

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования

«Сибирский государственный университет науки и технологии
имени академика М.Ф. Решетнева»

 На правах рукописи

ВИТИТНЕВ АЛЕКСАНДР ЮРЬЕВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗМОЛА
ВОЛОКНИСТЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ
ДРЕВЕСНОВОЛОКНИСТЫХ ПЛИТ**

05.21.03 Технология и оборудование химической переработки биомассы дерева;
химия древесины

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
академик РАО, д. т. н., профессор
Алашкевич Юрий Давыдович

Красноярск - 2019

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	1
1 Критический анализ литературных источников по рассматриваемому вопросу	9
1.1 Анализ теоретических материалов по подготовке волокнистых полуфабрикатов в производстве ДВП	9
1.2 Геометрические особенности рисунков размольных гарнитур быстроходных ножевых дисковых мельниц	21
2 Теоретическая часть.....	39
2.1 Распределение единичных ножей прямолинейной формы по зонам размола поверхности гарнитуры	39
2.2 Определение основных технологических параметров предлагаемой размольной гарнитуры	45
2.3 Влияние углов скрещивания ножей ротора и статора на процесс размола.....	55
2.4 Определение силовых характеристик при скрещивании режущих кромок ножей предлагаемой гарнитуры ротора и статора.....	60
3 Экспериментальная часть.....	69
3.1 Выбор основных направлений и методов исследований процесса размола волокнистых полуфабрикатов	70
3.1.1 Выбор методов исследований	70
3.1.2 Методика определения размерно-качественных характеристик древесноволокнистого полуфабриката и влияния их на физико-механические свойства плит, удельного расхода электроэнергии.....	73
3.2 Планирование эксперимента.....	77
3.3 Реализация эксперимента.....	83
3.3.1 Экспериментальные установки для проведения исследований.....	83
3.3.2 Последовательность проведения экспериментов.....	85
3.4 Результаты экспериментальных исследований процесса размола волокнистого полуфабриката.....	87
3.4.1 Исследование влияния конструктивных и технологических параметров процесса размола на размерно-качественные характеристики волокнистого полуфабриката.....	89

3.4.2 Физико-механические свойства древесноволокнистых плит.....	100
3.4.3 Сопоставление теоретических исследований с экспериментальными данными.....	105
4 Практическая реализация результатов работы.....	110
4.1 Исследование зависимости удельного расхода электроэнергии при подготовке волокнистого полуфабриката с использованием новой конструкции гарнитуры.....	110
4.2 Оптимизация процесса размола древесноволокнистого полуфабриката и его размерно-качественных характеристик в производстве ДВП.....	114
4.3 Оценка экономической эффективности эксплуатации предлагаемой конструкции размольной гарнитуры при размоле древесноволокнистого полуфабриката в производстве ДВП.....	119
Основные выводы и результаты диссертационной работы.....	126
Библиографический список.....	128
Приложение А.....	138
Приложение Б.....	139
Приложение В.....	140
Приложение Г.....	141
Приложение Д.....	142
Приложение Е.....	149

Введение

Лесная промышленность — это совокупность отраслей промышленности, связанных с заготовкой и переработкой древесины. На территории России размещено 1/4 всех мировых запасов древесины, что составляет 45 % всей площади страны. Лесной комплекс включает в себя: лесозаготовительную промышленность, направленную на заготовку древесины; деревообрабатывающую промышленность, деятельностью которой, является механическая и химико-механическая обработка и переработка древесины (плитное производство, мебельное производство, производство пиломатериалов и др); целлюлозно-бумажная промышленность, занимающаяся преимущественно химической переработкой древесины (целлюлозно-бумажное производство); лесохимическая промышленность, осуществляющая производство древесного угля, канифоли и скипидара [1].

Одной из важнейших задач лесной промышленности, является комплексная переработка и использование древесины. Развитие производства плитных материалов, таких как древесноволокнистые плиты (ДВП), используемые в различных областях народного хозяйства и эффективно заменяющие различные пиломатериалы и фанеру, является одним из приоритетных направлений, способствующим решению проблемы комплексного использования древесины.

Древесноволокнистые плиты (ДВП) наряду с различными пиломатериалами, фанерой и другими подобными плитными материалами обладают рядом преимуществ. Физико-механические свойства твердых ДВП близки соответствующим показателям натуральной древесины, а в некоторых моментах превосходят их, например сравнительно небольшими изменениями в «условиях переменной влажности», возможностью придания специальных свойств плитам, высокой степенью механизации и автоматизации при их производстве, относительно невысокой себестоимостью изготовления, широким спектром

применения в различных областях народного хозяйства (в строительстве, домостроении, производстве мебели, тары, контейнеров, ящиков и др).

В выпуске французского журнала «Bois sciéres» 1958 года, отмечено, что развитие плитного производства началось в 1912 году в России, когда впервые получили древесноволокнистую плиту, более прочную и гибкую, чем древесина. Только через 20 лет в Советской России, был усовершенствован такой способ получения ДВП и разработан специальный дефибратор для подготовки древесного сырья. В дальнейшем проводились исследования по повышению физико-механических свойств древесноволокнистых плит путем изменения режимов горячего прессования, а также введения гидрофобизирующих компонентов для улучшения водостойкости продукции, что способствовало совершенствованию их производства [2]. Крупномасштабное «промышленное производство ДВП из специально получаемой древесной массы» было начато в США в 1922 г., где был осуществлен в 1926 г. пуск первого завода и налажено серийное производство ДВП. Развитие производства волокнистых плит в Европе началось несколько позже в 1929 г., в Швеции тогда было два завода, выпускавших всего 11 тыс. т плит в год. В 1939 г. в Швеции, Норвегии и Финляндии насчитывалось уже 14 заводов мощностью 161 тыс. т в год (46 млн м²). Развитие плитной отрасли происходило стремительными темпами и в мировых масштабах производство составляло в 1932 г. около 10 млн м², а в течение следующих шести лет увеличилось в 20 раз. В 1960 г. годовой выпуск плит составлял 1,1 млрд м² [2].

Промышленное производство древесноволокнистых плит мокрым способом в нашей стране было организовано в 1936 г. на Новобелицком (республика Белоруссия) лесохимическом заводе, где был введен в эксплуатацию цех мощностью 1,6 млн м² и практически в тот же период времени в Москве Нагатинский завод, мощностью в 3,2 млн м² твёрдых и изоляционных плит [2]. В послевоенный период в 1948 г. в СССР было выпущено 2,8 млн м² древесноволокнистых плит. За период 1946-1965 гг. было построено 47 заводов по выпуску ДВП, и в 1965 г. их выпуск составил 138 млн м². В 1975 г. было

произведено 408,6 млн.м² древесноволокнистых плит. В 1980г. объём их выпуска составил 549 млн м². Начиная с 1971 г. по объёму промышленного производства древесноволокнистых плит СССР занимает второе место в мире (после США) и первое в Европе. На предприятиях Минлесбумпрома СССР изготавливалось до 90 % общесоюзного выпуска ДВП. Наряду с бурным ростом производства древесноволокнистых плит, можно наблюдать и некоторый спад в определенные годы (1990-2000 гг.), это объясняется сложной кризисной ситуацией в стране. В начале 20-го века объёмы выпуска древесноволокнистых плит стали постепенно нарастать и составили 271 млн м², в 2004 г. выпущено 342 млн м² плит. В период с 2006-2008 гг. наблюдалось динамичное развитие производства ДВП. В связи с кризисом в 2009 г., максимальное падение выпуска ДВП достигало 38 %.

На сегодняшний день распространено производство ДВП сухим и мокрым способом. В технологии производства ДВП сухим способом существенным недостатком, является применение в качестве связующего высокотоксичных смол, в отличие от мокрого способа, где при использовании сырья хвойных пород, связующее, как правило, не используют, при условии высоких качественных характеристик древесноволокнистого полуфабриката, из которого получают плиты. Стоит отметить, что в последние годы плиты производства ДВП сухим способом имеют больший спрос, чем мокрым, за счет большего потребления электроэнергии и обслуживания оборудования [3], что в результате сказывается на себестоимости плиты.

Качество готовых плит, в большей степени определяет качество древесноволокнистого полуфабриката, которое напрямую зависит от эффективности процесса размола. В настоящее время учеными научной школы Ю. Д. Алашкевича исследованы многие теоретические вопросы по разработке различных видов рисунков гарнитур для размола целлюлозного волокна в ЦБП [4-13], при этом остались не в полной мере раскрыты вопросы, связанные с размолом древесноволокнистого полуфабриката для производства ДВП. Конструкция размольной гарнитуры для производства ДВП на протяжении уже

60-70 лет однотипна и не совсем эффективна, что обуславливается отсутствием научно обоснованной теории при ее создании. Основанием являлись накопленные в течение многих лет практические данные, которые для каждого конкретного случая трудно воспроизводимы. Отсутствие теоретических обоснований выбора той или иной ножевой гарнитуры при использовании новых технологий и современного оборудования приводит к отставанию промышленности, ухудшению качества продукции и уменьшению рентабельности производства [14-16].

