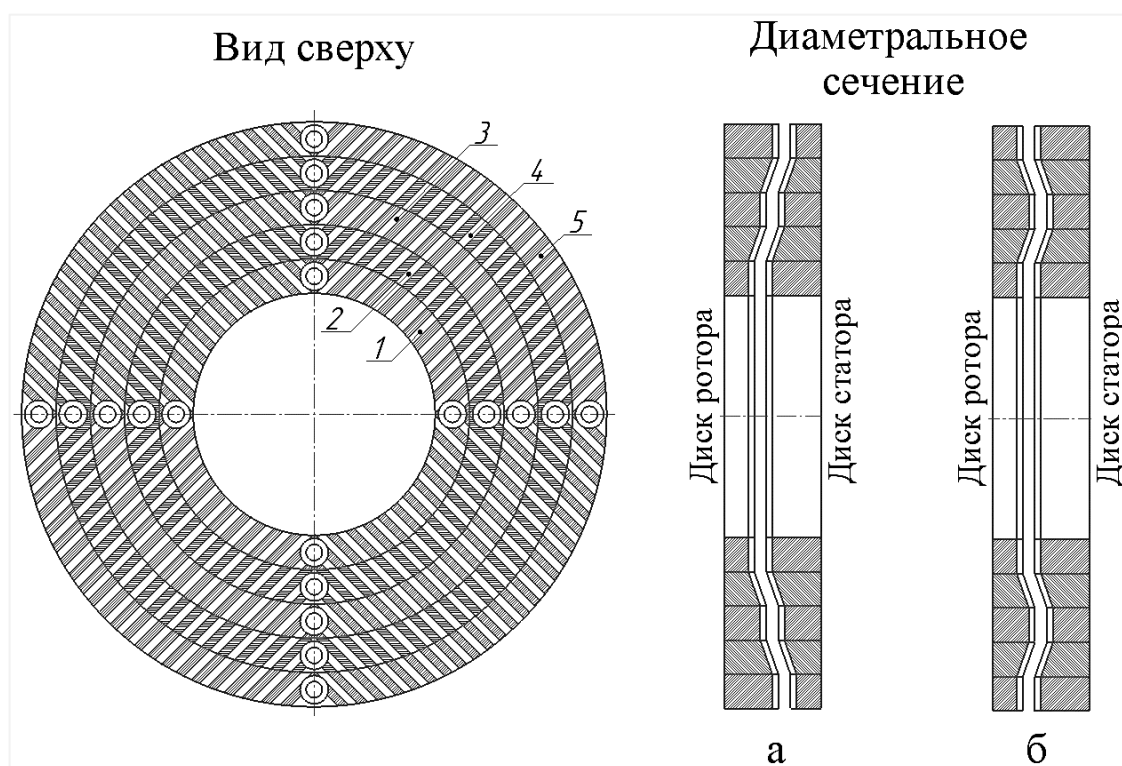
### 2.1 Обоснование геометрии построения ножевой полости размола и рисунка ножевой размалывающей поверхности гарнитуры

Комбинированная гарнитура дисковой мельницы была спроектирована на кафедре «Машины и аппараты промышленных технологий» Сибирского государственного института науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева (рисунок 2.1) [46].

Комбинированная гарнитура дисковой мельницы имеет внутренний диаметр  $d - 120$  мм, наружный диаметр  $D - 290$  мм и состоит из пяти разновысоких концентрических колец с равномерно распределенными на них по секторам параллельными ножевыми выступами.

Кольца 1, 3 и 5 имеют горизонтальную поверхность размола, у колец 2 и 4 поверхности размола разновысокие из-за наклона второго кольца к центру и четвертого к периферии (при волнообразном исполнении) или к центру дисков (при коническом исполнении).

Данная конструкция гарнитуры позволяет при необходимости изменять полость размола на волнообразную или коническую, благодаря сочетанию в ней традиционной плоской (кольца 1, 3 и 5) и конической (кольца 2 и 4) гарнитур.



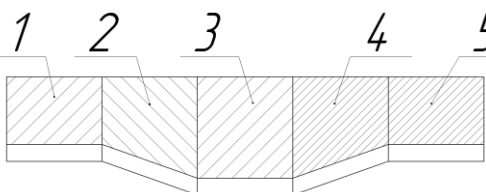
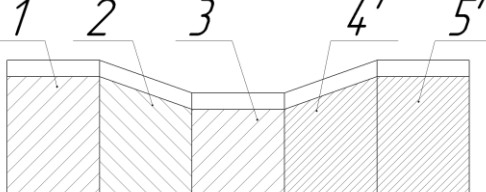
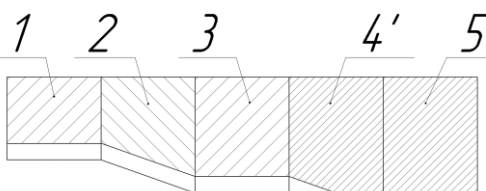
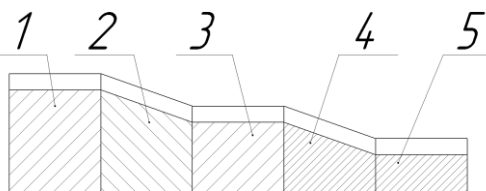
а – коническая полость размола; б – волнообразная полость размола;

1 – 5 – порядковый номер концентрических колец

Рисунок 2.1 – Комбинированная гарнитура дисковой мельницы

Основные конструктивные параметры комбинированной размалывающей гарнитуры дисковой мельницы, а также изображения элементов диска ротора и статора для волнообразной и конической полостей размола приведены в таблице 2.1. Изменение полости размола на коническую обеспечивается перестановкой колец № 4 и № 5 диска ротора и № 4' и № 5' диска статора. Для каждого кольца гарнитуры приведены угол наклона поверхности кольца к основанию диска  $\alpha, ^\circ$  и высота кольца  $h$ , мм.

Таблица 2.1 – Конструктивные параметры комбинированной гарнитуры

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

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

Механизм регулирования различных рисунков рабочей поверхности комбинированной гарнитуры

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

Рассмотрим выбор углов поворота концентрических колец в пределах единичного сектора.

Для создания *однонаправленных* ножей угол поворота выбранных колец составляет  $0^\circ$ .

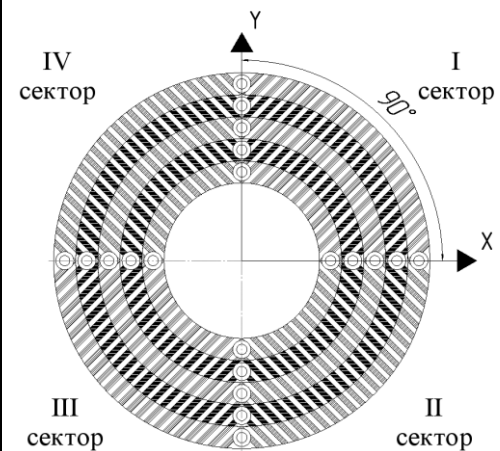
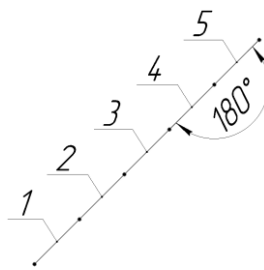
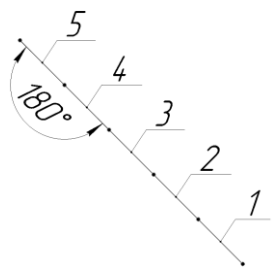
Создание *разнонаправленных* ножей с одинаковыми углами сопряжения режущих кромок на всем секторе обеспечивается поворотом концентрических колец на половину угла раствора –  $45^\circ$ .

Для создания *разнонаправленных* ножей с различными углами сопряжения режущих кромок произведем поворот колец на угол  $\alpha$  в промежутке  $0^\circ < \alpha < 45^\circ$ , при этом углы сопряжения режущих кромок на участке сектора, равном данному углу поворота и оставшейся части сектора, будут различны.

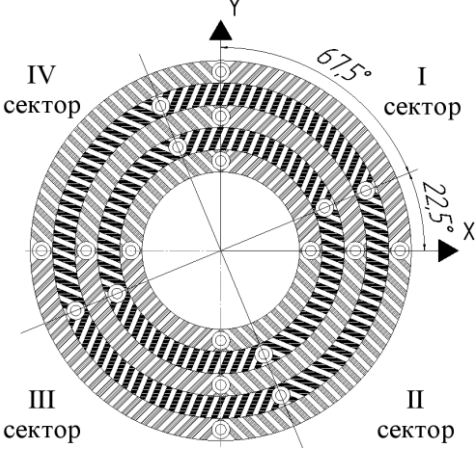
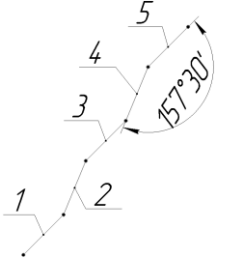
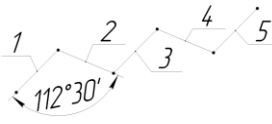
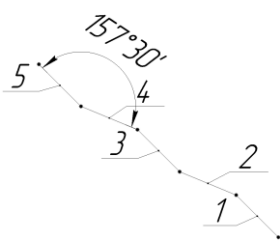
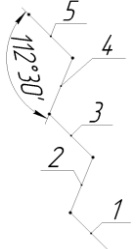
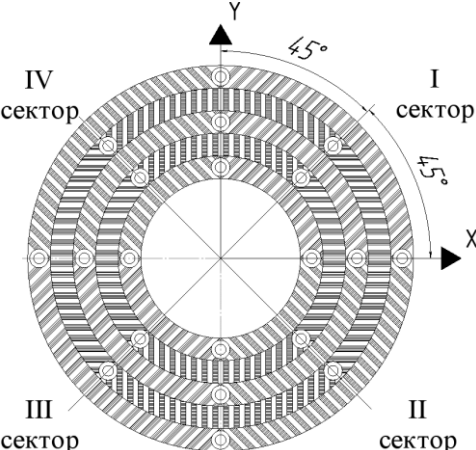
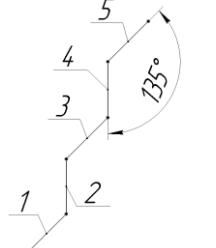
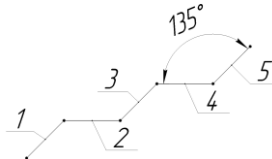
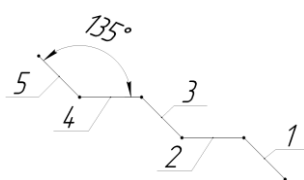
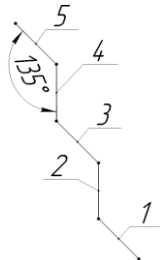
Для удобства расчетов промежутков от  $0^\circ$  до  $45^\circ$  делим пополам, таким образом угол поворота колец для создания *разнонаправленных* ножей с различными углами сопряжения режущих кромок равен  $22,5^\circ$ .

Учитывая, что при повороте колец для каждого рисунка гарнитуры наблюдаются разные углы сопряжения кромок ножей, в таблице 2.2 приведены изображения этих углов.

Таблица 2.2 – Изменение угла сопряжения кромок ножей при повороте колец

| Угол поворота колец | Изображение размалывающей поверхности при повороте колец                            | Схема расположения сопряжения кромок ножей при повороте колец по секторам            |                                                                                       |
|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|                     |                                                                                     | Сектор 1 и 3                                                                         | Сектор 2 и 4                                                                          |
| $0^\circ$           |  |  |  |

Продолжение таблицы 2.2

| Угол поворота колец | Изображение размалывающей поверхности при повороте колец                            | Схема расположения сопряжения кромок ножей при повороте колец по секторам            |                                                                                       |
|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 22,5°               |    | Сектор 1 и 3 – 67,5°                                                                 | Сектор 1 и 3 – 22,5°                                                                  |
|                     |                                                                                     |    |    |
|                     |                                                                                     | Сектор 2 и 4 – 67,5°                                                                 | Сектор 2 и 4 – 22,5°                                                                  |
|                     |                                                                                     |    |    |
| 45°                 |  | Сектор 1 и 3                                                                         | Сектор 1 и 3                                                                          |
|                     |                                                                                     |   |  |
|                     |                                                                                     | Сектор 2 и 4                                                                         | Сектор 2 и 4                                                                          |
|                     |                                                                                     |  |  |

Как видно из таблицы 2.2, для всех вариантов одинаковый угол наклона к оси X имеют ножи, расположенные на первом и третьем секторах, а также на втором и четвертом секторах.

Для варианта рисунка гарнитуры с поворотом колец на 0° конструкция рисунка режущей кромки ножа представляет прямую, а угол сопряжения кромок ножей составляет 180°.

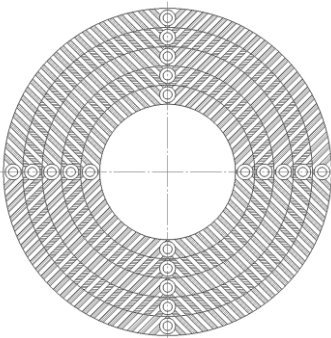
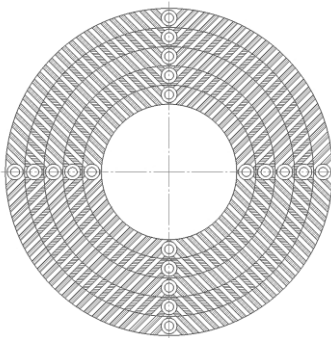
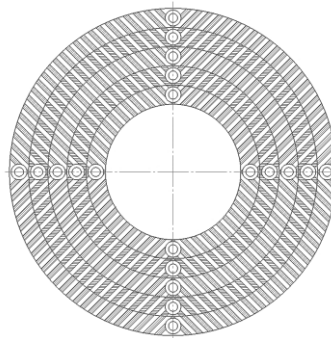
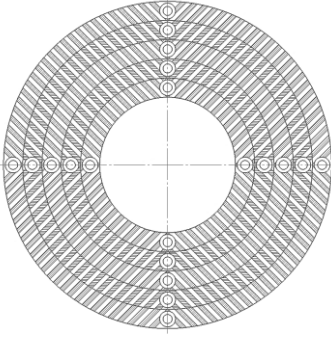
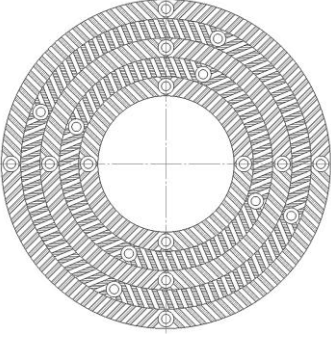
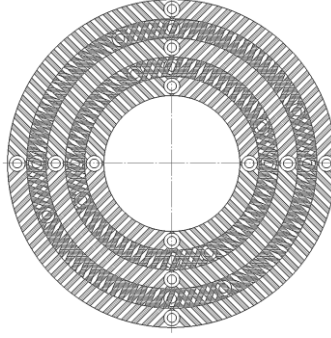
Для варианта рисунка гарнитуры с поворотом колец на  $22,5^\circ$  конструкция рисунка режущей кромки ножа представляет ломаную линию с углом сопряжения кромок ножей  $157^\circ 30'$  на промежутке сектора, равном  $67,5^\circ$  и углом  $112^\circ 30'$  на промежутке сектора, равном  $22,5^\circ$ .

Для варианта рисунка гарнитуры с поворотом колец на  $45^\circ$  конструкция рисунка режущей кромки ножа, по аналогии с вариантом поворота колец на  $22,5^\circ$ , представляет ломаную линию с углом сопряжения кромок ножей  $135^\circ$  на всем секторе.

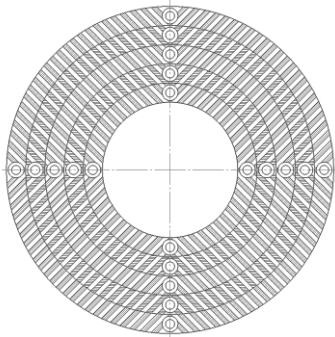
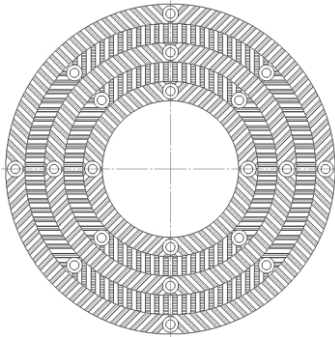
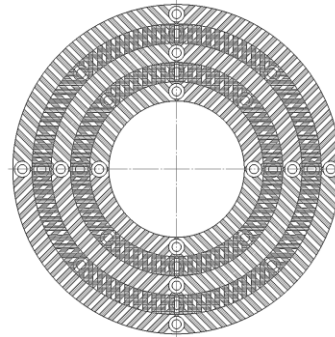
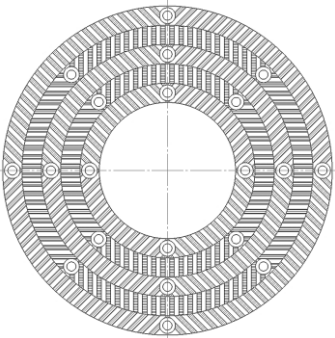
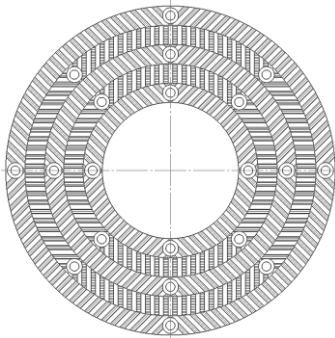
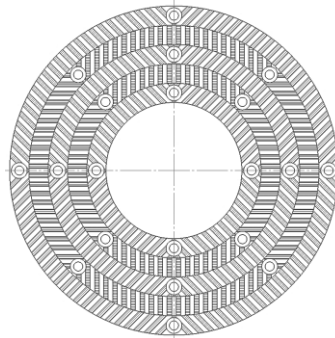
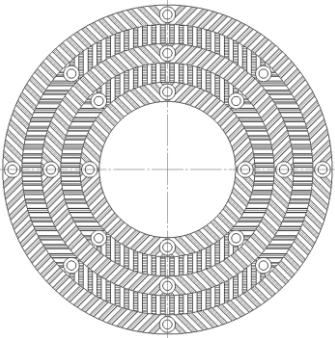
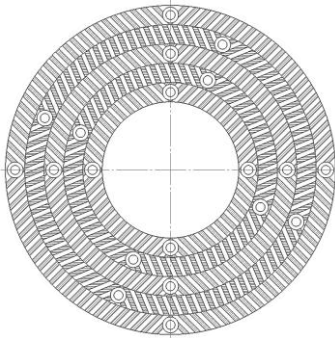
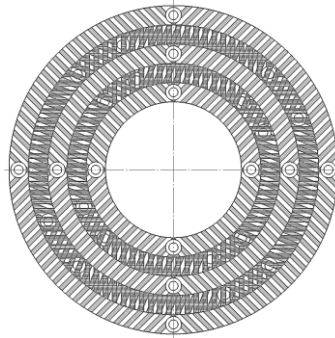
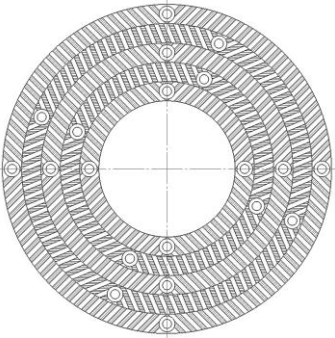
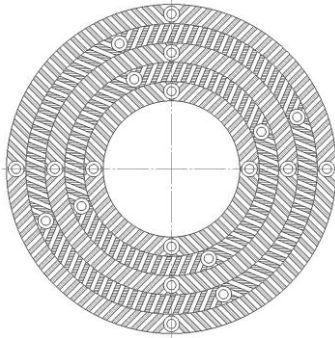
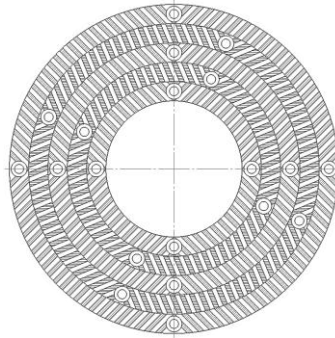
На основании поворота колец общее количество возможных рисунков гарнитуры составляет семь вариантов. Поворот колец осуществлялся по часовой стрелке на установленный угол  $0^\circ$ ,  $22,5^\circ$  и  $45^\circ$ , во всех случаях кроме варианта №6 (таблица 2.3), где кольца диска статора были повернуты против часовой стрелки.

Возможные варианты комбинирования рисунков гарнитуры представлены в таблице 2.3.

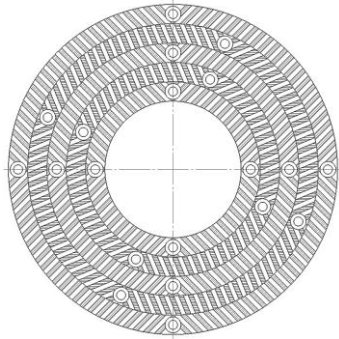
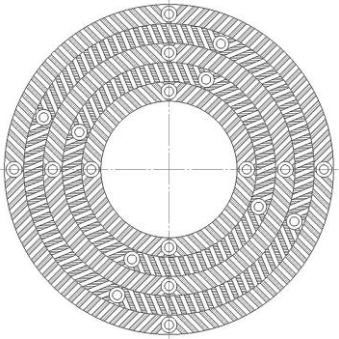
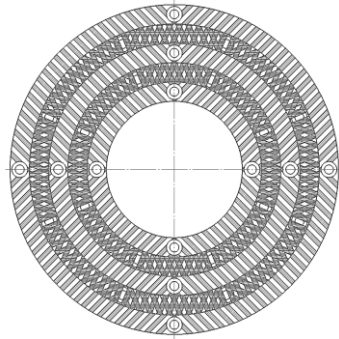
Таблица 2.3 – Вариации рисунков комбинированной гарнитуры

| Вариант установки колец (ротор / статор) | Ножевая поверхность диска ротора                                                    | Ножевая поверхность диска статора                                                    | Ножевые поверхности дисков ротора и статора при сопряжении                            |
|------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| № 1<br>$0^\circ/0^\circ$                 |  |  |  |
| № 2<br>$0^\circ/22,5^\circ$              |  |  |  |

Продолжение таблицы 2.3

| Вариант<br>установки<br>колец<br>(ротор /<br>статор) | Ножевая поверхность<br>диска ротора                                                 | Ножевая поверхность<br>диска статора                                                                             | Ножевые поверхности<br>дисков ротора и статора<br>при сопряжении                      |
|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| № 3<br>0°/45°                                        |    |                                |    |
| № 4<br>45°/45°                                       |   |                               |   |
| № 5<br>45°/22,5°                                     |  |                              |  |
| № 6<br>22,5°/22,5°                                   |  | <br>(против часовой стрелки) |  |

Продолжение таблицы 2.3

| Вариант<br>установки<br>колец<br>(ротор /<br>статор) | Ножевая поверхность<br>диска ротора                                               | Ножевая поверхность<br>диска статора                                               | Ножевые поверхности<br>дисков ротора и статора<br>при сопряжении                    |
|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| № 7<br><br>22,5°/22,5°                               |  |  |  |

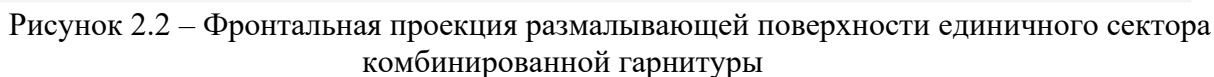
Существующая ранее технология конструирования гарнитур, обеспечивающая изменение рисунка ножевой размалывающей поверхности, требует в каждом конкретном случае изготовления новых рабочих дисков гарнитур с необходимыми рисунками.

В разработанной гарнитуре, представленной в данной диссертации (таблицы 2.1–2.3), технология изменения представленных рисунков обеспечивается без использования новых конструкций дисков.

## 2.2 Обоснование построения ножей и геометрии их распределения на рабочей поверхности комбинированной гарнитуры

Для решения поставленной задачи необходимо рассчитать величину шага между режущими кромками ножей, величину межножевых канавок и количество шагов, определить зависимости выходного угла  $\beta$  от входного угла  $\alpha$ , а также произвести расчёт входных углов наклона  $\alpha$  режущих кромок ножей единичного сектора к радиусу  $r$  (рисунок 2.2), что позволит определить показатели секундной режущей длины и поверхности размола.

Из семи рассмотренных вариантов конструкции гарнитуры для обоснования построения ножей используем комбинированную гарнитуру с вариантом поворота концентрических колец на  $0^\circ$  (таблица 2.3, вариант № 1).



– размалывающая поверхность диска разделена на четыре сектора (рисунок 2.1), рисунок ножевой поверхности ротора идентичен рисунку статора, а угол установки режущих кромок ножей к образующей сектора равен  $45^\circ$ , за счет чего в рабочем положении при сопряжении ножевых поверхностей дисков ротора и статора, их режущие кромки всегда наклонены к радиусу в одинаковом направлении;

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

Из  $n$ -го количества ножей, расположенных на единичном секторе, часть ножей пересекает входную окружную кромку на участке  $CF_1$ , при этом количество шагов  $t$ , уместяющихся на этом участке, будем считать не целым числом, в связи с симметричностью сектора, а оставшаяся часть ножей пересекает боковые образующие сектора на участках  $CD$  и  $F_1F_2$ .

Введем ряд параметров:

$s$  – ширина межножевой канавки, постоянная на всей длине ножа;

$p$  – ширина ножа, постоянная на всей длине ножа;

$i$  – порядковый номер ножа;

$t$  – шаг, или расстояние между режущими кромками соседних ножей;

$\varphi$  – центральный угол раствора единичного сектора;

$m$  – количество секторов на поверхности гарнитуры;

$z$  – число шагов, уместяющихся на внутренней хорде;

$Z$  – число шагов, уместяющихся на внешней хорде.

### **2.2.1 Расчет величины шага между режущими кромками ножей, величины межножевых канавок и количества шагов**

Найдем длину внутренней хорды  $CF_1$ . Поскольку угол раствора  $\varphi = 90^\circ$ , треугольник  $OCF_1$  является прямоугольным, а  $OC = OF_1 = r$ , тогда:

$$CF_1 = \sqrt{2 \cdot r^2} = \sqrt{2 \cdot 60^2} = 84,85 \text{ мм.}$$

Примем, что число шагов  $z$ , уместяющихся на внутренней хорде  $CF_1$ , равно  $z = 10,5$ , следовательно, величина шага равна:

$$t = \frac{OF_1}{z} = \frac{84,85}{10,5} = 8,08 \text{ мм.}$$

При заданной ширине ножа  $p$ , ширина межножевых канавок  $s$  равна:

$$s = t - p = 8,08 - 4 = 4,08 \text{ мм,}$$

что практически соответствует заданному.

Из треугольника  $ODF_2$  найдем длину внешней хорды  $DF_2$ . Треугольник  $ODF_2$  является прямоугольным, так как угол  $DOF_2$  равен углу раствора сектора  $\varphi = 90^\circ$ , а  $OD = OF_2 = R$ , следовательно:

$$DF_2 = \sqrt{2 \cdot R^2} = \sqrt{2 \cdot 145^2} = 205,06 \text{ мм.}$$

Таким образом, максимальное количество шагов  $Z$ , уместяющихся на внешней хорде  $DF_2$  равно:

$$Z = \frac{DF_2}{t} = \frac{205,06}{8,08} = 25.$$

Учитывая симметричное расположение ножей относительно центра сектора, примем фактическое количество ножей  $Z = 24$ .

### 2.2.2 Определение зависимости выходного угла $\beta$ от входного угла $\alpha$

Из рисунка 2.2 видно, что линия  $OE$  является общим катетом для треугольников  $AOE$  и  $BOE$ .

Из треугольника  $AOE$  следует:

$$\frac{OE}{r} = \sin \alpha,$$

отсюда:

$$OE = r \cdot \sin \alpha. \quad (2.1)$$

Из треугольника  $BOE$  следует:

$$\frac{OE}{R} = \sin \beta,$$

отсюда:

$$OE = R \cdot \sin \beta. \quad (2.2)$$

Сравнив зависимости 2.1 и 2.2 можно сделать вывод, что входной угол  $\alpha$  всегда больше выходного угла  $\beta$ , так как при постоянной величине катета  $OE$  внешний радиус  $R$  диска всегда больше внутреннего радиуса  $r$ .

Приравняв первые части выражений 2.1 и 2.2 получим:

$$r \cdot \sin \alpha = R \cdot \sin \beta. \quad (2.3)$$

Из выражения 2.3 получим:

$$\sin \beta = r \cdot \frac{\sin \alpha}{R}. \quad (2.4)$$

Следовательно:

$$\beta = \arcsin \left( r \cdot \frac{\sin \alpha}{R} \right). \quad (2.5)$$

Из зависимости 2.5 можно заключить, что углы  $\alpha$  и  $\beta$  взаимосвязаны.

### 2.2.3 Расчет входных углов наклона $\alpha$ режущих кромок ножей единичного сектора к радиусу $r$

#### Первая часть сектора (рисунок 2.2)

Расчет входных углов наклона  $\alpha$  режущих кромок ножей, пересекающих входную окружную кромку диска, производится следующим образом.

Из треугольника  $OA_{i_1}E_{i_1}$  находим синус угла наклона  $\alpha_{i_1}$  режущей кромки  $i$ -го ножа к радиусу  $r$  диска:

$$\sin \alpha_{i_1} = \frac{t}{r}. \quad (2.6)$$

Стоит отметить, что для 1-го ножа первой части сектора расчет будет скорректирован, так как с учетом симметричности расположения ножей ось  $O_y$  расположена посередине канавки и, следовательно, не соответствует началу отсчета шага.

Так как  $t = s + p$ , а ширина ножа и канавки в нашем случае равны ( $s = p$ ), то  $t = 2p$ , следовательно:  $p = \frac{t}{2}$ .

Учитывая, что ось  $O_y$  делит канавку пополам, первый шаг первой части сектора равен:

$$t_{1_1} = \frac{s}{2} + p = \frac{p}{2} + p = \frac{3 \cdot p}{2} = \frac{3 \cdot t}{4} = 0,75 \cdot t.$$

Таким образом, расчет 1-го ножа первой части сектора будет производиться следующим образом:

$$\sin \alpha_{1_1} = \frac{0,75 \cdot t}{r}. \quad (2.7)$$

Следовательно, расчет для ножей первой части сектора будет производиться следующим образом:

$$\sin \alpha_{i_1} = \frac{i \cdot t - 0,25 \cdot t}{r}. \quad (2.8)$$

Из соотношения 2.8 следует, что входной угол наклона  $\alpha$  режущих кромок ножей имеет тенденцию роста с увеличением количества шагов.

Для определения тригонометрической функции входного угла наклона  $\alpha$  режущих кромок первой части сектора диска, не пересекающих входную

окружную кромку, воспользуемся выражением 2.8, при этом угол  $\alpha$  в этом случае одинаков для всех ножей и равен  $\frac{\varphi}{2} = 45^\circ$ , тогда:

$$\sin \frac{\varphi'}{2_{i1}} = \frac{i \cdot t - 0,25 \cdot t}{r}. \quad (2.9)$$

### Вторая часть сектора (рисунок 2.2)

Для второй части сектора расчет входных углов наклона  $\alpha$  режущих кромок ножей, пересекающих входную окружную кромку диска, производится аналогично первой части сектора с соответствующей корректировкой для 1-го ножа:

$$t_{12} = t - t_{11} = t - 0,75 \cdot t = 0,25 \cdot t.$$

Следовательно, угол  $\alpha_{12}$  для 1-го ножа второй части сектора будет рассчитываться следующим образом:

$$\sin \alpha_{12} = \frac{0,25 \cdot t}{r}. \quad (2.10)$$

Расчет для ножей, пересекающих входную окружную кромку диска, будет производиться следующим образом:

$$\sin \alpha_{i2} = \frac{i \cdot t - 0,75 \cdot t}{r}. \quad (2.11)$$

Расчет установочного угла ножей второй части сектора, не пересекающих входную окружную кромку, будет производиться аналогично расчету для первой части сектора, с учетом соответствующих корректировок:

$$\sin \frac{\varphi'}{2_{i2}} = \frac{i \cdot t - 0,75 \cdot t}{r}. \quad (2.12)$$

Таким образом, получено обоснование построения ножей, их количество и распределение по рабочей поверхности.

## **2.3 Определение секундной режущей длины**

С учетом использования новой конструкции гарнитуры необходимо определить ее секундную режущую длину, площадь контакта ножей и секундную размалывающую способность.

Для расчета секундной режущей длины необходимо определить суммарную длину режущих кромок ножей первой и второй частей единичного сектора используя методику, описанную в пункте 2.2.3.

Первая часть сектора (рисунок 2.2)

Длина режущей кромки  $A_{i_1}B_{i_1}$  ножей, пересекающих входную окружную кромку, равна разности ординат точек  $B_i$  и  $A_i$ , соответственно:

$$A_{i_1}B_{i_1} = B_{i_1}E_{i_1} - A_{i_1}E_{i_1}. \quad (2.13)$$

Из прямоугольного треугольника  $OA_{i_1}E_{i_1}$  найдем ординату точки  $A_{i_1}$  из тригонометрической функции:

$$\cos \alpha_{i_1} = \frac{A_{i_1}E_{i_1}}{r}. \quad (2.14)$$

Следовательно:

$$A_{i_1}E_{i_1} = r \cdot \cos \alpha_{i_1}. \quad (2.15)$$

Из прямоугольного треугольника  $OB_{i_1}E_{i_1}$  найдем ординату точки  $B_{i_1}$  из тригонометрической функции:

$$\cos \beta_{i_1} = \frac{B_{i_1}E_{i_1}}{R}. \quad (2.16)$$

Следовательно:

$$B_{i_1}E_{i_1} = R \cdot \cos \beta_{i_1}. \quad (2.17)$$

Подставив в выражение 2.13 правые части выражений 2.15 и 2.17, получим:

$$A_{i_1}B_{i_1} = R \cdot \cos \beta_{i_1} - r \cdot \cos \alpha_{i_1}. \quad (2.18)$$

Представим выражение 2.18 в виде:

$$A_{i_1}B_{i_1} = R \cdot \sqrt{1 - \sin^2 \beta_{i_1}} - r \cdot \cos \alpha_{i_1}. \quad (2.19)$$

В соответствии с зависимостью 2.4:

$$A_{i_1}B_{i_1} = R \cdot \sqrt{1 - \frac{r^2}{R^2} \cdot \sin^2 \alpha_{i_1}} - r \cdot \cos \alpha_{i_1}. \quad (2.20)$$

В соответствии с зависимостью 2.8:

$$A_{i_1}B_{i_1} = R \cdot \sqrt{1 - \frac{r^2}{R^2} \cdot \frac{(i \cdot t - 0,25 \cdot t)^2}{r^2}} - r \cdot \cos \alpha_{i_1}. \quad (2.21)$$

После преобразований выражение 2.21 примет вид:

$$A_{i_1}B_{i_1} = \sqrt{R^2 - t^2 \cdot (i - 0,25)^2} - r \cdot \cos \alpha_{i_1}. \quad (2.22)$$

В соответствии с зависимостью 2.8:

$$A_{i_1}B_{i_1} = \sqrt{R^2 - t^2 \cdot (i - 0,25)^2} - r \cdot \cos \left( \arcsin \frac{i \cdot t - 0,25 \cdot t}{r} \right). \quad (2.23)$$

Длина режущей кромки  $A'_{i_1}B'_{i_1}$  ножей, не пересекающих входную окружную кромку диска, по аналогии, также равна разности ординат точек  $B'_{i_1}$  и  $A'_{i_1}$ .

Из прямоугольного треугольника  $OA'_{i_1}E_{i_1}$  найдем ординату точки  $A'_{i_1}$  из соотношения:

$$\frac{OE_{i_1}}{A'_{i_1}E_{i_1}} = \operatorname{tg} \frac{\varphi'}{2_{i_1}}. \quad (2.24)$$

Из выражения 2.24:

$$A'_{i_1}E_{i_1} = \frac{OE_{i_1}}{\operatorname{tg} \frac{\varphi'}{2_{i_1}}}. \quad (2.25)$$

Поскольку  $OE_{i_1} = i \cdot t - 0,25 \cdot t$ , то:

$$A'_{i_1}E_{i_1} = \frac{i \cdot t - 0,25 \cdot t}{\operatorname{tg} \frac{\varphi'}{2_{i_1}}}. \quad (2.26)$$

Заменяя в правой части зависимости 2.23 второй член получаем:

$$A'_{i_1}B'_{i_1} = \sqrt{R^2 - t^2 \cdot (i - 0,25)^2} - \frac{i \cdot t - 0,25 \cdot t}{\operatorname{tg} \frac{\varphi'}{2_{i_1}}}. \quad (2.27)$$

### Вторая часть сектора (рисунок 2.2)

Длина режущей кромки  $A_{i_2}B_{i_2}$  ножей, пересекающих входную окружную кромку диска, рассчитывается аналогично расчету в первой части сектора до выражения 2.20.