В настоящее время качественные характеристики древесноволокнистых полуфабрикатов и физико-механические свойства ДВП получаемых из них, зачастую не соответствуют требованиям ГОСТ 4598-2018, и при появлении на рынке строительных и отделочных материалов, таких как OSB (ориентированная стружечная плита), ДСтП (древесно-стружечная плита), фанера и др., ДВП теряют свою конкурентную привлекательность. Ввиду сложной финансово-экономической ситуации в стране на сегодняшний день, процесс обновления парка дорогостоящих размольных агрегатов в производстве ДВП довольно проблематичен. Тем не менее, сохранение и восстановление технологических линий производства ДВП мокрым способом оправдано, как с экономической стороны, так и с экологической. Наблюдается рост требований к экологичности плит и их физико-механическим свойствам, которые определяют дальнейшее использование в различных отраслях промышленности [16-18]. Вышесказанное требует проведения научных исследований в этом направлении для возможности изготовления плитной продукции высокого качества.

Наиболее реальным путем сохранения и увеличения промышленного потенциала в нынешней кризисной ситуации, является поддержание имеющегося оборудования в работоспособном состоянии с продолжением его модернизации на базе отечественных разработок [19]. Исследования в области подготовки древесноволокнистого полуфабриката, совершенствования размольных органов существующего оборудования является актуальным и позволит получать древесноволокнистый полуфабрикат и готовые плиты из него высокого качества,

отвечающие требованиям стандартов и потребителей, создать конкурентоспособность на рынке плитных материалов.

Таким образом, на основании вышесказанного определена цель и задачи настоящих исследований.

Цель настоящих исследований: совершенствование процесса размола волокнистых полуфабрикатов в производстве ДВП.

Задачи исследования:

1. Проанализировать работы других исследователей, связанные с процессами размола древесноволокнистых полуфабрикатов в производстве ДВП, и выявить недостатки отдельных исследований по рассматриваемому вопросу;
2. Теоретически обосновать построение единичного ножа и в целом рисунка предлагаемой гарнитуры, определить скоростные характеристики движения ножей ротора относительно ножей статора, а также усилия, возникающие при их контакте;
3. Определить основные технологические параметры гарнитуры: секундную режущую длину, поверхность размола, количество точек пересечения (контактов) ножей, циклическую элементарную длину ножевой гарнитуры в сравнении с традиционной конструкцией;
4. Определить силовые характеристики движения ножей ротора при контакте режущих кромок с ножами статора гарнитуры предлагаемого исполнения;
5. Установить влияние основных технологических, конструктивных и энергосиловых параметров процесса размола на размерно-качественные характеристики волокнистого полуфабриката, в частности отношение длины волокна к его диаметру (L/d) и физико-механические свойства готовой плиты;
6. Разработать оптимальные режимы процесса размола с учетом изменения степени помола древесного волокна после дефибратора, размерно-качественных характеристик волокнистого полуфабриката и физико-механических свойств плит, оценив экономическую эффективность использования предлагаемой

размольной гарнитуры в размалывающих машинах при производстве ДВП мокрым способом.

Объект исследований – производство древесноволокнистых плит.

Предмет исследований – размол древесного волокна в производстве древесноволокнистых плит.

Научная новизна:

- впервые дан теоретический анализ построения рисунка вновь спроектированной размольной гарнитуры преимущественно фибриллирующего воздействия на древесное волокно, в отличие от укорачивающего воздействия при использовании традиционной конструкции в производстве ДВП;

- впервые получены статистически-математические модели, обуславливающие процесс размола при использовании разработанной конструкции гарнитуры, качественные характеристики древесноволокнистого полуфабриката и физико-механические свойства готовой продукции;

- оптимизированы режимы процесса размола при эксплуатации предлагаемой размольной гарнитуры, качественные характеристики древесноволокнистого полуфабриката, обеспечивающие необходимые физико-механические свойства плиты без применения дополнительных связующих при минимизации энергетических затрат на размол в производстве ДВП.

Практическая значимость работы:

- разработана новая конструкция ножевой гарнитуры, отличающаяся от ранее используемых видов своими конструктивными и технологическими параметрами, позволяющими изменить силовые факторы на волокнистый полуфабрикат в процессе его обработки, что, в конечном счете, приводит к повышению качественных показателей процесса размола и снижению энергозатрат;

- теоретические и экспериментальные исследования, позволяют обосновать и прогнозировать эффективность предлагаемой конструкции размольной гарнитуры при размолке волокнистых полуфабрикатов в производстве ДВП;

- результаты исследования процесса размола волокнистого полуфабриката с использованием разработанной конструкции гарнитуры фибриллирующего воздействия, позволяют: обеспечить необходимые размерно-качественные характеристики полуфабриката и физико-механические свойства готовых плит без применения дополнительных связующих;

- предлагаемая конструкция гарнитуры дисковой мельницы, и установленные оптимальные режимные параметры процесса размола древесного волокна, его качественных характеристик позволяют повысить эффективность процесса, качество готовой продукции, снизив энергопотребление.

Преимственность и практическая значимость проведенных исследований отражена в технических актах проверочных испытаний математических моделей, описывающих процесс размол волокнистого полуфабриката и внедрения результатов научной работы на производство ДВП мокрым способом предприятия Segezha Group ОАО «Лесосибирский ЛДК №1».

Автор защищает:

- конструкцию размольной гарнитуры, обеспечивающую качественный процесс размола древесного волокна;

- теоретический анализ построения рисунка гарнитуры на поверхности дисков ротора и статора;

- теоретическое обоснование силовых факторов при контакте ножей ротора и статора в процессе размола и возможность регулирования нормальной и касательной составляющих усилий на древесное волокно при изменении угла скрещивания ножей;

- разработанную модель, проведенного многофакторного эксперимента при использовании новой конструкции гарнитуры, позволяющую адекватно описать процесс размола древесноволокнистого полуфабриката;

- результаты экспериментальных исследований процесса размола при различных входных параметрах;

- результаты оптимизации процесса размола древесноволокнистого полуфабриката, его размерно-качественных характеристик, позволяющие обеспечить высокие физико-механические свойства готовой плитной продукции при снижении энергозатрат.

Соответствие паспорту специальности.

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

Апробация работы.

Результаты работы докладывались на Международных научно-практических конференциях: «Новейшие достижения в области инновационного развития в химической промышленности и производстве строительных материалов» (Минск, 2015), и Всероссийских научно-практических конференциях: «Молодые ученые в решении актуальных проблем науки» (Красноярск, 2015, 2017, 2018), «Лесной и химический комплексы – проблемы и решения» (Красноярск, 2015-2017), «Новые достижения в химии и химической технологии растительного сырья» (Барнаул, 2017), «В мире научных открытий» (Ульяновск, 2015).

Публикации.

По результатам исследований опубликованы 19 печатных работ, из них одна – в изданиях, индексируемых базой SCOPUS, две – в изданиях, входящих в перечень ВАК, получено два патента (патент на изобретение, патент на полезную модель).

1 Критический анализ литературных источников по рассматриваемому вопросу

С целью проведения исследований, направленных на совершенствование процесса размола волокнистых полуфабрикатов в производстве древесно-плитных материалов, в данном разделе диссертационной работы рассмотрено состояние производства древесноволокнистых плит на современном этапе развития плитной отрасли; выполнен анализ оборудования, используемого для подготовки волокнистых полуфабрикатов, а также геометрических особенностей размольных элементов ножевых дисковых машин, оказывающих влияние на их размерно-качественные характеристики получаемого полуфабриката в процессе его размола.

1.1 Анализ теоретических материалов по размолу волокнистых полуфабрикатов в производстве ДВП

Древесноволокнистыми плитами (ДВП) называются листовые материалы, изготовленные из переплетенных и сформированных в ковер влажных или сухих древесных волокон посредством горячего прессования или сушки. Древесные волокна получают из низкокачественной древесины, отходов лесопиления и деревообработки, первичное соединение которых обуславливается расположением волокон и способностью к связеобразованию в результате их подготовки. На пути развития производства древесноволокнистых плит наибольшее применение и распространение получили мокрый и сухой способы производства. Наряду с ними существуют мокросухой и полусухой способы производства плит, которые менее распространены в плитном производстве [20].

Мокрый способ производства ДВП подразумевает выработку суспензии древесноволокнистой массы определенной концентрации, формирование ковра влажностью 70-80 % и последующее его горячее прессование [20]. При сухом

способе, ковер формируют из древесных волокон влажностью 5-8 %, смешанных со специальным связующим клеем, после чего сформированный ковер подвергается прессованию [21].

Процессы подготовки волокнистых полуфабрикатов (размола) в производстве ДВП идентичны как при мокром, так и при сухом способе, однако в дальнейшем технологические процессы формирования ковра и его прессования различны [21]. Производство древесноволокнистых плит мокрым способом близко по технологии к целлюлозно-бумажному производству.

Древесноволокнистые плиты находят свое применение в различных областях народного хозяйства [20]: в строительстве (для наружной отделки и внутренней изоляции, при черновом покрытии и выравнивании полов, в сельскохозяйственных постройках); в мебельном производстве (для изготовления задних стенок шкафов, мебели, днищ ящиков); автомобиле- и судостроении; малоэтажном домостроении; в производстве контейнеров, ящиков, щитов и др. В 1858 году впервые в США был запатентован один из первых способ изготовления материала, аналогичного древесноволокнистым плитам [18, 22]. В 1864 году Карлом Мюнхом была предложена идея производства мягкой плиты из древесных волокон. Сконструировав агрегат, ему удалось изготовить на нем первую в мире древесноволокнистую плиту, частично изменив процесс производства бумаги [23- 25].

Развитие производства ДВП способствовало изучению данной области промышленности. Различные исследования [21, 17, 26-29] проводились с целью, объяснения сил связеобразования волокон и структуры плиты. ДВП, как и бумага, является капиллярно-пористым коллоидным материалом. Пористость структуры плиты, обусловлена специфическим характером пор и гигроскопичностью, что характеризует особые свойства этого материала, находящиеся в тесной зависимости от капиллярных явлений [21]. Л. Котрэлл, Я. Г. Хинчин и др. [30, 31] высказывали гипотезу о существовании связей по полярным гидроксильным группам поверхности микрофибрилл целлюлозы и о роли воды при образовании этих связей. Я. Г. Хинчин на основании новой теории связи между волокнами

сделал первую попытку объяснить многие явления, происходящие в процессах производства бумаги [30, 31]. Американские исследователи еще в 1943 г. экспериментально доказали существование водородных связей, представляющих собой особого вида вторичные валентности [30, 31]. Эксперимент был основан на изучении спектра поглощения инфракрасных лучей, который отражал «каждое изменение в колебаниях водородных атомов при присоединении их к другим атомам структуры». Теория водородной связи применительно к структуре бумажного листа позволила также объяснить многие свойства плиты, в том числе увеличение или уменьшение механической ее прочности [21].

А. А. Леонович, рассматривая вопросы химических и физико-химических процессов при получении древесноволокнистых плит для повышения их свойств огнезащищенности, подтвердил ранее проведенные исследования других авторов, касаемые некоторых вопросов, и дополнил картину формования плиты [18, 28]. В работах авторов [21, 32, 33] можно наблюдать наиболее полную картину структурообразования древесноволокнистых плит. Рассматривая и анализируя структуру ДВП, можно заключить, что «древесноволокнистая плита представляет собой многослойную полидисперсную структуру, которая состоит из волокнистых и неволокнистых компонентов, сросшихся между собой в блоки срастания, неравномерно распределенных в плите и соединенных друг с другом механическими и адгезионно-когезионными силами трения» [18, 21]. Также при рассмотрении плиты на микроуровне стоит отметить, что древесное волокно является основным элементом структуры, обладающим высокими физико-механическими свойствами и способностью к образованию пространственной волокнистой сетки в результате прочных межволоконных контактов [34, 35].

П. Х. Ласкеев, исследуя в своих работах [36] свойства древесных волокон во влажном состоянии, отмечает, что древесные волокна, в отличие от целлюлозных, обладают некоторой гибкостью лишь в узком диапазоне деформаций. Гибкость волокна напрямую зависит от отношения длины к его диаметру. Длинные и тонкие волокна обладают большей гибкостью по сравнению с короткими

волокнами того же диаметра. Повышенную прочность древесного волокна во влажном состоянии обеспечивает его достаточная гибкость и способность к связеобразованию, которые достигаются при определенной степени его разработки в процессе размол [36]. Практическими данными подтверждается, что при подготовке древесноволокнистого полуфабриката расщепление волокон вдоль по длине способствует сохранению его начальной высокой прочности во влажном состоянии [36]. Таким образом, в процессе размол волокнистого полуфабриката необходимо обеспечить такие воздействия, при которых волокна будут гибкие и прочные, с высокой способностью к связеобразованию.

Н. Г. Чистова отмечает, что в растительных волокнистых полуфабрикатах содержится 8-15 % мелких морфологических элементов растительного сырья, так называемая первичная фракция мелочи [21, 22]. В процессе размол древесных волокон в результате их фибриллирования образуется вторичная фракция мелочи, которая состоит из пучков фибрилл, слизи, тонких волокнистых стенок [21, 22]. Мелочь является естественным связующим армирующей древесноволокнистой сетки и обеспечивает образование дополнительных межволоконных связей, а содержание ее зависит от вида волокнистого полуфабриката, степени его помола [21, 22]. Наличие мелких волокон в древесноволокнистой массе, до 40-45 %, оказывает положительное влияние на прочность готовой плиты, при этом повышается водостойкость плит, так как содержание мелких волокон уменьшает пористость плиты и соответственно снижается количество воды, проникшей в ее структуру. В то же время дальнейшее увеличение мелкой фракции в основной массе волокна снижает прочностные показатели готовой плиты, увеличивается шероховатость поверхности [21, 22].

П. Х. Ласкеев, исследуя вопросы структуры плиты в своих работах [36], также отмечает большое влияние структуры мелочи, характеризуемой средней длиной и диаметром волокон, отношением их длины к диаметру, а также удельной поверхностью.

Таким образом, наличие мелочи в определенных объемах является естественным и необходимым компонентом, входящим в структуру плиты. При содержании в общем объеме плиты хорошо разработанных мелких и длинных волокон приводит к повышению величины общей площади, на которой устанавливаются межволоконные связи, в результате повышается и механическая прочность ДВП. В результате исследований различных авторов [21, 22, 36, 37], связанных со структурообразованием плиты на макро- и микроуровнях, стоит отметить, что на современном этапе развития плитной отрасли предложена теоретическая модель структуры ДВП [21], позволяющая понимать из каких компонентов состоит плита ДВП. Анализируя ее, можно заключить, что природная прочность волокон влияет на прочность древесноволокнистой плиты, но используется не в полной мере. Это обусловлено тем, что влияние на механическую прочность ДВП оказывает как средняя прочность исходных волокон, так и прочность межволоконных связей. «Наличие волокон с повреждениями в виде трещин, неоднородности структуры и прочее влекут за собой возникновение опасных местных перенапряжений, превосходящих средние напряжения в плите» [21].

Авторы [21, 22, 28, 32, 38], исследуя физико-механические свойства древесноволокнистых плит, экспериментальным путем доказали, что значения прочности и плотности плиты возрастают с увеличением степени помола древесноволокнистого полуфабриката. Значение толщины плиты, ее водопоглощение уменьшаются с увеличением степени помола, т.е. качественные показатели плиты, в целом, также улучшаются. С изменением степени помола изменяются и морфологические характеристики древесноволокнистого полуфабриката: увеличение степени помола влечет снижение количества крупной фракции за счет возрастания мелкой и средней. Таким образом, степень разработки полуфабриката в процессе его подготовки (размола) несомненно оказывает влияние на физико-механические свойства древесноволокнистых плит, а также на все последующие процессы производства ДВП [21, 22].

Повышение физико-механических показателей ДВП с приростом степени помола обуславливается тем, что такой древесноволокнистый полуфабрикат имеет хорошо разработанную поверхность (тонкого помола), содержит более гибкие и пластичные волокна, способные к связеобразованию в процессе отлива ковра [21, 22]. Высокая степень помола способствует более равномерному структурированию каркаса древесноволокнистого ковра, с преобладанием ориентации волокна параллельно движущейся сетке, а при прессовании в зоне их контактов между собой - возникновению водородных связей. Дальнейшее повышение степени помола, свыше 24 ДС для твердых плит, негативно будет влиять, замедляя формирование древесноволокнистого ковра на отливной машине. Древесноволокнистый полуфабрикат медленнее обезвоживается на сетке, что ведет к удлинению цикла прессования из-за более высокой влажности древесноволокнистого ковра и ухудшению физико-механических свойств готовых плит, снижая экономическую эффективность производства плит [21, 22].

На основании проведенных исследований авторов можно отметить, что прочностные свойства ДВП плиты зависят не только от степени разработки волокнистого полуфабриката и фракционного состава, но и ориентации древесных волокон в плите [21, 22, 36].