Преобразуем, выражение 2.20 для второй части сектора, в соответствии с зависимостью 2.11:

$$A_{i_2}B_{i_2} = R \cdot \sqrt{1 - \frac{r^2}{R^2} \cdot \frac{(i \cdot t - 0,75 \cdot t)^2}{r^2}} - r \cdot \cos \alpha_{i_2}. \quad (2.28)$$

После преобразований выражение 2.28 примет вид:

$$A_{i_2}B_{i_2} = \sqrt{R^2 - t^2 \cdot (i - 0,75)^2} - r \cdot \cos \alpha_{i_2}. \quad (2.29)$$

В соответствии с зависимостью 2.11:

$$A_{i_2}B_{i_2} = \sqrt{R^2 - t^2 \cdot (i - 0,75)^2} - r \cdot \cos \left( \arcsin \frac{i \cdot t - 0,75 \cdot t}{r} \right). \quad (2.30)$$

Длина режущей кромки  $A'_{i_2}B'_{i_2}$  ножей, не пересекающих входную окружную кромку диска, рассчитывается аналогично расчету в первой части сектора.

Из прямоугольного треугольника  $OA'_{i_2}E_{i_2}$  найдем ординату точки  $A'_{i_2}$  из соотношения:

$$\frac{OE_{i_2}}{A'_{i_2}E_{i_2}} = \operatorname{tg} \frac{\varphi'}{2_{i_2}}. \quad (2.31)$$

Из выражения 2.31:

$$A'_{i_2}E_{i_2} = \frac{OE_{i_2}}{\operatorname{tg} \frac{\varphi'}{2_{i_2}}}. \quad (2.32)$$

Поскольку  $OE_{i_2} = i \cdot t - 0,75 \cdot t$ , то:

$$A'_{i_2}E_{i_2} = \frac{i \cdot t - 0,75 \cdot t}{\operatorname{tg} \frac{\varphi'}{2_{i_2}}}. \quad (2.33)$$

Заменив в правой части зависимости 2.30 второй член, получаем:

$$A'_{i_2}B'_{i_2} = \sqrt{R^2 - t^2 \cdot (i - 0,75)^2} - \frac{i \cdot t - 0,75 \cdot t}{\operatorname{tg} \frac{\varphi'}{2_{i_2}}}. \quad (2.34)$$

Суммарная длина режущих кромок ножей единичного сектора определяется как сумма длин режущих кромок ножей, пересекающих и не пересекающих входную окружную кромку, на первой и второй частях сектора:

$$\sum A_iB_i = \sum A_{i_1}B_{i_1} + \sum A'_{i_1}B'_{i_1} + \sum A_{i_2}B_{i_2} + \sum A'_{i_2}B'_{i_2}. \quad (2.35)$$

Заменив  $A_iB_i$  на  $l_i$ , а  $A_{i_1}B_{i_1}$ ,  $A'_{i_1}B'_{i_1}$ ,  $A_{i_2}B_{i_2}$  и  $A'_{i_2}B'_{i_2}$ , соответственно, на  $l_{i_1}$ ,  $l'_{i_1}$ ,  $l_{i_2}$  и  $l'_{i_2}$ , получим:

$$\sum l_i = \sum l_{i_1} + \sum l'_{i_1} + \sum l_{i_2} + \sum l'_{i_2}. \quad (2.36)$$

Тогда в соответствии с зависимостями 2.23, 2.27, 2.30 и 2.34:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n l_i = & \sum \left[ \sqrt{R^2 - t^2 \cdot (i - 0,25)^2} - r \cdot \cos \left( \arcsin \frac{i \cdot t - 0,25 \cdot t}{r} \right) \right] + \\ & + \sum \left[ \sqrt{R^2 - t^2 \cdot (i - 0,25)^2} - \frac{i \cdot t - 0,25 \cdot t}{\operatorname{tg} \frac{\varphi'}{2}_{i_1}} \right] + \\ & + \sum \left[ \sqrt{R^2 - t^2 \cdot (i - 0,75)^2} - r \cdot \cos \left( \arcsin \frac{i \cdot t - 0,75 \cdot t}{r} \right) \right] + \\ & + \sum \left[ \sqrt{R^2 - t^2 \cdot (i - 0,75)^2} - \frac{i \cdot t - 0,75 \cdot t}{\operatorname{tg} \frac{\varphi'}{2}_{i_2}} \right]. \end{aligned} \quad (2.37)$$

Суммарная длина режущих кромок ножей для всей гарнитуры:

$$\begin{aligned} \sum_m = & \left\{ \sum \left[ \sqrt{R^2 - t^2 \cdot (i - 0,25)^2} - r \cdot \cos \left( \arcsin \frac{i \cdot t - 0,25 \cdot t}{r} \right) \right] + \right. \\ & + \sum \left[ \sqrt{R^2 - t^2 \cdot (i - 0,25)^2} - \frac{i \cdot t - 0,25 \cdot t}{\operatorname{tg} \frac{\varphi'}{2}_{i_1}} \right] + \\ & + \sum \left[ \sqrt{R^2 - t^2 \cdot (i - 0,75)^2} - r \cdot \cos \left( \arcsin \frac{i \cdot t - 0,75 \cdot t}{r} \right) \right] + \\ & \left. + \sum \left[ \sqrt{R^2 - t^2 \cdot (i - 0,75)^2} - \frac{i \cdot t - 0,75 \cdot t}{\operatorname{tg} \frac{\varphi'}{2}_{i_2}} \right] \right\} \cdot m. \end{aligned} \quad (2.38)$$

Расчёт значений длин режущих кромок ножей производим согласно зависимостям 2.23, 2.27, 2.30 и 2.34.

Суммарная длина режущих кромок ножей единичного сектора комбинированной гарнитуры, в соответствии с зависимостью 2.37, равна:

$$\sum_{i=1}^n l_i = 1,687 \text{ м.}$$

Суммарная длина режущих кромок ножей для всей комбинированной гарнитуры, в соответствии с зависимостью 2.38, равна:

$$\sum l_i \cdot m = 6,749 \text{ м.}$$

Следующим шагом необходимо определить суммарную длину контакта режущих кромок ножей вращающегося ротора с режущими кромками ножей неподвижного статора.

Для режущих кромок ножей, **пересекающих** входную окружную кромку, расчет длины контакта будет производиться следующим образом:

$$L_{\text{BH}} = n_{\text{BH}} \cdot \sum_{i=1}^n l_i, \quad (2.39)$$

где  $n_{\text{BH}}$  – количество ножей, пересекающих входную окружную кромку, шт.;

$l_i$  – длина режущей кромки  $i$ -го ножа, м.

Для режущих кромок ножей, **не пересекающих** входную окружную кромку, расположенных на *первой части сектора*, расчет длины контакта будет производиться следующим образом:

$$L_1 = l_{k1} * (n_{\text{BH1}} + k) * 2 - (l_{k2} - l_{k1}) * (n_{\text{BH1}} + k) * 2 + \sum_{k=k+1}^{n_1 - n_{\text{BH1}}} l_{k1} + \sum_{k=k+1}^{n_2 - n_{\text{BH2}}} l_{k2}. \quad (2.40)$$

Для режущих кромок ножей, **не пересекающих** входную окружную кромку, расположенных на *второй части сектора*, расчет длины контакта будет производиться следующим образом:

$$L_2 = l_{k2} * ((n_{\text{BH2}} + k) * 2) - 1 - (l_{k2} - l_{k1}) * ((n_{\text{BH2}} + k) * 2) - 1 + \sum_{k=k}^{n_1 - n_{\text{BH1}}} l_{k1} + \sum_{k=k+1}^{n_2 - n_{\text{BH2}}} l_{k2}, \quad (2.41)$$

где  $l_{k1}$  – длина режущей кромки  $k$ -го ножа первой части сектора, м;

$l_{k2}$  – длина режущей кромки  $k$ -го ножа второй части сектора, м;

$n_{\text{BH1}}$  – количество ножей, пересекающих входную окружную кромку, на первой части сектора, шт.;

$n_{\text{BH2}}$  – количество ножей, пересекающих входную окружную кромку, на второй части сектора, шт.;

$n$  – общее количество ножей расположенных на единичном секторе, шт.;

$k$  – порядковый номер ножа, отсчитываемый непосредственно после  $n_{\text{BH}}$ .

Длина контакта режущих кромок ножей для единичного сектора комбинированной гарнитуры равна:

$$\sum_{i=1}^n L_i = \sum L_{\text{BH}} + \sum L_1 + \sum L_2. \quad (2.42)$$

Суммарная длина контакта режущих кромок ножей для всех секторов ротора и статора комбинированной гарнитуры:

$$\sum L = \sum_{i=1}^n L_i \cdot m_p \cdot m_c, \quad (2.43)$$

где  $m_p$  – количество секторов диска ротора, шт.;

$m_c$  – количество секторов диска статора, шт.

Расчёт значений длин контакта режущих кромок ножей производим согласно зависимостям 2.39, 2.40 и 2.41.

Суммарная длина контакта режущих кромок ножей для единичного сектора, в соответствии с зависимостью 2.42, равна:

$$\sum_{i=1}^n L_i = 31,803 \text{ м.}$$

Суммарная длина контакта режущих кромок ножей ротора и статора, в соответствии с зависимостью 2.43, равна:

$$\sum L = 508,847 \text{ м.}$$

Расчет секундной режущей длины рассчитывается следующим образом:

$$L_c = \sum L \cdot \frac{n_p}{60}, \quad (2.44)$$

где  $n_p$  – частота вращения диска ротора, об/мин.

Секундная режущая длина, в соответствии с зависимостью 2.44, равна:

$$L_c = 16\,961,6 \text{ м/с.}$$

Суммарная площадь контакта ножей диска ротора с ножами диска статора определяется следующим образом:

$$\sum F = \sum L \cdot p, \quad (2.45)$$

где  $p$  – ширина ножа, м.

Суммарная площадь контакта, в соответствии с зависимостью 2.45, равна:

$$\sum F = 508,847 \cdot 0,004 = 2,035 \text{ м}^2.$$

Секундная площадь контакта (секундная размалывающая способность) определяется следующим образом:

$$F_c = \sum F \cdot \frac{n_p}{60}. \quad (2.46)$$

Секундная площадь контакта, в соответствии с зависимостью 2.46, равна:

$$F_c = 2,035 \cdot \frac{2000}{60} = 67,85 \text{ м}^2/\text{с}.$$

Таким образом, при определении основных технологических параметров гарнитуры были выведены формулы расчета длины ножей и длины контакта режущих кромок ножей для комбинированной гарнитуры при размоле волокнистых полуфабрикатов.

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

Произвести расчет изменения углов сопряжения ножей ротора с ножами статора в сотые доли секунды затруднительно, однако получить качественные и количественные зависимости изменения секундной режущей длины и размалывающей поверхности можно с использованием современных компьютерных технологий, в частности, с использованием системы проектирования КОМПАС–3D и пакета прикладных программ *Matlab*.

Определение площади контакта ножей с использованием системы проектирования КОМПАС–3D v22

Наглядное изменение площади контакта ножей для всех вариантов рисунков комбинированной гарнитуры в динамике представлено в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Изменение площади контакта ножей от поворота концентрических колец

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

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

Зависимости изменения площади контакта ножей от угла поворота диска ротора относительно диска статора для выбранных вариантов рисунков комбинированной гарнитуры представлены на рисунке 2.3.

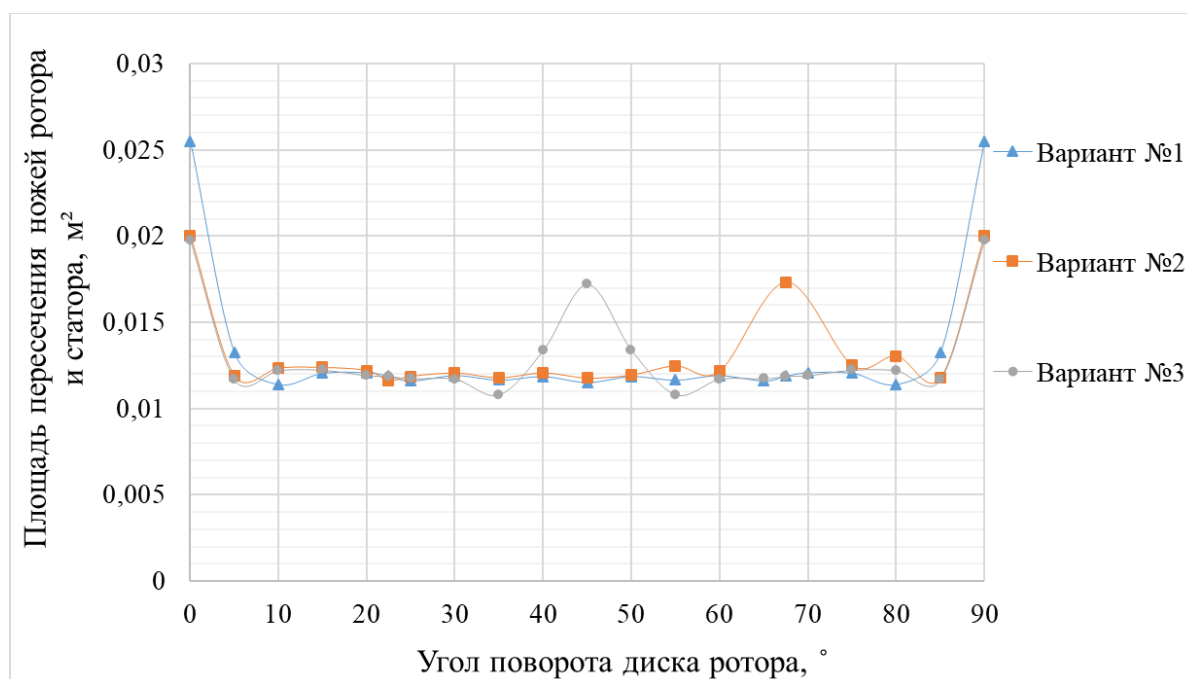


Рисунок 2.3 – Зависимость изменения площади контакта ножей от угла поворота диска ротора относительно диска статора

Как видно из рисунка, для варианта установки колец № 1 (таблица 2.4) площадь контакта ножей максимальна при углах поворота диска ротора  $0^\circ$  и  $90^\circ$ , что соответствует полному перекрытию ножей статора ножами ротора, и составляет  $0,0255 \text{ м}^2$ , при дальнейшем повороте диска ротора от  $10^\circ$  до  $80^\circ$  наблюдаются минимальные значения показателя площади контакта в пределах  $0,0114 \text{ м}^2$ .

Для вариантов установки колец № 2 и № 3 (таблица 2.4) максимальные значения площади контакта составляют  $0,02 \text{ м}^2$  и  $0,0198 \text{ м}^2$  соответственно, и достигаются при углах поворота диска ротора  $0^\circ$  и  $90^\circ$ . При дальнейшем повороте диска ротора от  $5^\circ$  до  $85^\circ$  значения данного показателя для обоих вариантов гарнитур снижаются до  $0,012 \text{ м}^2$ , при этом наблюдается повышение показателя до  $0,017 \text{ м}^2$  при повороте диска ротора на  $67,5^\circ$  и  $45^\circ$  соответственно, что соответствует моменту полного перекрытия ножей на кольцах 2 и 4.

Определение показателей секундной режущей длины и числа точек пересечения режущих кромок ножей с использованием пакета прикладных программ Matlab

Секундная режущая длина и число точек пересечения режущих кромок ножей являются важными показателями и позволяют произвести оценку эффективности процесса размола через показатель циклической элементарной длины. В работах авторов [36, 37] установлено, что увеличение числа точек пересечения режущих кромок ножей ведет к снижению значений циклической элементарной длины, что может снизить качество процесса размола и его эффективность.

Для анализа изменения секундной режущей длины комбинированной гарнитуры и числа точек пересечения режущих кромок ножей для выбранных вариантов рисунков гарнитур необходимо воспользоваться разработанной авторами [58] программой при использовании пакета прикладных программ Matlab.

Полученные графические зависимости секундной режущей длины от углов поворота диска ротора относительно диска статора демонстрируют

взаимодействие режущих кромок ножей ротора и статора по всей области гарнитуры при повороте на один полный сектор. Значение пиков на графике отражает момент встречи кромок ножей ротора и статора, при котором «отрезается» определенная максимальная длина. В моменте, когда режущая кромка ножа ротора сошла с ножа статора, но еще не нашла на кромку следующего ножа наблюдается спад, отражающий значения минимальной «отрезаемой» длины в данный момент.

Для варианта установки колец № 1 (таблица 2.4) был построен график зависимостей секундной режущей длины ( $L_c$ , м/с) от угла поворота диска ротора относительно диска статора, представленный на рисунке 2.4.

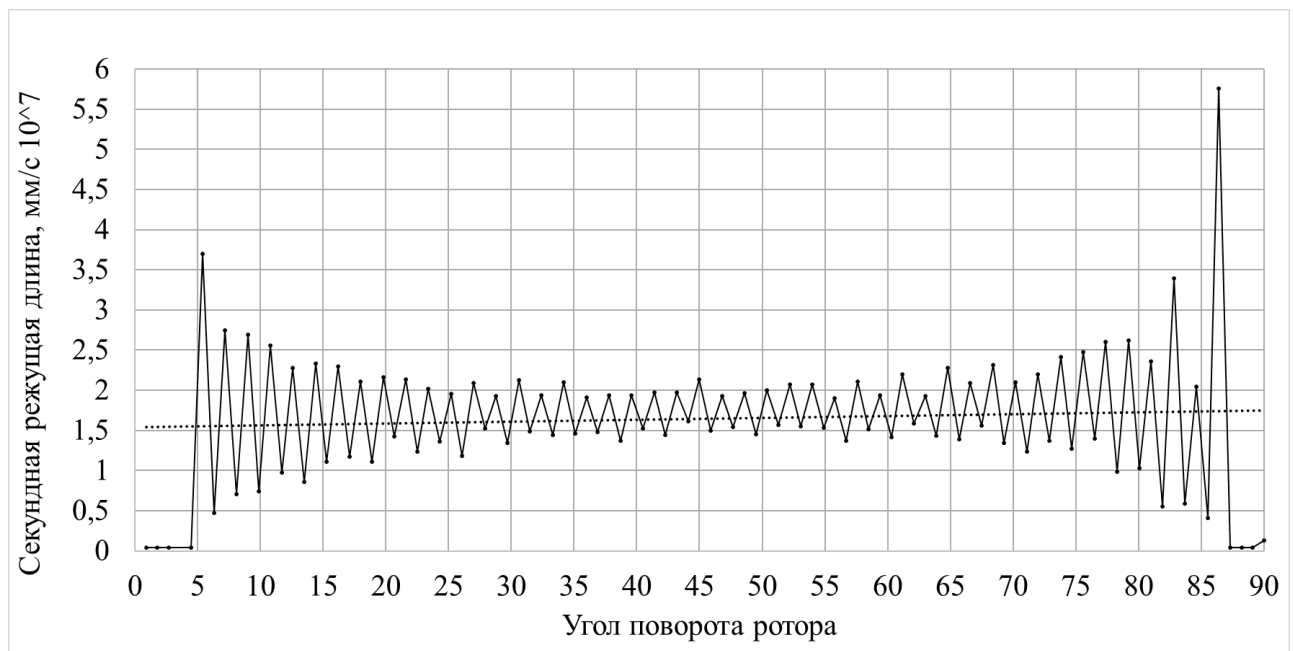


Рисунок 2.4 – Зависимость секундной режущей длины от углов поворота ротора относительно статора вариант установки колец № 1

Из графика зависимости изменения секундной режущей длины видно, что количественные значения данного показателя при повороте диска ротора от 0° до 4,5° имеют минимальные значения, что соответствует моменту контакта режущей кромки ножа ротора с межножевой канавкой статора, после чего режущие кромки ножей ротора находят на кромки ножей статора при повороте диска ротора до 5°, с ростом показателя до 37022 м/с.

При повороте диска ротора до  $30^\circ$  количественные значения секундной режущей длины снижаются до  $16182 \text{ м/с}$ , с сохранением данного значения при повороте диска ротора до  $60^\circ$ , при дальнейшем повороте диска ротора до  $87^\circ$  наблюдается повышение данного показателя, с максимальным значением секундной режущей длины, равным  $57578 \text{ м/с}$  в этой точке. По аналогии с поворотом от  $0^\circ$  до  $4,5^\circ$  при повороте диска ротора от  $87^\circ$  до  $90^\circ$ , наблюдаются минимальные значения секундной режущей длины.

Зависимость изменения секундной режущей длины от угла поворота диска ротора относительно диска статора для варианта установки колец № 2 (таблица 2.4) представлена на рисунке 2.5.

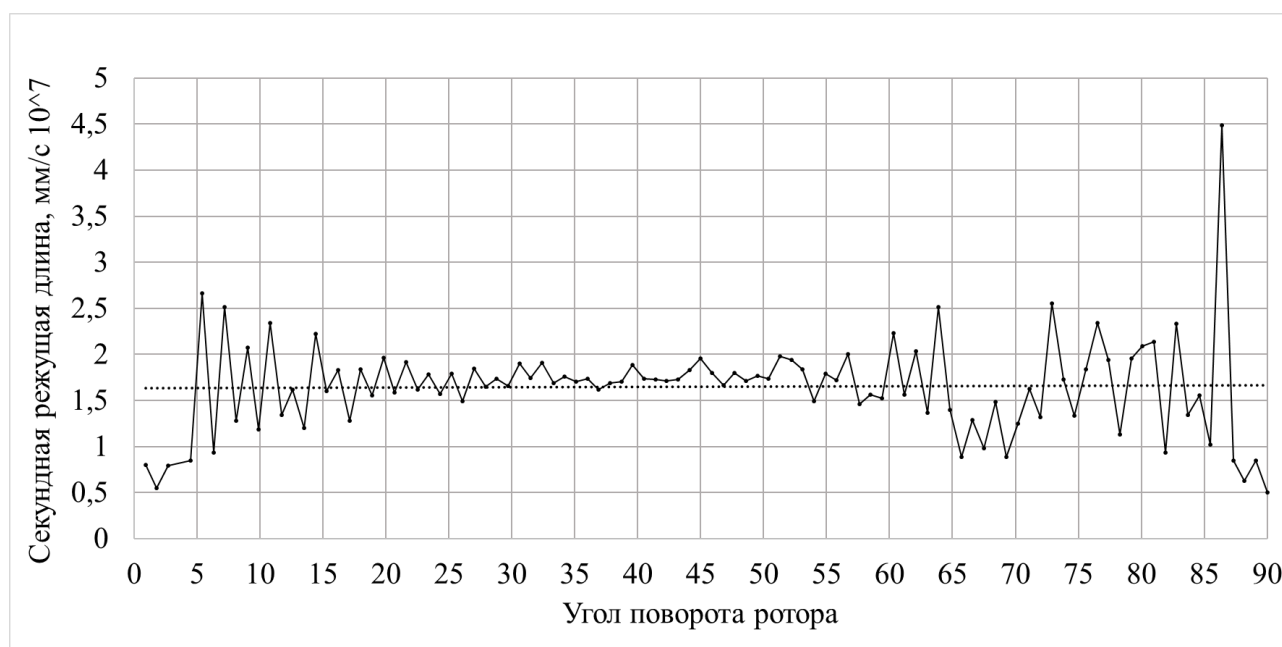


Рисунок 2.5 – Зависимость секундной режущей длины от углов поворота ротора относительно статора вариант установки колец № 2

Как видно из графика зависимости, количественные значения секундной режущей длины при повороте диска ротора от  $0^\circ$  до  $4,5^\circ$  и от  $87^\circ$  до  $90^\circ$  имеют минимальные значения, что соответствует моменту контакта режущей кромки ножа ротора с межножевой канавкой статора на кольцах 1, 3 и 5. При повороте диска ротора на  $5^\circ$  и  $87^\circ$  ножи ротора находят на ножи статора, при этом показатель секундной режущей длины увеличивается до  $26600 \text{ м/с}$  и  $44865 \text{ м/с}$ , соответственно. Количественные значения секундной режущей длины снижаются

до 16647 м/с, при повороте диска ротора от  $5^\circ$  до  $20^\circ$ , с сохранением данного значения при повороте до  $60^\circ$ .

Уменьшение количественных значений показателя наблюдается при повороте от  $65^\circ$  до  $70^\circ$  и соответствует моменту контакта режущей кромки ножа ротора с межножевой канавкой статора на кольцах 2 и 4. Увеличение количественных значений до 25132 м/с, при повороте до  $64^\circ$  и  $73^\circ$ , соответствует моменту встречи ножей ротора с ножами статора на кольцах 2 и 4.

Зависимость изменения секундной режущей длины от угла поворота диска ротора относительно диска статора для варианта установки колец № 3 (таблица 2.4) представлена на рисунке 2.6.

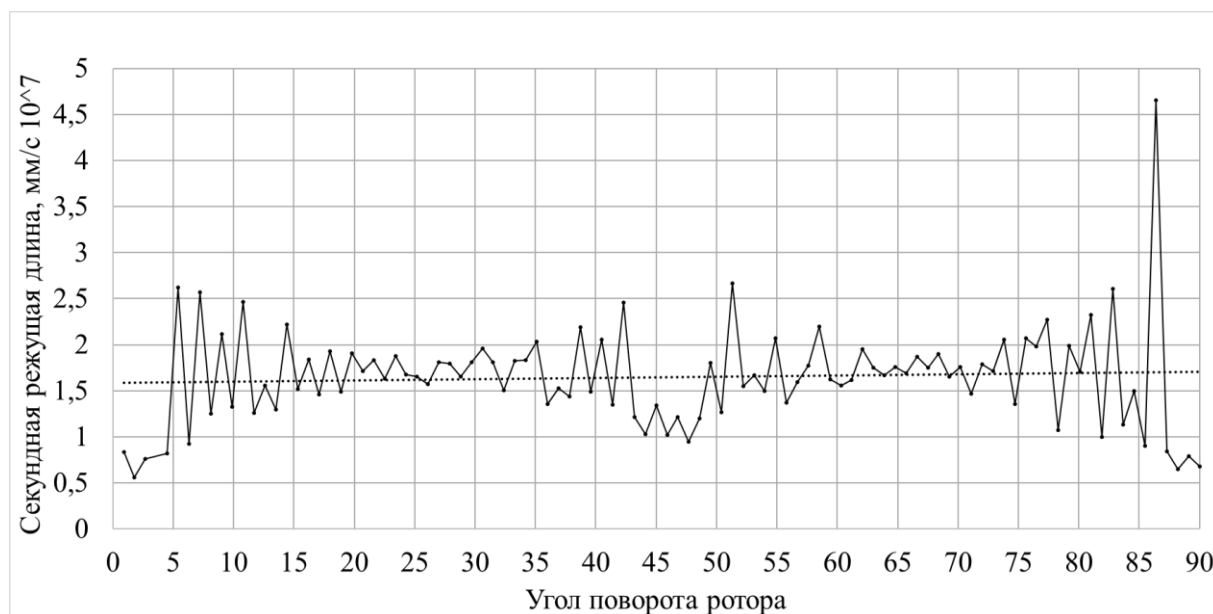


Рисунок 2.6 – Зависимость секундной режущей длины от углов поворота ротора относительно статора вариант установки колец № 3

Из графика зависимости изменения секундной режущей длины видно, что аналогично варианту установки колец № 2 количественные значения секундной режущей длины при повороте диска ротора от  $0^\circ$  до  $4,5^\circ$  и от  $87^\circ$  до  $90^\circ$  имеют минимальные значения, что соответствует моменту контакта режущей кромки ножа ротора с межножевой канавкой статора на кольцах 1, 3 и 5. При повороте диска ротора на  $5^\circ$  и  $87^\circ$  ножи ротора находят на ножи статора, при этом показатель секундной режущей длины увеличивается до 26209 м/с и 46523 м/с соответственно.

Количественные значения секундной режущей длины снижаются до 16302 м/с, при повороте диска ротора от  $5^\circ$  до  $20^\circ$ , с сохранением данного значения при повороте до  $35^\circ$ .

Уменьшение количественных значений показателя наблюдается при повороте от  $43^\circ$  до  $48^\circ$  и соответствует моменту контакта режущей кромки ножа ротора с межножевой канавкой статора на кольцах 2 и 4. Увеличение количественных значений при повороте до  $64^\circ$  и  $73^\circ$  до 24621 м/с и 26662 м/с соответственно, происходит в моменты встречи ножей ротора с ножами статора на кольцах 2 и 4.

Зависимость изменения числа точек пересечения ( $t$ , шт.) режущих кромок ножей от угла поворота диска ротора относительно диска статора для варианта установки колец № 1 (таблица 2.4) представлена на рисунке 2.7. Из зависимости видно, что количество точек пересечения растет при повороте до  $45^\circ$  и снижается при дальнейшем повороте до  $90^\circ$ .

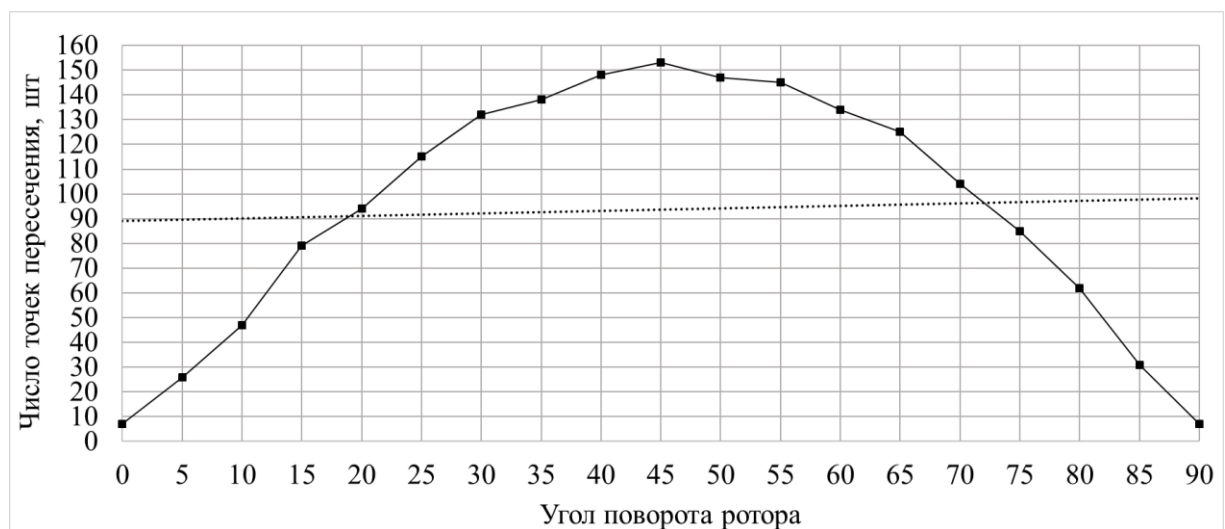


Рисунок 2.7 – Зависимость числа точек пересечения ножей от угла поворота ротора относительно статора вариант установки колец № 1

Зависимость изменения числа точек пересечения режущих кромок ножей от угла поворота диска ротора относительно диска статора для варианта установки колец № 2 (таблица 2.4) представлена на рисунке 2.8.

Как видно из графика зависимости, число точек пересечения ножей увеличивается при повороте диска ротора до  $40^\circ$ , при дальнейшем повороте до  $90^\circ$  данный показатель снижается.

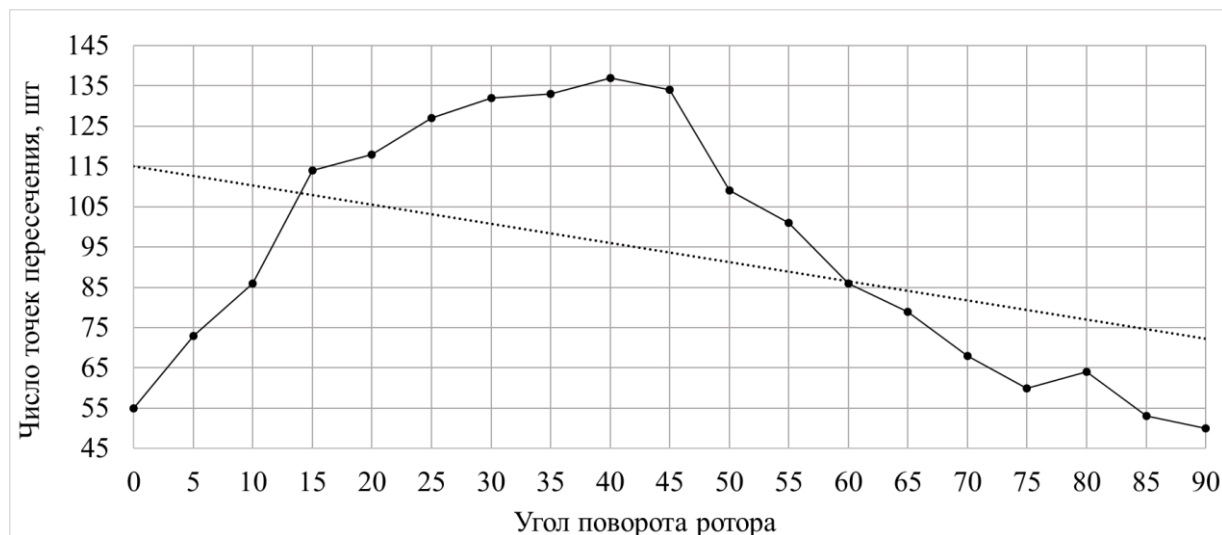


Рисунок 2.8 – Зависимость числа точек пересечения ножей от углов поворота ротора относительно статора вариант установки колец № 2

Зависимость изменения числа точек пересечения режущих кромок ножей от угла поворота диска ротора относительно диска статора для варианта установки колец № 3 (таблица 2.4) представлена на рисунке 2.9.

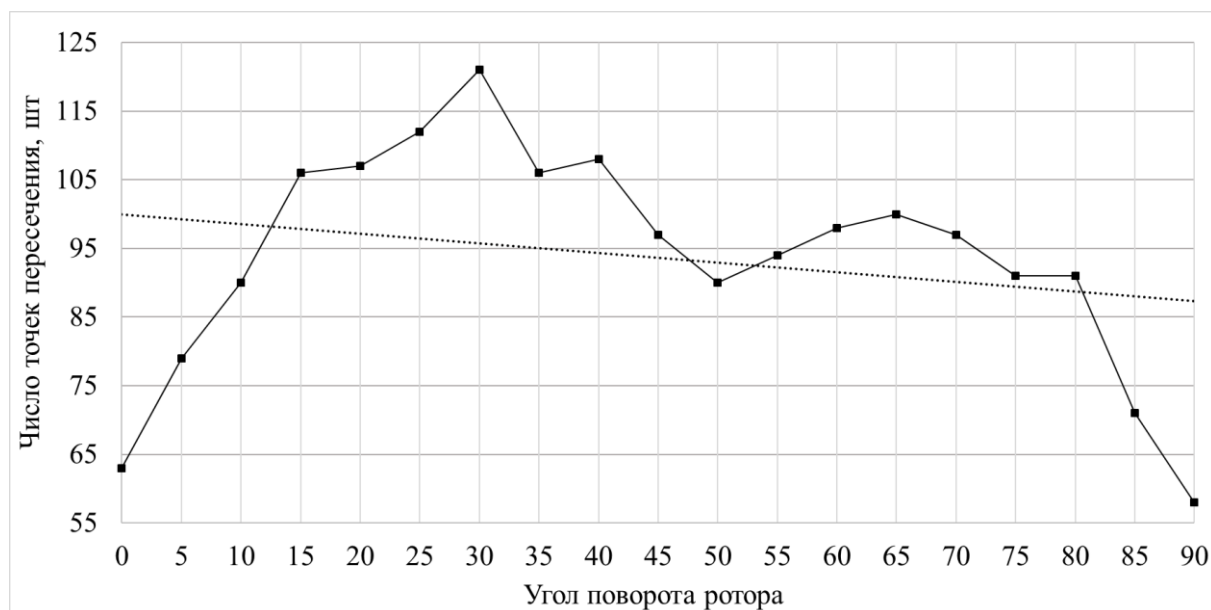


Рисунок 2.9 – Зависимость числа точек пересечения ножей от углов поворота ротора относительно статора вариант установки колец № 3

Как видно из графика зависимости, число точек пересечения ножей увеличивается при повороте диска ротора от  $0^\circ$  до  $30^\circ$ , от  $35^\circ$  до  $40^\circ$  и от  $50^\circ$  до  $65^\circ$ , на остальных участках данный показатель снижается.

## 2.4 Определение циклической элементарной длины

Более точную оценку эффективности размалывающей гарнитуры позволит дать разработанный авторами Ю. Д. Алашкевичем и А. А. Набиевой [20, 37] параметр циклической элементарной длины, характеризующий среднюю длину волокна, «отрезаемую» парой ножей за один оборот диска ротора, и позволяющий, с учетом таких технологических параметров, как секундная режущая длина и число точек пересечения, дать оценку эффективности процесса размола при использовании различных конструкций рисунков гарнитур.

Расчёт циклической элементарной длины производили следующим образом:

$$L_{\omega.эл} = \frac{L_S \cdot 60}{n \cdot t \cdot (2\pi/\psi)}, \quad (2.47)$$

где  $L_S$  – секундная режущая длина, м/с;

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

$t$  – число точек пересечения, шт.;

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

В соответствии с зависимостью 2.47 для рассмотренных рисунков гарнитур были построены графические зависимости «циклической элементарной длины» от углов поворота ротора относительно статора, изображенные на рисунке 2.10.

Учитывая рекомендации, данные в работе [37], для полупромышленных дисковых мельниц при значении параметра циклической элементарной длины в пределах одного метра характер процесса размола направлен в сторону рубки волокна, при значении от 1,7 до 3 метров характер процесса размола носит фибриллирующий эффект.