Исследования [21, 22, 36], показали, что наибольшую прочность плиты обеспечивают волокна, расположенные вдоль пласти плиты, «они должны составлять не менее 60 % от общего объема древесноволокнистого полуфабриката». «Увеличение процентного состава волокна, ориентированного под некоторым углом к пласти, ведет к снижению прочности плиты и других немаловажных ее характеристик, причем чем больше угол наклона волокон, тем слабее прочностные связи в плите». Исследования поперечного и послойных (на разных уровнях) срезов древесноволокнистого ковра и готовой плиты показали (степень помола 23 ДС), что распределение волокон крупной фракции (60 %) наблюдается преимущественно в пласти со стороны сетки, волокна средней фракции (60 %) преобладают в средних слоях ковра, более мелкие

распределяются по всей толщине и в количественном соотношении увеличиваются от нижней пласти к верхней [21, 22]. Это можно обеспечить, воздействуя на волокнистый полуфабрикат в процессе его размола таким образом, чтобы в результате преобладала длиноволокнистая фракция с хорошо разработанной фибриллированной поверхностью. Достичь определенного качества полуфабриката возможно, изменяя технологические и конструктивные параметры процесса размола: зазор между размалывающими элементами (удельное давление в рабочем зазоре), геометрию размалывающей поверхности гарнитуры, частоту вращения ротора, концентрацию древесноволокнистой массы, и т.д. [21, 39-41].

Процесс размола древесноволокнистых полуфабрикатов в производстве ДВП, как и в целлюлозно-бумажном производстве, является важнейшим этапом, определяющим качество полуфабрикатов и готовой продукции. В 30-х годах для подготовки волокнистых полуфабрикатов в СССР стали применять конические и в 50-х дисковые мельницы [31, 36, 42- 45].

В своих исследованиях Ю. Д. Алашкевич [40] отмечает, что на второй ступени размола использование дискового рафинатора более эффективно, так как прилагаемое «волокнистой массе ускорение в радиальном направлении располагает продольную ось волокна параллельно плоскости ножа». При подготовке древесноволокнистого полуфабриката в рафинаторе менее интенсивно происходит укорачивание волокон, чем при тех же условиях в конической мельнице.

В производстве ДВП мокрым способом подготовка древесноволокнистых полуфабрикатов на второй ступени размола преимущественно осуществляется при низких концентрациях на быстроходных ножевых дисковых мельницах (рафинаторах), аналогичных машинах, используемых в производстве ЦБП для размола целлюлозных волокон. Оборудование для размола волокнистых полуфабрикатов, его цель, происходящие процессы и явления при подготовке как в производстве ДВП, так и в производстве ЦБП очень схожи. Поэтому можно

сделать предположение, что влияние факторов данного процесса на качество полуфабрикатов имеет аналогичную тенденцию, однако закономерности процесса размола могут иметь некоторые отличия ввиду различных прочностных характеристик, вида предварительной обработки целлюлозных и древесных волокон.

Многочисленные исследования в области процесса размола волокнистых полуфабрикатов подтверждают, что увеличение концентрации массы, величины зазора между размалывающими дисками (удельного давления), частоты вращения ротора вызывают сокращение продолжительности размола полуфабрикатов и способствуют получению волокон более длинноволокнистой фракции и значительному упрочнению готовой продукции [46]. Влияние основных факторов процесса размола отражено в работах [4, 21, 40, 100].

Анализируя исследования этих авторов, занимающихся размолом волокнистых полуфабрикатов в производстве ЦБП, стоит отметить, что, наряду с основными вышеперечисленными факторами, достижение оптимальных режимов процесса, требуемого качества полуфабриката и готовой продукции возможно, изменяя геометрию поверхности размалывающих элементов дисковых мельниц, обеспечивая необходимые удельные давления и нагрузки на волокно, режим течения волокнистой массы и т.д.

Авторы в своих исследованиях изучали влияние технологических и конструктивных параметров размола, что, несомненно, очень важно, однако, по нашему мнению, недостаточно уделено внимания геометрии поверхности размольной гарнитуры для подготовки древесноволокнистого полуфабриката в производстве ДВП.

Доказано, что состояние размалывающей поверхности гарнитуры оказывает значительное влияние на качество древесноволокнистого полуфабриката. «При размоле волокна собираются слоями на передней кромке ножа, где они подвергаются действию сил трения и сжатия. В результате происходит их сплющивание и закручивание, а на поверхности волокна образуется тонкая,

способная к связеобразованию волокнистая структура» [21]. Часть волокнистого материала истирается в древесные обрывки различной длины, что уменьшает содержание длиноволокнистой фракции и увеличивает количество средней фракции в общем объеме массы.

В ходе проведения исследований Ю. Д. Алашкевичем, Н. Г. Чисовой экспериментальным путем установлено, что «рабочая поверхность ножей ротора истирается интенсивнее поверхности ножей статора» и при износе ножей гарнитуры меняется соотношение L/h (отношение ширины межножевой ячейки к высоте ножа), оказывая значительное влияние на процесс подготовки древесноволокнистого полуфабриката.

Результаты экспериментальных исследований показывают, что при всех прочих равных условиях первоначально происходит увеличение прироста степени помола с интенсивностью износа рабочей поверхности гарнитуры до 60-70 %, при дальнейшем износе гарнитуры качественные показатели полуфабриката ухудшаются.

Можно заключить, что оптимальные значения параметра L/h размольной гарнитуры, зазора между дисками и концентрации древесноволокнистой массы способствуют при размоле раздавливанию, растиранию, раздвиганию волокон, что способствует сохранению их естественной длины.

По нашему мнению, изменение традиционной конструкции размольной гарнитуры сможет обеспечить необходимое качество древесноволокнистого полуфабриката при всех прочих равных условиях процесса размола. Соответственно дополнительное регулирование технологических и конструктивных параметров процесса будет осуществляться более эффективно.

«Преобладание в массе средних фракций волокна увеличивает прочностные показатели продукции как при мокром, так и при сухом способе производства ДВП» [21, 22, 32, 36, 38, 47].

Анализируя результаты исследований этих авторов, можно отметить, что величина рабочего зазора между ножами ротора и статора, концентрация

древесноволокнистого полуфабриката оказывают влияние на показатель предела прочности плит при изгибе. Степень помола, при которой получены максимальные значения прочностных свойств плиты, зависит от вида волокна, конструктивных параметров гарнитуры и технологических режимов его размола. Размол увеличивает контактную поверхность волокон при формовании и таким образом обуславливает повышение прочности плит, что подтверждено экспериментально авторами [21, 22, 32, 38].

По нашему мнению, размольная гарнитура с преобладающим фибриллирующим воздействием, отличная от традиционной конструкции, за счет своих геометрических особенностей сможет обеспечить высокие значения основных технологических параметров размола (циклической элементарной, секундной режущей длины, размалывающей поверхности гарнитуры), небольшое количество точек пересечения ножей ротора с ножами статора, режим течения древесноволокнистой массы. В результате это позволит подготавливать волокнистый полуфабрикат с преобладанием волокон длинноволокнистой фракции и хорошо разработанной фибриллированной поверхностью, обеспечивая его необходимое качество и соответственно высокие физико-механические свойства готовых плит из него.

Невозможность снижения диаметральных размеров древесных волокон отрицательно отражается на прочности плит, ввиду того что удельная поверхность по пласти тонких волокон значительно больше. Изменяя конструкцию гарнитуры, можно максимально сохранить длину волокон, разработать поверхность, при этом снизить их толщину. Это позволит увеличить прочность плит при статическом изгибе. Гибкие и эластичные волокна с хорошо разработанной поверхностью, достаточным наличием мелочи в общем составе композиции способствуют при изготовлении плиты сближению волокон и установлению между ними плотного контакта, соответственно повышая плотность плиты.

Анализ работ авторов [21, 22, 28, 48], показал, что «при формировании древесноволокнистого ковра в водной среде происходит структурирование и ориентирование волокна в его скелете, что полностью отсутствует, при всех прочих равных условиях, при формировании ковра в воздушной среде», это является одной из причин, объясняющих, почему при производстве ДВП сухим способом нельзя обойтись без связующего и проклеющего состава для получения плиты с заданными свойствами. Однако стоит отметить, что в настоящее время при производстве ДВП мокрым способом также используют связующее, чтобы обеспечить физико-механические свойства готовых плит. Это можно объяснить тем, что традиционно используемая конструкция размольной гарнитуры не может обеспечить эффективную разработку волокна и его необходимые размерно-качественные характеристики (степень помола, фракционный показатель качества, фракционный состав, среднюю длину и диаметр волокон, их отношение и т.д.).

Из вышесказанных выводов следует, что использование новых конструкций гарнитур, регулируя технологические параметры размолы [21, 40, 49-51] и обеспечивая необходимую степень помола, фракционный показатель качества, фракционный состав волокнистого полуфабриката, его среднюю длину и диаметр волокон, их отношение, возможно, позволит изготавливать плиту без использования дополнительных связующих, улучшая экологические вопросы производства ДВП.

На сегодняшний день, рассматривая состояние плитной отрасли, развитие производства древесноволокнистых плит, можно отметить: несмотря на то, что в последнее время стали уделять серьезное внимание производству ДВП сухим способом, процесс производства плит мокрым способом остается актуальным [48, 52-54]. Это можно объяснить тем, что плиты, полученные мокрым способом, имеют свои достоинства и отличительные особенности [21, 47, 55, 56]. Использование таких плит возможно как в строительстве в качестве отделочного и изоляционного материала, так и в производстве мебели, что обеспечивается

классом их экологичности. Основными потребителями данного ресурса являются: Узбекистан, Таджикистан, Казахстан, Польша, Германия, Швеция, Финляндия, Эстония, Венгрия, Литва, Австрия, Дания, Нидерланды и др. [57, 58].