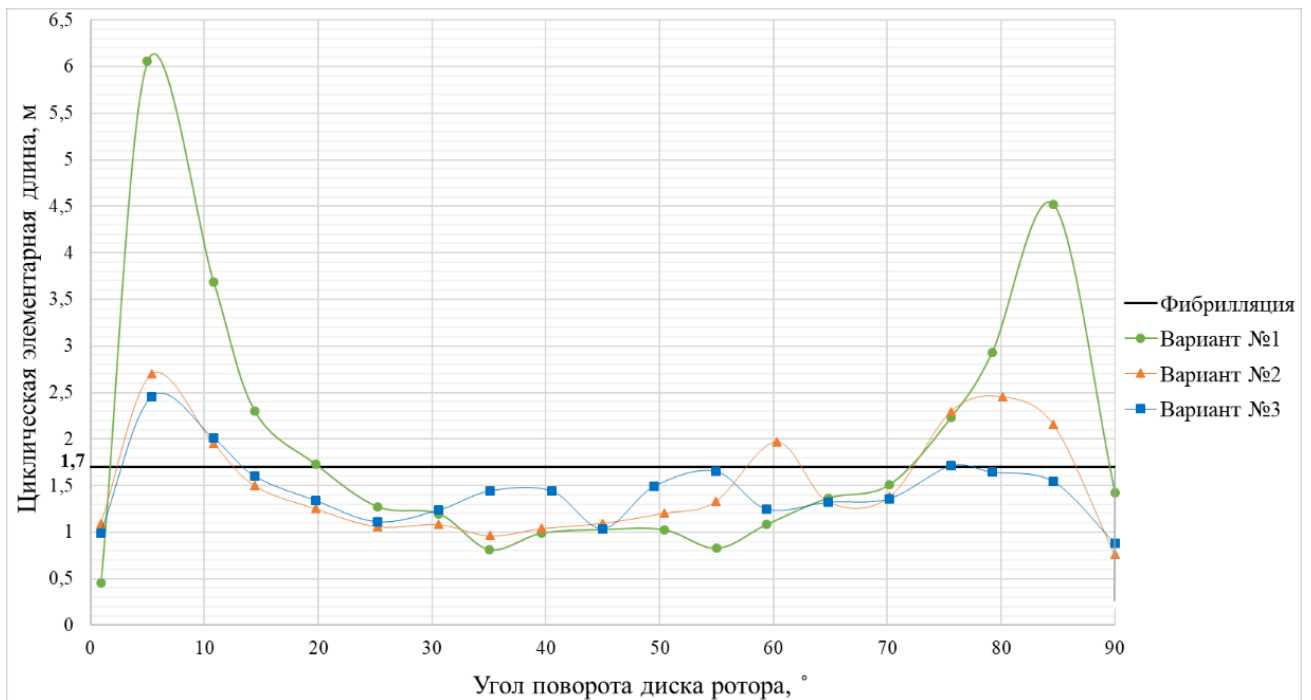


Рисунок 2.10 – Зависимость циклической элементарной длины от углов поворота ротора относительно статора

Как видно из рисунка 2.10 для варианта установки колец № 1 (таблица 2.4) при повороте диска ротора от  $2^\circ$  до  $20^\circ$  и от  $72^\circ$  до  $90^\circ$  значения показателя циклической элементарной длины выше данного в рекомендациях значения  $1,7$  м, что соответствует процессу фибрилляции волокон, при повороте диска ротора от  $20^\circ$  до  $72^\circ$  данные значения ниже и соответствуют рубке волокна.

Для варианта установки колец № 2 (таблица 2.4) фибриллирующий эффект наблюдается при повороте диска ротора от  $2^\circ$  до  $14^\circ$  и от  $72^\circ$  до  $86^\circ$ , при повороте диска ротора от  $14^\circ$  до  $72^\circ$  характер размола направлен в сторону рубки волокна.

Для варианта установки колец № 3 (таблица 2.4) при повороте диска ротора от  $2^\circ$  до  $14^\circ$  наблюдается фибриллирующий эффект, на остальном промежутке от  $14^\circ$  до  $90^\circ$  значения циклической элементарной длины находятся ниже  $1,7$  м, что говорит о рубке волокна.

Анализируя показатель циклической элементарной длины для выбранных вариантов гарнитур, сделаем вывод, что соотношение фибрилляции к рубке волокна для выбранных вариантов гарнитур следующее:

– вариант установки колец № 1 имеет соотношение 40 % фибрилляции к 60 % рубки волокна;

– вариант установки колец № 2 имеет соотношение 29 % фибрилляции к 71 % рубки волокна;

– вариант установки колец № 3 имеет соотношение 13 % фибрилляции к 87 % рубки волокна.

Таким образом, из данных соотношений можно сделать предположение о влиянии изменения рисунка ножевой размалывающей поверхности комбинированной гарнитуры на процесс размола волокнистых полуфабрикатов.

Для подтверждения данного предположения необходимо провести многофакторный эксперимент с использованием комбинированной гарнитуры с учетом изменения рисунка ножевой размалывающей поверхности.

## Выводы по второй главе

Во второй главе произведено теоретическое обоснование конструктивных параметров комбинированной гарнитуры дисковой мельницы, представлены ее характеристики и варианты исполнения рисунка ножевой размалывающей поверхности.

Предложена методика теоретического обоснования построения ножей и геометрии их распределения на рабочей поверхности комбинированной гарнитуры, определены зависимости выходного угла  $\beta$  от входного угла  $\alpha$ , а также произведен расчёт входных углов наклона  $\alpha$  режущих кромок ножей единичного сектора к радиусу  $r$ .

Получены формулы для расчета длины ножей и длины контакта режущих кромок ножей с учетом новой конструкции комбинированной гарнитуры дисковой мельницы. Определены такие основные технологические параметры, как секундная режущая длина, площадь контакта ножей и секундная размалывающая поверхность для комбинированной гарнитуры.

Для анализа процесса размола в динамике, с использованием современных компьютерных технологий, определены показатели площади контакта ножей, секундной режущей длины и числа точек пересечения режущих кромок ножей.

Рассчитан показатель циклической элементарной длины в динамике, значения которого могут говорить о характере процесса размола, так при значении параметра циклической элементарной длины в пределах одного метра характер процесса размола направлен в сторону рубки волокна, при значении от 1,7 до 3 метров характер процесса размола носит фибриллирующий эффект.

Установлено, что процентное соотношение фибрилляции к рубке волокна для выбранных вариантов гарнитур различно, большее процентное соотношение фибрилляции наблюдается при варианте установки колец № 1.

## ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

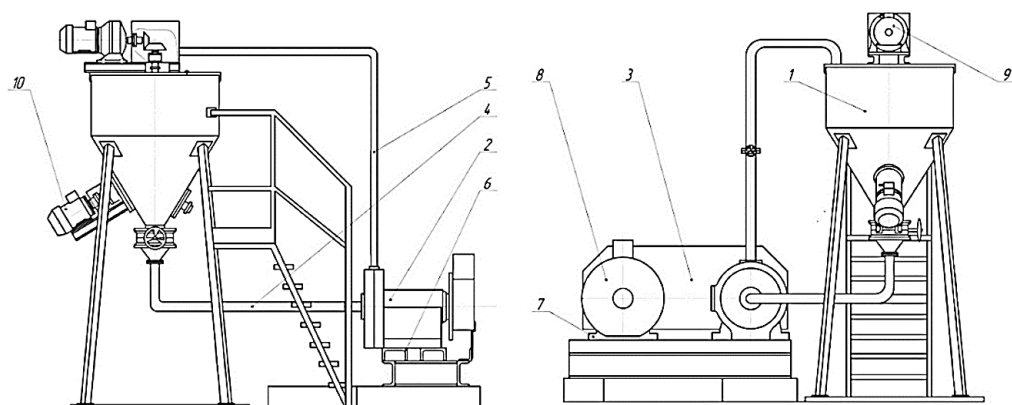
Для анализа процесса размола волокнистого полуфабриката с использованием комбинированной гарнитуры дисковой мельницы необходимо определить влияние основных факторов процесса размола, в числе которых величина зазора между ножами ротора и статора, концентрация волокнистой массы и изменение рисунка ножевой размалывающей поверхности, на бумагообразующие свойства и физико-механические характеристики готовых бумажных отливок. Для выявления латентных факторов, влияющих на процесс размола волокнистого полуфабриката, необходимо провести кластерный и факторный анализ выходных параметров эксперимента.

### 3.1 Методика проведения эксперимента

#### 3.1.1 Описание экспериментальной установки

Исследования процесса размола проводились на полупромышленной дисковой мельнице МД на базе лаборатории кафедры «Машин и аппаратов промышленных технологий» Сибирского государственного института науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева при использовании комбинированной гарнитуры дисковой мельницы.

Общий вид экспериментальной установки представлен на рисунке 3.1.



1 – гидроразбиватель; 2 – полупромышленная дисковая мельница;  
3 – ременная передача; 4 – нагнетательная труба; 5 – циркуляционная труба;  
6 – рама; 7 – крепление; 8, 9, 10 – электродвигатель

Рисунок 3.1 – Общий вид экспериментальной установки для размола

Технические характеристики экспериментальной установки представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Технические характеристики экспериментальной установки

| Дисковая мельница                                 |              |
|---------------------------------------------------|--------------|
| Габаритные размеры, м                             | 0,95×0,6×0,8 |
| Межножевой зазор, мм                              | 0÷6          |
| Частота вращения ротора, об/мин                   | 0÷2000       |
| Привод мельницы                                   |              |
| Номинальная мощность, кВт                         | 22           |
| Частота вращения ротора, об/мин                   | 750          |
| Гидроразбиватель                                  |              |
| Ёмкость, л                                        | 320          |
| Расход жидкости из гидроразбивателя, л/с          | 0÷3          |
| Мешалка гидроразбивателя вертикальная             |              |
| Тип мешалки                                       | Рамная       |
| Частота вращения электродвигателя мешалки, об/мин | 60           |
| Мощность привода, кВт                             | 1,7          |
| Мешалка гидроразбивателя наклонная                |              |
| Тип мешалки                                       | Дисковая     |
| Частота вращения электродвигателя мешалки, об/мин | 900          |
| Мощность привода, кВт                             | 3            |

Экспериментальная установка состоит из гидроразбивателя 1, в котором волокнистая масса подготавливается к размолу с помощью вертикальной и наклонной мешалок, приводимых в движение электродвигателями 9 и 10. Подготовленная волокнистая масса через нагнетательную трубу 4 поступает в рабочую камеру дисковой мельницы 2. Роторный вал мельницы приводится в движение электродвигателем 8 через ременную передачу 3, после чего волокнистая масса возвращается в гидроразбиватель по циркуляционной трубе 5.

### 3.1.2 Выбор конструкции комбинированной гарнитуры

Для проведения исследования была использована волнообразная конструкция межножевой полости комбинированной гарнитуры дисковой мельницы, рассмотренная в пункте 2.1 (рисунок 2.1, б), выбор которой осуществлен на основании более высоких значений физико-механических показателей готовых бумажных отливок, полученных при проведении предварительной серии экспериментов [10, 22, 56, 57].

Для подтверждения предположения, приведенного в пункте 2.4, о влиянии изменения рисунка ножевой размалывающей поверхности комбинированной гарнитуры на процесс размола волокнистых полуфабрикатов использовали варианты установки концентрических колец № 1, № 2 и № 3 (таблица 2.4).

### 3.1.3 Характеристики сырья и параметры размола

В качестве сырья для исследований была выбрана беленая сульфатная целлюлоза из хвойных пород древесины производства АО «Группа Илим» филиал г. Братск, с начальной степенью помола 10 °ШР. Характеристика волокнистого полуфабриката до размола представлена в таблице 3.2, бумагообразующие свойства волокнистой массы были получены с помощью анализатора волокна *MorFi Neo* [110].

Таблица 3.2 – Характеристика волокнистого полуфабриката до размола

| Физико-механические характеристики          |                                      |                             |                                           |                              |                                 |                         |
|---------------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------|------------------------------|---------------------------------|-------------------------|
| Разрывная<br>длина, м                       | Сопротивление продавливанию, кПа     |                             |                                           | Сопротивление<br>излому, шт. | Сопротивление<br>раздиранию, мН |                         |
| 219                                         | 100                                  |                             |                                           | 10                           | 324                             |                         |
| Бумагообразующие свойства                   |                                      |                             |                                           |                              |                                 |                         |
| Средняя<br>длина<br>волокна,<br>мм          | Средняя<br>ширина<br>волокна,<br>мкм | Индекс<br>фибрилляции,<br>% | Водоудержи<br>вающая<br>способность,<br>% | Грубость, мг/м               | Мелочь по<br>площади, %         |                         |
| 2,321                                       | 33                                   | 1,054                       | 150,5                                     | 0,56                         | 1,523                           |                         |
| Фракционный состав средней длины волокна, % |                                      |                             |                                           |                              |                                 |                         |
| $fr_1$<br>0,2–0,3<br>мм                     | $fr_2$<br>0,3–0,45<br>мм             | $fr_3$<br>0,45–0,6<br>мм    | $fr_4$<br>0,6–1,0<br>мм                   | $fr_5$<br>1,0–1,5<br>мм      | $fr_6$<br>1,5–2,0<br>мм         | $fr_7$<br>2,0–2,5<br>мм |
| 9,90                                        | 8,50                                 | 10,70                       | 15,45                                     | 12,36                        | 13,70                           | 22,38                   |

Перед проведением эксперимента подготовленные листы целлюлозы были подвергнуты замачиванию, после чего производился их роспуск в гидроразбивателе с последующей подачей волокнистой массы в дисковую мельницу при помощи системы трубопроводов.

Таким образом, исходя из характеристик экспериментальной установки (таблица 3.1), эксперимент проводился при величине межножевого зазора, равной

0,10 мм, 0,15 мм и 0,20 мм, концентрации волокнистой массы 1 %, 2 % и 3 %, вариантах установки колец № 1, № 2 и № 3 (таблица 2.4) с углом поворота концентрических колец 2 и 4 диска статора комбинированной гарнитуры 0°, 22,5° и 45°, при постоянной частоте вращения ротора 2000 об/мин.

Выбор частоты вращения ротора основан на анализе исследований авторов, занимающихся вопросом ножевого размолу волокнистых полуфабрикатов, было определено, что увеличение частоты вращения ротора способствует уменьшению времени размолу и повышению прочностных характеристик готового продукта [2, 3, 8, 30, 70].

### **3.1.4 Порядок проведения эксперимента**

Подготовка экспериментальной установки к размолу осуществлялась следующим образом: на роторный вал устанавливается основание диска ротора с закрепленными на нем при помощи болтов кольцами комбинированной гарнитуры и фиксируется с помощью прижимной гайки и прокладки. На дверь мельницы устанавливается основание диска статора с закрепленными на нем при помощи болтов кольцами комбинированной гарнитуры с необходимым рисунком ножевой поверхности, который обеспечивается поворотом отдельных колец гарнитуры, после чего происходит настройка параллельности дисков ротора и статора с помощью регулировочных болтов. Далее мельница закрывается и устанавливается необходимый межножевой зазор в диапазоне от 0 до 6 мм с помощью винтового приспособления, точность которого составляет 0,05 мм. Выбор необходимой частоты вращения ротора обеспечивается с помощью набора шкивов: 1000; 1500; 2000 об/мин.

Подготовленная масса заданной концентрации загружается в бак гидроразбивателя и подготавливается в течение установленного времени при включенных вертикальной и наклонной мешалках. После выполненных действий масса подвергается размолу с периодическим отбором образца массы для замера прироста степени помола по Шоппер-Риглеру на аппарате СР–2. Значения затрачиваемой энергии фиксируются и контролируются аппаратом К–540. При достижении необходимой степени помола отбираются пробы волокнистой массы

для дальнейшего изучения бумагообразующих свойств волокнистой массы и физико-механических характеристик готовых бумажных отливок, полученных на листоотливном аппарате ЛА–1. В ходе проведенных исследований отбирались пробы со степенью помола от 10 до 70 °ШР с интервалом 20 °ШР.

### 3.1.5 Определение бумагообразующих свойств волокнистого полуфабриката

Для оценки влияния процесса размолла с использованием комбинированной гарнитуры дисковой мельницы на характер обработки волокнистого полуфабриката с помощью анализатора волокна *MorFi Neo* определялись бумагообразующие свойства волокнистой массы. Прибор состоит из гидравлической части (насос, резервуар), осуществляющей подачу подготовленной массы к оптической части (измерительная камера, соединенная с компьютером), измеряющей основные показатели волокнистой массы [110]. Исследуемые бумагообразующие показатели и их описание представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Описание бумагообразующих показателей

| Показатель                        | Описание показателя                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|-----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Средняя длина волокна, $L_i$ , мм | Прибор рассчитывает длину волокна как сумму участков по направлению каждого непересекающегося прямолинейного сегмента.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Ширина волокна, $z$ , мкм         | Ширина волокна рассчитывается для каждого сегмента, за счет нескольких измерений на каждом волокне полученные значения получаются надежными.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Фракционный состав, $fr$ , %      | При определении фракционного состава прибор рассчитывает все распознанные волокна и распределяет их по классам в зависимости от длины в процентном выражении: 0,2–0,3 мм ( $fr1$ ); 0,3–0,45 мм ( $fr2$ ); 0,45–0,6 мм ( $fr3$ ); 0,6–1 мм ( $fr4$ ); 1–1,5 мм ( $fr5$ ); 1,5–2 мм ( $fr6$ ); 2–3,5 мм ( $fr7$ ), 3,5–5 мм ( $fr8$ ), 5–8 мм ( $fr9$ ). В ходе проводимых экспериментов было выбрано семь классов фракций волокна: $fr1 - fr7$ .                   |
| Мелочь, $A$ , %                   | Прибор относит к классу мелочи волокна, длина которых менее 0,2 мм. Умеренное количество мелочи оказывает большое влияние на прочность бумаги, увеличивая эффективную площадь контакта волокон путем заполнения пустот между ними.                                                                                                                                                                                                                                 |
| Индекс фибрилляции, $Fib$ , %     | Индекс фибрилляции при расчете на анализаторе определяется как отношение сумм длин всех фибрилл к длинам всех волокон.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Грубость волокна, $K$ , мг/м      | Грубость волокна при работе анализатора вычисляется как отношение массы всех волокон к их суммарной длине. При определении показателя грубости волокна прибор подсчитывает количество проанализированных изображений волокон, после чего высчитывает их массу. Общий объем проанализированной волокнистой массы подсчитывается исходя из объема волокон, полученных на изображении, что позволяет рассчитать общую массу полуфабриката при известной концентрации. |

Показатель водоудерживающей способности, предложенный Джайме, характеризует показатель набухания волокон. Определение водоудерживающей способности волокнистого полуфабриката заключается в измерении оставшейся в нем влаги после центрифугирования при определенных условиях [61].

### **3.1.6 Определение физико-механических характеристик готовых бумажных отливок**

Определение прочности готовых бумажных отливок проводилось по следующим физико-механическим показателям: разрывная длина, сопротивление продавливанию, сопротивление раздиранию и сопротивление излому. Определение перечисленных показателей производилось по стандартным методикам в соответствии с ГОСТ 13525.2–80 [15], ГОСТ 13525.3–97 [16], ГОСТ 13525.8–86 [17], ГОСТ ИСО 1924–1–96 [18].

Испытываемые образцы готовых бумажных отливок перед испытанием кондиционировали в стандартных атмосферных условиях в соответствии с ГОСТ 13523–78 [14] при относительной влажности воздуха  $(50 \pm 2) \%$  и температуре воздуха  $(23 \pm 3) ^\circ\text{C}$ , испытания проводились в тех же условиях.

#### Разрывная длина

Разрывная длина бумаги – это условный показатель, выражающий (в метрах) длину бумажной полоски, при которой она разорвется под собственным весом при подвешивании ее за один конец [18]. Наибольшее влияние на показатель разрывной длины оказывают межволоконные силы связи и прочность волокон [25].

#### Сопротивление продавливанию

Показатель сопротивления продавливанию является сложной функцией сопротивления разрыву и удлинения бумаги до разрыва [63]. Большие показатели сопротивления продавливанию показывает бумага, изготовленная из длинных волокон, также увеличение данного показателя отмечается при увеличении степени помола волокнистой массы за счет увеличения межволоконных сил связи. Однако укорочение волокон при чрезмерном росте степени помола волокнистой массы снижает показатель сопротивления продавливанию.

Определение показателя сопротивления продавливанию проводилось на автоматическом приборе «*CALIBRATED*», точность измерения прибора  $\pm 9\%$ .

#### Сопротивление раздиранию

Показатель сопротивления раздиранию характеризуется силой, вызывающей у полученного надрыва кромки дальнейший разрыв до определенной его длины [63]. Высокие значения данного показателя наблюдаются у бумаги, изготовленной из длинных волокон, также показатель повышается с ростом влажности бумаги.

Определение показателя сопротивления раздиранию производилось методом Эльмендорфа, который основан на определении усилия, требуемого для раздирания предварительно надрезанного образца, на аппарате РБ. Точность измерения прибора  $\pm 3\%$ .

#### Сопротивление излому

Сопротивление излому является показателем, определяющим механическую прочность бумаги. Высокие значения данного показателя наблюдаются у бумаги, состоящей из длинных, гибких волокон с высокой межволоконной связью.

Определение показателя сопротивления излому проводилось на аппарате И-2, принцип работы которого заключается в определении числа двойных перегибов, выдерживаемых бумажной полоской, которая находится под натяжением, до разрушения образца по линии сгиба.

### **3.2 Планирование эксперимента**

В ходе исследований был применен метод активного эксперимента с целью получения математических уравнений для описания процесса размола волокнистого полуфабриката с использованием комбинированной конструкции гарнитуры дисковой мельницы. Математические зависимости, полученные в ходе активного эксперимента, позволят получить соотношения между установленными входными и выходными параметрами.

Многофакторный эксперимент, благодаря возможности варьирования практически всех факторов при переходе к следующему эксперименту, является наиболее предпочтительным при определении влияния конструктивных особенностей гарнитуры и технологических параметров процесса размола на бумагообразующие свойства волокнистой массы и физико-механические характеристики готовых отливок.

В первой части эксперимента был использован регрессионный анализ для построения математической модели процесса размола. Регрессионный анализ позволяет вычислить предполагаемые отношения между входными независимыми переменными ( $X$ ) и выходными зависимыми переменными ( $Y$ ), что позволяет моделировать отношения между выбранными переменными и прогнозируемыми значениями на основе модели.

Зависимости выходного параметра ( $Y$ ) от независимой переменной ( $X$ ) аппроксимированы уравнениями регрессии. Факторы процесса размола, оказывающие основное влияние на бумагообразующие свойства волокнистой массы и физико-механические характеристики готовых бумажных отливок, в виде входных  $X$  и выходных  $Y$  параметров, представлены в таблице 3.4. Матрица планирования эксперимента (приложение А) построена с использованием пакета программ *STATISTICA*–13.

Таблица 3.4 – Входные и выходные параметры эксперимента

| Параметр                                                             | Обозначение |                 |
|----------------------------------------------------------------------|-------------|-----------------|
|                                                                      | натуральное | нормализованное |
| Входные параметры                                                    |             |                 |
| Межножевой зазор, мм                                                 | $s$         | $X_1$           |
| Концентрация волокнистой массы, %                                    | $C$         | $X_2$           |
| Угол поворота колец 2 и 4 комбинированной гарнитуры, °               | $\alpha$    | $X_3$           |
| Выходные параметры                                                   |             |                 |
| Изменение бумагообразующих показателей при размоле волокнистой массы |             |                 |
| Средняя длина волокна, мм                                            | $L_i$       | $Y_1$           |
| Средняя ширина волокна, мкм                                          | $z$         | $Y_2$           |
| Индекс фибрилляции, %                                                | $Fib$       | $Y_3$           |
| Грубость волокна, мг/м                                               | $K$         | $Y_4$           |
| Водоудерживающая способность (по Джайме), %                          | $W$         | $Y_5$           |

Продолжение таблицы 3.4

| Фракционный состав средней длины волокна              |        |          |
|-------------------------------------------------------|--------|----------|
| Фракция 0,2–0,3 мм, %                                 | $fr_1$ | $Y_6$    |
| Фракция 0,3–0,45 мм, %                                | $fr_2$ | $Y_7$    |
| Фракция 0,45–0,6 мм, %                                | $fr_3$ | $Y_8$    |
| Фракция 0,6–1 мм, %                                   | $fr_4$ | $Y_9$    |
| Фракция 1–1,5 мм, %                                   | $fr_5$ | $Y_{10}$ |
| Фракция 1,5–2 мм, %                                   | $fr_6$ | $Y_{11}$ |
| Фракция 2–3,5 мм, %                                   | $fr_7$ | $Y_{12}$ |
| Мелочь по площади, %                                  | $A$    | $Y_{13}$ |
| Изменение физико-механических свойств готовых отливок |        |          |
| Сопротивление излому, шт.                             | $U$    | $Y_{14}$ |
| Разрывная длина, м                                    | $L$    | $Y_{15}$ |
| Сопротивление продавливанию, кПа                      | $P_a$  | $Y_{16}$ |
| Сопротивление раздиранию, мН                          | $E$    | $Y_{17}$ |

Уровни и шаги варьирования входных параметров эксперимента, согласно составленному плану эксперимента, представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Уровни и шаги варьирования исследуемых факторов

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

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

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{33}X_3^2 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 \quad (3.1)$$

Коэффициенты уравнений регрессии для выходных параметров приведены в приложении Б, таблицы Б.1 – Б.3.

В рамках проводимого исследования представлялось целесообразным выявить вклад каждого из коэффициентов регрессии в дисперсию выходных параметров. Для этого были построены поверхности откликов выходных параметров в зависимости от выбранного варианта установки концентрических

колец, концентрации волокнистой массы и величины межножевого зазора между дисками ротора и статора при различных степенях помола.

### **3.3 Результаты экспериментальных исследований**

По результатам экспериментальных исследований были построены поверхности отклика для бумагообразующих показателей волокнистого полуфабриката и физико-механических особенностей готового продукта. Полученные поверхности отклика отображают изменения исследуемых показателей в зависимости от величины межножевого зазора ( $s$ ), концентрации волокнистой массы ( $C$ ) (таблица 3.5) и конструкции гарнитуры (варианта установки колец), меняющейся за счет поворота концентрических колец на определенный угол, согласно таблице 2.4, при изменении степени помола полуфабриката до 30, 50 и 70 °ШР.

#### **3.3.1 Бумагообразующие свойства волокнистого полуфабриката**

##### **3.3.1.1 Продолжительность размола**

С уменьшением времени, затрачиваемого на размол волокнистого полуфабриката, повышается интенсивность прироста степени помола, в результате чего увеличивается производительность размалывающей установки и, следовательно, сокращаются энергетические затраты на производство готового продукта.

Изменение времени размола волокнистого полуфабриката при регулировании конструкции гарнитуры представлено на рисунке 3.2. Как видно из рисунка время, затрачиваемое на размол, изменяется в зависимости от конструкции гарнитуры (таблица 2.4) следующим образом: для всех рассматриваемых степеней помола волокнистой массы максимальное количество затрачиваемого на размол времени наблюдается при использовании варианта установки колец № 1, минимальное время наблюдается при использовании варианта установки колец № 2.

Увеличение количества затрачиваемого на размол времени наблюдается также при приросте степени помола от 30 до 70 °ШР.

Увеличение величины зазора между ножами ротора и статора от 0,08 до 0,22 мм приводит к увеличению количества времени, затрачиваемого на размол волокнистой массы. Особенно выражено влияние величины межножевого зазора с увеличением степени помола, в частности при 50 °ШР и особенно при 70 °ШР.

Изменение концентрации волокнистой массы не оказывает значительного влияния на количество затрачиваемого на размол времени.

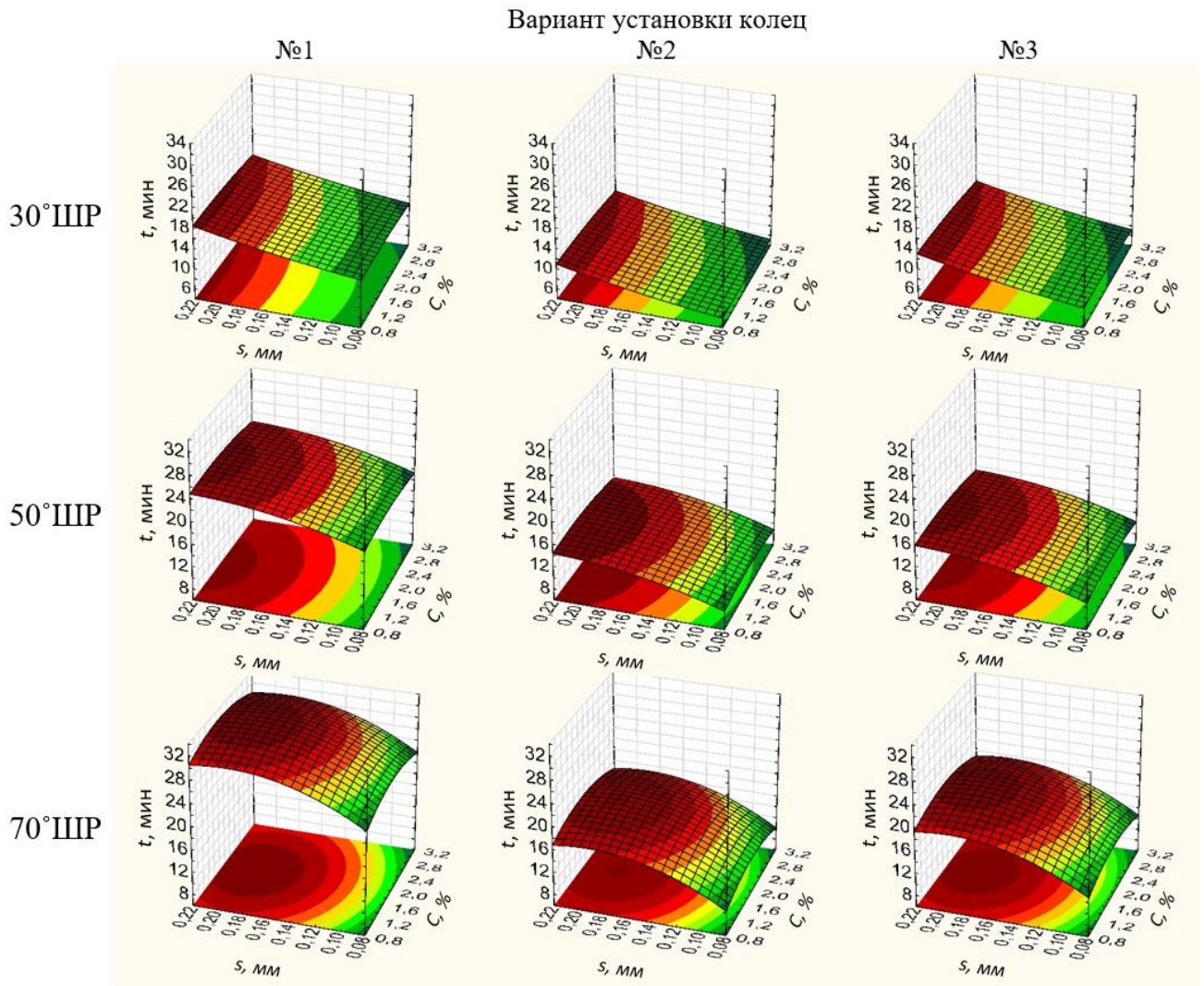


Рисунок 3.2 – Изменение времени размола волокнистого полуфабриката при регулировании конструкции рабочих органов

По данным, представленным на рисунке 3.2, для размола волокнистого полуфабриката наиболее предпочтительными являются варианты установки колец № 2 и № 3 (таблица 2.4), где наблюдается минимальное время размола. Однако интенсивный прирост степени помола может быть связан с рубкой волокна, в связи с чем необходимо рассмотреть среднюю длину волокна и фракционный состав волокнистой массы для исследуемых вариантов установки колец.

### 3.3.1.2 Средняя длина волокна

Длина волокна является важным показателем, влияющим на прочностные характеристики получаемого продукта и позволяющим оценить характер преимущественного воздействия гарнитуры на волокнистый полуфабрикат.

Регулирование данного параметра, посредством укорочения волокон при размоле, позволяет получить более однородную массу, предотвратить образование отдельных флоккул волокон при отливе на бумагоделательной машине и, следовательно, обеспечить требуемую структуру бумажного листа [25]. Поверхности отклика средней длины волокна  $L_i$  представлены на рисунке 3.3.

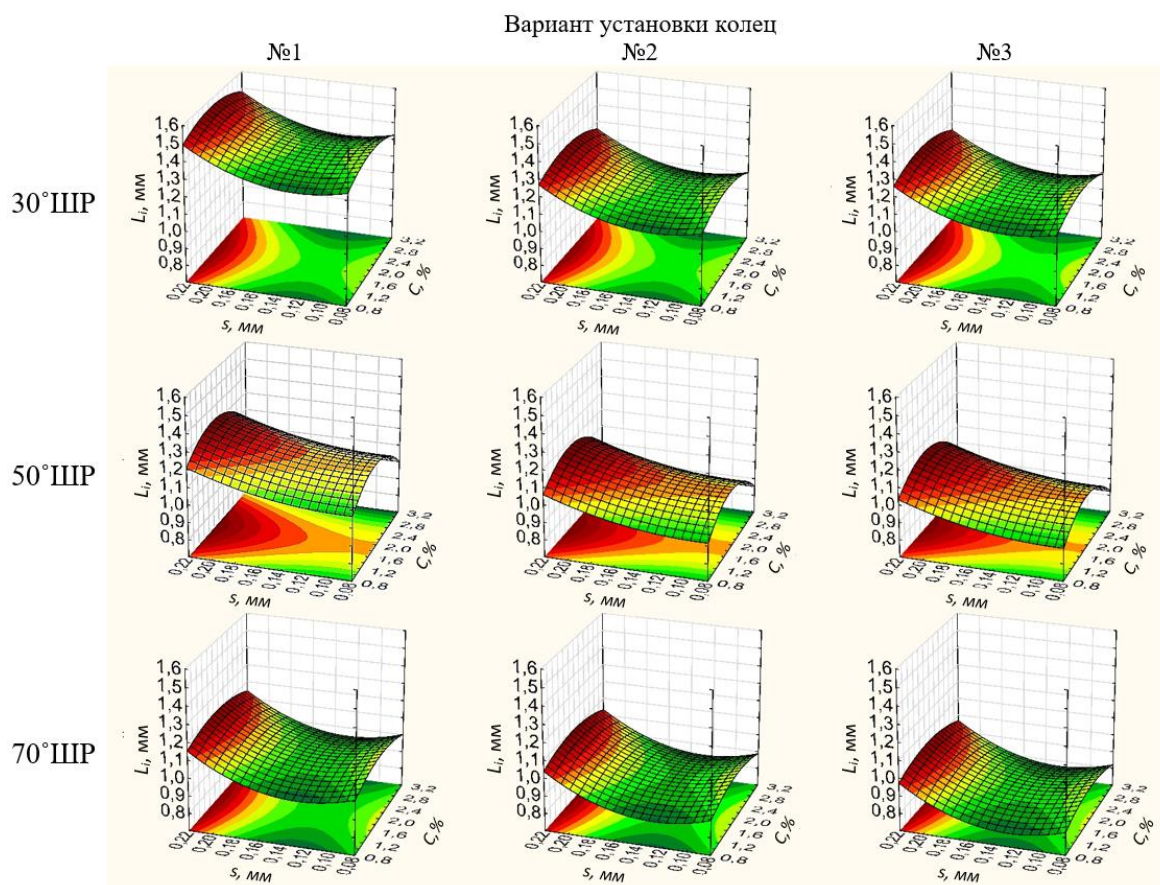


Рисунок 3.3 – Изменение средней длины волокна  $L_i$  при регулировании конструкции рабочих органов

При анализе представленных графиков наблюдается следующая картина изменения средней длины волокна:

- при изменении конструкции гарнитуры (варианта установки колец (таблица 2.4)), а именно при увеличении угла поворота концентрических колец 2 и 4 от  $0^\circ$  до  $45^\circ$ , наблюдается укорачивание длины волокон. Как видно из рисунка 3.3, при варианте установки колец № 1 средняя длина волокон сокращается менее интенсивно по сравнению с вариантами установки колец № 2 и № 3, значения которых близки друг к другу при аналогичных значениях межножевого зазора и концентрации волокнистой массы;

- при увеличении межножевого зазора от 0,08 до 0,22 мм показатель длины волокна увеличивается для исследуемых вариантов установки колец, что связано с уменьшением рубки волокна;

- при увеличении концентрации волокнистой массы от 0,8 до 2 % наблюдается сохранение длины волокна, с дальнейшим увеличением концентрации до 3,2 % значения данного показателя уменьшаются, причем наиболее интенсивно это происходит при степени помола волокнистой массы 50 °ШР.

Таким образом, при использовании конструкции гарнитуры с вариантом установки колец № 1, увеличении межножевого зазора от 0,08 до 0,22 мм и концентрации волокнистой массы равной 2 %, наблюдается меньшее укорочение волокон по сравнению с вариантами установки колец № 2 и № 3, что подтверждает предположение, приведенное в пункте 3.3.1.1, о более интенсивном приросте степени помола волокнистой массы за счет направленности размола в сторону рубки. Для более полного анализа изменения длины волокон при изменении конструкции гарнитуры необходимо рассмотреть распределение процентного содержания фракционного состава.