Анализ литературных источников показал, что процесс размола волокнистых полуфабрикатов является важнейшим этапом, определяющим качество получаемых древесноволокнистых полуфабрикатов и качество готовых плит из них как в производстве ДВП, так и ЦБП. Подготовка волокнистых полуфабрикатов в настоящее время преимущественно осуществляется на быстроходных дисковых мельницах. Основным размалывающим элементом таких установок является размольная гарнитура.

Помимо основных факторов процесса размола, значительное влияние на размерно-качественные характеристики волокнистых полуфабрикатов в процессе их подготовки и соответственно на физико-механические свойства готовой продукции оказывают конструктивные особенности (рисунок) размалывающей поверхности гарнитуры.

Анализируя результаты исследований академика Ю. Д. Алашкевича и его учеников [4, 6, 11, 40, 59] изучающих процесс размола, необходимо отметить, что ими рассмотрены различные вопросы, связанные с изменением, влиянием, теоретическим построением конструкции гарнитуры для целлюлозных волокон в ЦБП, однако в производстве ДВП волокнистый полуфабрикат (древесная масса) имеет несколько другой характер, соответственно и геометрия размалывающей поверхности гарнитуры может быть отличной. Таким образом, практически отсутствуют исследования конструктивных параметров гарнитуры для размола древесного волокна в производстве ДВП, за исключением отдельных вопросов, имеющих фрагментарный характер [21, 32], таких как исследование влияния изменения отношения ширины межножевой ячейки к высоте ножа при износе гарнитуры на процесс размола.

На основании анализа литературных источников можно заключить, что при подготовке древесного волокна в производстве ДВП недостаточно уделено

внимания исследованию конструкции размольной гарнитуры, ее влияния на эффективность процесса размолота, что, по нашему мнению, представляет особый интерес.

С целью совершенствования процесса подготовки древесноволокнистого полуфабриката в производстве ДВП мокрым способом необходимо выполнить анализ геометрических особенностей рисунков размольных гарнитур и их влияние на процесс подготовки различных волокнистых полуфабрикатов в быстроходных ножевых дисковых мельницах.

1.2 Геометрические особенности рисунков размольных гарнитур быстроходных ножевых дисковых мельниц

Геометрические особенности рисунка размольной гарнитуры оказывают значительное влияние на эффективность работы дисковых мельниц и размерно-качественные характеристики получаемого волокнистого полуфабриката [4, 6, 11, 40, 60, 61]. На сегодняшний день разработано большое множество различных типов гарнитур, отличающихся геометрией рисунка рабочей поверхности.

Однако стоит отметить, что накопленный опыт не позволяет осуществить использование рисунка гарнитуры, оптимального при размолотке древесной массы в производстве ДВП [21, 62].

Конструктивными параметрами, определяющими геометрию рисунка рабочей поверхности диска, являются: ширина ножей, ширина и глубина канавок между ножами, наличие перегородок, углов наклона режущих кромок к радиусу диска, направление их наклона и угол скрещивания [6, 11, 40].

Существующие рисунки гарнитуры, особенности их эксплуатации в различных отраслях при подготовке волокнистых полуфабрикатов потребовали классификации по различным признакам, на базе которой возможно разрабатывать и проектировать основные типы фибриллирующего и укорачивающего воздействия

[11, 40, 49]. Как уже было сказано в пункте 1.1, размольное оборудование, используемое в производстве плитной отрасли и в производстве целлюлозно-бумажной продукции, аналогично, механизм размола во многом схож, поэтому представляет большой интерес рассмотреть и проанализировать геометрические особенности размольных гарнитур в производстве ЦБП и их влияние на процесс подготовки волокнистых полуфабрикатов.

Различают исполнение размольной гарнитуры в зависимости от ее пропускной способности: с *закрытым и открытым периферийным выходом массы* [6, 40, 49, 63]. Гарнитура с *закрытым периферийным выходом* используется при подготовке волокнистого полуфабриката невысокой концентрации. Главным отличием рисунков рабочей поверхности данного типа является наличие перегородок в ячейках между ножами, расположенных на диске преимущественно в шахматном порядке или по какой – либо кривой, например по спирали [6, 63, 64]. Подобный тип исполнения рисунка размольной гарнитуры был разработан и запатентован в 2003 году [5] на кафедре МАПТ СибГТУ под руководством академика Ю. Д. Алашкевича. Рабочая поверхность данной гарнитуры разделена на секторы с выполненными на них ножами и межножевыми канавками, нанесенными параллельно одной из радиальных кромок сектора. Согласно изобретению, межножевые канавки закрыты поочередно со стороны входа и выхода, включая и канавки между секторами, что позволяет интенсифицировать процесс, повысить качество и снизить энергозатраты размола [5].

Анализируя вышесказанное, стоит отметить, что при проектировании рисунка размольной гарнитуры необходимо обратить внимание на подобные удерживающие элементы конструкции, если это необходимо для получения полуфабриката определенного качества при эффективном режиме процесса размола.

Рисунок размольной гарнитуры с *открытым периферийным выходом* используется преимущественно для подготовки волокнистых полуфабрикатов на стадии предварительного размола, например, щепы, полуцеллюлозы, с высокой

концентрацией (15...40) % [65]. Оценка эффективности разработки волокна, отчасти производится по *размалывающей способности гарнитуры*, другими словами по отношению площади поверхности при контакте ножей к общей кольцевой площади диска. Эта величина определяет *живое сечение* рисунка гарнитуры и в основном составляет 30 – 70 % от общей площади диска [65].

Рисунки рабочей поверхности гарнитур с открытым выходом отличает то, что *живое сечение* уменьшается от входа в размольную зону к выходу в соответствии с изменением фракционного состава полуфабриката в процессе прохождения его от входной окружной кромки ножа к периферийной [63].

Рабочую поверхность гарнитуры необходимо проектировать с целью обеспечения процесса, в результате которого щепы и пучки волокон удерживались в зоне размола более длительное время [5]. Волокнистая масса высокой концентрации, приобретая свойства твёрдого тела, теряет способность к текучести, и время её нахождения в дисковой мельнице в процессе подготовки не может регулироваться внешним дросселированием [5, 65].

Подобный тип рисунка размольной гарнитуры для целлюлозно-бумажного производства в своих исследованиях предложили Ю. Д. Алашкевич с учениками [4, 6, 49]. «Размалывающая гарнитура включает закрепленное на несущем основании ножевое размалывающее кольцо с ножами, выполненными в форме усеченных секторов. Сектора равномерно расположены по окружности так, что прямые линии их режущих кромок сходятся в центре кольца. Режущим кромкам ножей придана форма фасок с радиально выполненными боковыми сторонами. Эффективность заключается в снижении распределенного удельного давления на волокнистый материал со стороны режущих кромок ножей ротора и статора за счет придания им плоскостной формы или притупления, что обеспечивает интенсификацию, высокое качество полуфабриката и снижение энергозатрат процесса размола» [13].

Наличие фасок у ножей обеспечивает захват достаточного количества волокнистого материала и дальнейшее принудительное протягивание его между

их рабочими поверхностями. При этом на материал оказывается силовое воздействие в виде совместной деформации сжатия и сдвига, возникающей при вращении подвижных ножей относительно неподвижных. Кроме того, нормальная составляющая окружного усилия распределяется по площади сопряжения фасок. За счет этого величины удельного давления в данной гарнитуре имеют меньшие значения по сравнению с известными конструкциями. Поэтому в момент соударения фасок ножей ротора и статора на волокнистый материал, находящийся между ними, оказывается более мягкое воздействие, с преобладанием большей доли нормальных напряжений (ударных воздействий), при одновременном усилении фибриллирующего эффекта [4].

Анализируя вышесказанное, можно отметить, что гарнитур с открытым периферийным выходом обладают меньшей удерживающей способностью массы в зоне размола, в сравнении с гарнитурами, у которых закрытый периферийный выход и существует возможность удерживать массу более длительный промежуток время в зоне размола, с целью требуемой степени разработки волокна.

В зависимости от *распределения ножей на рабочей поверхности*, размольная гарнитура может быть выполнена с *равномерным распределением ножей* и с *распределением ножей по составляющим её секторам* [6, 49]. При *равномерном распределении* межножевые канавки и ножи имеют небольшую диффузорность, чем обуславливается некоторое снижение *размалывающей способности гарнитуры* [6]. Первый вариант исполнения характеризуется увеличением толщины ножей ротора и статора, что влияет на характер размола волокна от садкого к жирному [60].