### **3.3.1.3 Фракционный состав**

При исследовании фракционного состава рассматривалось семь основных классов  $fr1 - fr7$ , содержащих определенную долю волокон в процентном соотношении, и процентное содержание волокон мелочи,  $A$ , % (таблица 3.3) в

зависимости от концентрации волокнистой массы, величины межножевого зазора и конструкции гарнитуры (варианта установки колец), представленных в приложениях В.1 – В.8.

При анализе поверхностей откликов фракционного состава выяснилось, что качественные зависимости фракционного состава изменяются от величины степени помола, причем в пределах одной степени помола конструкция гарнитуры (вариант установки колец) не влияет на изменение качественных зависимостей. Вместе с тем изменение количественных зависимостей наблюдается при изменении степени помола и конструкции гарнитуры (варианта установки колец).

Для сравнения распределения процентного содержания фракционного состава при различных вариантах установки колец были построены гистограммы при следующих параметрах: межножевой зазор равен 0,15 мм, концентрация волокнистой массы равна 2 % (рисунок 3.4–3.6).

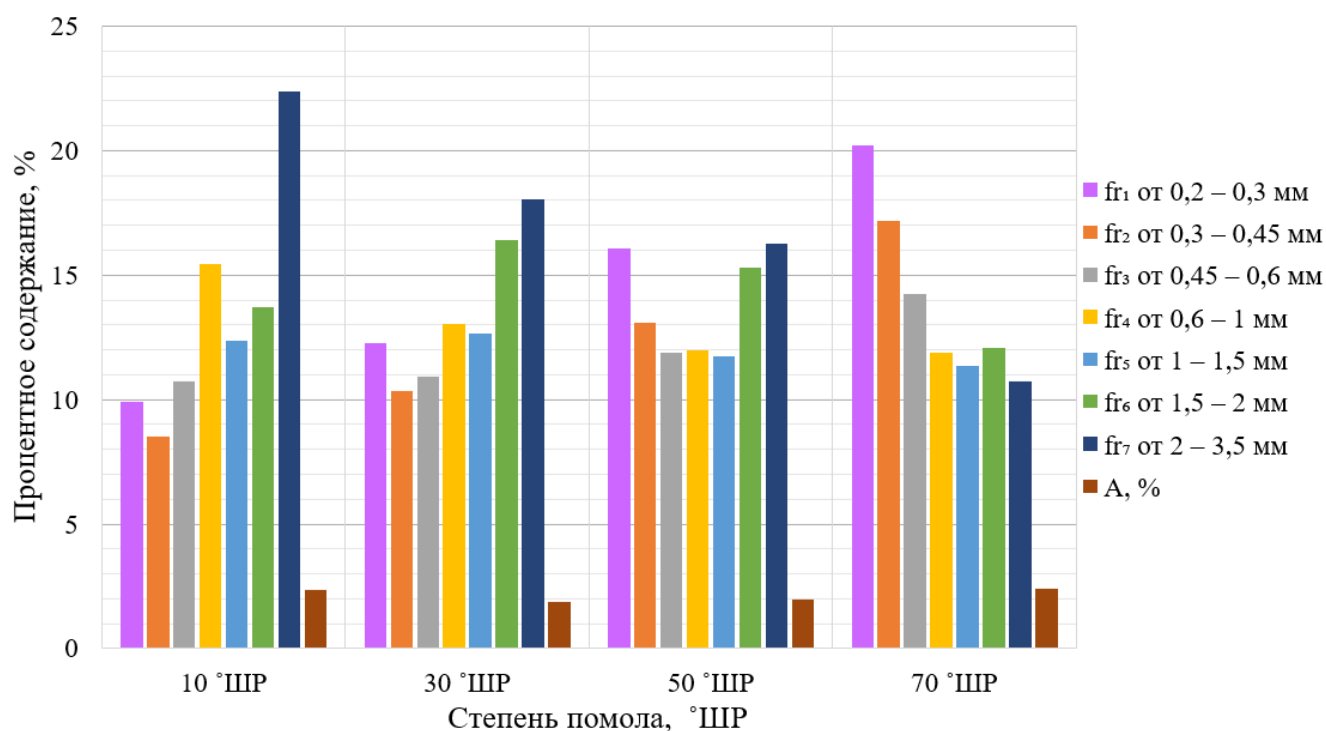


Рисунок 3.4 – Гистограмма распределения фракционного состава при величине межножевого зазора 0,15 мм, концентрации волокнистой массы 2 % и варианте установки колец № 1

Как видно из рисунка 3.4, для варианта установки колец № 1 с изменением степени помола волокнистой массы наблюдается прирост процентного содержания

волокон фракций  $fr1 - fr4$  с небольшим сокращением длинноволокнистых фракций  $fr6$  и  $fr7$  и незначительным приростом мелочи,  $A$ , %.

Из гистограммы, представленной на рисунке 3.5, видно, что при использовании гарнитуры с вариантом установки колец № 2 с изменением степени помола волокнистой массы до 70 °ШР наблюдается снижение процентного содержания длинноволокнистых фракций  $fr6$  и  $fr7$ , при этом наблюдается увеличение содержания фракций  $fr1 - fr5$  и мелочи  $A$ , %.

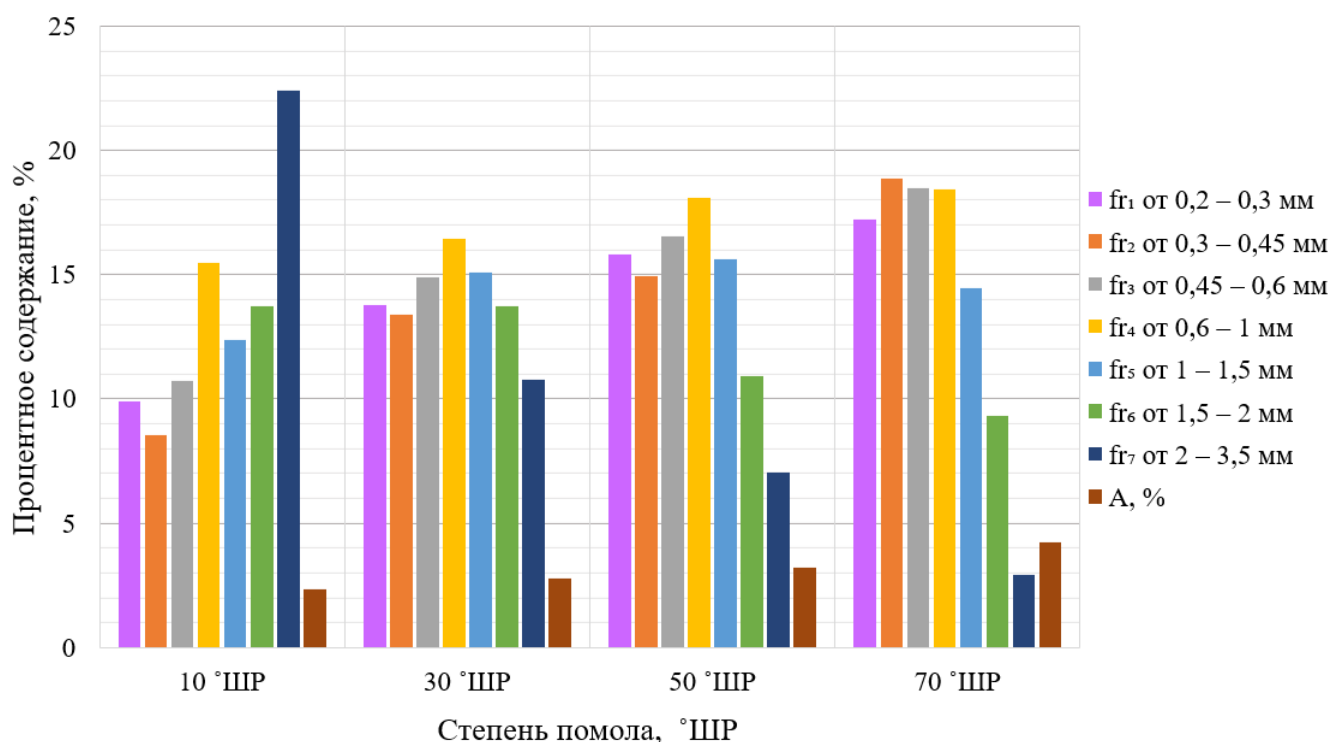


Рисунок 3.5 – Гистограмма распределения фракционного состава при величине межножевого зазора 0,15 мм, концентрации волокнистой массы 2 % и варианте установки колец № 2

Из гистограммы, представленной на рисунке 3.6, видно, что при использовании гарнитуры с вариантом установки колец № 3 с изменением степени помола волокнистой массы до 70 °ШР наблюдается увеличение процентного содержания фракций  $fr1 - fr3$  и незначительное увеличение содержания фракций  $fr4 - fr5$  и мелочи  $A$ , %. При этом содержание длинноволокнистых фракций  $fr6$  и  $fr7$  снижается.

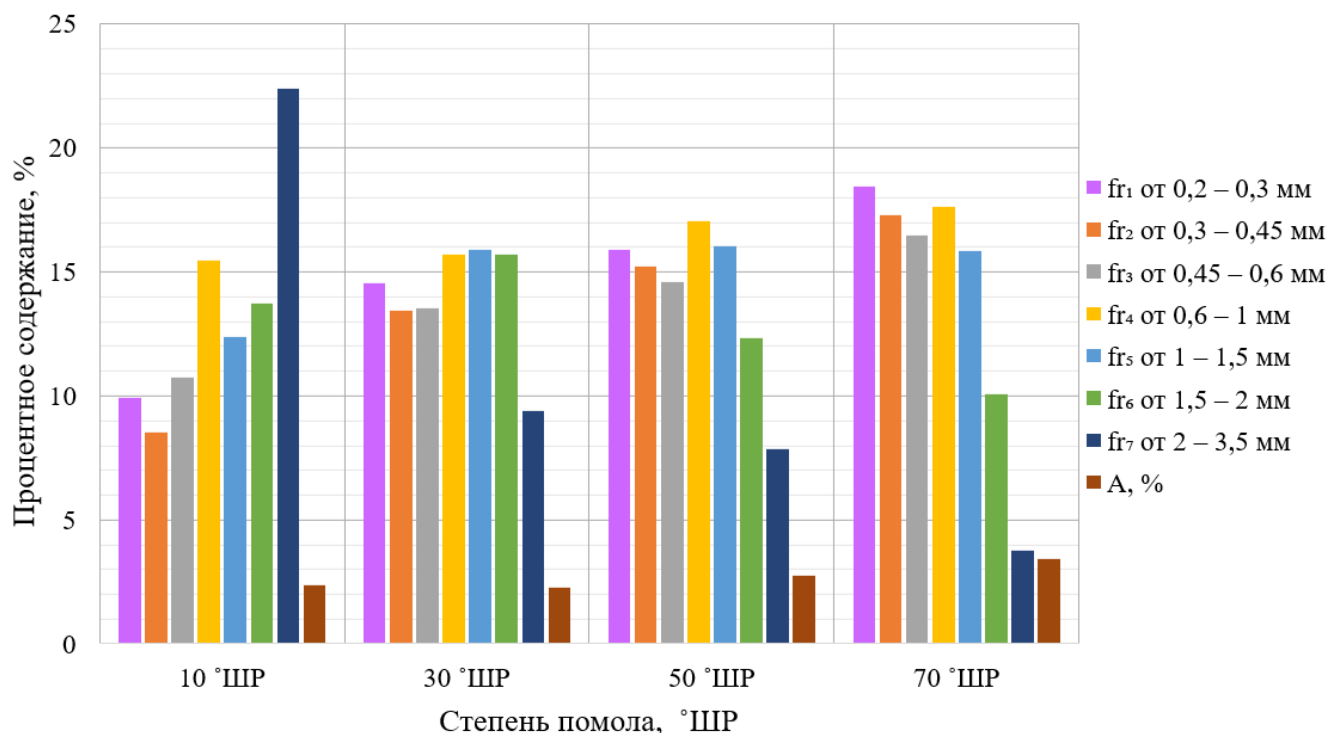


Рисунок 3.6 – Гистограмма распределения фракционного состава при величине межножевого зазора 0,15 мм, концентрации волокнистой массы 2 % и варианте установки колец № 3

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

#### 3.3.1.4 Ширина волокна

Поверхности отклика средней ширины волокна  $z$  представлены на рисунке 3.7. При изменении конструкции гарнитуры (варианта установки колец (таблица 2.4)), а именно увеличении угла поворота концентрических колец 2 и 4 от 0° до 45°, наблюдается увеличение ширины волокна при всех степенях помола.

Как видно из рисунка, при размоле до 30 °ШР уменьшение величины межножевого зазора от 0,22 до 0,08 мм ведет к повышению значений показателя ширины волокна, а концентрация волокнистой массы не оказывает существенного влияния на изменение данного показателя.

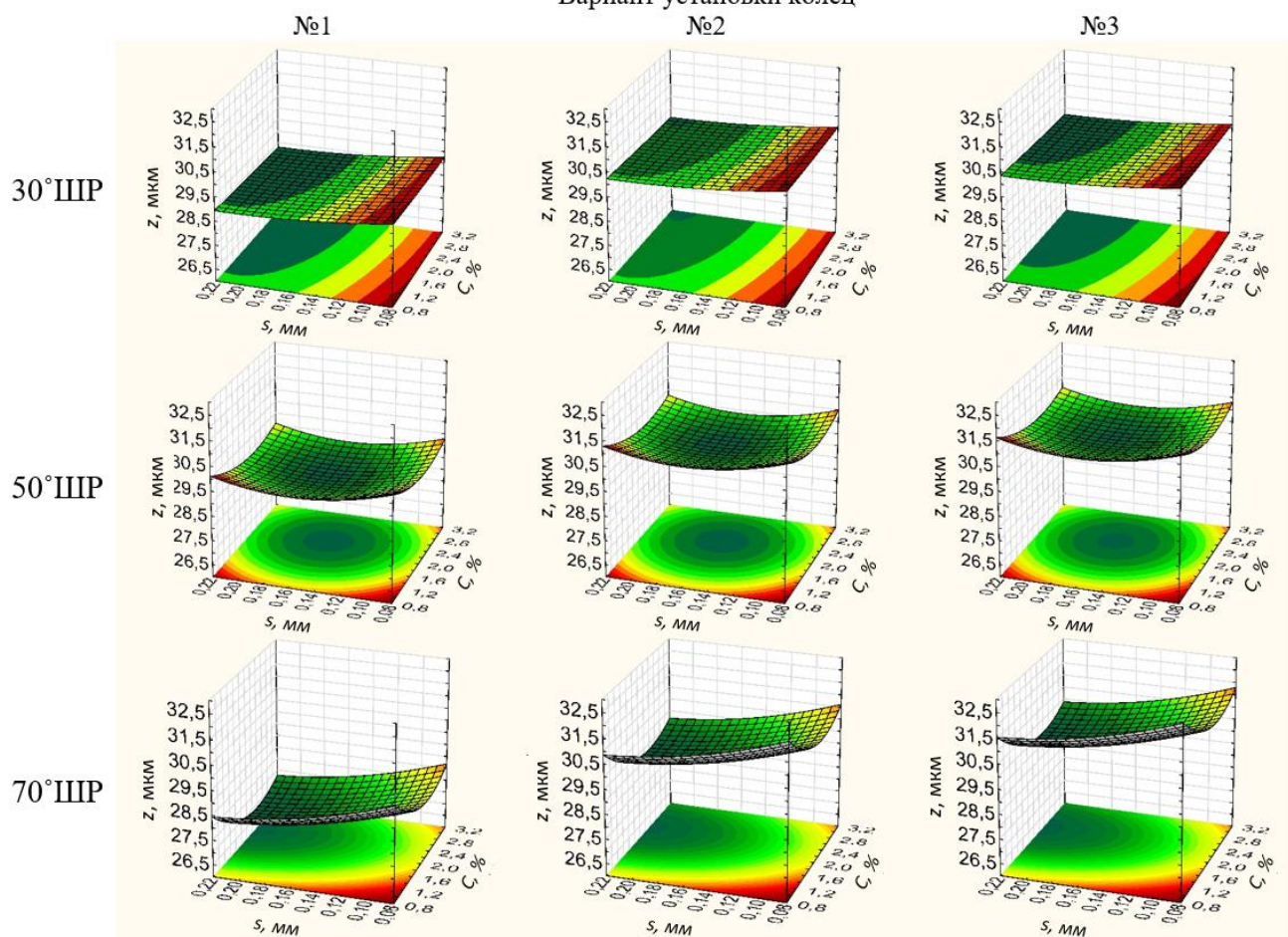


Рисунок 3.7 – Изменение ширины волокна  $Z$  при регулировании конструкции рабочих органов

При размоле до  $50^\circ \text{ШР}$  увеличение межножевого зазора от 0,08 до 0,16 мм и концентрации волокнистой массы от 0,8 до 2,2 % ведет к уменьшению показателя ширины волокна. При дальнейшем увеличении межножевого зазора до 0,22 мм и концентрации до 3,2 % показатель ширины волокна увеличивается.

При размоле до  $70^\circ \text{ШР}$  уменьшение величины межножевого зазора от 0,22 до 0,08 мм приводит к повышению показателя ширины волокна. При концентрации волокнистой массы равной 2 % наблюдаются минимальные значения данного показателя, причем дальнейшее увеличение концентрации до 3,2 % и ее уменьшение до 0,8 % ведет к повышению показателя ширины волокна.

### 3.3.1.4 Индекс фибрилляции

Поверхности отклика индекса фибрилляции  $Fib$  представлены на рисунке 3.8. При размоле волокнистой массы до  $30^\circ \text{ШР}$  и  $70^\circ \text{ШР}$  качественные

зависимости изменения показателя индекса фибрилляции близки друг к другу. Уменьшение величины межножевого зазора от 0,22 до 0,08 мм ведет к повышению данного показателя. При концентрации волокнистой массы, равной 2,2 %, наблюдаются минимальные значения показателя индекса фибрилляции, причем дальнейшее увеличение концентрации до 3,2 % или ее уменьшение до 0,8 % ведет к повышению данного показателя.

Изменение конструкции гарнитуры (варианта установки колец (таблица 2.4)), а именно увеличение угла поворота концентрических колец 2 и 4 от  $0^\circ$  до  $45^\circ$ , приводит к увеличению показателя индекса фибрилляции для данных степеней помола.

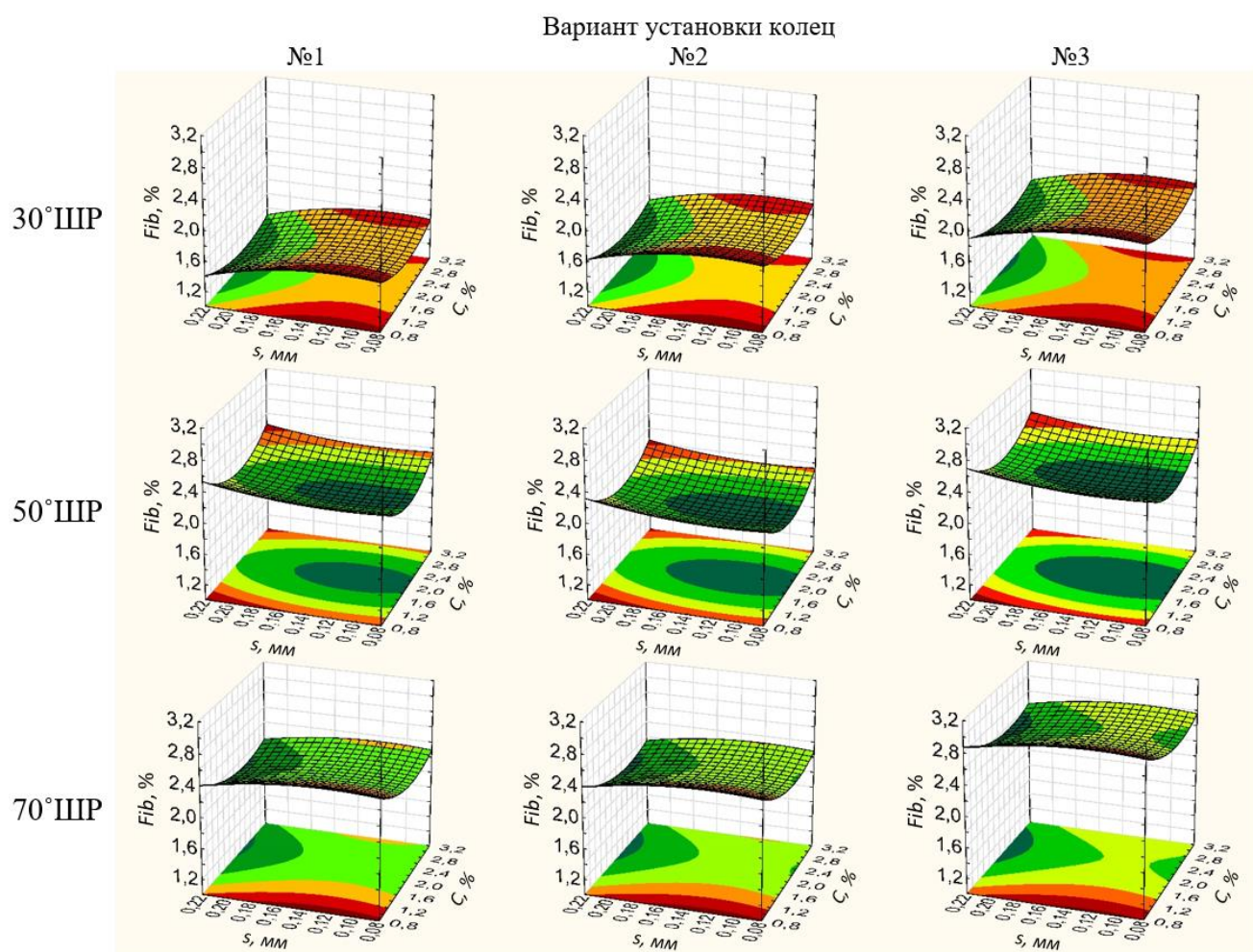


Рисунок 3.8 – Изменение индекса фибрилляции *Fib* при регулировании конструкции рабочих органов

При размоле до  $50^\circ$  ШР увеличение межножевого зазора от 0,08 до 0,22 мм ведет к незначительному повышению показателя индекса фибрилляции. При

концентрации волокнистой массы, равной 2 %, наблюдаются минимальные значения показателя индекса фибрилляции, а дальнейшее увеличение концентрации до 3,2 % и ее уменьшение до 0,8 %, аналогично случаям со степенью помола волокнистой массы 30 °ШР и 70 °ШР, ведет к повышению данного показателя.

Изменение конструкции гарнитуры при степени помола 50 °ШР влияет на показатель индекса фибрилляции следующим образом: максимальные количественные значения показателя индекса фибрилляции наблюдаются при варианте установки колец № 3. При варианте установки колец № 1 снижение показателя индекса фибрилляции составляет 7 %. При варианте установки колец № 2 данный показатель снижается в пределах 15 %.

Таким образом, максимальные значения показателя индекса фибрилляции наблюдаются при использовании конструкции гарнитуры с вариантом установки колец № 3. Высокие значения показателя индекса фибрилляции свидетельствуют о превалировании хорошо разработанных волокон, способствующих образованию прочных межволоконных сил связи и влияющих на прочность и качество готового продукта.

### **3.3.1.5 Грубость волокна**

Согласно мнению Дж. Кларка [28], одним из ключевых бумагообразующих свойств волокнистой массы, наряду с длиной волокна, является его грубость. В работах авторов [1, 26] отмечается, что прочностные характеристики бумаги во многом зависят от тонкости и гибкости волокон, которые связаны с его грубостью.

Волокна, обладающие большей грубостью, имеют меньшую пластичность, что приводит к образованию более рыхлого и менее плотного бумажного листа. Кроме того, изменение грубости волокон существенно влияет на их когезионную способность. Повышение грубости волокон ведет к снижению их когезионной способности, так как менее пластичные и менее конформные волокна формируют структуру бумажного листа с малым числом межволоконных контактов, что делает его менее плотным.

Поверхности отклика грубости волокна  $K$  представлены на рисунке 3.9.

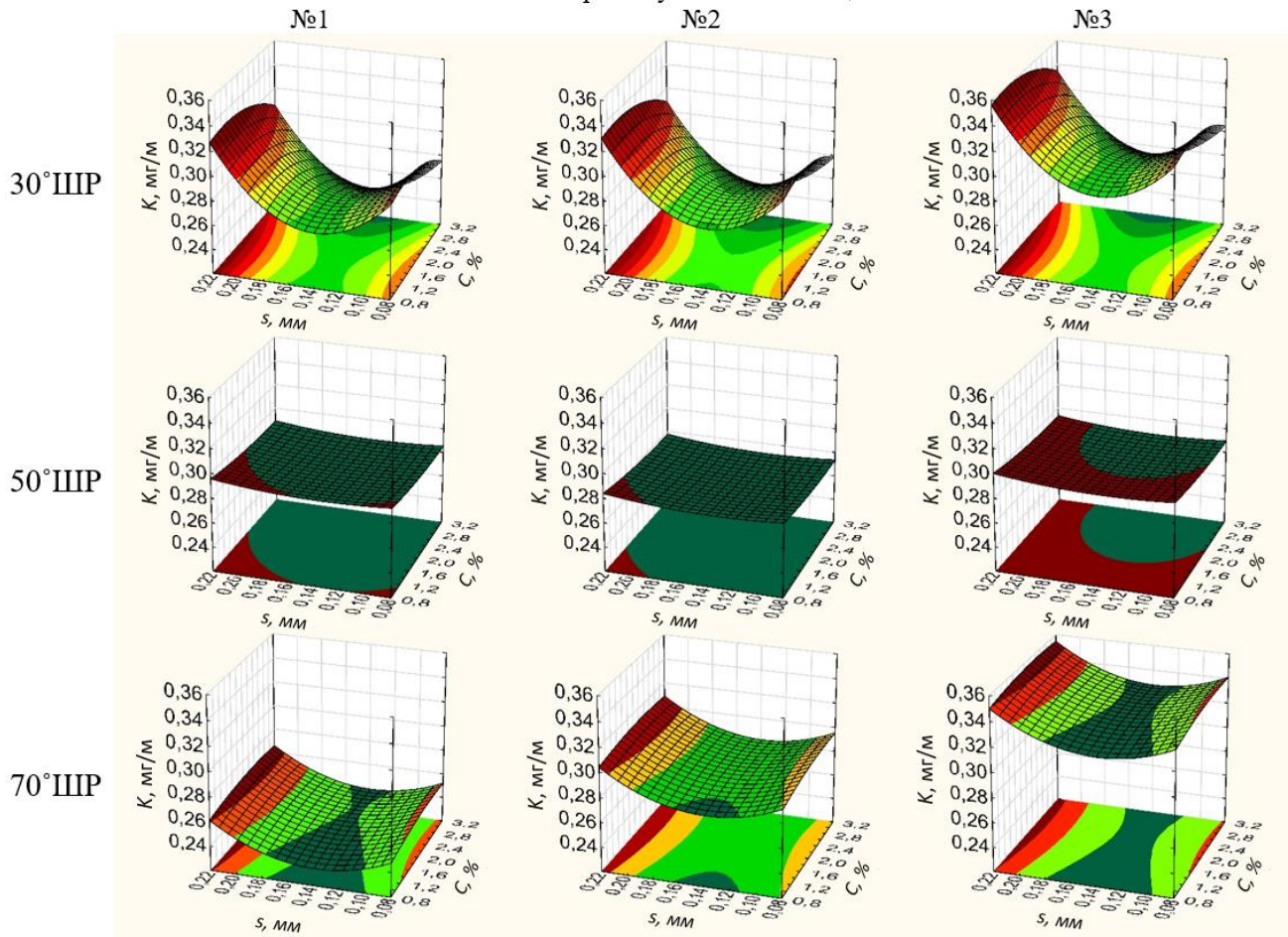


Рисунок 3.9 – Изменение грубости волокна  $K$  при регулировании конструкции рабочих органов

При размоле до  $30^\circ\text{ШР}$  и  $70^\circ\text{ШР}$  наименьшие значения данного показателя наблюдаются при межножевом зазоре  $0,14\text{ мм}$ . При дальнейшем увеличении межножевого зазора до  $0,22\text{ мм}$  и его уменьшении до  $0,08\text{ мм}$  количественные значения показателя грубости волокна увеличиваются. Использование концентрации волокнистой массы, равной  $1,4\%$  при размоле до  $30^\circ\text{ШР}$  и концентрации  $2,4\%$  при размоле до  $70^\circ\text{ШР}$  ведет к незначительному повышению показателя грубости волокна.

При изменении конструкции гарнитуры (варианта установки колец (таблица 2.4)), а именно увеличении угла поворота концентрических колец 2 и 4 от  $0^\circ$  до  $45^\circ$ , наблюдается увеличение количественных значений показателя грубости волокна при данных степенях помола.

При размоле волокнистой массы до 50 °ШР изменение величины межножевого зазора и концентрации волокнистой массы не оказывает значительного влияния на количественные значения показателя грубости волокна (изменение показателя составляет от 1 до 2 %).

Изменение конструкции гарнитуры влияет на показатель грубости волокна следующим образом: при вариантах установки колец № 1 и № 3 количественные значения показателя грубости волокна близки друг к другу. При варианте установки колец № 2 значения показателя грубости волокна снижаются в пределах 5 %

Таким образом, для получения волокнистой массы с меньшими показателями грубости волокна при размоле волокнистой массы до 30 °ШР и 70 °ШР рекомендуется производить размол с использованием конструкции гарнитуры с вариантом установки колец № 1 при межножевом зазоре от 0,1 до 0,18 мм.

Причем при размоле до 50 °ШР конструкция гарнитуры, межножевой зазор и концентрация волокнистой массы влияют на изменение показателя грубости волокна незначительно, в результате чего имеется возможность производить размол на любой из предложенных конструкций гарнитур.

### **3.3.1.6 Водоудерживающая способность**

Поверхности отклика водоудерживающей способности  $W$  представлены на рисунке 3.10. При степени помола волокнистой массы 30 °ШР максимальные значения показателя водоудерживающей способности наблюдаются при величине межножевого зазора 0,15 мм и концентрации волокнистой массы 1,6 %.

При изменении конструкции гарнитуры (варианта установки колец (таблица 2.4)) максимальные значения показателя водоудерживающей способности наблюдаются при варианте установки колец № 1. При варианте установки колец № 3 значения данного показателя снижаются на 7 %. При варианте установки колец № 2 значения показателя водоудерживающей способности снижаются на 10 %.

При размоле до 50 °ШР величина межножевого зазора, равная 0,16 мм дает незначительный прирост показателя водоудерживающей способности.

Использование концентрации волокнистой массы, равной 1,5 % ведет к получению минимальных значений данного показателя. Причем, при дальнейшем уменьшении концентрации до 0,8 %, наблюдается повышение показателя водоудерживающей способности на 10 %, при увеличении концентрации до 3,2 % повышение данного показателя составляет 16 %.

Изменение конструкции гарнитуры (варианта установки колец (таблица 2.4)) в данном случае влияет на показатель водоудерживающей способности следующим образом: максимальные значения данного показателя наблюдаются при варианте установки колец № 1. При использовании конструкции гарнитуры с вариантом установки колец № 3 и № 2 наблюдается незначительное снижение показателя водоудерживающей способности.

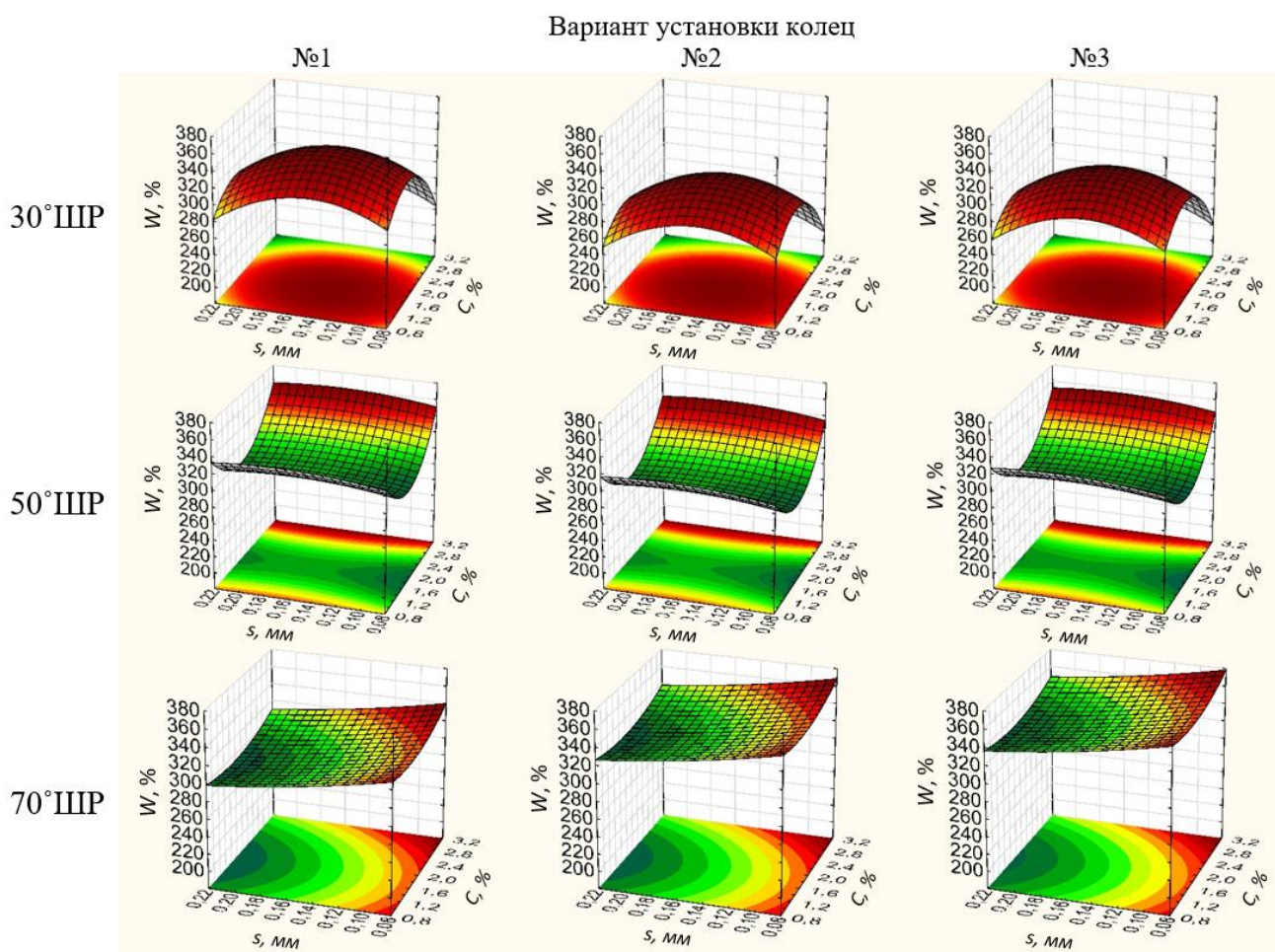


Рисунок 3.10 – Изменение водоудерживающей способности  $W$  при регулировании конструкции рабочих органов

При размоле до 70 °ШР уменьшение величины межножевого зазора от 0,22 до 0,08 мм ведет к повышению показателя водоудерживающей способности. Использование концентрации волокнистой массы, равной 1,5 % ведет к незначительному снижению показателя водоудерживающей способности.

При изменении конструкции гарнитуры (варианта установки колец (таблица 2.4)), а именно увеличении угла поворота концентрических колец 2 и 4 от 0° до 45°, наблюдается увеличение количественных значений показателя водоудерживающей способности.

### **3.3.2 Физико-механические показатели готовых бумажных отливок**

#### **3.3.2.1 Разрывная длина**

Важным фактором, определяющим прочность готовой бумаги, является показатель разрывной длины, который в большей степени зависит от межволоконных сил связи и прочности волокон нежели от длины волокон, их эластичности и гибкости [62].

Поверхности отклика разрывной длины  $L$  представлены на рисунке 3.11. Как видно из рисунка, при изменении конструкции гарнитуры (варианта установки колец (таблица 2.4)), а именно увеличении угла поворота концентрических колец 2 и 4 от 0° до 45°, наблюдается повышение показателя разрывной длины при всех степенях помола.

При приросте степени помола до 30 °ШР увеличение величины межножевого зазора от 0,08 до 0,22 мм ведет к повышению показателя разрывной длины. Изменение концентрации волокнистой массы не оказывает значительного влияния на данный показатель.

При изменении конструкции гарнитуры (варианта установки колец (таблица 2.4)) максимальное значение показателя разрывной длины наблюдается при варианте установки колец № 3 и составляет 4800 м.

При использовании гарнитуры с вариантом установки колец № 2 данный показатель снижается на 2 %, и составляет 4700 м. При использовании гарнитуры с вариантом установки колец № 1 показатель разрывной длины снижается на 12,5 % и составляет 4200 м.

При размоле до  $50^\circ\text{ШР}$  увеличение зазора от 0,08 до 0,22 мм ведет к повышению показателя разрывной длины. При увеличении концентрации от 0,8 до 1,6 % наблюдается увеличение показателя разрывной длины, причем при дальнейшем увеличении концентрации до 3,2 % наблюдается снижение данного показателя.

При изменении конструкции гарнитуры (варианта установки колец (таблица 2.4)) максимальное значение показателя разрывной длины наблюдается при варианте установки колец № 3 и составляет 5300 м. При использовании варианта установки колец № 2 значение данного показателя снижается на 3,7 % и составляет 5100 м. При использовании варианта установки колец № 1 значение показателя разрывной длины снижается на 7,5 % и составляет 4900 м.