В своих работах С. Смит высказывает противоречивые мнения этой гипотезы, основанные на факте, что в процессе размола наибольшую роль играют режущие кромки ножей с нависшими на них волокнистыми наслойками, а не вся поверхность ножей [40, 66, 67]. Поэтому влияние в большей степени на гидратацию и фибриллирование волокна в процессе размола оказывает количество режущих кромок, а не толщина ножей. В результате увеличения толщины ножей уменьшается их количество и соответственно общая режущая длина. Количество

обрабатываемых волокон на единицу длины кромки ножа уменьшается, что влечет за собой увеличение направленной нагрузки на отдельные волокна и способствует преобладанию эффекта их укорачивания [60]. Данная теория была подтверждена экспериментальным путем [40, 60].

Сравнение работы дисковых мельниц, гарнитура которых снабжена прямолинейными ножами разной толщины (4, 7, 10 мм), при одинаковой площади контактов рабочих поверхностей ротора и статора в рабочем состоянии, показало, что мельницы с большим количеством ножей, соответственно с тонкими ножами, характеризуются лучшими энергосиловыми показателями, чем мельницы с гарнитурой, снабженной более широкими ножами. Это можно объяснить тем, что за счёт разного количества ножей при одинаковом значении среднего давления во всех случаях удельное давление на кромки ножей будет различно [40].

При относительно небольшой интенсивности удельного давления сжатия на волокнистые наслойки в точках пересечения режущих кромок ножей размольной гарнитуры достигается максимальная степень разработки целлюлозных волокон [40]. Это обуславливается тем, что обеспечивается относительно небольшое количество точек контактов и механических воздействий режущих кромок ножей в динамике на волокнистые наслойки. Обычно данное условие выполняется при малом количестве точек пересечения ножей и достаточно больших значениях секундной режущей и циклической элементарной длины гарнитуры [6, 49].

При выборе эффективного рисунка размольной гарнитуры следует исходить из того, что производительность мельницы и степень помола массы повышаются, а удельный расход энергии уменьшается с увеличением количества ножей и одновременным уменьшением их ширины и ширины межножевых ячеек [6].

Анализируя литературные источники, стоит отметить, что для хорошего соотношения гидратации и коэффициента укорочения волокон ножи не должны быть тоньше 2 – 3 мм, а учитывая прочностные характеристики металла и технологию изготовления гарнитуры, при высоких нагрузках на размалывающие поверхности, толщину ножей целесообразно увеличивать до 5 – 6 мм [40, 60].

Уменьшение ширины межножевых канавок имеет свои пределы, которые зависят от длины обрабатываемого волокна, его фракционного состава и концентрации волокнистой массы. Увеличение концентрации и средней длины волокна повышает гидравлические сопротивления и, как следствие, уменьшается пропускная способность мельницы, а также повышается возможность забивания волокном межножевых канавок размольной гарнитуры [49, 64].

При *секторном распределении* ножей [6, 49] рисунок их распределения может быть разнообразным. Для наиболее используемой в целлюлозно-бумажной промышленности *секторной* размольной гарнитуры характерно исполнение рисунка рабочих поверхностей дисковой мельницы с максимально плотным распределением ножей единичного сектора гарнитуры. Этому способствует то, что ширина межножевых канавок и ножей постоянна вдоль радиуса [6, 49], это обуславливает параллельность ножей.

Отличительной особенностью такого исполнения поверхности от рисунка с *равномерным распределением* ножей является то, что установочные углы режущих кромок всех ножей разные, другими словами, у каждого ножа единичного сектора определенный установочный угол, отличающийся от других [6, 9]. «В характере изменения их величины наблюдается тенденция возрастания в направлении от режущей кромки первого ножа, параллельной одной из образующих сектора, к режущей кромке последнего ножа, пересекающейся с входной окружной кромкой диска гарнитуры» [6, 9, 49]. Данные геометрические особенности построения рисунка секторной гарнитуры позволяют увеличить количество ножей, секундную режущую длину и *размалывающую способность гарнитуры*. При «*секторном распределении* секундная режущая длина на 10 – 15 % больше, чем при *равномерном распределении*», что подтверждают расчёты [68]. Это обуславливает преимущественное использование в производстве гарнитур данного типа [11].

По нашему мнению, предпочтительнее исполнение размольной гарнитуры при секторном распределении. Так как геометрия может быть разнообразной, возможно

обеспечение параллельности ножей и увеличение эффективности размольной гарнитуры.

Рисунки размольных гарнитур при сопряжении их рабочих поверхностей делятся в зависимости от расположения пересекающихся режущих кромок ножей ротора и статора относительно центра их дисков на четыре типа исполнений: одностороннее, двухстороннее, радиальное и комбинированное (зеркальное).

Двухстороннее (обычное) исполнение характеризуется тем, что поверхности дисков ротора и статора имеют одинаковое направление наклона режущих кромок их ножей. При сопряжении дисков размалывающими поверхностями направление наклона режущих кромок ножей ротора и статора противоположны [6, 49, 69], а эксцентриситеты расположены с разных его сторон относительно центра вращения. При рассмотрении движения режущей кромки единичного ножа ротора, поворачивающейся относительно центра вращения, в контакте с неподвижной режущей кромкой единичного ножа статора, наблюдается эффект ножниц [6], при этом, если считать одно их лезвие неподвижным, то можно предположить, что другое лезвие поворачивается относительно центра вращения. Режущие кромки проходят эксцентрично, т. е. с разных сторон относительно центра (двухсторонние ножницы). Данный тип исполнения рисунка при сопряжении рабочих поверхностей размольных гарнитур ножевых размалывающих установок в наибольшей мере применяется в целлюлозно-бумажной промышленности.

Значения установочного угла режущей кромки ножа к радиусу в *двухстороннем* исполнении колеблется в широком диапазоне [6, 49, 65]. При больших значениях углов установки ножей, как и касательных составляющих окружных усилий по сравнению с нормальными, происходит увеличение рубящего воздействия на древесноволокнистый полуфабрикат [6, 49, 60, 65].

Пересечение всех режущих кромок ножей ротора и статора в центре диска характерно при *радиальном исполнении* [9, 49]. Установочные углы режущих кромок ножей ротора и статора к радиусу, их эксцентриситеты относительно

центра вращения и углы скрещивания режущих кромок равны нулю. Такое исполнение рисунка имеет ряд особенностей:

- в процессе работы векторы окружной скорости и окружного усилия, развиваемые режущей кромкой единичного ножа ротора, перпендикулярны;
- контакт режущих кромок ножей ротора и статора осуществляется одновременно по всей их длине.

Особенности этого типа размольной гарнитуры позволяют свести к минимуму рубящий эффект, что достигается при одновременном контакте всех кромок ножей ротора с кромками ножей статора при отсутствии углов скрещивания [4, 9]. Авторы [37, 26] при создании гарнитуры перенесли эффект ударного воздействия в современную быстроходную дисковую мельницу, который был положительным при размоле волокнистой массы в «ступе», что позволило повысить качество размола волокнистой массы. Исследованиями [4, 49] подтверждается повышение физико-механических характеристик бумажных отливок при использовании гарнитуры с ударным эффектом в сравнении с традиционной гарнитурой, используемой в дисковых мельницах.

Значения установочного угла режущей кромки ножа к радиусу равны нулю при *радиальном* исполнении рисунка, за счет чего осуществляется более сильное ударное воздействие на волокно при минимальном режущем воздействии [4].

Одностороннее исполнение характеризуется тем, что все скрещивающиеся режущие кромки ножей расположены эксцентрично, с одной стороны относительно центра диска [70]. По мнению В. П. Горячкина, лёгкость реза больше характерна *односторонним* ножницам, чем *двухсторонним* [70]. Однако конструктивное исполнение *двухсторонних* ножниц проще, чем односторонних. По нашему мнению, данная особенность односторонних ножниц имеет место для гарнитуры ротора и статора с односторонним исполнением рисунка размалывающих поверхностей.

Комбинированное исполнение характеризуется наличием всех вышерассмотренных исполнений рисунков расположения пересекающихся

режущих кромок ножей ротора и статора относительно центра вращения диска гарнитуры. При *зеркальном исполнении* рисунка рабочей поверхности ротора по отношению к статору, при сопряжении размалывающих поверхностей дисков гарнитуры, направление наклона режущих кромок их ножей одинаково, а эксцентриситеты большей части режущих кромок ножей ротора и статора располагаются с одной стороны от центра диска [11, 71, 72].

В лаборатории кафедры МАПТ СибГТУ, А. А. Набиевой, под руководством академика Ю. Д. Алашкевича, была разработана гарнитура с зеркальным исполнением поверхности ротора относительно статора [10, 11]. Особенностью рисунка данной гарнитуры является то, что режущая кромка одного из ножей единичных секторов ротора и статора выполнена радиально с углом наклона $22,5^\circ$ к образующей сектора, при угле раствора – 45° . За один оборот роторного диска из исходной позиции все скрещивающиеся режущие кромки последовательно занимают положения, характерные для каждого из трёх исполнений рисунка, что обуславливает эффективную работу по сравнению с гарнитурами *двухстороннего* исполнения [10, 11].