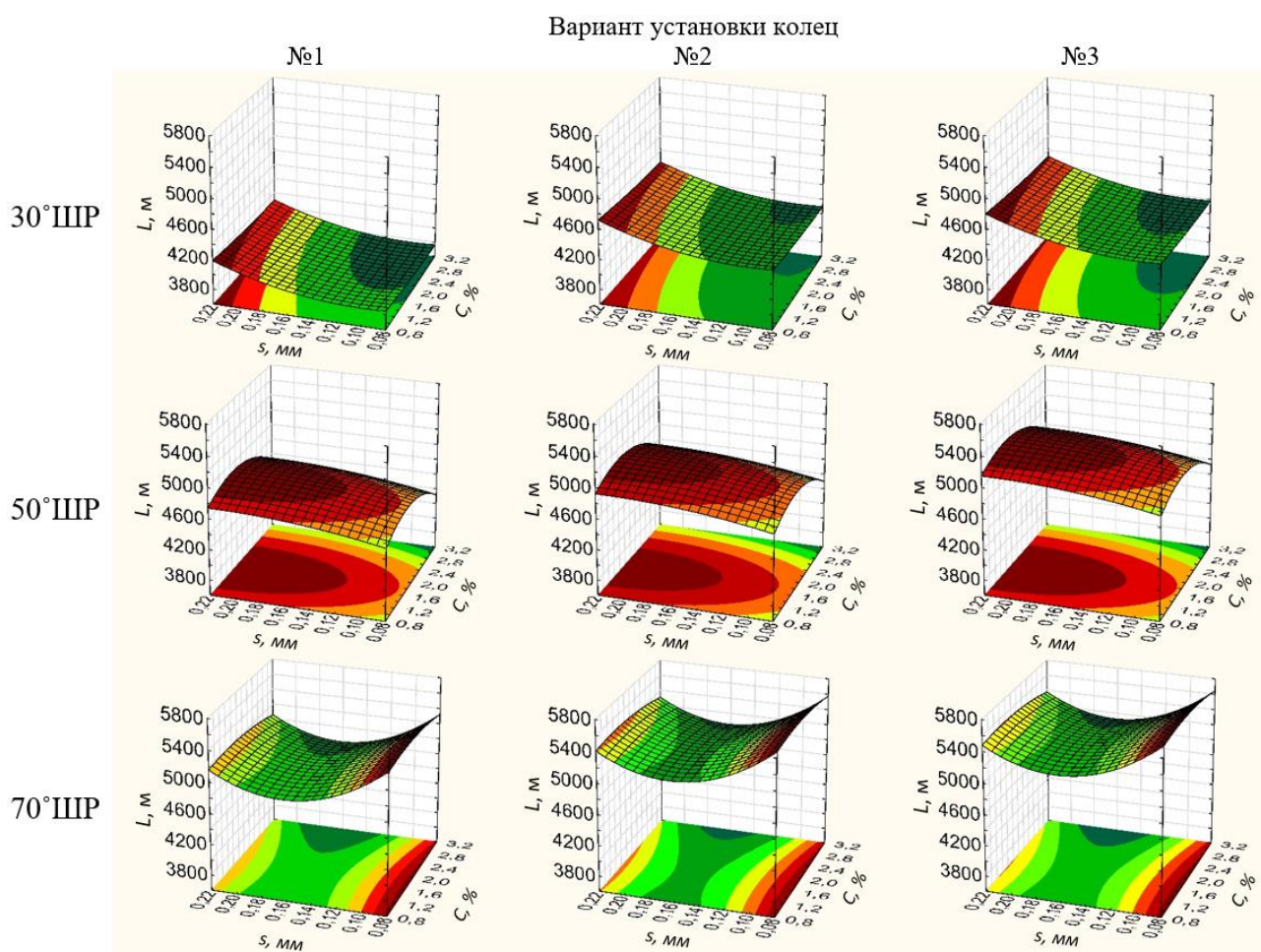


Рисунок 3.11 – Изменение разрывной длины  $L$  при регулировании конструкции рабочих органов

При приросте степени помола до 70 °ШР повышение показателя разрывной длины наблюдается при уменьшении величины межножевого зазора от 0,16 до 0,08 мм и при его увеличении от 0,16 до 0,22 мм. Концентрация волокнистой массы в данном случае не оказывает значительного влияния на изменение показателя разрывной длины.

При изменении конструкции гарнитуры (варианта установки колец (таблица 2.4)) максимальное значение показателя разрывной длины наблюдается при варианте установки колец № 3 и составляет 5800 м. При использовании варианта установки колец № 2 значение данного показателя снижается на 1,7 % и составляет 5700 м. При использовании варианта установки колец № 1 значение показателя разрывной длины снижается на 6,8 % и составляет 5400 м.

### **3.3.2.2 Сопротивление продавливанию**

Поверхности отклика показателя сопротивления продавливанию  $P_a$  представлены на рисунке 3.12. Как видно из рисунка, при приросте степени помола до 30 °ШР и 50 °ШР увеличение величины межножевого зазора от 0,08 до 0,22 мм и уменьшение концентрации волокнистой массы от 3,2 до 0,8 % ведет к повышению показателя сопротивления продавливанию.

При изменении конструкции гарнитуры (варианта установки колец (таблица 2.4)) при приросте степени помола волокнистой массы 30 °ШР максимальное значение показателя сопротивления продавливанию наблюдается при варианте установки колец № 1 и составляет 255 кПа. При варианте установки колец № 3 значение показателя снижается на 7,8 % и равно 235 кПа. При варианте установки колец № 2 снижение показателя составляет 13,7 % и равно 220 кПа.

При приросте степени помола волокнистой массы 50 °ШР максимальное значение показателя сопротивления продавливанию наблюдается при варианте установки колец № 1 и составляет 290 кПа. При варианте установки колец № 3 значение показателя снижается на 14 % и равно 250 кПа. При варианте установки колец № 2 снижение показателя составляет 17 % и равно 240 кПа.

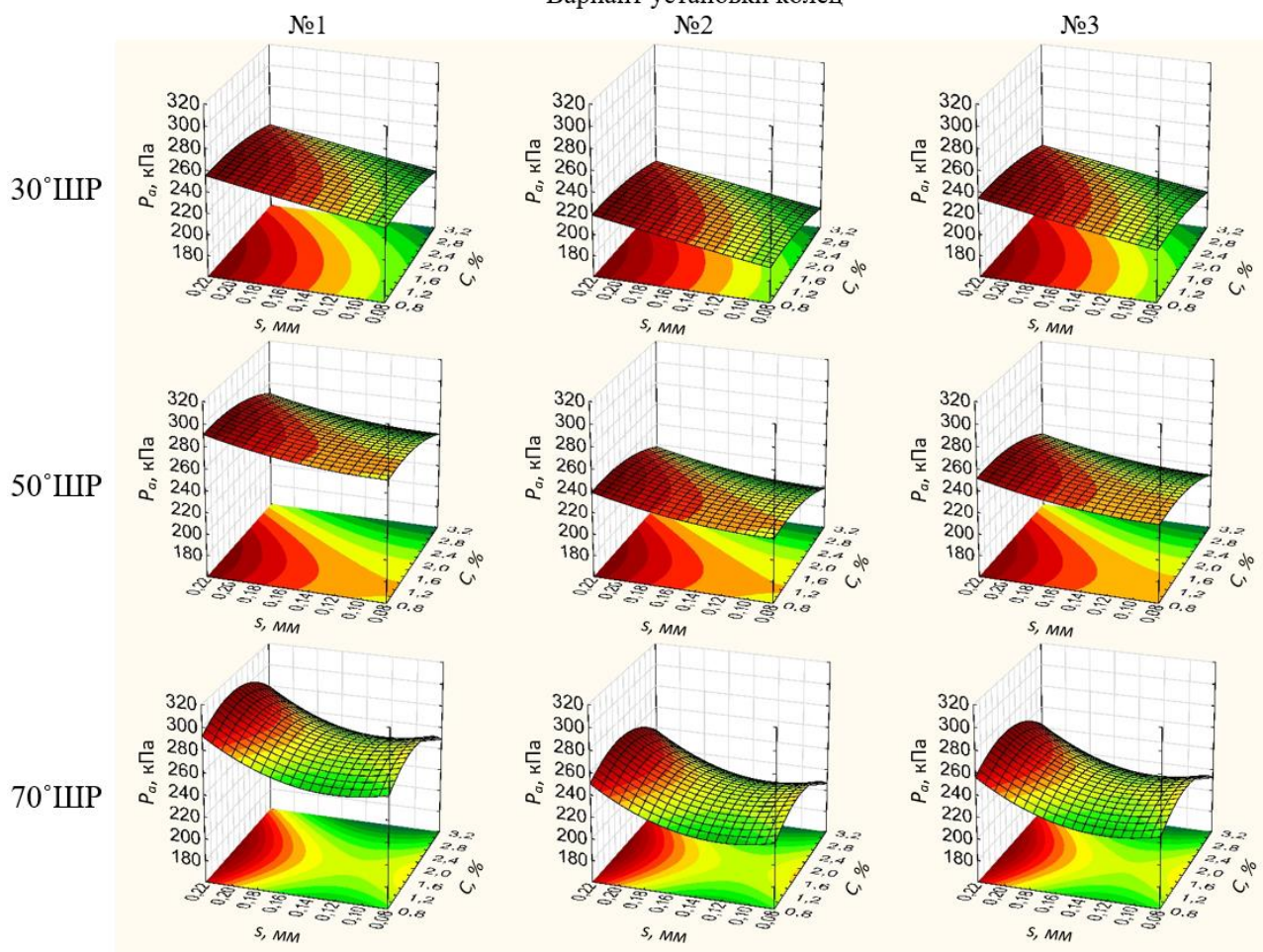


Рисунок 3.12 – Изменение сопротивления продавливанию  $P_{\sigma}$  при регулировании конструкции рабочих органов

При приросте степени помола до 70 °ШР увеличение межножевого зазора от 0,08 до 0,22 мм и концентрации волокнистой массы от 0,8 до 2 % ведет к повышению показателя сопротивления продавливанию. При этом дальнейшее увеличение концентрации волокнистой массы от 2 до 3,2 % приводит к снижению данного показателя.

При изменении конструкции гарнитуры (варианта установки колец (таблица 2.4)) при приросте степени помола волокнистой массы 70 °ШР максимальное значение показателя сопротивления продавливанию наблюдается при варианте установки колец № 1 и составляет 305 кПа. При варианте установки колец № 3 значение показателя снижается на 11,5 % и равно 270 кПа. При варианте установки колец № 2 снижение показателя составляет 13 % и равно 265 кПа.

### 3.3.2.3 Сопротивление излому

Поверхности отклика показателя сопротивления излому  $U$  представлены на рисунке 3.13. Как видно из рисунка, при изменении конструкции гарнитуры (варианта установки колец (таблица 2.4)), а именно увеличении угла поворота концентрических колец 2 и 4 от  $0^\circ$  до  $45^\circ$ , наблюдается снижение показателя сопротивления излому при всех степенях помола.

При приросте степени помола до  $30^\circ$  ШР увеличение величины межножевого зазора от 0,08 до 0,18 мм ведет к повышению показателя сопротивления излому, дальнейшее повышение межножевого зазора до 0,22 мм приводит к снижению данного показателя. Концентрация волокнистой массы в данном случае не оказывает значительного влияния на изменение данного показателя.

При изменении конструкции гарнитуры (варианта установки колец (таблица 2.4)) максимальное значение показателя сопротивления излому наблюдается при варианте установки колец № 1 и составляет 2600 перегибов. При использовании гарнитуры с вариантом установки колец № 2 данный показатель снижается на 43 %, и составляет 1500 перегибов. При использовании гарнитуры с вариантом установки колец № 3 показатель сопротивления излому снижается на 60 % и составляет 1050 перегибов.

При приросте степени помола до  $50^\circ$  ШР увеличение величины межножевого зазора от 0,08 до 0,22 мм и снижение концентрации волокнистой массы от 3,2 до 0,08 % ведет к повышению показателя сопротивления излому.

При изменении конструкции гарнитуры (варианта установки колец (таблица 2.4)) максимальное значение показателя сопротивления излому наблюдается при варианте установки колец № 1 и составляет 4300 перегибов. При использовании гарнитуры с вариантом установки колец № 2 данный показатель снижается на 40 %, и составляет 2600 перегибов. При использовании гарнитуры с вариантом установки колец № 3 показатель сопротивления излому снижается на 60 % и составляет 1700 перегибов.

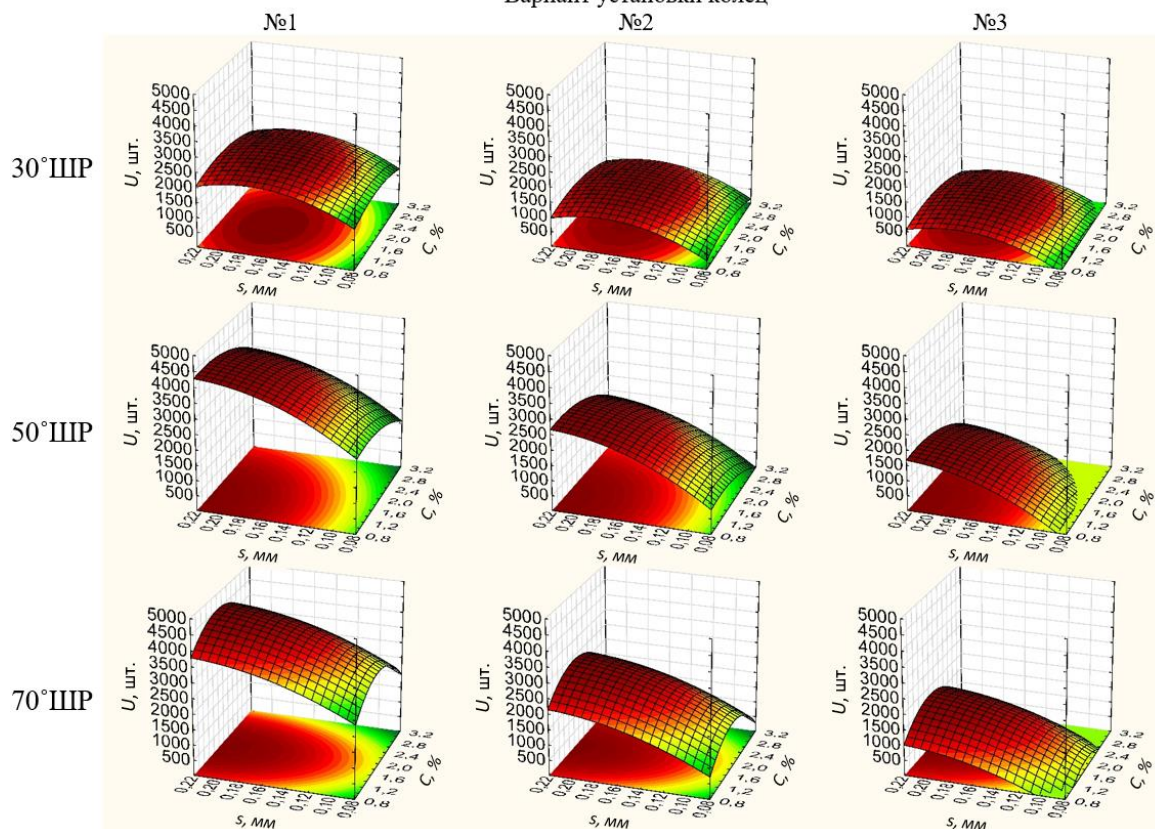


Рисунок 3.13 – Изменение сопротивления излому  $U$  при регулировании конструкции рабочих органов

При приросте степени помола до 70 °ШР увеличение величины межножевого зазора от 0,08 до 0,22 мм ведет к повышению показателя сопротивления излому. При увеличении концентрации от 0,8 до 1,8 % наблюдается увеличение показателя сопротивления излому, причем при дальнейшем увеличении концентрации до 3,2 % наблюдается снижение данного показателя.

При изменении конструкции гарнитуры (варианта установки колец (таблица 2.4)) максимальное значение показателя сопротивления излому наблюдается при варианте установки колец № 1 и составляет 4500 перегибов. При использовании гарнитуры с вариантом установки колец № 2 данный показатель снижается на 36 %, и составляет 2850 перегибов. При использовании гарнитуры с вариантом установки колец № 3 показатель сопротивления излому снижается на 62 % и составляет 1700 перегибов.

### 3.3.2.4 Сопротивление раздиранию

Поверхности отклика показателя сопротивления раздиранию  $E$  представлены на рисунке 3.14. Как видно из рисунка, увеличение величины межножевого зазора

от 0,08 до 0,22 мм и концентрации волокнистой массы от 0,8 до 1,8 % ведет к повышению показателя сопротивления раздиранию для всех степеней помола. При этом дальнейшее увеличение концентрации волокнистой массы до 3,2 % приводит к снижению данного показателя.

При изменении конструкции гарнитуры (варианта установки колец (таблица 2.4)) при приросте степени помола волокнистой массы 30 °ШР максимальное значение показателя сопротивления раздиранию наблюдается при варианте установки колец № 1 и составляет 1100 мН. При варианте установки колец № 2 значение показателя сопротивления раздиранию снижается на 26 % и равно 700 мН. При варианте установки колец № 3 снижение данного показателя составляет 39 % и равно 670 мН.

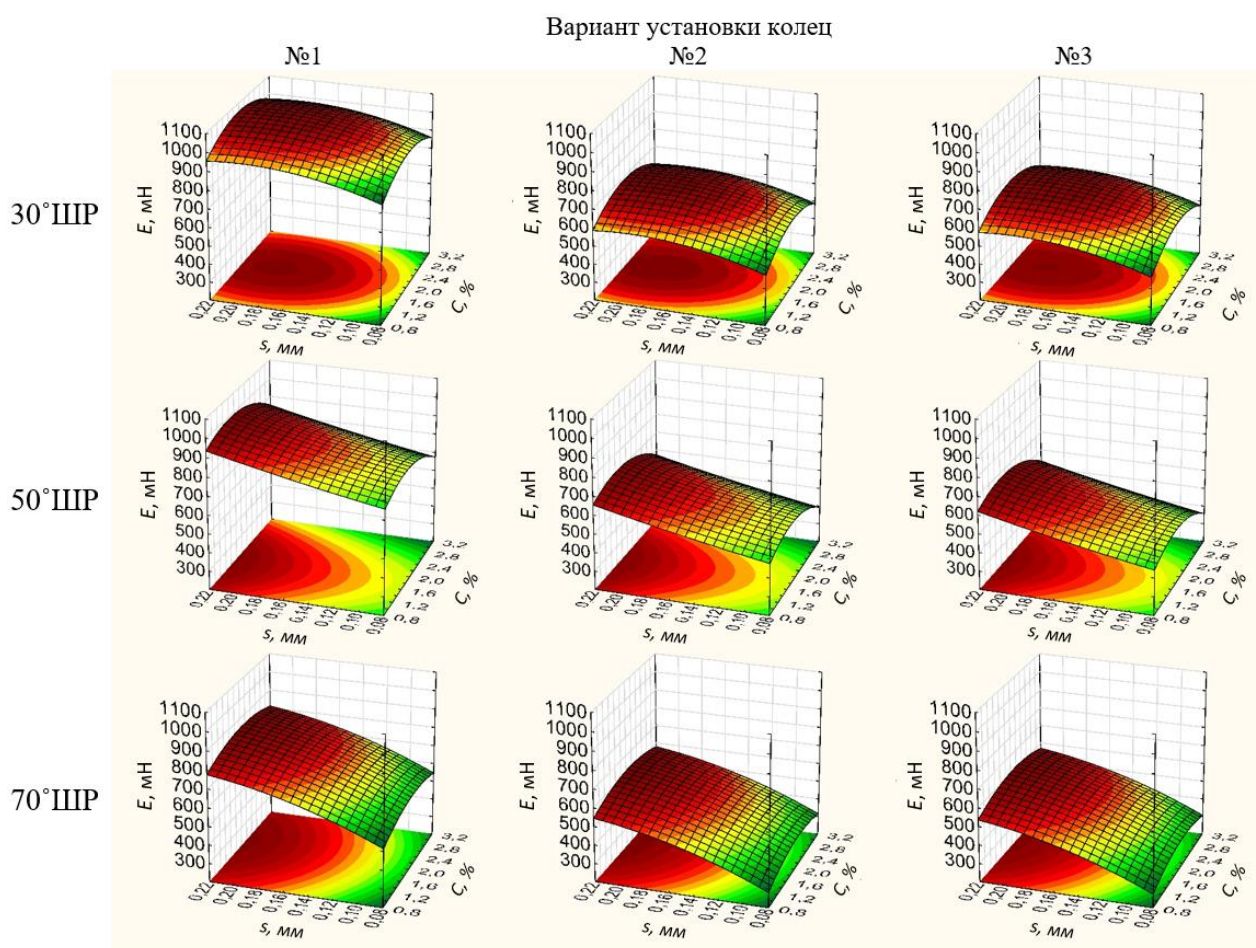


Рисунок 3.14 – Изменение сопротивления раздиранию  $E$  при регулировании конструкции рабочих органов

При изменении конструкции гарнитуры (варианта установки колец (таблица 2.4)) при приросте степени помола волокнистой массы 50 °ШР максимальное значение показателя сопротивления раздиранию наблюдается при варианте установки колец № 1 и составляет 1000 мН. При варианте установки колец № 2 значение показателя сопротивления раздиранию снижается на 30 % и равно 700 мН. При варианте установки колец № 3 снижение данного показателя составляет 35 % и равно 650 мН.

При изменении конструкции гарнитуры (варианта установки колец (таблица 2.4)) при приросте степени помола волокнистой массы 70 °ШР максимальное значение показателя сопротивления раздиранию наблюдается при варианте установки колец № 1 и составляет 850 мН. При варианте установки колец № 2 значение показателя сопротивления раздиранию снижается на 27 % и равно 620 мН. При варианте установки колец № 3 снижение данного показателя составляет 30 % и равно 600 мН.

Таким образом, анализ влияния конструкции комбинированной гарнитуры дисковой мельницы на бумагообразующие свойства волокнистых полуфабрикатов и физико-механические характеристики готовых бумажных отливок подтверждает предположение, приведенное в пункте 2.4, о влиянии изменения рисунка ножевой размалывающей поверхности комбинированной гарнитуры на процесс размола.

### **3.4 Кластерный и факторный анализ выходных параметров эксперимента**

При проведении регрессионного анализа процесса размола волокнистого полуфабриката с использованием комбинированной конструкции гарнитуры было исследовано влияние факторов процесса размола на выходные параметры. Однако существуют латентные (скрытые) свойства полуфабриката, которые в ходе проводимого эксперимента не определялись, но варьирование которых влияет на значения выходных параметров. В связи с этим целесообразно проведение

кластерного и факторного анализа выходных параметров размола для выявления числа и природы этих факторов.

Для проведения анализа были выделены основные выходные параметры эксперимента (таблица 3.6), входные параметры размола представлены в таблице 3.5, в ходе эксперимента было проведено 45 наблюдений.

Таблица 3.6 – Исследуемые выходные параметры процесса размола

| Параметр                         | Обозначение |                 |
|----------------------------------|-------------|-----------------|
|                                  | натуральное | нормализованное |
| Средняя длина волокна, мм        | $L_i$       | $Y_1$           |
| Средняя ширина волокна, мкм      | $z$         | $Y_2$           |
| Индекс фибрилляции, %            | $Fib$       | $Y_3$           |
| Грубость волокна, мг/м           | $K$         | $Y_4$           |
| Водоудерживающая способность, %  | $W$         | $Y_5$           |
| Сопротивление излому, шт.        | $U$         | $Y_6$           |
| Разрывная длина, м               | $L$         | $Y_7$           |
| Сопротивление продавливанию, кПа | $P_a$       | $Y_8$           |
| Сопротивление раздиранию, мН     | $E$         | $Y_9$           |

При помощи программного продукта *Statgraphics Centurion v18* была проведена математическая обработка результатов исследования, в ходе которой получены статистические характеристики выходных параметров, выполнены корреляционный, кластерный и факторный анализ. Сводные статистические данные выходных параметров представлены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Сводные статистические характеристики выходных параметров

| Характеристики          | Выходные параметры |       |       |        |        |         |         |        |        |
|-------------------------|--------------------|-------|-------|--------|--------|---------|---------|--------|--------|
|                         | $Y_1$              | $Y_2$ | $Y_3$ | $Y_4$  | $Y_5$  | $Y_6$   | $Y_7$   | $Y_8$  | $Y_9$  |
| Количество наблюдений   | 45                 | 45    | 45    | 45     | 45     | 45      | 45      | 45     | 45     |
| Максимальное значение   | 1441               | 32,1  | 2,947 | 0,4346 | 392,3  | 5622    | 5565    | 289    | 1048   |
| Минимальное значение    | 787                | 26,8  | 1,219 | 0,1898 | 143,8  | 344     | 3640    | 189    | 400    |
| Среднее значение        | 1070,84            | 29,93 | 2,12  | 0,29   | 310,31 | 1757,58 | 4782,16 | 234,07 | 646,40 |
| Стандартное отклонение  | 165,97             | 1,17  | 0,42  | 0,04   | 44,54  | 1317,54 | 494,46  | 26,27  | 180,94 |
| Коэффициент вариации, % | 15,50              | 3,92  | 19,84 | 12,99  | 14,35  | 74,96   | 10,34   | 11,22  | 27,99  |

Матрица корреляции выходных параметров представлена в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Матрица корреляции выходных параметров

|       | $Y_1$  | $Y_2$  | $Y_3$  | $Y_4$  | $Y_5$  | $Y_6$  | $Y_7$  | $Y_8$  | $Y_9$  |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $Y_1$ | 1      | -0,481 | -0,812 | -0,184 | -0,445 | 0,306  | -0,779 | 0,139  | 0,841  |
| $Y_2$ | -0,481 | 1      | 0,369  | 0,450  | 0,141  | -0,660 | 0,252  | -0,522 | -0,598 |
| $Y_3$ | -0,812 | 0,369  | 1      | 0,300  | 0,456  | -0,085 | 0,768  | 0,284  | -0,552 |
| $Y_4$ | -0,184 | 0,450  | 0,300  | 1      | 0,173  | -0,407 | 0,191  | -0,159 | -0,205 |
| $Y_5$ | -0,445 | 0,141  | 0,456  | 0,173  | 1      | -0,134 | 0,352  | 0,078  | -0,259 |
| $Y_6$ | 0,306  | -0,660 | -0,085 | -0,407 | -0,134 | 1      | -0,106 | 0,728  | 0,612  |
| $Y_7$ | -0,779 | 0,252  | 0,768  | 0,191  | 0,352  | -0,106 | 1      | 0,146  | -0,703 |
| $Y_8$ | 0,139  | -0,522 | 0,284  | -0,159 | 0,078  | 0,728  | 0,146  | 1      | 0,473  |
| $Y_9$ | 0,841  | -0,598 | -0,552 | -0,205 | -0,259 | 0,612  | -0,703 | 0,473  | 1      |

Установлено, что между некоторыми парами выходных параметров существуют статистически значимые коэффициенты корреляции, что свидетельствует о наличии латентных факторов, число которых меньше числа наблюдаемых переменных. Стоит отметить, что варьирование данных факторов в результате эксперимента приводит к изменению рассматриваемых выходных параметров.

Для изучения структуры корреляционных связей между выходными параметрами размола был выполнен кластерный анализ.

Задача кластерного анализа заключается в том, чтобы на основании данных, содержащихся во множестве  $X$ , разбить множество объектов  $G$  на  $m$  ( $m$  – целое) кластеров (подмножеств)  $Q_1, Q_2, \dots, Q_m$ , так, чтобы каждый объект  $G_j$  принадлежал одному и только одному подмножеству разбиения. А объекты, принадлежащие одному и тому же кластеру, были сходными, в то время как объекты, принадлежащие разным кластерам, были разнородными [4, с. 7].

Решением задачи кластерного анализа являются разбиения, удовлетворяющие некоторому критерию оптимальности. Этот критерий может представлять собой некоторый функционал, выражающий уровни желательности различных разбиений и группировок, который называют целевой функцией. Например, в качестве целевой функции может быть взята внутригрупповая сумма квадратов отклонения [4, с.7]:

$$W = \sigma_n = \sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2 = \sum_{j=1}^n x_j^2 - \frac{1}{n} \left( \sum_{j=1}^n x_j \right)^2, \quad (3.2)$$

где  $x_j$  – представляет собой измерения  $j$ -го объекта.

Кластерный анализ выполнен методом Варда (*Ward's method*) с использованием нормализованных значений переменных (свойств) и квадрата «евклидова расстояния» (*Squared Euclidean distance*) в качестве метрики [50].

Дендрограмма классификации выходных параметров представлена на рисунке 3.15.

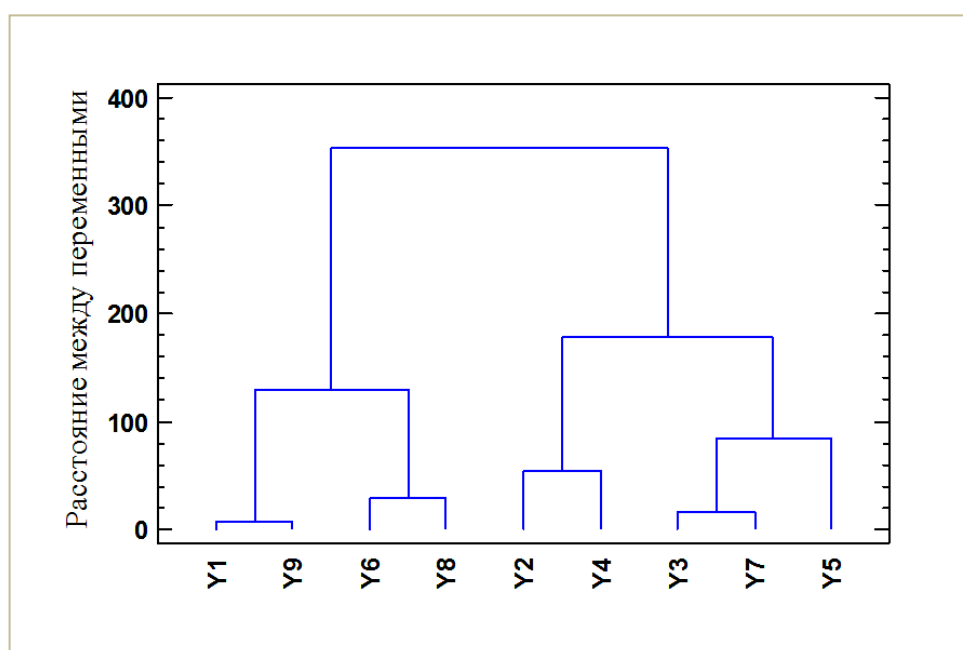


Рисунок 3.15 – Дендрограмма классификации выходных параметров

Согласно данным, представленным на дендрограмме, рассматриваемые выходные параметры можно разделить на два кластера. В первом кластере сгруппировались такие выходные параметры, как средняя длина волокна ( $Y_1$ ), показатель сопротивления излому ( $Y_6$ ), показатель сопротивления продавливанию ( $Y_8$ ) и показатель сопротивления раздиранию ( $Y_9$ ).

Во втором кластере выделяются следующие выходные параметры: средняя ширина волокна ( $Y_2$ ), индекс фибрилляции ( $Y_3$ ), грубость волокна ( $Y_4$ ), водоудерживающая способность ( $Y_5$ ) и показатель разрывной длины ( $Y_7$ ).

Для выявления латентных факторов, влияющих на процесс размола волокнистого полуфабриката, опираясь на исследования авторов [52, 53], необходимо провести факторный анализ выходных параметров процесса размола с использованием комбинированной гарнитуры дисковой мельницы.

Факторный анализ – это статистический метод, используемый для выявления структурных взаимосвязей между множеством переменных и уменьшения размерности данных. Он позволяет исследовать, как связи между несколькими переменными могут быть объяснены меньшим числом скрытых факторов. Факторный анализ устанавливает корреляционные связи между выходными параметрами методом выделения скрытых факторов [52].

Модель факторного анализа записывается следующей системой равенств [23]:

$$x_i = \sum_{j=1}^m l_{ij} f_j + \varepsilon_i; i = \overline{1, p}; m \leq p. \quad (3.3)$$

Значения каждого параметра  $x_i$  могут быть выражены суммой простых факторов  $f_j$  с остаточным членом  $\varepsilon_i$  с дисперсией  $\sigma^2(\varepsilon_i)$ , действующей только на  $x_i$ , который называют специфическим фактором.

Факторы  $f_i$  считаются взаимно независимыми и их дисперсии равны единице, а случайные величины  $\varepsilon_i$  тоже независимы друг от друга и от какого-либо фактора  $f_j$ . Максимально возможное количество факторов  $m$  при заданном числе признаков  $p$  определяется неравенством, получающимся на основании подсчёта степеней свободы, имеющих в задаче:

$$(p + m) \leq (p - m)^2, \quad (3.4)$$

данное неравенство должно выполняться, чтобы задача не вырождалась в тривиальную [35].

Сумму квадратов нагрузок в выражении (3.3) называют общностью соответствующего признака  $x_i$  и, чем больше это значение, тем лучше описывается признак  $x_i$  факторами  $f_j$ . В свою очередь,  $\varepsilon_i^2$  показывает, какая часть дисперсии исходного признака остается необъясненной (специфичный фактор,

соответствующий только одной определенной переменной и дисперсии, обусловленной ошибкой) при используемом наборе факторов, данную величину называют характерностью признака. Следовательно:

$$\text{дисперсия признака} = \text{общность} \sum_{j=1}^m l_{ij}^2 + \text{характерность} \varepsilon_i^2. \quad (3.5)$$

Основное соотношение факторного анализа показывает, что коэффициент корреляции любых двух признаков  $x_i$  и  $x_j$  можно выразить суммой произведения нагрузок некоррелированных факторов:

$$r_{ij} = r(x_i, x_j) = l_{i1}l_{j1} + l_{i2}l_{j2} + l_{im}l_{jm}. \quad (3.6)$$

Для выделения факторов необходимо составить матрицы коэффициентов корреляции для перехода от редуцированной матрицы корреляций к редуцированной факторной матрице, позволяющей определить необходимое количество факторов для отражения всех корреляций между переменными, а также величину нагрузок каждого фактора для разных переменных.

Задачу факторного анализа нельзя решить однозначно. Равенства (3.3) не поддаются непосредственной проверке, так как  $p$  исходных признаков задается через  $(p+m)$  других переменных – простых и специфических факторов.

Поэтому представление корреляционной матрицы факторами (факторизацию) можно произвести бесконечно большим числом способов.

Если удалось произвести факторизацию корреляционной матрицы с помощью некоторой матрицы факторных нагрузок  $F$ , то любое линейное ортогональное преобразование  $F$  (ортогональное вращение) приведет к такой же факторизации [21].

Существующие программы вычисления нагрузок начинают работать с однофакторной модели, где  $m = 1$ , после чего проверяется отличие корреляционной матрицы, восстановленной по однофакторной модели, от корреляционной матрицы исходных данных. Если однофакторная модель признается неудовлетворительной, то испытывается модель с  $m = 2$  и так далее до тех пор, пока при некотором  $m$  не будет достигнута адекватность или число

факторов в модели не превысит максимально допустимое, при котором адекватной модели факторного анализа не существует [21].

Факторный анализ результатов выполнен методом главных компонент (*Principal Components Analysis*), при котором определяется минимальное количество факторов, вносящих наибольший вклад в дисперсию данных.

График собственных чисел факторов представлен на рисунке 3.16, горизонтальная линия является границей между наиболее значимыми факторами. Все факторы, находящиеся над данной линией и имеющие собственные числа больше единицы, сохраняются для дальнейшего анализа.

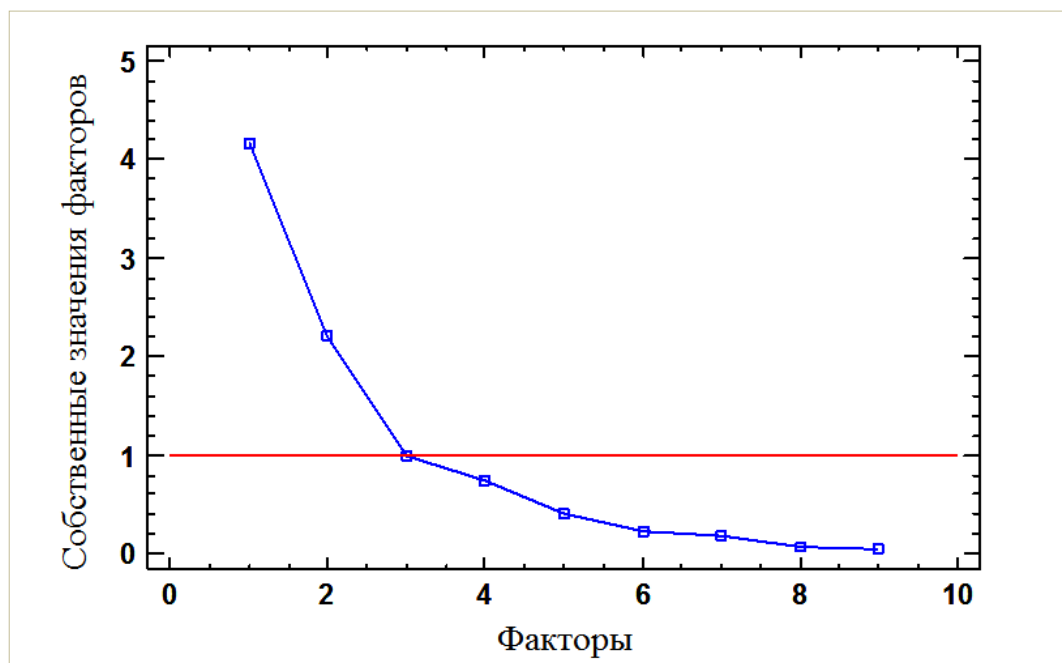


Рисунок 3.16 – График собственных чисел факторов

Как видно из рисунка 3.16 и количественных значений собственных чисел, представленных в таблице 3.9, существенную часть суммарной дисперсии рассматриваемых показателей определяют два латентных фактора.