В работах Ю. Д. Алашкевича и А. А. Набиевой [11,40], С. С. Легоцкого и В. Н. Гончарова [60, 73, 74] отмечается, что при значениях среднего угла *скрещивания* ножей ротора и статора, не превышающих $22,5^\circ$, происходит наиболее качественный, эффективный и энергосберегающий режим подготовки древесноволокнистых полуфабрикатов и обосновывается экспериментально [8]. Использование *зеркального исполнения* рисунка ножевой гарнитуры ротора по отношению к статору, по мнению авторов [10], более эффективно, в сравнении с *двухсторонним* исполнением. Обоснованием сказанного является то, что при *зеркальном* исполнении рисунка с уменьшением угла скрещивания ножей повышаются физико-механические характеристики готовой продукции: сопротивление раздиранию, разрывная длина, сопротивление излому, при снижении удельного расхода энергии на размол [49, 64, 75], а изменением угла скрещивания режущих кромок ножей можно менять соотношение

фибриллирующего и укорачивающего воздействия на древесноволокнистый полуфабрикат [6, 11, 49].

При оценке зеркального исполнения $\alpha_{скр} = \alpha_p - \alpha_c$ видно, что данное исполнение рисунка ротора и статора устраняет недостатки, так как диапазон значений установочных углов режущих кромок не зависит от угла скрещивания и может быть от 0° до 90° . Это позволит при $\alpha_{скр} \leq 2\varphi$ (двойной угол трения) обеспечить работу гарнитуры, увеличив пропускную способность мельницы, долю нормальной составляющей окружного усилия от касательной, при этом увеличив фибриллирующий эффект воздействия на волокнистый полуфабрикат [11].

Анализируя вышеизложенное, можно заключить, что комбинированное исполнение размольной гарнитуры более эффективное, так как ножи образуют различные углы скрещивания, в среднем не превышающие $22,5^\circ$, характеризуюсь преобладанием преимущественно фибриллирующего эффекта воздействия на волокнистый полуфабрикат, что положительно влияет на его разработку и конечное качество, а соответственно и на физико-механические свойства готовой продукции [11].

Размалывающая машина должна обеспечивать условия для самопродвижения массы по зоне размола [6, 49, 60, 69, 76-79]. При условии совпадения направления наклона режущих кромок ножей ротора с направлением вращения ротора мельница работает в режиме удержания массы в зоне размола [49, 60]. Данное условие необходимо учитывать при проектировании рисунка размольной гарнитуры, чтобы получить необходимый эффект воздействия на волокнистый полуфабрикат.

Практическим путем установлено, что средний угол установки ножей относительно радиуса диска изменяется и составляет $12,5^\circ \dots 25^\circ$ [49, 60], при этом угол скрещивания ножей будет $25^\circ \dots 50^\circ$. Авторы в работах [4, 6, 11, 49] рассматривают угол скрещивания режущих кромок единичных ножей ротора и статора одним из параметров, который определяет воздействие размольной гарнитуры на волокно. Как показала практика, «гарнитура с углом установки

ножей к радиусу 20° позволяет получать хорошо фибриллированную массу, с высокими физико-механическими показателями» [80, 81].

Шведской фирме Sunds Defibrator AB в результате изменения углов установки ножей размалывающей гарнитуры удалось сократить время прохода массы через размольную зону гарнитуры, тем самым снизить затраты на электроэнергию до 25 % [82, 83].

При установке режущих кромок ножей гарнитуры под некоторым углом относительно ее радиуса, по отношению к режущей кромке создается окружное усилие, имеющее касательную и нормальную составляющие, соответственно при вращении ножевой гарнитуры ротора обуславливается нормальное и скользящее движение режущих кромок. Анализируя различные работы в области размала древесной массы в производстве ДВП, данный вопрос не обсуждался в достаточной мере и по нашему мнению, преобладание *касательных составляющих* обуславливает рубящий эффект воздействия на древесноволокнистый полуфабрикат, а преобладание *нормальных составляющих* должно характеризовать фибриллирующий эффект воздействия.

В процессе размала характер силового воздействия на древесноволокнистый полуфабрикат определяется механизмом, состоящим из стадий.

Первоначальная стадия обуславливается воздействием подвижной и неподвижной режущих кромок на находящийся перед точкой их скрещивания древесноволокнистый полуфабрикат с последующим попаданием его в зазор между размалывающими дисками.

Последующая стадия характеризуется воздействием размалывающих поверхностей сопряжённых ножей ротора и статора через межножевой зазор на заполняющий его волокнистый полуфабрикат. На этой стадии воздействие на бумажную массу в ножевых машинах осуществляется за счёт сил сжатия и сдвига [40, 60], действующих во взаимно перпендикулярных плоскостях. Сила сжатия присутствует в осевом направлении, а сила сдвига – в направлении вращения ротора размольной гарнитуры.

На *первоначальной стадии* размалывающие поверхности ножей ротора и статора ещё не сопряжены, это объясняет воздействие на волокнистый полуфабрикат только со стороны режущих кромок ножей ротора и статора гарнитуры, в точке их скрещивания и вблизи неё. Резание тела прямым движением требует значительных усилий, однако такой же эффект достигается при слабом давлении со скользящим движением [40, 70]. Известно, что процесс резания весьма значительно облегчается скользящим движением, т. е. когда нож движется не нормально к режущей кромке, а под косым углом [40, 70], что особенно необходимо для статического давления, играющего большую роль при перемещении ножа нормально к режущей кромке.

Анализируя исследования ряда авторов [4, 6, 11, 40], изучающих влияние конструктивных особенностей размольной гарнитуры на процесс подготовки волокнистых полуфабрикатов в целлюлозно-бумажном производстве, стоит отметить, что геометрия гарнитуры в свою очередь формирует технологические параметры, позволяющие характеризовать эффективность размола. Авторами [11, 40] впервые были разработаны и предложены методики по определению и оценке основных технологических параметров (секундная режущая длина, кол-во точек пересечения ножей ротора с ножами статора, циклическая элементарная длина ножевой гарнитуры).

В работе А. А. Набиевой [11] был проведён теоретический анализ по определению истинного значения секундной режущей длины, с учётом углов установки ножей ротора и статора к образующей единичного сектора, углов их скрещивания и их основных геометрических параметров гарнитуры. При использовании современного пакета прикладных программ среды MatLab было определено истинное значение секундной режущей длины (L_s), а также количество одновременно движущихся точек пересечения ножей ротора с ножами статора (t). С целью наиболее полной оценки эффективности размольной гарнитуры различного исполнения, авторами [11, 40, 84] был разработан новый технологический параметр «циклической элементарной длины» ($L_{\omega.эл}$),

характеризующий среднюю длину, «отрезаемую» за один оборот ротора, в процессе контакта всех его ножей с ножами статора и позволяющий оценить влияние конструктивных особенностей гарнитуры на качество помола [11].

Согласно исследованиям, высокие значения $L_{\omega,эл}$ от 1,76 м и выше характеризуют гарнитуру преобладающим фибриллирующим воздействием, до 1,76 м - преобладающим укорачивающим воздействием. Экспериментально установлено, что с увеличением этого параметра качество помола повышается [11]. Представляет особый интерес аналогичная оценка эффективности размольных гарнитур, используемых в производстве ДВП. По нашему мнению, чтобы эффективно подготавливать древесноволокнистый полуфабрикат с заданными размерно-качественными характеристиками для производства ДВП, необходима конструкция гарнитуры, обеспечивающая высокие значения основных технологических параметров и соответственно фибриллирующее воздействие на полуфабрикат.

Исследования А. Дик [65, 81] показали, что когда длина ножей и соответственно размалывающая поверхность дисков гарнитуры была меньше на 66 % от первоначальной, в процессе размола степень разработки волокна не изменилась, а удельный расход энергии снизился. Исследования Х. Вильямса и П. Марша [65, 85] показали, что при изменении соотношения внутреннего и внешнего диаметров диска d/D от 0,55 до 0,85 оптимальным является значение $d/D = 0,6$, так как достижение одинаковой степени разработки волокна происходит при меньшем удельном расходе электроэнергии. Таким образом, при проектировании гарнитур следует это учитывать. На современных действующих мельницах соотношение d/D изменяется от 0,45 до 0,50. Также необходимо учитывать, что скорость движения волокнистой массы замедляется за счёт шероховатости межножевых канавок на границе контакта с поверхностями по сравнению со скоростью в центральной части их поперечного сечения, что ведёт к удержанию массы, возрастающей по мере её продвижения к периферии диска.

В своих исследованиях авторы [21, 40] Ю. Д. Алашкевич, Н. Г. Чистова, изучая процесс размол волокнистых полуфабрикатов в ножевых дисковых мельницах, теоретическим и экспериментальным путем установили влияние конструктивного параметра L/h (отношение ширины межножевой ячейки к высоте ножа) на их качество. Также определены оптимальные значения данного параметра в диапазоне от единицы до двух. Установлено, что при таких значениях данного параметра размольной гарнитуры имеют место быть интенсивные гидродинамические составляющие в процессе размол, что положительно влияет на разработку волокна, способствуя улучшению качественных характеристики полуфабрикатов. При анализе исследований авторов [21, 40] стоит отметить, что однозначно в процессе размол древесноволокнистых полуфабрикатов присутствуют как механические, так и гидродинамические воздействия, поэтому при разработке новой конструкции гарнитуры необходимо придерживаться оптимального соотношения данного параметра.