Статистическая значимость с доверительной вероятностью не менее 95 % установлена для двух латентных факторов, ответственных за 70,78 % суммарной дисперсии всех девяти выходных параметров, в том числе на долю первого фактора приходится 46,28 % этой дисперсии, на долю второго – 24,50 %.

Таблица 3.9 – Собственные числа и доли дисперсии факторов

| Номер фактора | Собственные числа | Доля дисперсии, % | Доля суммарной дисперсии, % |
|---------------|-------------------|-------------------|-----------------------------|
| 1             | 4,16              | 46,28             | 46,28                       |
| 2             | 2,21              | 24,50             | 70,78                       |
| 3             | 0,98              | 10,92             | 81,70                       |
| 4             | 0,75              | 8,30              | 90,00                       |
| 5             | 0,40              | 4,41              | 94,41                       |
| 6             | 0,23              | 2,51              | 96,92                       |
| 7             | 0,18              | 1,98              | 98,90                       |
| 8             | 0,06              | 0,68              | 99,58                       |
| 9             | 0,04              | 0,42              | 100,00                      |

Для ортогонального преобразования факторных нагрузок использован критерий *Varimax Rotation*, предназначенный для максимизации дисперсий квадратов исходных факторных нагрузок по переменным для каждого фактора.

Факторные нагрузки представляют собой коэффициенты корреляции между переменными и факторами [4, с. 24]. Значения факторных нагрузок для двухфакторной модели представлены в таблице 3.10.

Таблица 3.10 – Факторные нагрузки для двухфакторной модели

| Выходные параметры |                                  | Факторные нагрузки |          | Предполагаемая общность |
|--------------------|----------------------------------|--------------------|----------|-------------------------|
|                    |                                  | Фактор 1           | Фактор 2 |                         |
| $Y_1$              | Средняя длина волокна, мм        | -0,874             | 0,337    | 0,877                   |
| $Y_2$              | Средняя ширина волокна, мкм      | 0,288              | -0,793   | 0,713                   |
| $Y_3$              | Индекс фибрилляции, %            | 0,936              | -0,029   | 0,877                   |
| $Y_4$              | Грубость волокна, мг/м           | 0,220              | -0,446   | 0,247                   |
| $Y_5$              | Водоудерживающая способность, %  | 0,578              | -0,024   | 0,334                   |
| $Y_6$              | Сопротивление излому, шт.        | - 0,051            | 0,915    | 0,839                   |
| $Y_7$              | Разрывная длина, м               | 0,896              | -0,074   | 0,808                   |
| $Y_8$              | Сопротивление продавливанию, кПа | 0,266              | 0,879    | 0,843                   |
| $Y_9$              | Сопротивление раздиранию, мН     | -0,641             | 0,650    | 0,833                   |

Согласно данным, представленным в таблице 3.10, рассматриваемые выходные параметры, в числе которых средняя длина волокна ( $Y_1$ ), показатель сопротивления излому ( $Y_6$ ), показатель сопротивления продавливанию ( $Y_8$ ) и

показатель сопротивления раздиранию ( $Y_9$ ) имеют наибольшую корреляцию с фактором 2. Выходные параметры, в числе которых средняя ширина волокна ( $Y_2$ ), индекс фибрилляции ( $Y_3$ ), грубость волокна ( $Y_4$ ), водоудерживающая способность ( $Y_5$ ) и показатель разрывной длины ( $Y_7$ ) сильнее всего коррелируют с фактором 1.

Из распределения выходных параметров в двумерном факторном пространстве, представленном на рисунке 3.17, видно, что данные параметры разделились на две группы, которые соответствуют распределению факторных нагрузок, рассмотренных выше.

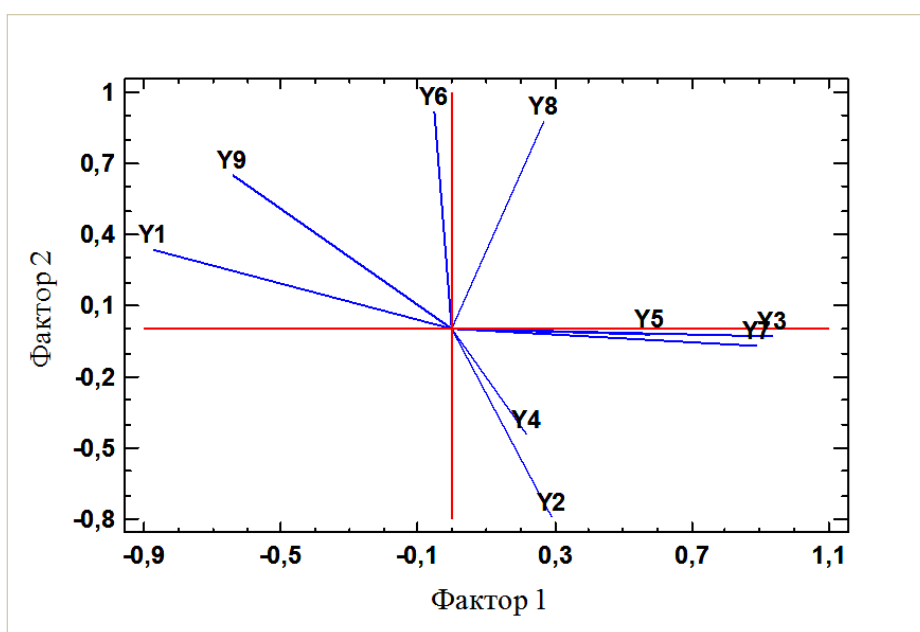


Рисунок 3.17 – Распределение выходных параметров в двумерном факторном пространстве

Как и следовало ожидать, результаты кластерного и факторного анализа при сравнении совпадают, что подтверждает надежность группировки (классификации) наблюдаемых выходных параметров.

Анализируя совокупность данных, полученных при кластерном и факторном анализе, можно отметить степень влияния каждого латентного фактора на отдельные выделенные кластеры.

Выходные параметры, сгруппированные в первый кластер, расположились на положительной части координатной оси второго фактора (рисунок 3.17). Можно предположить, что природа данного латентного фактора отождествлена с длиной и

прочностью волокон, что подтверждается научными изысканиями Д. М. Флятте, из которых следует, что такие показатели, как сопротивление бумаги излому, раздиранию и продавливанию в значительной степени зависят от длины волокон и их прочности [62, с. 299].

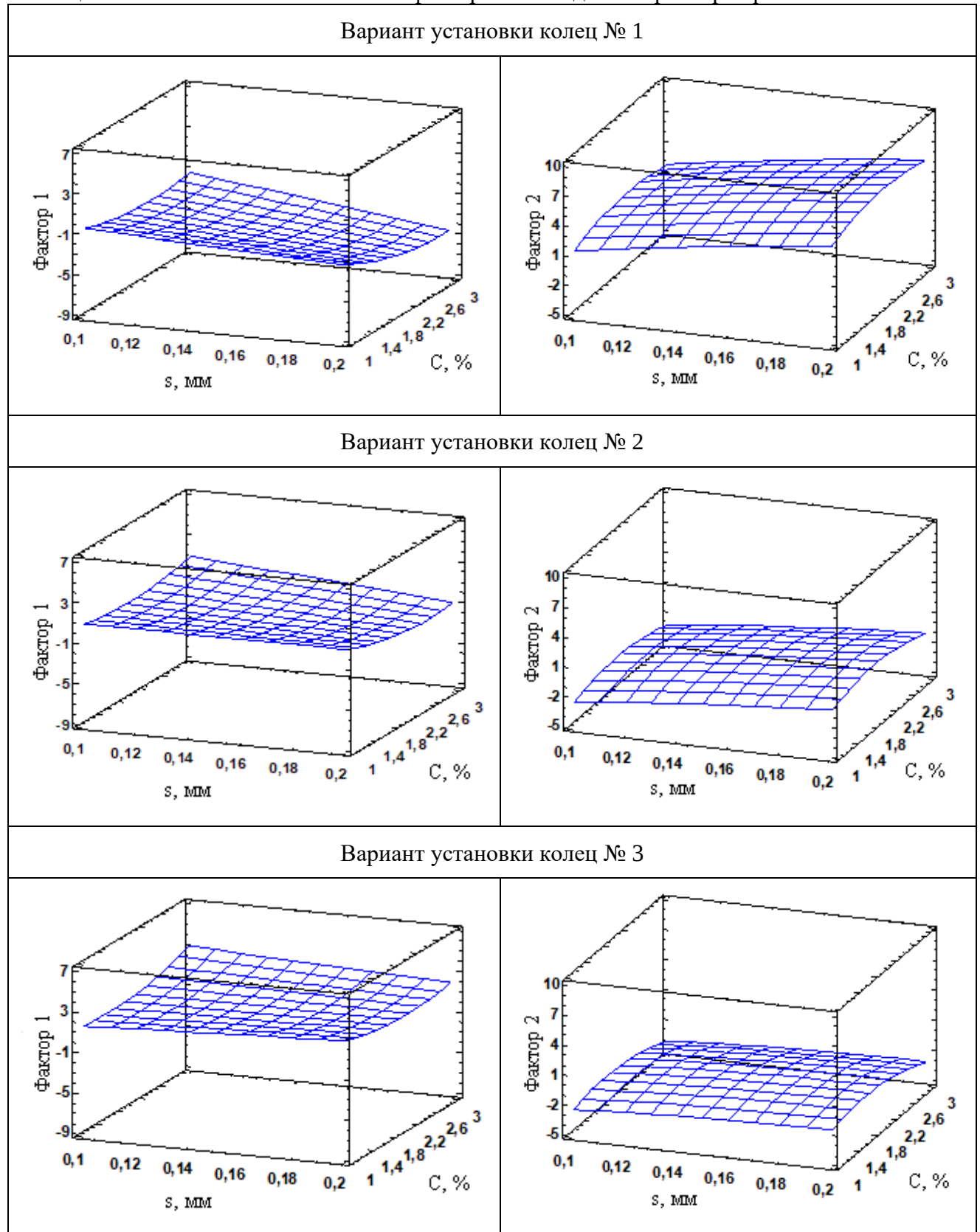
Выходные параметры, сгруппированные во втором кластере, расположены на положительной части координатной оси первого латентного фактора. Предположительно, природа данного фактора может быть связана со степенью внешней разработанности волокон, а именно с их фибрилляцией и гибкостью, вследствие чего возрастает количество контактов (связей) между волокнами [62, с. 303].

Д. М. Флятте отмечает, что показатель разрывной длины «...в большей степени зависит от сил сцепления между волокнами и прочности самих волокон, чем от их длины» [62, с. 299]. Стоит отметить, что положительная корреляция с первым латентным фактором наблюдается также для показателя сопротивления продавливанию, находящегося в первом кластере, величина которого в некоторой степени зависит от межволоконных сил связи [62, с. 326].

По результатам кластерного и факторного анализа процесса размола волокнистого полуфабриката с использованием комбинированной гарнитуры дисковой мельницы условно можно разделить выходные параметры размола на две группы, определяемые длиной волокон и степенью их внешней разработанности, которые влияют на прочностные характеристики готового бумажного продукта.

Выявленные в процессе кластерного и факторного анализа латентные факторы, влияющие на выходные параметры размола, в свою очередь зависят от входных параметров размола (зазора между ножами ротора и статора, концентрации волокнистой массы и конструкции гарнитуры). Для определения зависимости между латентными факторами и выходными параметрами размола были построены поверхности откликов (таблица 3.11).

Таблица 3.11 – Зависимости латентных факторов от входных параметров размола



Из представленных зависимостей видно, что количественные значения первого латентного фактора, природа которого отождествлена со степенью

внешней разработанности волокон, повышаются при увеличении угла поворота концентрических колец 2 и 4 от  $0^\circ$  до  $45^\circ$ , что согласуется с результатами, полученными при рассмотрении показателя индекса фибрилляции в пункте 3.3.1.4, где максимальные значения данного показателя достигаются при варианте установки колец № 3.

С увеличением концентрации волокнистой массы от 1 до 3 % наблюдается незначительный прирост количественных значений данного фактора, при этом величина зазора не оказывает значительного влияния на количественные показатели первого латентного фактора, что может быть связано с различным влиянием входных параметров размола на рассматриваемые показатели ширины волокна, индекса фибрилляции, грубости волокна, водоудерживающей способности и разрывной длины, рассматриваемых при данном анализе в совокупности.

Количественные значения второго латентного фактора, природа которого отождествлена с длиной и прочностью волокон, повышаются при уменьшении угла поворота концентрических колец 2 и 4 от  $45^\circ$  до  $0^\circ$ , что согласуется с результатами, полученными при рассмотрении показателя средней длины волокна в пункте 3.3.1.2, где максимальные значения данного показателя достигаются при варианте установки колец № 1.

С увеличением величины зазора между ножами ротора и статора от 0,1 до 0,2 мм наблюдается повышение количественных значений второго латентного фактора, при этом влияние концентрации волокнистой массы на данный фактор незначительно. Данные зависимости ярко выражены и согласуются с результатами, полученными при рассмотрении показателей средней длины волокна, сопротивления продавливанию, раздиранию и излому.

Таким образом, результаты, полученные при анализе зависимостей латентных факторов от входных параметров размола, подтверждают результаты экспериментальных исследований влияния конструкции комбинированной гарнитуры дисковой мельницы на волокнистый полуфабрикат, представленные в пункте 3.3.

## Выводы к третьей главе

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

Таким образом, анализируя бумагообразующие показатели волокнистой массы, можно сделать следующие выводы:

– При изменении конструкции гарнитуры (варианта установки колец (таблица 2.4)), а именно при увеличении угла поворота колец 2 и 4 от  $0^\circ$  до  $45^\circ$  наблюдается уменьшение *средней длины волокна*, увеличение *средней ширины волокна*, его *грубости* и *индекса фибрилляции*.

– При увеличении зазора между ножами ротора и статора наблюдается сохранение *длины волокна*, уменьшение его *средней ширины*, незначительное уменьшение *индекса фибрилляции*, а также увеличение показателя *грубости волокон*.

– Увеличение концентрации волокнистой массы от 0,8 до 2 % способствует сохранению *длины волокна* и снижению его *средней ширины*, при этом влияние концентрации на показатель *грубости волокна* незначительно. Кроме того, наблюдается уменьшение показателя *индекса фибрилляции*, причем данный показатель увеличивается при дальнейшем повышении концентрации от 2 до 3,2 %.

Анализ физико-механических характеристик готовых бумажных отливок, показал, что:

– При изменении конструкции гарнитуры (варианта установки колец (таблица 2.4)), а именно при увеличении угла установки колец 2 и 4 от  $0^\circ$  до  $45^\circ$  наблюдается увеличение показателя *разрывной длины*, снижение показателей *сопротивления излому* и *раздиранию*, что касается показателя *сопротивления продавливанию*, то максимальные значения наблюдаются при варианте установки колец № 1, а наименьшие – при варианте установки колец № 2.

– При увеличении зазора между ножами ротора и статора наблюдается увеличение показателя *разрывной длины*, при этом значения показателей *сопротивления излому*, *продавливанию* и *раздиранию* уменьшаются.

Концентрация волокнистой массы влияет на физико-механические характеристики готовых бумажных отливок следующим образом:

– увеличение концентрации волокнистой массы до 1,8 % при приросте степени помола до  $50^\circ\text{ШР}$  ведет к повышению показателя *разрывной длины*, при приросте степени помола до  $30^\circ\text{ШР}$  и  $70^\circ\text{ШР}$  влияние концентрации незначительно;

– увеличение концентрации от 0,8 до 2 % при приросте степени помола до  $30^\circ\text{ШР}$  и  $70^\circ\text{ШР}$  приводит к повышению показателя *сопротивления излому*, при приросте степени помола до  $50^\circ\text{ШР}$  увеличение концентрации волокнистой массы ведет к снижению данного показателя;

– увеличение концентрации от 0,8 до 2 % при приросте степени помола до  $70^\circ\text{ШР}$  ведет к повышению показателя *сопротивления продавливанию*, при приросте степени помола до  $30^\circ\text{ШР}$  и  $50^\circ\text{ШР}$  влияние концентрации незначительно;

– при увеличении концентрации волокнистой массы до 2 % наблюдается увеличение показателя *сопротивления раздиранию*.

Анализ влияния конструкции комбинированной гарнитуры дисковой мельницы на бумагообразующие свойства волокнистых полуфабрикатов и физико-механические характеристики готовых бумажных отливок подтверждает

предположение, приведенное в пункте 2.4, о влиянии изменения рисунка ножевой размалывающей поверхности комбинированной гарнитуры на процесс размола.

По результатам проведенного кластерного анализа выходных параметров процесса размола с использованием комбинированной гарнитуры дисковой мельницы условно можно разделить выходные параметры размола на две группы, определяемые длиной волокон и степенью их внешней разработанности, которые влияют на прочностные характеристики готового бумажного продукта. В первую группу входят средняя длина волокна, показатели сопротивления излому, продавливанию и раздиранию, вторую группу составляют средняя ширина волокна, индекс фибрилляции, грубость волокна, водоудерживающая способность и показатель разрывной длины.

По результатам проведенного факторного анализа выходных параметров процесса размола выявлено два латентных фактора, ответственных за 70,78 % суммарной дисперсии всех девяти выходных параметров, в том числе на долю первого фактора приходится 46,28 % этой дисперсии, на долю второго – 24,50 %.

Результаты, полученные при анализе зависимостей латентных факторов от входных параметров размола, подтверждают результаты экспериментальных исследований влияния конструкции комбинированной гарнитуры дисковой мельницы на волокнистый полуфабрикат, представленные в пункте 3.3.

## ГЛАВА 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМА РАЗМОЛА

### 4.1 Определение оптимального режима процесса размол волокнистого полуфабриката при использовании комбинированной гарнитуры

В процессе изготовления продукции целлюлозно-бумажного производства предъявляются различные требования к физико-механическим характеристикам получаемых продуктов, в связи с этим определение оптимального режима размол производили с учетом требований ГОСТ Р 54542–2011 «Бумага для обложек ученических тетрадей. Общие технические условия», согласно которым установлены требования к минимальным значениям показателей разрывной длины и сопротивления излому [19].

Определение оптимального режима процесса размол волокнистого полуфабриката с учетом конструкции исследуемой гарнитуры производилось при помощи метода обобщенного параметра оптимизации выходных показателей размол. Сущность данного метода заключается в «свертывании» результатов наблюдений – создании глобального скалярного критерия (обобщенного параметра оптимизации) [51].

Для определения оптимального режима процесса размол рассматривались следующие выходные параметры при степени помола волокнистой массы 30 °ШР: показатели разрывной длины ( $Y_7$ ), сопротивления излому ( $Y_6$ ), продавливанию ( $Y_8$ ), раздиранию ( $Y_9$ ), представленные в таблице 3.6, и удельный расход электроэнергии ( $E_{уд}$ ).

Так как рассматриваемые выходные параметры имеют разную природу и, соответственно, разные единицы измерения, для расчета обобщенного параметра оптимизации перейдем от натуральных значений данных параметров к их безразмерным нормированным величинам [51]. Для физико-механических показателей, значения которых должны стремиться к максимуму, расчет производится по формуле:

$$d_i = \frac{Y_{i_{\text{тек.}}} - Y_{i_{\min}}}{Y_{i_{\max}} - Y_{i_{\min}}}, \quad (4.1)$$

где  $d_i$  – частная функция полезности;

$Y_{i_{\text{тек.}}}$  – текущее значение выходного параметра;

$Y_{i_{\max}}$  – максимальное значение выходного параметра;

$Y_{i_{\min}}$  – минимальное значение выходного параметра.

Для показателя удельного расхода электроэнергии  $E_{\text{уд}}$ , кВт·ч/т, значения которого должны стремиться к минимуму, расчет производится по формуле:

$$d_E = \frac{E_{\text{удmax}} - E_{\text{удтек.}}}{E_{\text{удmax}} - E_{\text{удmin}}}, \quad (4.2)$$

где  $d_E$  – частная функция полезности;

$E_{\text{удтек.}}$  – текущее значение удельного расхода электроэнергии;

$E_{\text{удmax}}$  – максимальное значение удельного расхода электроэнергии;

$E_{\text{удmin}}$  – минимальное значение удельного расхода электроэнергии.

Обобщенный параметр оптимизации вычисляется как среднее арифметическое значение частных функций полезности:

$$W_{\text{об.}} = \frac{\sum_{j=1}^n d_j}{n}, \quad (4.3)$$

где  $n$  – количество выходных параметров.

Определение оптимального режима размола с обобщенным параметром оптимизации представлено в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Результаты измерений выходных параметров размола с обобщенным параметром оптимизации

| Входные параметры размола |       |       | Выходные параметры размола |                |              |                |               | Нормализованные значения выходных параметров |       |       |       |       | Обобщенный параметр оптимизации |
|---------------------------|-------|-------|----------------------------|----------------|--------------|----------------|---------------|----------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|---------------------------------|
| $X_1$                     | $X_2$ | $X_3$ | $E_{уд},$<br>кВт·ч/т       | $Y_6$<br>(шт.) | $Y_7$<br>(м) | $Y_8$<br>(кПа) | $Y_9$<br>(мН) | $d_E$                                        | $d_6$ | $d_7$ | $d_8$ | $d_9$ | $W_{об}$                        |
| 0,1                       | 1     | 0     | 2143,41                    | 1300           | 3664         | 224            | 880           | 0,328                                        | 0,023 | 0,343 | 0,476 | 0,704 | 0,375                           |
| 0,1                       | 3     | 0     | 868,91                     | 1360           | 3640         | 205            | 968           | 0,829                                        | 0     | 0,366 | 0,222 | 0,859 | 0,455                           |
| 0,15                      | 2     | 0     | 1524,20                    | 3006           | 3791         | 237            | 1048          | 0,572                                        | 0,148 | 1     | 0,665 | 1     | 0,677                           |
| 0,2                       | 1     | 0     | 2979,13                    | 2320           | 4227         | 262            | 960           | 0                                            | 0,576 | 0,736 | 1     | 0,845 | 0,631                           |
| 0,2                       | 3     | 0     | 1117,17                    | 2344           | 4155         | 258            | 1016          | 0,732                                        | 0,504 | 0,745 | 0,944 | 0,944 | 0,774                           |
| 0,15                      | 3     | 22,5  | 434,46                     | 1155           | 4419         | 194            | 600           | 1                                            | 0,764 | 0,287 | 0,071 | 0,211 | 0,467                           |
| 0,2                       | 2     | 22,5  | 762,10                     | 1211           | 4484         | 190            | 704           | 0,871                                        | 0,827 | 0,309 | 0,015 | 0,394 | 0,483                           |
| 0,15                      | 1     | 22,5  | 1675,76                    | 1372           | 4460         | 207            | 640           | 0,512                                        | 0,804 | 0,371 | 0,246 | 0,282 | 0,443                           |
| 0,1                       | 2     | 22,5  | 837,88                     | 1201           | 4490         | 218            | 616           | 0,841                                        | 0,833 | 0,305 | 0,394 | 0,239 | 0,522                           |
| 0,15                      | 2     | 22,5  | 651,68                     | 959            | 4178         | 189            | 600           | 0,915                                        | 0,528 | 0,212 | 0     | 0,211 | 0,373                           |
| 0,2                       | 1     | 45    | 2420,54                    | 805            | 4660         | 234            | 600           | 0,220                                        | 1     | 0,152 | 0,616 | 0,211 | 0,440                           |
| 0,1                       | 1     | 45    | 1714,73                    | 578            | 4420         | 206            | 568           | 0,497                                        | 0,765 | 0,065 | 0,233 | 0,155 | 0,343                           |
| 0,15                      | 2     | 45    | 762,10                     | 607            | 4609         | 223            | 680           | 0,871                                        | 0,95  | 0,076 | 0,469 | 0,352 | 0,544                           |
| 0,2                       | 3     | 45    | 571,58                     | 573            | 4374         | 210            | 640           | 0,946                                        | 0,719 | 0,063 | 0,295 | 0,282 | 0,461                           |
| 0,1                       | 3     | 45    | 444,56                     | 409            | 4491         | 210            | 480           | 0,996                                        | 0,834 | 0     | 0,287 | 0     | 0,423                           |

Получено уравнение регрессии для обобщенного параметра оптимизации:

$$W = -0,241983 + 4,57967 \cdot X_1 + 0,308072 \cdot X_2 - 0,00200173 \cdot X_3 - \quad (4.4) \\ -7,22222 \cdot X_1^2 + 0,055 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,0508889 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,05666 \cdot X_2^2 - \\ -0,000777778 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,000177668 \cdot X_3^2$$

Используя уравнение регрессии, были вычислены оптимальные значения входных параметров размола, при которых обобщенный параметр оптимизации является максимальным:

- зазор между ножами ротора и статора  $s = 0,2$  мм;
- концентрация волокнистой массы  $C = 2,8$  %;
- угол установки колец 2 и 4 комбинированной гарнитуры равен  $0^\circ$ .

Для анализа экономической эффективности процесса размола с использованием комбинированной гарнитуры из таблицы 4.1 был выбран режим с входными параметрами, наиболее близкими к оптимальным значениям:

- зазор между ножами ротора и статора  $s = 0,2$  мм;
- концентрация волокнистой массы  $C = 3\%$ ;
- угол поворота колец 2 и 4 комбинированной гарнитуры равен  $0^\circ$ .

#### **4.2 Определение экономической эффективности процесса размола с использованием комбинированной гарнитуры**

На сегодняшний день в России насчитывается порядка 180 предприятий целлюлозно-бумажной промышленности, 20 из которых производят примерно 85 % всей продукции отрасли. Проводя переоборудование и модернизацию производства, большинство отечественных компаний стремятся к сокращению себестоимости готовой продукции путем использования современных разработок в области подготовки волокнистых полуфабрикатов, позволяющих снижать производственные энергозатраты и конкурировать с мировыми производителями, представленными на внутреннем рынке [40].

Одним из вариантов модернизации целлюлозно-бумажных предприятий в области подготовки волокнистых полуфабрикатов является использование новых

конструкций гарнитур дисковых мельниц. Срок службы гарнитуры определяется материалом гарнитуры, удельным давлением при размоле, видом размалываемого материала, наличием загрязнений в массе и ограничивается продолжительностью использования не более двух лет [6].

По мере износа размалывающей гарнитуры дисковой мельницы возникает необходимость полной замены изношенного диска, так как в условиях производства не предусмотрен ремонт гарнитур. Одним из вариантов сокращения затрат на замену изношенной гарнитуры может выступать комбинированная гарнитура дисковой мельницы, позволяющая за счет конструктивных особенностей производить замену не всего диска, а отдельных концентрических колец при появлении повреждений.

В рамках проведенных исследований представлялось актуальным сравнение разработанной комбинированной гарнитуры с классической традиционной восьмисекторной гарнитурой. Сравнение проводилось при степени помола волокнистой массы 30 °ШР и определенных в таблице 4.1 оптимальных параметрах размола: межножевой зазор ( $s$ ) равен 0,2 мм; концентрация волокнистой массы ( $C$ ) равна 3 % и угол поворота колец 2 и 4 равен 0°. Результаты сравнения выходных параметров размола представлены в приложении Г. Выбор режима размола основан на соответствии количественных значений исследуемых физико-механических характеристик требованиям ГОСТ Р 54542–2011 «Бумага для обложек ученических тетрадей. Общие технические условия», согласно которым разрывная длина бумаги должна составлять не менее 4000 метров [19].

Зависимость времени размола от степени помола волокнистой массы при использовании традиционной гарнитуры и комбинированной гарнитуры с различными вариантами установки колец, представлена на рисунке 4.1.

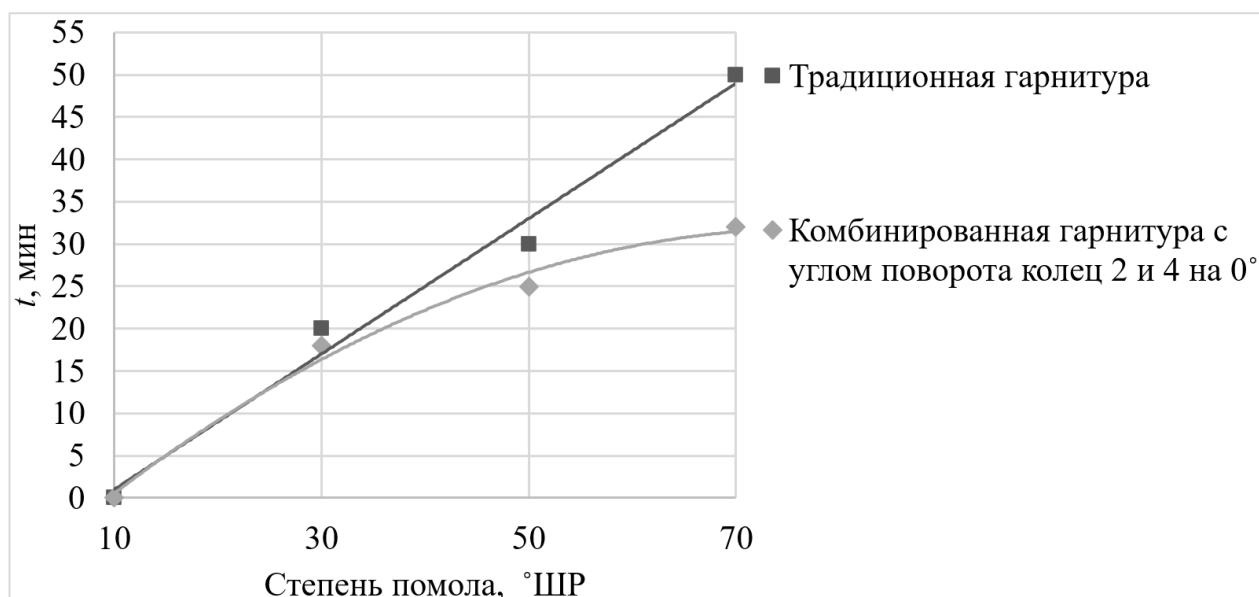


Рисунок 4.1 – Зависимость времени размола от степени помола волокнистой массы

Зависимость удельных энергозатрат от степени помола волокнистой массы при использовании традиционной гарнитуры и комбинированной гарнитуры с различными вариантами установки колец, представлена на рисунке 4.2.

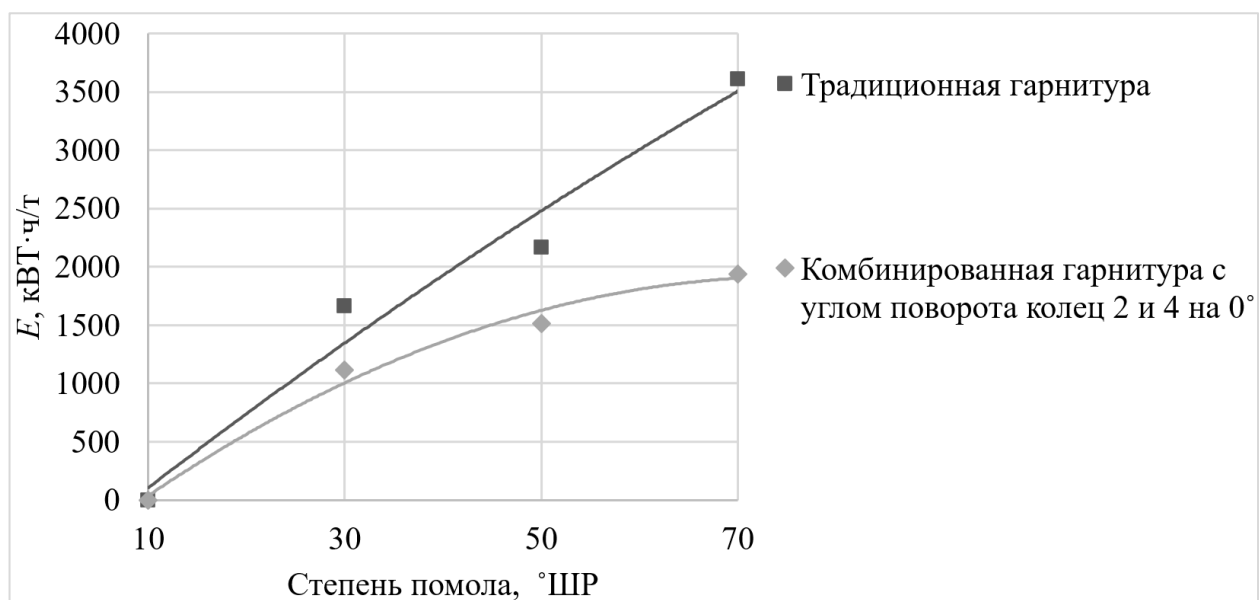


Рисунок 4.2 – Зависимость удельных энергозатрат от степени помола волокнистой массы

Как видно из рисунков 4.1 и 4.2, при всех степенях помола минимальные показатели затрачиваемого на размол волокнистой массы времени и количества удельной электроэнергии наблюдаются при использовании комбинированной

гарнитуры с вариантом установки колец № 1, максимальные – при использовании традиционной гарнитуры.

Экономическим эффектом от использования комбинированной гарнитуры будем считать снижение себестоимости выпускаемой продукции, которое достигается за счет снижения затрат электроэнергии на размол волокнистого полуфабриката.

Расчет затрат электроэнергии  $E_{уд}$ , кВт·ч/т на размол волокнистого полуфабриката производим по формуле:

$$E_{уд} = \frac{(N \cdot t)}{m}, \quad (4.5)$$

где  $N$  – потребляемая мощность, Вт;

$t$  – время, ч,

$m$  – масса, т.

Потребляемая мощность  $N$ , Вт определяется по формуле:

$$N = \sqrt{3} \cdot U_{\phi} \cdot I \cdot \cos \varphi, \quad (4.6)$$

где  $\cos \varphi$  – коэффициент мощности, определяемый по формуле:

$$\cos \varphi = \frac{P_A + P_B + P_C}{3 \cdot I \cdot U_{\phi}}, \quad (4.7)$$

где  $P_A, P_B, P_C$ , – мощность, потребляемая каждой фазой, кВт;

$I$  – сила тока, А;

$U_{\phi}$  – фазное напряжение, В.

Для расчета затрат на электроэнергию в денежном выражении необходимо определить эффективный фонд рабочего времени оборудования (таблица 4.2).

Таблица 4.2 – Баланс рабочего времени оборудования

| Наименование             | Вид производства (непрерывное) |      |
|--------------------------|--------------------------------|------|
|                          | дни                            | часы |
| Календарный фонд времени | 365                            | 8760 |
| Простои в ремонтах       |                                |      |
| Капитальный ремонт       | 21                             | 504  |
| Средний ремонт           | 12                             | 288  |
| Текущий ремонт           | 10                             | 240  |
| Итого простои в ремонтах | 43                             | 1032 |
| Эффективный фонд времени | 322                            | 7728 |

Затраты на электроэнергию в денежном выражении  $Z_{эл}$ , руб., определяются по формуле:

$$Z_{эл} = \frac{E_{уд} \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot T_{эф} \cdot Ц}{K_3}, \quad (4.8)$$

где  $E_{уд}$  – удельный расход электроэнергии, кВт·ч/т;

$K_1$  – 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;

$Ц$  – стоимость 1 кВт·ч электроэнергии, руб.;

$Ц = 10,35$  руб. [39].

Для оптимального режима проведения размола целлюлозы с использованием комбинированной гарнитуры затраты на электроэнергию составят:

$$Z_{эл}^к = \frac{1117,17 \cdot 0,95 \cdot 0,9 \cdot 7728 \cdot 10,35}{0,95} = 80420,9 \text{ тыс. руб.}$$

Для размола, проведенного с использованием традиционной восьмисекторной гарнитуры с углом установки ножей к радиусу  $45^\circ$ , затраты на электроэнергию составят:

$$Z_{эл}^т = \frac{1661,11 \cdot 0,95 \cdot 0,9 \cdot 7728 \cdot 10,35}{0,95} = 119577,2 \text{ тыс. руб.}$$

Определим величину экономии электроэнергии, за счет реализации гипотезы о возможности интенсификации процесса размола при использовании комбинированной конструкции гарнитуры.

$$\Delta Z = 119577,2 - 80420,9 = 39156,3 \text{ тыс. руб.}$$

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

### **Выводы к четвертой главе**

Определен оптимальный режим процесса размола волокнистого полуфабриката при использовании комбинированной гарнитуры.

В результате проведенных исследований процесса размола при использовании комбинированной гарнитуры дисковой мельницы было установлено, что по сравнению с традиционной восьмисекторной гарнитурой затраты на электроэнергию снизятся на 32,7 %, что в натуральном выражении составит 39156,3 тысяч рублей в год.

## ВЫВОДЫ

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

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

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

3. Проведено обоснование построения ножей и геометрии их распределения на рабочей поверхности комбинированной гарнитуры. Рассчитана величина шага между режущими кромками ножей, величина межножевых канавок и количество шагов. Произведен расчет входных углов наклона  $\alpha$  режущих кромок ножей единичного сектора к радиусу  $r$ , для первой и второй частей единичного сектора комбинированной гарнитуры. Определены зависимости выходного угла  $\beta$  от входного угла  $\alpha$  режущей кромки ножей комбинированной гарнитуры. Рассчитан показатель секундной режущей длины, с определением суммарной длины режущих кромок ножей и суммарной длины контакта режущих кромок ножей ротора с режущими кромками ножей статора. С использованием современных компьютерных технологий рассчитан показатель секундной режущей длины в зависимости от характера распределения ножей на рабочей поверхности комбинированной гарнитуры. Рассчитаны значения параметра циклической

элементарной длины для комбинированной гарнитуры в динамике, которые могут говорить о направленности процесса размола в сторону рубки или фибрилляции, в зависимости от конструкции гарнитуры.

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

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

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

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алашкевич, Ю. Д. Влияние параметров ножевых размалывающих машин на качество помола волокнистых полуфабрикатов / Ю. Д. Алашкевич, Ф. И. Мицкевич // Перспективы развития химической промышленности в Красноярском крае: Тез. докл. краевой науч. конф. – Красноярск, 1982. – С. 54 – 56.
2. Алашкевич, Ю. Д. Основы теории гидродинамической обработки волокнистых материалов в размольных машинах: дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.03 / Алашкевич Юрий Давыдович. – Красноярск, 1986. – 361 с.
3. Аликин, В. П. Вопросы реологии и размола целлюлозных материалов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.00.00 / Аликин Виктор Павлович. – Л., 1960. – 21 с.
4. Афонин, П. Н. Статистический анализ с применением современных программных средств / П. Н. Афонин, Д. Н. Афонин. – СПб.: ИЦ «Интермедия», 2017. – 100 с.
5. Вититнев, А. Ю. Совершенствование процесса размола волокнистых полуфабрикатов в производстве древесноволокнистых плит: дис. ... канд. техн. наук: 05.21.03 / Вититнев Александр Юрьевич. – Красноярск, 2019. – 152 с.
6. Вихарев, С. Н. Надежность гарнитуры ножевых размалывающих машин / С. Н. Вихарев // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века: труды XIII Международного евразийского симпозиума, Екатеринбург, 18–21 сентября 2018 года / Минобрнауки России, Уральский государственный лесотехнический университет, Уральский лесной технопарк. – Екатеринбург: ФГБОУ ВПО «Уральский государственный лесотехнический университет», 2018. – С. 151–155.
7. Вихарев, С. Н. Разработка методов и средств виброзащиты и вибрационной диагностики дисковых мельниц: дис. ... канд. техн. наук: 05.21.03 / Вихарев Сергей Николаевич. – Екатеринбург, 1993. – 235 с.

8. Вихарев, С. Н. Сегментная наборная гарнитура ножевых размалывающих машин / С. Н. Вихарев, М. Д. Григорьев // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века: труды XIV Международного евразийского симпозиума, Екатеринбург, 17–20 сентября 2019 года / [под научной редакцией В. Г. Новоселова]; Уральский государственный лесотехнический университет. – Екатеринбург, 2019. – С. 120–122.

9. Вихарев, С. Н. Экспериментальные исследования процесса размола при помощи вибрации на гарнитуре статора / С. Н. Вихарев // Машины и аппараты целлюлозно-бумажного производства: Межвузовский сборник научных трудов. – Л., 1990. – С. 29–33.

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

11. Гаузе, А. А. Машины для размола и сортирования бумажной массы: Конспект лекций / А. А. Гаузе, В. Н. Гончаров. – Л.: ЛТИ ЦБП, 1975. – 161 с.

12. Гидродинамические явления при размоле волокнистых полуфабрикатов в ножевых размалывающих машинах: монография / Ю. Д. Алашкевич, Н. С. Решетова, В. П. Барановский, Л. В. Кутовая. – Красноярск: СибГТУ, 2003. – 176 с.

13. Гончаров, В. Н. Силовые факторы в дисковой мельнице и их влияние на процесс размола / В. Н. Гончаров // Бум. пром-сть. – 1971. – №5. – С. 12–14.

14. ГОСТ 13523–78. Полуфабрикаты волокнистые, бумага и картон. Метод кондиционирования образцов. Взамен ГОСТ 13523–68. Дата введения 01.10.1978. Москва: ИПК Издательство стандартов, 1999. 4 с.

15. ГОСТ 13525.2–80. Полуфабрикаты волокнистые, бумага и картон. Метод определения прочности на излом при многократных перегибах. Взамен ГОСТ 13525.2–68 Дата введения 30.06.1981. Москва: Стандартинформ, 2007. 4 с.

16. ГОСТ 13525.3–97. Полуфабрикаты волокнистые и бумага. Метод определения сопротивления раздиранию (метод Эльмендорфа). Взамен ГОСТ 13525.3–78. Дата введения 30.06.2001. Москва: Стандартинформ, 2007. 8 с.

17. ГОСТ 13525.8–86. Полуфабрикаты волокнистые, бумага и картон. Метод определения сопротивления продавливанию. Взамен ГОСТ 13525.8–78. Дата введения 01.01.1988. Москва: Стандартинформ, 2007. 6 с.

18. ГОСТ ИСО 1924–1–96. Бумага и картон. Определение прочности при растяжении. Ч. 1. Метод нагружения с постоянной скоростью. Взамен ГОСТ 13525.1–79. Дата введения 01.01.2000. Минск: Изд-во стандартов, 2000. 10 с.

19. ГОСТ Р 54542–2011. Бумага для обложек ученических тетрадей. Общие технические условия. Дата введения 01.01.2013. Москва: Стандартинформ, 2013. 8 с.

20. Дирацуян, А. А. Новый технологический параметр процесса размола волокнистых материалов / А. А. Дирацуян, Е. Е. Нестеров, Ю. Д. Алашкевич, И. А. Воронин // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2011. – № 4 (322). – С. 104–108.

21. Дюк, В. А. Компьютерная психодиагностика / В. А. Дюк. – СПб.: Братство, 1994. – 364 с.

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

23. Иберла, К. Факторный анализ / К. Иберла. – М.: Статистика, 1980. – 308 с.
24. Иванов, С. Н. Современная теория размолы / С. Н. Иванов. // Бум. пром-сть. – 1967. – № 11. – С. 11–13.
25. Иванов, С. Н. Технология бумаги / С. Н. Иванов. – 3-е изд. – М.: Школа бумаги, 2006. – 696 с.
26. Казаков, Я. В. Характеристики деформативности как основополагающий критерий в оценке качества целлюлозно-бумажных материалов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.03 / Казаков Яков Владимирович. – Архангельск, САФУ. – 2015. – 175 с.
27. Киселев, С. С. Эксплуатация и ремонт дисковых и конических мельниц / С. С. Киселев, В. Ф. Пашинский. – М.: Лесная промышленность, 1979. – 208 с.
28. Кларк, Дж. Технология целлюлозы / Дж. Кларк. – М.: Лесная промышленность, 1983. – 456 с.
29. Ковалев, В. И. Размол волокнистых полуфабрикатов при различном характере построения рисунка ножевой гарнитуры: дис. ... канд. техн. наук: 05.21.03 / Ковалев Валерий Иванович. – Красноярск, 2007. – 209 с.
30. Кожухов, В. А. Особенности использования ножевой гарнитуры с ударным воздействием при размолу волокнистой массы / В. А. Кожухов, Ю. Д. Алашкевич // Химия растительного сырья. – 2009. – № 2. – С. 153–157.
31. Кожухов, В. А. Размол волокнистых полуфабрикатов в размольных ножевых машинах при ударном воздействии на волокно: дис. ... канд. техн. наук: 05.21.03 / Кожухов Виктор Анатольевич. – Красноярск, 2015. – 161 с.
32. Кутовая, Л. В. Комплексный параметр процесса обработки волокнистых суспензий безножевым способом в установке типа «Струя-преграда»: дисс. ... канд. техн. наук: 05.21.03/ Кутовая Лариса Владимировна. – Красноярск, 1998. – 178 с.
33. Легоцкий, С. С. Размалывающее оборудование и подготовка бумажной массы / С. С. Легоцкий, В. Н. Гончаров. – М.: Лесн. пром-сть, 1990. – 224 с.

34. Легоцкий, С. С. Размол бумажной массы / С. С. Легоцкий, Л. Н. Лаптев. – М.: Лесная промышленность, 1981. – 93 с.

35. Лоули, Д. Факторный анализ как статистический метод / Д. Лоули, А. Максвелл. – М.: Мир, 1967. – 144 с.

36. Набиева, А. А. Анализ формирования технологических параметров ножевых размалывающих гарнитур / А. А. Набиева, Ю. Д. Алашкевич, В. И. Ковалев // Химия растительного сырья. – 2009. – № 3. – С. 169–172.

37. Набиева, А. А. Оценка влияния и совершенствования технологических параметров ножевых размалывающих машин: дис. ... канд. техн. наук: 05.21.03 / Набиева Анна Александровна. – Красноярск, 2004. – 156 с.

38. Никитин, Н. И. Химия древесины и целлюлозы / Н. И. Никитин. – М.: Лесная промышленность, 1962. – 622 с.

39. Об установлении тарифов на электрическую энергию, поставляемую публичным акционерным обществом «Красноярскэнергосбыт» (г. Красноярск, ИНН 2466132221): Приказ министерства тарифной политики Красноярского края № 83-э от 18.11.2022 года [Электронный ресурс] – URL: <http://zakon.krskstate.ru/doc/82133> (дата обращения: 12. 02. 2025)

40. ООО «ИТЦ-Трейд»: [сайт] – URL: [https://bumaga--karton.ru/proizvoditeli\\_bumagi\\_kartona](https://bumaga--karton.ru/proizvoditeli_bumagi_kartona) (дата обращения: 12. 02. 2025)

41. Патент № 186651 Российская Федерация, МПК D21D 1/30, B02C 7/12. Гарнитура дисковой мельницы: № 2018115603: заявл. 25.04.2018: опубл. 28.01.2019 / С. Н. Вихарев, Н. К. Прядилина, М. М. Бочаров; заявитель, патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный лесотехнический университет». – 7 с.

42. Патент № 2227825 Российская Федерация, МПК D21D, B02C007/12. Размалывающая гарнитура дисковой мельницы: № 2003122181: заявл. 15.07.2003: опубл. 27.04.2004 / Алашкевич Ю. Д., Ковалев В. И., Невзоров А. И.; заявитель, патентообладатель Сибир. госуд. технолог. ун-т. – 8 с.

43. Патент № 2227826 Российская Федерация, МПК D21D1/30 B02C007/12. Размалывающая гарнитура для дисковой мельницы: № 2003122252:

заявл.16.07.2003: опубл. 27.04.2004 / Алашкевич Ю. Д., Ковалев В. И., Саргсян К. Х. [и др.]; заявитель, патентообладатель СибГТУ. – 8 с.

44. Патент № 2262384 Российская Федерация, МПК7 B02 C007/12, D21 D1/30. Размалывающая гарнитура дисковой мельницы: № 2004122055/03: заявл. 21.07.2004: опубл.20.10.2005 / Алашкевич Ю. Д., Спарш С. В., Ковалев В. И., Браун В. В.; заявитель, патентообладатель ОАО Канский Машиностроительный завод «Сегмент». – 14 с.

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

46. Патент № 2314380 C1 Российская Федерация, МПК D21D 1/30, B02C 7/12. Размалывающая гарнитура дисковой мельницы: № 2006121708/12: заявл. 19.06.2006: опубл. 10.01.2008 / Ю. Д. Алашкевич, В. И. Ковалев, М. А. Карбышев [и др.]; заявитель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский государственный технологический университет». – 9 с.

47. Патент № 2556534 Российская Федерация, МПК B02C 7/12. Размалывающая гарнитура для дисковой мельницы: № 2014103760/12: заявл. 04.02.2014: опубл. 10.07.201 / Ю. Д. Алашкевич, В. И. Ковалев, В. И. Шуркина; заявитель, патентообладатель Сибир. госуд. технолог. ун-т. – 9 с.

48. Патент № 2811135 C1 Российская Федерация, МПК D21D 1/30, B02C 7/12. Размалывающая гарнитура дисковой мельницы: № 2023125074: заявл. 29.09.2023: опубл. 11.01.2024 / Ю. Д. Алашкевич, А. А. Петрова, И. А. Воронин, В. И. Ковалев; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева». – 11 с.

49. Пашинский, В. Ф. Машины для размолла волокнистой массы / В. Ф. Пашинский. – М.: Лесная промышленность, 1972. – 160 с.

50. Пен, Р. З. Кластерный анализ свойств мелованной бумаги / Р. З. Пен, Л. В. Чендылова, И. Л. Шапиро // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 10–1. – С. 63–66.

51. Пен, Р. З. Планирование эксперимента в Statgraphics / Р. З. Пен. – Красноярск: СибГТУ-Кларетианум, 2003. – 246 с.

52. Пен, Р. З. Статистические методы моделирования и оптимизации процессов ЦБП / Р. З. Пен. – Красноярск: Изд-во КГУ, 1982. – 192 с.

53. Пен, Р. З. Факторный анализ свойств мелованной бумаги / Р. З. Пен, Л. В. Чендылова, И. Л. Шапиро // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 10–2. – С. 289–293.

54. Перекальский, Н. П. Влияние лигнина на процесс размола и прочность бумаги / Н. П. Перекальский, В. Ф. Филатенков // Труды ЛТИ ЦБП. – 1961. – № 8. – С. 46.

55. Перекальский, Н. П. Сущность процесса размола / Н. П. Перекальский, В. Ф. Филатенков // Труды ЛТИ ЦБП. – 1956. – Вып. 4. – С. 21–32.

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

57. Петрова, А. А. Влияние рисунка комбинированной гарнитуры дисковой мельницы на отдельные бумагообразующие свойства волокнистых полуфабрикатов и физико-механические характеристики готового продукта / А. А. Петрова, Ю. Д. Алашкевич, И. А. Воронин // Химия растительного сырья. – 2023. – №4. – С. 429–435.

58. Свидетельство № 2009613683 РФ. Численный метод определения секундной режущей длины секторной ножевой гарнитуры дисковых мельниц с параллельными прямолинейными ножами постоянной ширины / А. А. Набиева,

Е. Е. Нестеров, Ю. Д. Алашкевич, Д. С. Карпенко. Заявка № 2009612514, от 10.07.2009.

59. Симигин, П. С. О размоле и размалывающем оборудовании / П. С. Симигин // Бумажная пром-сть. – 1970. – №6. – С. 15–17.

60. Терентьев, О. А. Гидродинамика волокнистых суспензий в целлюлозно-бумажном производстве / О. А. Терентьев. – М.: Лесная пром-сть, 1980. – 248 с.

61. Уатте, У. Определение водоудерживающей способности различных беленых и небеленых целлюлоз / У. Уатте // Экспресс-информация. – 1968. – №23

62. Фляте, Д. М. Свойства бумаги / Д. М. Фляте. – М.: Лесн. пром-сть, 1986. – 344 с.

63. Фляте, Д. М. Технология бумаги / Д. М. Фляте. – М.: Лесн. пром-сть, 1988. – 440 с.

64. Хинчин, Я. Г. О значении гемицеллюлоз в целлюлозно-бумажном производстве / Я. Г. Хинчин // Бум. пром-сть. – 1939. – № 12. – С. 4–16.

65. Хинчин, Я. Г. О значении физико-химических факторов в производстве бумаги / Я. Г. Хинчин // Бумажная пром-сть. – 1941. – № 1. – С. 8–12.

66. Хлебников, А. А. О силовом воздействии ножевой гарнитуры конической мельницы / А. А. Хлебников, В. Ф. Пашинский, В. Н. Гончаров, Э. А. Смирнова // Труды ЛТИ ЦБП. – 1969. – Вып. 22. – С. 129–136.

67. Чистова, Н. Г. Размол древесноволокнистой массы на промышленных установках при производстве ДВП: дис. ... канд. техн. наук: 05.21.03 / Чистова Наталья Геральдовна. – Красноярск, 2000. – 170 с.

68. Чистова, Н. Г. Переработка древесных отходов в технологическом процессе получения древесноволокнистых плит: дис. ... докт. техн. наук: 05.21.03 / Чистова Наталья Геральдовна. – Красноярск, 2010. – 415 с.

69. Швальбе, Х. Приготовление бумажной массы. Размол / Х. Швальбе ; Перевод с немецкого. – М.: Гослестехиздат, 1935. – 170 с.

70. Шуркина, В. И. Совершенствование ножевого размол волокнистых растительных полимеров в целлюлозно-бумажном производстве: дисс. ... канд. техн. наук: 05.21.03 / Шуркина Валентина Ивановна. – Красноярск, 2016. – 145 с.

71. Шуркина, В. И. Совершенствование ножевого размола волокнистых растительных полимеров в целлюлозно-бумажном производстве: монография / В. И. Шуркина, Р. А. Марченко, Ю. Д. Алашкевич. – Красноярск: СибГУ им. М.Ф. Решетнева, 2020. – 178 с.

72. Arjas, A. Influence of residence time distribution on pulp properties / A. Arjas // International Symposium on Fundamental concepts of refining, Institute of Paper Chemistry. – Appelon, Wisconsin, USA, 1980. – Pp. 139–148.

73. Arjas, A. The influence of residence time distribution on the beating results of a mill-scale conical refiner / A. Arjas, M. Ano, N. Ryti. – Paperi Puu, 1970. – № 52 (10). – Pp. 639–649.

74. Attack, D. Advances in beating and refining / D. Attack // Transaction of the Oxford Symposium, «Fibre-water interactions in paper-making», British paper and Board Industry Federation, 1977. – Pp. 261–297.

75. Banks, W. A. Design considerations and engineering characteristics of disk refiners / W. A. Banks // Paper Technology and Industry, 1967. – Vol 8(4). – Pp. 363–369.

76. Batchelor, W. Forces on fibres in low-consistency refining: shear force / W. Batchelor, D. M. Martinez, Rj. Kerekes, D. Ouellet // Journal of Pulp and Paper Science, 1997. – 23 (1). – Pp. 40–45.

77. Brecht, W. On the theoretical classification of the beating process in modern refiners / W. Brecht, W. Siewert // Das Papier, 1966. – Vol 20 (1). – Pp. 4–14.

78. Campbell, W. B. Hydration of Cellulose by Beating / W. B. Campbell, W. Boyd // Pulp Paper Magazine: Canada, 1930.–V.29. –№3. – Pp. 37–44.

79. Caucal, G. Etude Physique et Hydraulique du Raffinage / G. Caucal, D. Chaussy, M. Renaud // Revue ATIP. – 1991. – № 45 (5). – Pp. 187–199.

80. Clark, I. D. The Universal Theory of Beating / I. D. Clark // Paper Industry, 1943. – V. 25. – № 4. – Pp. 49–57.

81. Cross, C. F. A Text-book of Paper-making / C. F. Cross, E. I. Beven. – London, 1920. – 286 p.

82. Danforth, D. W. Stock preparation: Theory/practice / D. W. Danforth // Southern Pulp and Paper Manufacturer, 1969. – Vol 32(7). – Pp. 52–53.
83. Espenmiller, H. P. The theory and practice of refining / H. P. Espenmiller // Southern Pulp & Paper Manufacturer, 1969. – Vol 32 (4) – Pp. 50–57.
84. Fox, T. S. High-speed photography of stock transport in a disc refiner / T. S. Fox, R. S. Brodkey, A. H. Nissan // TAPPI, 1979. – Vol 62 (3). – Pp. 55–58.
85. Fox, T. S. Inside a disk refiner / T. S. Fox // International Symposium on: Fundamental concepts of refining, Institute of Paper Chemistry, Appleton. – Wisconsin, USA, 1980. – Pp. 281–313.
86. Fraser, J. Managing energy price risk for the pulp and paper industry / J. Fraser, C. Breslau // Pulp and Paper. Canada –Ontario. – 2000. – Pp. 271–273.
87. Kerekes, R. J. Characterizing refining action in low-consistency refiners by forces on fibres / R. J. Kerekes, J. J. Senger // J. Pulp Pap. Sci., 2006. – Vol 32 (1). – Pp. 1–8.
88. Kure, K. A. Development of spruce fibre properties by a combination of a pressurized compressive pretreatment and high intensity refining / K. A. Kure // International mechanical pulping Conference, Houston, USA, 1999. – Pp. 427–433.
89. Kure, K.-A. Development of structural fibre properties in high intensity refining – Cross-sectional fibre dimensions are significantly changed in refining / K.-A. Kure, G. Dahlqvist // Pulp Paper Canada, 1998. – Vol 99(7). – Pp. 59–63.
90. Leider, P. J. Understanding the disk refiner: Measurement of treatment of the fibers / P. J. Leider, A. H. Nissan // TAPPI, 1977. – Vol 60 (10). – Pp. 85–101.
91. Leider, P.J. Understanding the disk refiner. Part 1: The hydraulic behavior / P. J. Leider, J. Rihs // TAPPI, 1977. – Vol 60 (9). – Pp. 98–102.
92. Lumiainen, J. J. Specific surface load theory / J. J. Lumiainen // 3rd International Refining Conference. – PIRA International, 1995. – Vol 5. – Pp. 89–92.
93. Martinez, D. M. Forces on fibres in low-consistency refining / D. M. Martinez, R. J. Kerekes // TAPPI, 1994. – Vol 77 (12). – Pp. 119–123.

94. Martinez, D. M. Forces on fibres in low-consistency refining: normal force / D. M. Martinez, W. J. Batchelor, R. J. Kerekes, D. Ouellet // Journal of Pulp and Paper Science, 1997. – Vol 23 (1). – Pp. 119–123.
95. McDonald, D. The nature of the mechanical pulping process / D. McDonald, K. Miles, R. Amiri // Pulp Pap. Canada, 2004. – Vol. 105. – №. 8. – Pp. 27–32.
96. Meltzer, F. P. New ways to forecast the technological results of refining / F. P. Meltzer, P. W. Sepke // 3rd International Refining Conference. – PIRA International, 1995. – Vol 2. – P. 22.
97. Mohlin, U.-B. LC-refining of chemical pulps – refining intensity and gap clearance Industnkontakt / U.-B. Mohlin // STFI-Packforsk. – Stockholm, Sweden, 2006. – № 1. – Pp. 9–11.
98. Musselmann, R. Third stage low consistency refining of TMP for energy savings and quality enhancement / R. Musselmann, D. Letarte, R. Simard // 4th International Refining Conference. – PIRA International, 1997. – Pp. 141–147
99. Nordman, L. Conditions in an LC-refiner as observed by physical measurements / L. Nordman, J.-E. Levlin, T. Markonen, H. Jokisalo // Paperi ja Puu – Papper och Trii. – 1981. – Vol 63 (4). – Pp. 169–180.
100. Page, D. H. The beating of chemical pulps – the action and effects / D. H. Page // 9th Fundamental Research Symposium, «Fundamentals of Papermaking», 1989. – P. 38.
101. Pettersen, G. W. Noise emanation from conical refiners / G. W. Pettersen // Pulp Paper Can, 1986. – № 87 (9). – Pp. 336–340.
102. Radoslavova, D. Hydrodynamic modeling of the behaviour of the pulp suspensions during beating and its application to optimizing the refining process / D. Radoslavova, J. C. Roux, J. Silvy // 11th Fundamental Research Symposium. – Fundamentals of Papermaking materials, 1997. – Pp. 607–639.
103. Roux, J. C. Radial distribution of the pressure in an industrial refiner / J. C. Roux, G. Joris // 13th Fundamental Research Symposium «Bonding and strength development», 2005. – Pp. 409–425.

104. Roux, J. C. Théorie hydromécanique du fonctionnement d'un raffineur à basse concentration / J. C. Roux, J. Chu, G. Joris, G. Caucal // Revue A.T.I.P., 1999. – Vol 53 (4–5). – Pp. 106–116.
105. Senger, J. J. Factors affecting the shear forces in high-consistency refining / J. J. Senger, D. J. Ouellet // Journal of Pulp and Paper Science, 2002. – Vol 28 (11). – Pp. 364–369.
106. Smith, S. Die rationelle Theorie des Ganzzeughollenders / S. Smith. – Berlin: Otto Ernst Verlag, 1922. – 105 p.
107. Stationwala, M. I. The effect of first stage refining conditions on pulp properties and energy consumption / M. I. Stationwala, K. B. Miles, A. Karnis // International mechanical pulping Conference, Minneapolis, 1991. – Pp. 321–327.
108. Steenberg, B. Review of the Effect of Mechanical Treatment of Fibres / B. Steenberg // Svensk Papperstidning, 1963. – Vol 66. – № 22. – Pp. 933–939.
109. Strachan, J. Fundamental Concepts of Beating Process / J. Strachan, M. Chem. // Paper Maker, 1946. – Vol 12. – Pp. 28–35.
110. Techpap: [сайт]. URL: <https://www.techpap.com/fiber-and-shive-analyzer-morfi-neo,lab-device,31.html> (дата обращения: 12. 02. 2025)
111. Wultsch, F. The Escher-Wyss small refiner as a standard test apparatus for modern stock preparation plants / F. Wultsch, W. Flucher // Das Papier, 1958. – Vol 12 (13 /14). – Pp. 334–342.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица А.1 – Матрица планирования эксперимента

| Номер опыта | Количество факторов |           |           |
|-------------|---------------------|-----------|-----------|
|             | $X_1$ , мм          | $X_2$ , % | $X_3$ , ° |
| 1           | 0,10                | 1         | 0         |
| 2           | 0,10                | 3         | 0         |
| 3           | 0,15                | 2         | 0         |
| 4           | 0,20                | 1         | 0         |
| 5           | 0,20                | 3         | 0         |
| 6           | 0,15                | 3         | 22,5      |
| 7           | 0,20                | 2         | 22,5      |
| 8           | 0,15                | 1         | 22,5      |
| 9           | 0,10                | 2         | 22,5      |
| 10          | 0,15                | 2         | 22,5      |
| 11          | 0,20                | 1         | 45        |
| 12          | 0,10                | 1         | 45        |
| 13          | 0,15                | 2         | 45        |
| 14          | 0,20                | 3         | 45        |
| 15          | 0,10                | 3         | 45        |

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

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

| Коэффициенты регрессии             | Выходные параметры     |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |           |          |          |
|------------------------------------|------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
|                                    | $Y_1$                  | $Y_2$    | $Y_3$    | $Y_4$    | $Y_5$    | $Y_6$    | $Y_7$    | $Y_8$    | $Y_9$    | $Y_{10}$ | $Y_{11}$ | $Y_{12}$ | $Y_{13}$ | $Y_{14}$ | $Y_{15}$  | $Y_{16}$ | $Y_{17}$ |
|                                    | Значения коэффициентов |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |           |          |          |
| $b_0$                              | 1,58872                | 32,1425  | 1,5501   | 0,461808 | -81,11   | 7,99629  | 6,31453  | 10,5046  | 10,6694  | 17,3798  | 24,4133  | 18,8847  | -0,36855 | -2164,75 | 3449,58   | 180,442  | 484,833  |
| $b_1$                              | -6,0045                | -18,45   | 6,218    | -2,69255 | 2872,6   | 81,1522  | 87,0613  | 40,0307  | 73,8475  | -28,8082 | -110,959 | -107,177 | 40,269   | 40975    | -417,5    | 371,167  | 3083,33  |
| $b_2$                              | 0,15265                | -1,11667 | -0,57263 | 0,029995 | 232,502  | -1,95721 | -2,06202 | -1,00388 | -1,22137 | -0,06616 | 0,603983 | 2,97188  | -0,81132 | 861,833  | 80,8833   | 11,7889  | 251,278  |
| $b_3$                              | -0,01353               | 0,046185 | 0,020984 | -0,00303 | -1,7483  | 0,10019  | 0,177493 | 0,218125 | 0,095951 | 0,017898 | -0,198   | -0,27006 | 0,029019 | -30,7593 | 51,0774   | -1,77691 | -23,316  |
| $b_{11}$                           | 20                     | 26,6667  | -23,0667 | 9,2      | -6546,67 | -207,089 | -274,378 | -171,222 | -252,933 | 59,5556  | 301,267  | 409,467  | -93,7333 | -105333  | 24066,7   | 111,111  | -9777,78 |
| $b_{22}$                           | 0,4475                 | 3,75     | 0,48     | -0,09025 | -623,5   | -6,2725  | -3,165   | -2,27    | -6,0125  | -2,5875  | 8,7375   | 9,94     | -5,555   | -275     | -1012,5   | -32,5    | 250      |
| $b_{33}$                           | 0,008778               | -0,01111 | -0,08667 | 0,0145   | 10,3111  | -0,50056 | -0,30133 | 0,061778 | 0,106556 | 0,332111 | 0,401667 | -0,14378 | -0,10022 | -178,889 | -106,111  | -7       | 6,66667  |
| $b_{12}$                           | -0,049                 | 0,016667 | 0,114333 | -0,00775 | -34,0667 | 0,803278 | 0,664556 | 0,303944 | 0,437667 | -0,11111 | -0,52033 | -1,02033 | 0,375167 | -203,333 | 12,6667   | -3,22222 | -64,4444 |
| $b_{13}$                           | -0,00131               | 0,019444 | -6,7E-05 | 0,000245 | -1,08667 | -0,01214 | 0,011989 | 0,010333 | 0,026372 | 0,023917 | -0,00564 | -0,03088 | 0,006933 | -2,72222 | -0,661111 | 0,016667 | -1,11111 |
| $b_{23}$                           | 0,000214               | -0,00115 | 6,68E-05 | 2,27E-05 | 0,040856 | 0,000582 | -0,00232 | -0,00439 | -0,00271 | -0,00131 | 0,002925 | 0,004621 | -0,00021 | 0,674897 | -0,448066 | 0,051907 | 0,356653 |
| Коэффициент детерминации $R^2$ , % | 90,932                 | 84,207   | 87,096   | 84,498   | 53,655   | 88,790   | 90,585   | 94,213   | 81,036   | 92,422   | 78,811   | 91,631   | 77,249   | 87,956   | 90,546    | 75,109   | 98,594   |

Таблица Б.2 – Коэффициенты  $b_{ij}$  уравнений регрессий и статистические параметры выходных параметров при степени помола волокнистой массы 50 °ПП

| Коэффициенты регрессии             | Выходные параметры     |          |          |          |           |          |          |          |          |          |          |          |          |          |           |          |          |
|------------------------------------|------------------------|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
|                                    | $Y_1$                  | $Y_2$    | $Y_3$    | $Y_4$    | $Y_5$     | $Y_6$    | $Y_7$    | $Y_8$    | $Y_9$    | $Y_{10}$ | $Y_{11}$ | $Y_{12}$ | $Y_{13}$ | $Y_{14}$ | $Y_{15}$  | $Y_{16}$ | $Y_{17}$ |
|                                    | Значения коэффициентов |          |          |          |           |          |          |          |          |          |          |          |          |          |           |          |          |
| $b_0$                              | 0,925492               | 35,7025  | 3,18908  | 0,340608 | 459,696   | 11,6216  | 15,632   | 18,0886  | 16,7752  | 20,8393  | 16,1517  | -0,14153 | -0,30468 | -3367,35 | 3058,73   | 297,726  | 663,578  |
| $b_1$                              | -2,07783               | -41,85   | -2,15767 | -0,55355 | 52,8258   | 66,285   | 43,9137  | 7,54567  | 23,2007  | -56,5543 | -70,0128 | 0,778667 | 39,0717  | 60572,8  | 10293,5   | -282,717 | -55,5556 |
| $b_2$                              | 0,347972               | -2,91167 | -0,81251 | -0,03798 | -123,822  | -0,35878 | -4,82313 | -5,28806 | -4,16763 | -2,02929 | 2,98487  | 11,4142  | -0,47088 | 1080,53  | 1221,5    | 3,36611  | 77,1259  |
| $b_3$                              | -0,00566               | 0,035074 | -0,03734 | 0,001007 | -6,01554  | -0,08176 | 0,009852 | 0,152542 | 0,22552  | 0,049784 | -0,10399 | -0,19141 | 0,055278 | -17,8226 | -14,6156  | -4,47742 | -9,6372  |
| $b_{11}$                           | 8,37778                | 106,667  | 13,5556  | 0,76     | -1287,22  | -141,067 | -127,022 | -84,4889 | -122,822 | 115,644  | 222,178  | 51,2444  | -111,622 | -80787,7 | -10819,5  | 1068,89  | 1007,41  |
| $b_{22}$                           | 0,3775                 | 4,75     | -0,98    | 0,26625  | -65,3931  | -16,31   | -7,755   | 1,535    | 3,64     | 5,48     | 5,6425   | 7,83     | -3,695   | -4747,5  | -4326,14  | 32,25    | 1006,67  |
| $b_{33}$                           | -0,00767               | -0,05556 | 0,036222 | -0,00799 | 22,8651   | 0,003333 | -0,05622 | 0,027333 | -0,23556 | 0,306889 | 0,466778 | -0,32711 | -0,22956 | -603     | 135,842   | 1,58889  | -44,7407 |
| $b_{12}$                           | -0,10056               | 0,366667 | 0,205889 | 0,0015   | 32,5155   | 0,806833 | 1,54944  | 1,34378  | 0,857444 | 0,091111 | -1,07556 | -3,06439 | 0,266444 | -242,969 | -169,776  | -5,52778 | -61,4815 |
| $b_{13}$                           | -0,00126               | 0,022778 | 0,004611 | -0,00047 | 0,617143  | 0,002411 | 0,015511 | 0,011356 | 0,010633 | 0,017344 | -0,00843 | -0,03791 | 0,010522 | 11,2611  | 0,64899   | 0,237222 | -0,78519 |
| $b_{23}$                           | 0,000119               | -0,00086 | 0,000586 | 2,75E-05 | 0,0268818 | 0,001849 | -1,7E-05 | -0,00297 | -0,00353 | -0,00177 | 0,000413 | 0,004534 | -0,00052 | 0,617455 | 0,0445276 | 0,064044 | 0,242012 |
| Коэффициент детерминации $R^2$ , % | 90,932                 | 84,207   | 87,096   | 84,498   | 53,655    | 88,790   | 90,585   | 94,213   | 81,036   | 92,422   | 78,811   | 91,631   | 77,249   | 87,956   | 90,546    | 75,109   | 98,594   |

Таблица Б.3 – Коэффициенты  $b_{ij}$  уравнений регрессий и статистические параметры выходных параметров при степени помола волокнистой массы 70 °ШР

| Коэффициенты регрессии             | Выходные параметры     |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |           |          |          |          |
|------------------------------------|------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------|
|                                    | $Y_1$                  | $Y_2$    | $Y_3$    | $Y_4$    | $Y_5$    | $Y_6$    | $Y_7$    | $Y_8$    | $Y_9$    | $Y_{10}$ | $Y_{11}$ | $Y_{12}$ | $Y_{13}$ | $Y_{14}$  | $Y_{15}$ | $Y_{16}$ | $Y_{17}$ |
|                                    | Значения коэффициентов |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |           |          |          |          |
| $b_0$                              | 1,3685                 | 34,2433  | 2,76283  | 0,498    | 401,743  | 12,6753  | 9,33475  | 8,11633  | 13,6928  | 16,3903  | 20,719   | 16,1098  | 1,57708  | -1158,84  | 7754,76  | 261,3    | 72,9917  |
| $b_1$                              | -7,43                  | -25,8667 | 4,58333  | -2,04    | -377,208 | 108,893  | 79,925   | 121,273  | 53,0633  | -30,0867 | -113,26  | -177,557 | 25,6383  | 28622,8   | -30129,2 | -822     | 4396,17  |
| $b_2$                              | 0,103833               | -3,39556 | -0,54672 | -0,05217 | -9,77678 | -1,62272 | 1,77083  | -1,66772 | -2,03689 | 0,084278 | -0,6355  | 2,94744  | -0,62639 | 1810,59   | 13,9778  | 52,45    | 103,356  |
| $b_3$                              | -0,00297               | 0,120988 | -0,02447 | -0,00348 | -2,49378 | -0,17036 | -0,01927 | 0,155862 | 0,232936 | 0,072306 | -0,14431 | -0,12192 | 0,021436 | -22,8201  | -19,6038 | -2,20889 | -6,52877 |
| $b_{11}$                           | 24,6667                | 55,5556  | -15,7778 | 4,66667  | 635,778  | -305,778 | -235,333 | -425,778 | -215,111 | 82,2222  | 360      | 595,556  | -77,1111 | -57444,4  | 76822,2  | 3800     | -7755,56 |
| $b_{22}$                           | 0,6                    | 0        | -0,85    | 0,2      | -211,975 | -8,55    | -7,525   | -3,25    | -5,55    | -3,55    | 5,95     | 17,95    | -3,925   | 3902,5    | 447,5    | -10      | 492,5    |
| $b_{33}$                           | -0,00667               | -0,04444 | 0,042222 | 0,013333 | 17,4456  | 0,075556 | -0,03444 | -0,23111 | 0,1      | 0,151111 | 0,311111 | -0,22444 | 0,014444 | -403,222  | 190,111  | -3,55556 | -52,1111 |
| $b_{12}$                           | -0,04333               | 0,638889 | 0,125556 | -0,00333 | 7,24944  | 0,735556 | -0,08333 | 0,520556 | 0,602222 | -0,08444 | -0,125   | -1,18111 | 0,357222 | -643,111  | -48,4444 | -13,5    | -39,3889 |
| $b_{13}$                           | -0,001                 | 0,015556 | 0,003111 | 0,001667 | 0,776278 | 0,005556 | 0,001833 | 0,016889 | 0,001889 | 0,020444 | 0,001778 | -0,03856 | 0,016056 | -0,272222 | 3,10556  | -0,1     | -0,32778 |
| $b_{23}$                           | 4,28E-05               | -0,0017  | 0,000495 | 3,29E-06 | -0,01826 | 0,00328  | 0,001139 | -0,0022  | -0,00401 | -0,00196 | 0,001096 | 0,002408 | -0,00084 | 0,485706  | -0,17668 | 0,047407 | 0,21454  |
| Коэффициент детерминации $R^2$ , % | 90,932                 | 84,207   | 87,096   | 84,498   | 53,655   | 88,790   | 90,585   | 94,213   | 81,036   | 92,422   | 78,811   | 91,631   | 77,249   | 87,956    | 90,546   | 75,109   | 98,594   |

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

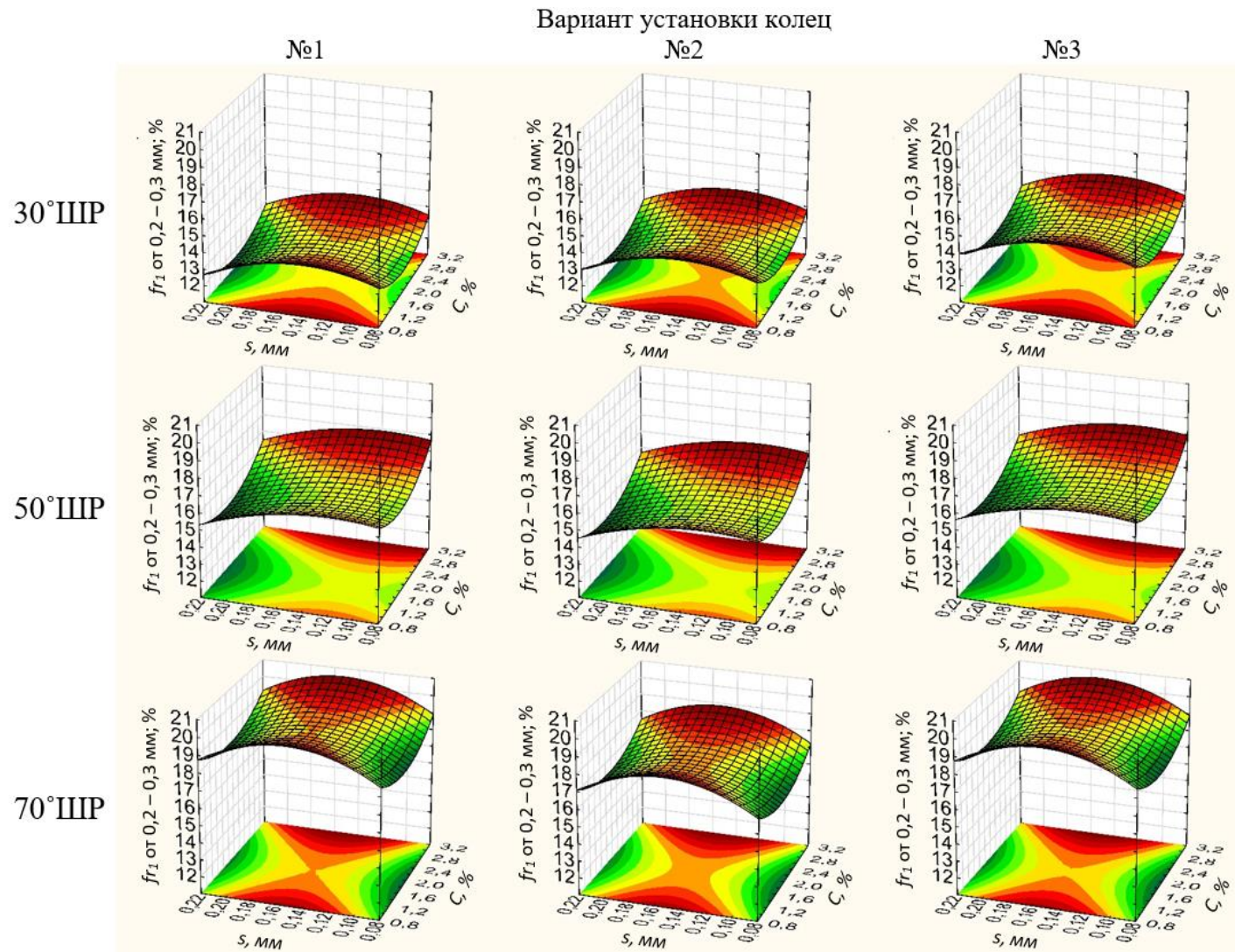


Рисунок В.1 – Зависимость фракции  $fr_1$  от 0,2-0,3 мм от величины межложевого зазора « $s$ », концентрации волокнистой массы « $C$ » и варианта установки колец при степени помола 30 °ШР, 50 °ШР, 70 °ШР

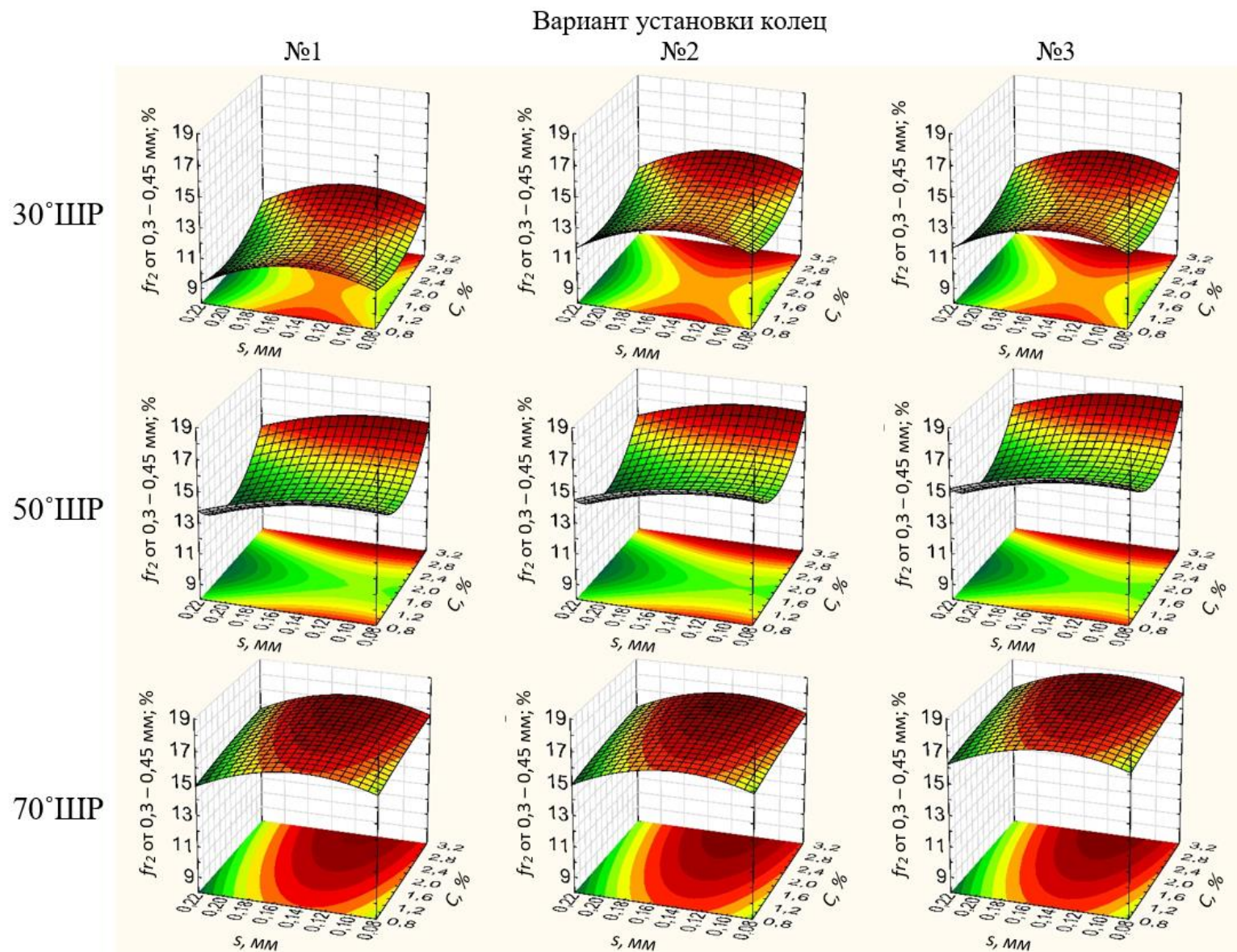


Рисунок В.2 – Зависимость фракции  $fr_2$  от 0,3-0,45 мм от величины межножевого зазора « $s$ », концентрации волокнистой массы « $C$ » и варианта установки колец при степени помола 30 °ШР, 50 °ШР, 70 °ШР

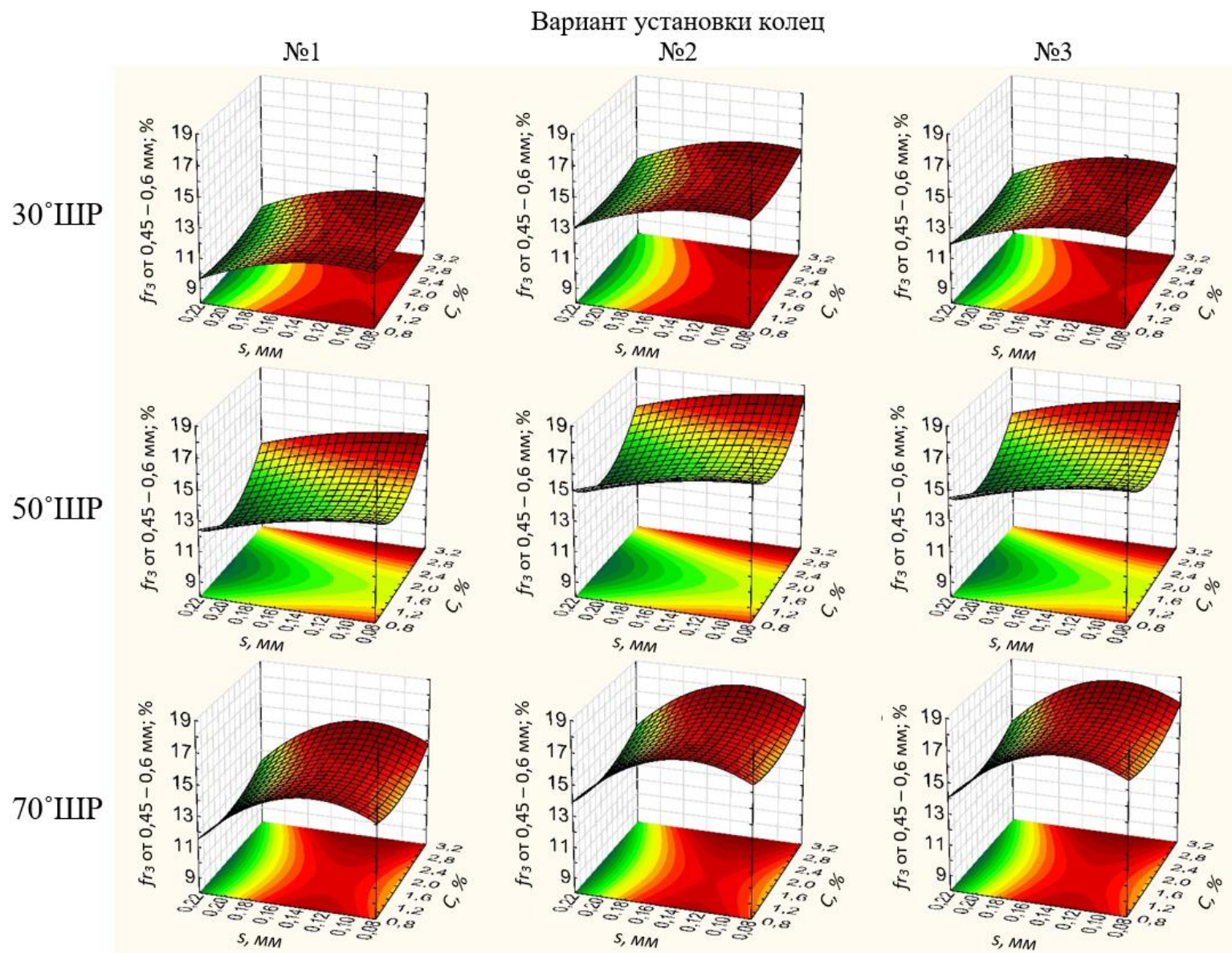


Рисунок В.3 – Зависимость фракции  $fr_3$  от 0,45-0,6 мм от величины межножевого зазора « $s$ », концентрации волокнистой массы « $C$ » и варианта установки колец при степени помола 30 °ШР, 50 °ШР, 70 °ШР

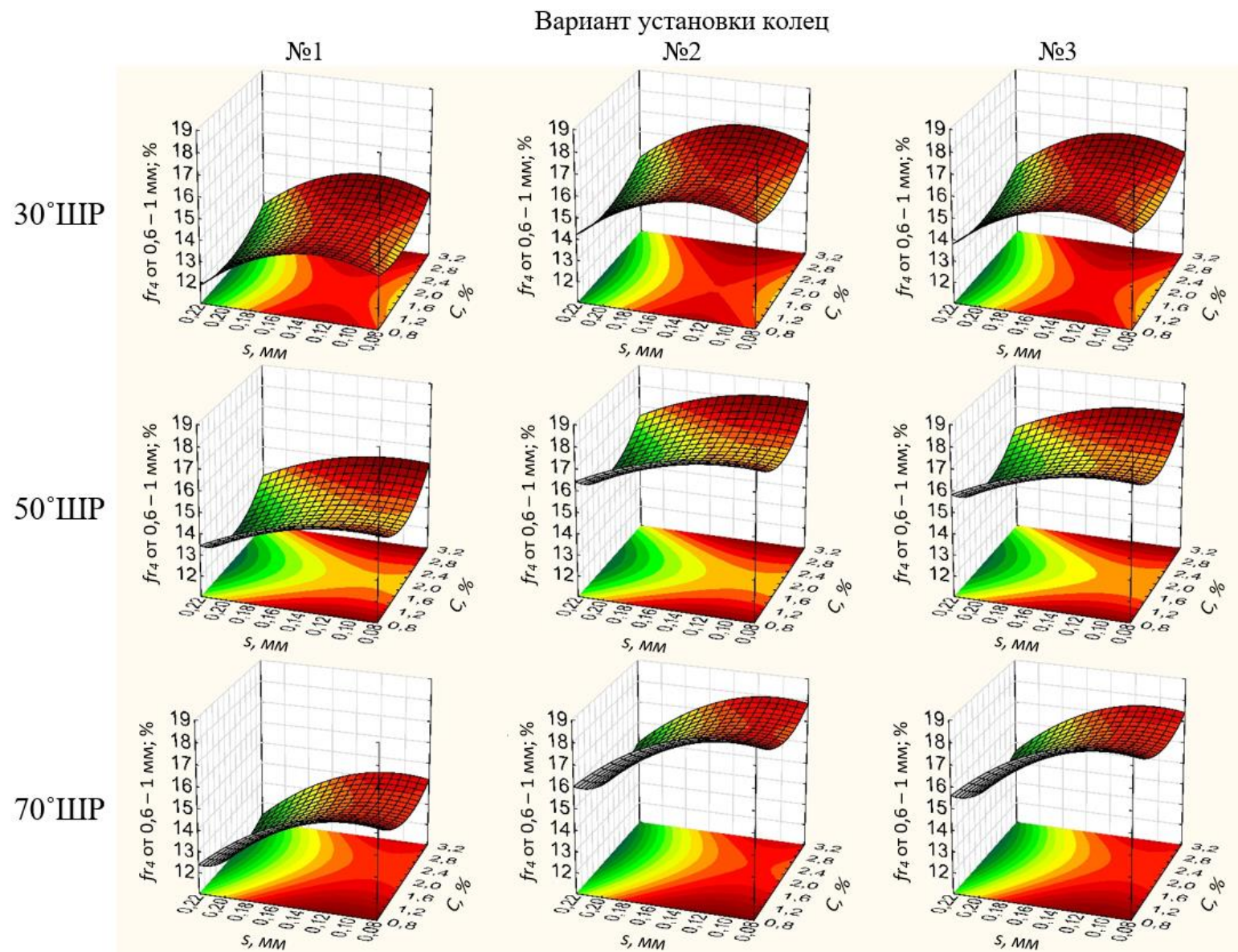


Рисунок В.4 – Зависимость фракции  $fr_4$  от 0,6-1 мм от величины межножевого зазора « $s$ », концентрации волокнистой массы « $C$ » и варианта установки колец при степени помола 30 °ШР, 50 °ШР, 70 °ШР

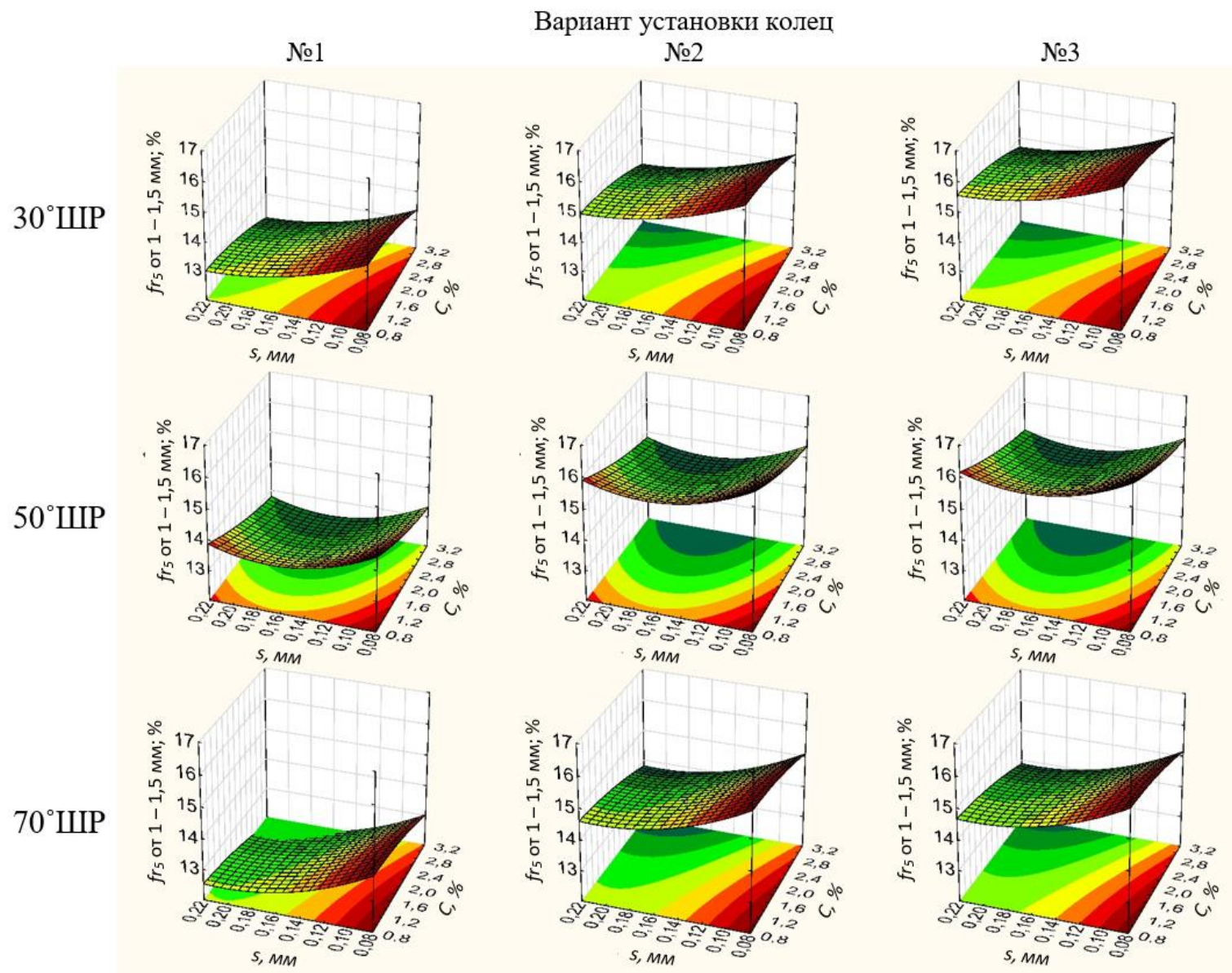


Рисунок В.5 – Зависимость фракции  $fr_5$  от 1-1,5 мм от величины межножевого зазора «s», концентрации волокнистой массы «C» и варианта установки колец при степени помола 30 °ШР, 50 °ШР, 70 °ШР

Вариант установки колец

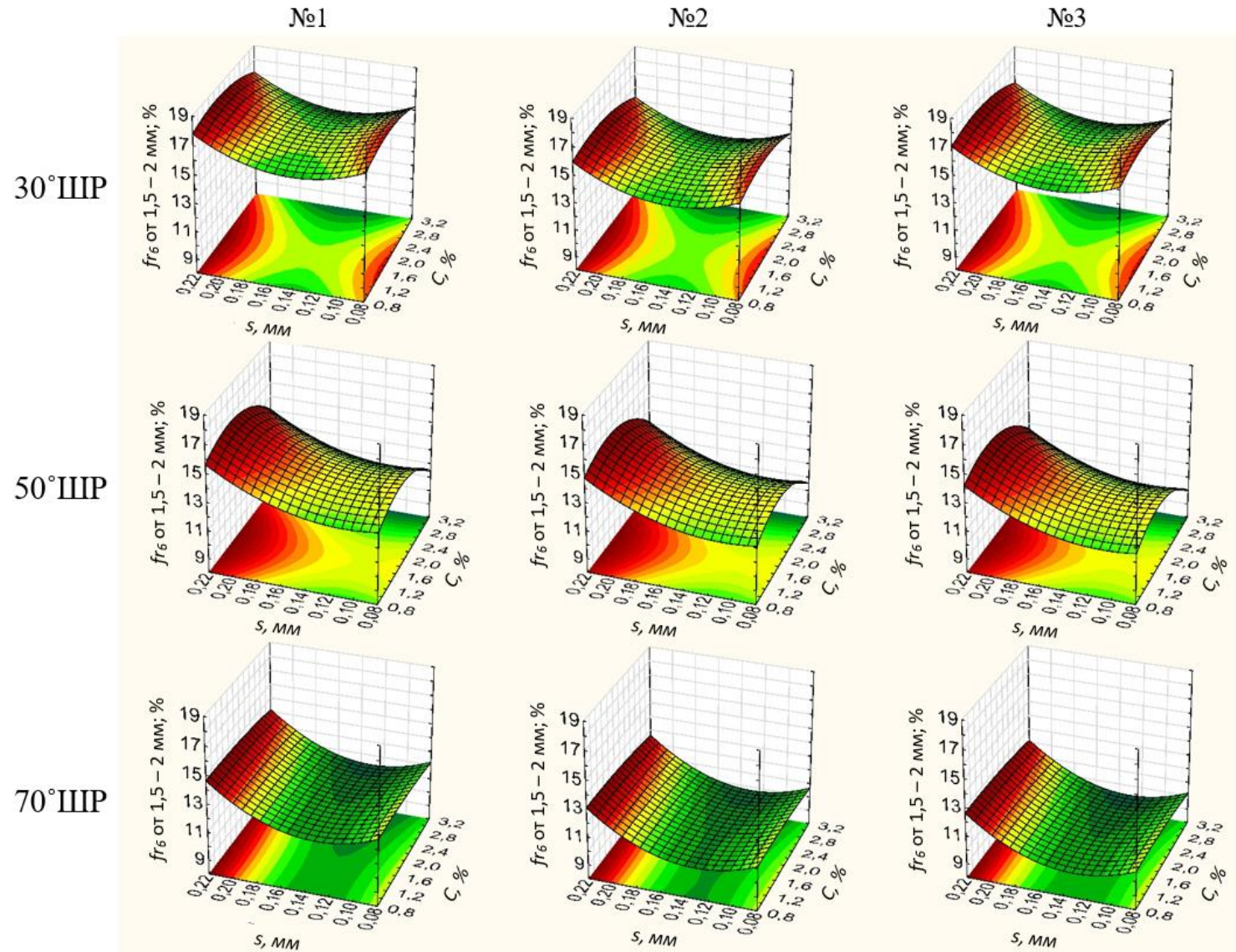


Рисунок В.6 – Зависимость фракции  $fr_6$  от 1,5-2 мм от величины межкожеевого зазора « $s$ », концентрации волокнистой массы « $C$ » и варианта установки колец при степени помола 30 °ШР, 50 °ШР, 70 °ШР

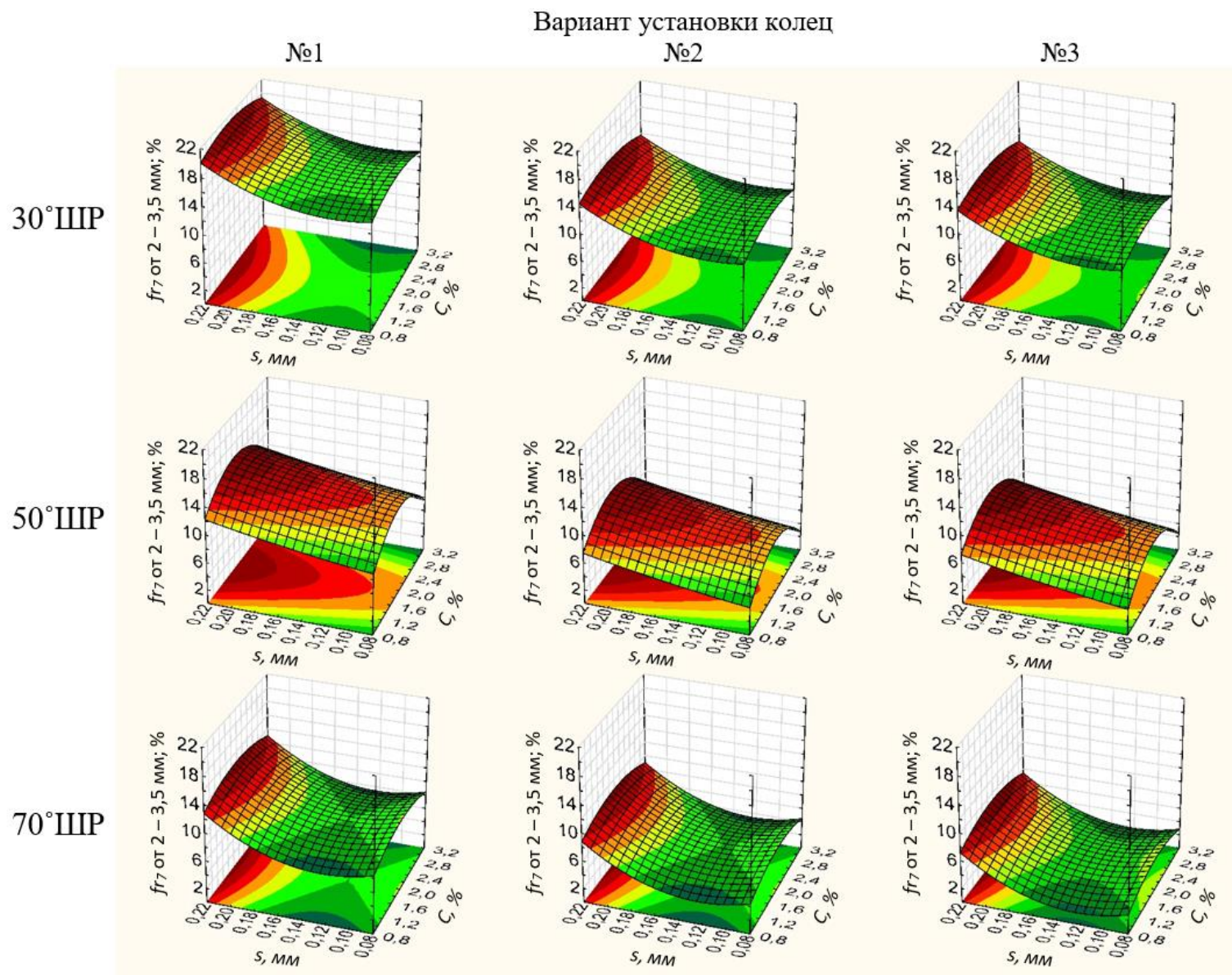


Рисунок В.7 – Зависимость фракции  $fr_7$  от 2-3,5 мм от величины межножевого зазора « $s$ », концентрации волокнистой массы « $C$ » и варианта установки колец при степени помола 30 °ШР, 50 °ШР, 70 °ШР

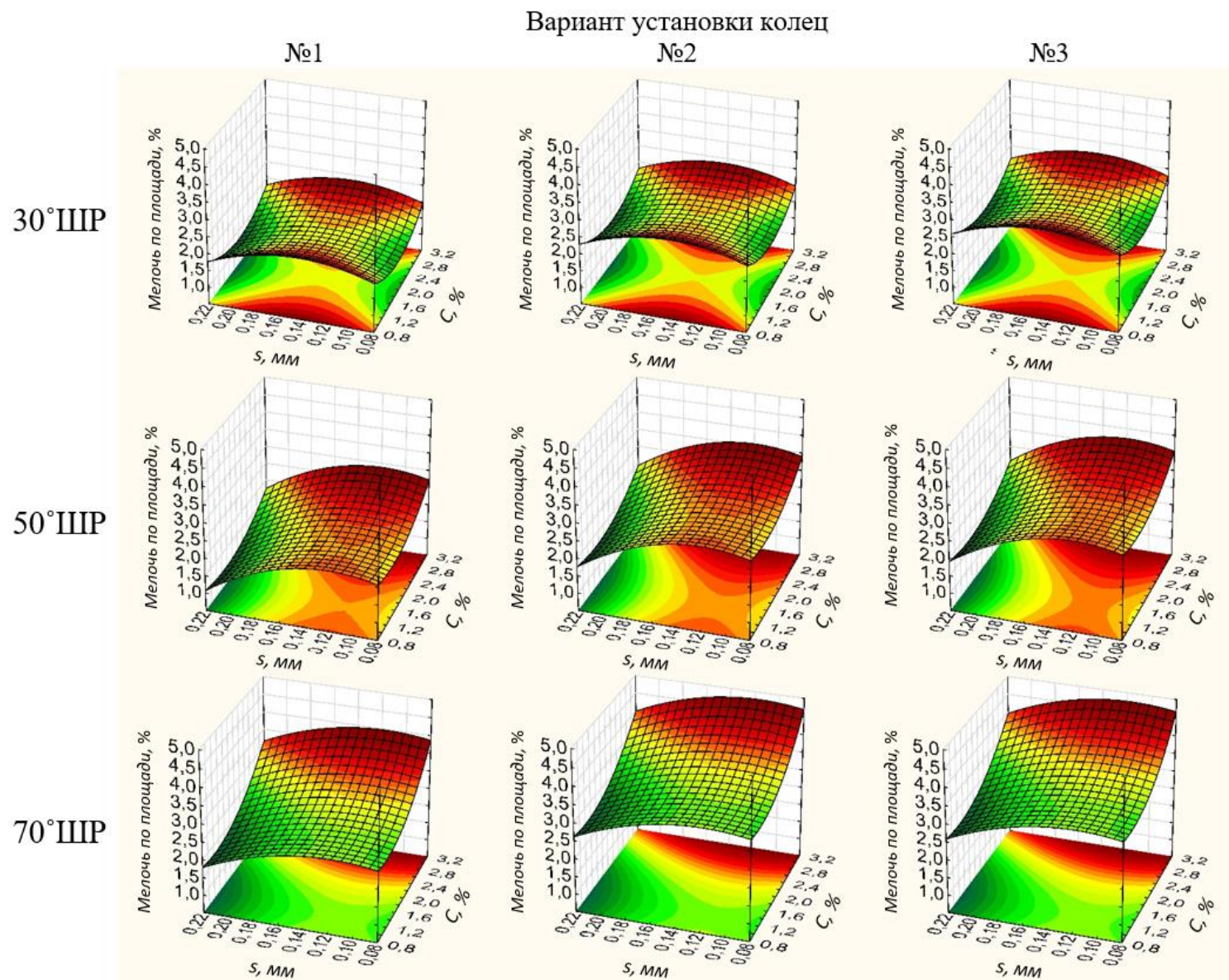


Рисунок В.8 – Зависимость мелочи по площади от величины межножевого зазора « $s$ », концентрации волокнистой массы « $C$ » и варианта установки колец при степени помола 30 °ШР, 50 °ШР, 70 °ШР

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Таблица Г.1 – Сравнительная характеристика выходных параметров размола с использованием комбинированной и традиционной гарнитур

| Степень помола | Зазор, мм | Концентрация, % | Комбинированная гарнитура с углом поворота 2 и 4 колец на 0° |                        |                    |               |                    |                | Традиционная восьмисекторная гарнитура с углом установки ножей к радиусу 45° |                        |                    |               |                    |                |
|----------------|-----------|-----------------|--------------------------------------------------------------|------------------------|--------------------|---------------|--------------------|----------------|------------------------------------------------------------------------------|------------------------|--------------------|---------------|--------------------|----------------|
|                |           |                 | Продолжительность размола, мин                               | Энергозатраты, кВт·ч/т | Разрывная длина, м | Сопротивление |                    |                | Продолжительность размола, мин                                               | Энергозатраты, кВт·ч/т | Разрывная длина, м | Сопротивление |                    |                |
|                |           |                 |                                                              |                        |                    | излому, шт    | продавливанию, кПа | раздиранию, мН |                                                                              |                        |                    | излому, шт    | продавливанию, кПа | раздиранию, мН |
| 30 °ШР         | 0,2       | 1               | 16                                                           | 2979,13                | 4227               | 2320          | 262                | 960            | 21                                                                           | 4550,00                | 3637               | 267           | 223                | 432            |
|                | 0,1       | 1               | 11                                                           | 2143,41                | 3664               | 1300          | 224                | 880            | 13                                                                           | 2816,67                | 4095               | 215           | 220                | 447            |
|                | 0,15      | 2               | 16                                                           | 1524,20                | 3791               | 3006          | 237                | 1048           | 18                                                                           | 1950,00                | 3545               | 243           | 190                | 420            |
|                | 0,2       | 3               | 18                                                           | 1117,17                | 4155               | 2344          | 258                | 1016           | 20                                                                           | 1661,11                | 3436               | 310           | 209                | 496            |
|                | 0,1       | 3               | 14                                                           | 868,91                 | 3640               | 1360          | 205                | 968            | 25                                                                           | 1444,44                | 3804               | 333           | 209                | 480            |
| 50 °ШР         | 0,2       | 1               | 23                                                           | 4182,90                | 4905               | 5622          | 289                | 904            | 56                                                                           | 12133,30               | 3962               | 365           | 252                | 433            |
|                | 0,1       | 1               | 16                                                           | 2979,13                | 4615               | 1610          | 274                | 784            | 30                                                                           | 6500,00                | 4647               | 370           | 249                | 508            |
|                | 0,15      | 2               | 26                                                           | 2533,12                | 4577               | 4641          | 282                | 928            | 28                                                                           | 3033,33                | 4547               | 361           | 214                | 362            |
|                | 0,2       | 3               | 25                                                           | 1515,54                | 4315               | 3410          | 266                | 976            | 30                                                                           | 2166,67                | 4099               | 426           | 255                | 456            |
|                | 0,1       | 3               | 22                                                           | 1365,43                | 4927               | 1266          | 245                | 613            | 40                                                                           | 2888,88                | 3611               | 325           | 229                | 434            |
| 70 °ШР         | 0,2       | 1               | 30                                                           | 5455,96                | 4962               | 3800          | 286                | 792            | 81                                                                           | 17550,00               | 4030               | 303           | 248                | 436            |
|                | 0,1       | 1               | 22                                                           | 4191,56                | 5546               | 2464          | 246                | 520            | 49                                                                           | 10616,00               | 4007               | 210           | 260                | 400            |
|                | 0,15      | 2               | 35                                                           | 3258,42                | 4655               | 5251          | 277                | 832            | 42                                                                           | 4550,00                | 4905               | 261           | 230                | 340            |
|                | 0,2       | 3               | 32                                                           | 1939,90                | 4635               | 4338          | 282                | 888            | 50                                                                           | 3611,41                | 4289               | 295           | 256                | 426            |
|                | 0,1       | 3               | 29                                                           | 1841,75                | 5438               | 1308          | 250                | 507            | 60                                                                           | 4333,33                | 3911               | 315           | 249                | 388            |

## ПРИЛОЖЕНИЕ Д

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**ПАТЕНТ**  
НА ИЗОБРЕТЕНИЕ  
**№ 2811135**

**Размалывающая гарнитура дисковой мельницы**

Патентообладатель: **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва" (СибГУ им. М.Ф. Решетнёва) (RU)**

Авторы: **Алашкевич Юрий Давыдович (RU), Петрова Анастасия Алексеевна (RU), Воронин Иван Андреевич (RU), Ковалев Валерий Иванович (RU)**

Заявка № **2023125074**  
Приоритет изобретения **29 сентября 2023 г.**  
Дата государственной регистрации  
в Государственном реестре изобретений  
Российской Федерации **11 января 2024 г.**  
Срок действия исключительного права  
на изобретение истекает **29 сентября 2043 г.**

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности



**Ю.С. Зубов**