При анализе рекомендаций по выбору вида рисунка размалывающей поверхности ножевых гарнитур для того или иного волокнистого полуфабриката мнения порой противоречивы, нет однозначного ответа о механизме воздействия в процессе его подготовки, что не позволяет сделать осознанный и обоснованный выбор гарнитуры. Установить механизм воздействия на волокно возможно только после проведения его размол, при оценке качества полученного древесноволокнистого полуфабриката и сопоставлении физико-механических показателей готовой продукции, полученной из него [86].

Рассматривая геометрию рисунков размольной гарнитуры, используемой для подготовки древесноволокнистого полуфабриката в производстве ДВП, можно отметить, что преимущественно рисунки характеризуются двухсторонним исполнением, описание которого приводится в работах [5, 6, 49]. При сравнении исполнений размольных гарнитур можно сделать вывод о том, что двухстороннее исполнение малоэффективно, т.к. в процессе размол преобладающим является укорачивающее воздействие на волокно (эффект ножниц) и, как следствие,

недостаточная его разработка и низкое качество волокнистого полуфабриката и древесноволокнистой плиты из него. Так же высокие нагрузки на кромки ножей при таких углах скрещивания (п. 2.3, таблица 2.3), как мы считаем, приводят к более интенсивному износу размольной поверхности гарнитуры. При износе гарнитуры меняется соотношение параметра L/h , что еще раз подтверждает целесообразность учитывать это в наших исследованиях.

Авторы [6, 11, 40], изучая процесс размола волокнистых полуфабрикатов в ЦБП, теоретически и экспериментально подтвердили эффективность использования комбинированного исполнения перед двухсторонним, обеспечивая преимущественно фибриллирующее воздействие гарнитуры на волокно при его подготовке, в результате получая полуфабрикат с высокими качественными характеристиками.

Анализ литературных источников, теоретических и экспериментальных данных показал, что эффективность процесса размола волокнистых полуфабрикатов в большой степени зависит от конструкции размольной гарнитуры. При исследовании и анализе работы производства ДВП мокрым способом выяснилось, что используемая гарнитура имеет ряд существенных недостатков. Двухстороннее исполнение, согласно исследованиям, характеризуется преимущественно укорачивающим воздействием на древесное волокно, что обуславливает менее качественные характеристики древесноволокнистого полуфабриката и соответственно физико-механические свойства готовых плитных материалов, снижается эффективность процесса размола. По нашему мнению, разновидность конструкции гарнитуры комбинированного исполнения, имея преимущества перед двухсторонним, сможет обеспечить необходимую степень разработки волокнистого полуфабриката и высокое качество получаемых плит из него.

Выводы к первой главе

Согласно технологическому процессу в производстве древесноволокнистых плит наряду с различными операциями, как в производстве ЦБП, важнейшим и определяющим качество готовых плит является процесс размол древесноволокнистых полуфабрикатов. Отличие процесса размол в производстве ЦБП и ДВП заключается в химической обработке (варке древесины) перед размол в первом случае и чисто термомеханическим путем (пропаривании) во втором. В первом случае степень помола целлюлозы по шкале ШР° после ее варки составляет (12-14)°. Эффективность производства ДВП определяется различными начальными параметрами обработки древесного волокна, степенью помола (ДС) после первой ступени получения древесной массы (в дефибраторе) и последующим размол волокна на второй ступени (в рафинаторе). Пределы изменения степени помола при производстве ДВП и бумаги, течение волокнистой суспензии в рабочих органах дисковой мельницы различны, потому что размеры и степень разработки целлюлозных и древесных волокон, а также физические их свойства (гибкость отдельных волокон) имеют существенные различия. Все это требует особого подхода к процессу размол волокнистых полуфабрикатов.

Можно согласиться с высказываниями П. Х. Ласкеева о влиянии показателя отношения длины к диаметру волокна на его гибкость в определенных пределах. Но как добиться необходимой величины этого отношения в процессе размол полуфабриката для достижения определенной гибкости волокна – П. Х. Ласкеев не приводит, поскольку в то время изучением процесса размол и влиянием его на качество ДВП практически не занимались.

В свою очередь и до настоящего времени при исследовании процесса размол учеными научной школы Ю. Д. Алашкевича произведено теоретическое обоснование построения рисунков гарнитуры и определены технологические параметры размол волокнистых полуфабрикатов при использовании новых конструкций с ножами прямолинейной формы, что подтверждено результатами

многочисленных экспериментов. Однако при размоле древесной массы в производстве ДВП с учетом разницы в качественных показателях древесного волокна по сравнению с волокнами бумажной массы и целлюлозы теоретических исследований проводилось не в полной мере.

Анализ теоретических и экспериментальных исследований, рассмотренных в первой главе, показал, что для получения плиты ДВП с высокими физико-механическими свойствами необходимо, чтобы полуфабрикат, из которого ее изготавливают, состоял преимущественно из хорошо разработанных с фибриллированной поверхностью гибких и достаточно длинных волокон. В частности, в работах [21, 32] недостаточно уделено внимания вопросам по изменению конструктивных параметров гарнитуры, их влиянию на древесноволокнистый полуфабрикат, что, на наш взгляд, позволит регулировать его качественные характеристики в процессе размола.

Использование результатов теоретических исследований учеников академика РАО Ю. Д. Алашкевича по разработке и использованию гарнитур с ножами формой, отличной от прямолинейной, на наш взгляд, затруднительно в связи со сложностью производства такого рода гарнитур на заводах-изготовителях. Необходимо уделить достаточно внимания к исследованию вопросов, связанных с изменением конструктивных параметров гарнитуры. На основании проведенного анализа конструктивных особенностей гарнитур стоит отметить, что существующая конструкция гарнитуры в производстве ДВП имеет двухстороннее исполнение, характеризуясь преимущественно укорачивающим эффектом воздействия на древесное волокно. Низкие значения технологических параметров (секундной режущей длины, циклической элементарной длины, поверхности размола), формируемые большим количеством одновременных контактов ножей при их пересечении, не обеспечивают необходимые качественные характеристики древесноволокнистого полуфабриката для изготовления плиты с высокими физико-механическими свойствами.

По нашему мнению, комбинированное исполнение размольной гарнитуры (авторского исполнения) компенсирует недостатки существующей конструкции за счет снижения количества одновременных контактов при пересечении ножей ротора и статора, обеспечивая высокие значения технологических параметров в процессе размола, характеризуясь преобладающим фибриллирующим воздействием на древесное волокно. Использование новой размольной гарнитуры (авторское исполнение) предположительно позволит эффективно подготавливать древесноволокнистый полуфабрикат с необходимыми размерно-качественными характеристиками, не нарушая технологический процесс производства ДВП, и изготавливать продукцию с высокими физико-механическими свойствами, соответствующую показателям ГОСТ 4598-2018 без применения связующих смол, что неприемлемо при размоле волокнистого полуфабриката с использованием традиционной конструкции гарнитуры в промышленных условиях.

2 Теоретическая часть

Известно, что в процессе размола волокнистых полуфабрикатов в дисковых мельницах при контакте ножей ротора с ножами статора имеют место нормальные и касательные усилия, которые обеспечивают в первом случае - разрушение волокон в продольном направлении (фибриллирование), во втором - в поперечном (рубку). Чтобы решить данную задачу и обеспечить эффективное разделение древесных волокон при размоле преимущественно вдоль их оси, необходимо разработать конструкцию гарнитуры таким образом, чтобы регулировать воздействие нормальных и касательных усилий на волокно.

Для увеличения воздействия нормальных усилий на волокно при контакте ножей ротора и статора необходимо предусмотреть конструкцию гарнитуры дисковой мельницы, обеспечивающей это явление. Гарнитура должна характеризоваться углами скрещивания ножей, образующимися при их контакте, иметь определенный рисунок, необходимые углы установки ножей относительно осей диска. Решение данной задачи возможно при построении единичного ножа, в целом рисунка по поверхности гарнитуры, выяснении скоростных характеристик при движении ножей ротора относительно ножей статора, определении качественных и количественных характеристик усилий, воздействующих на волокно при размоле.

С учетом новой конструкции гарнитуры были определены основные технологические параметры: секундная режущая длина, поверхность размола, циклическая элементарная длина в сравнении с традиционной конструкцией.

2.1 Распределение единичных ножей прямолинейной формы по зонам размола поверхности гарнитуры

В связи с распределением гарнитуры по зонам размола, где параллельные ножи прямолинейной формы образуют зеркальный рисунок размалывающей

поверхности, представляет особый интерес подробнее рассмотреть особенности предлагаемого исполнения.

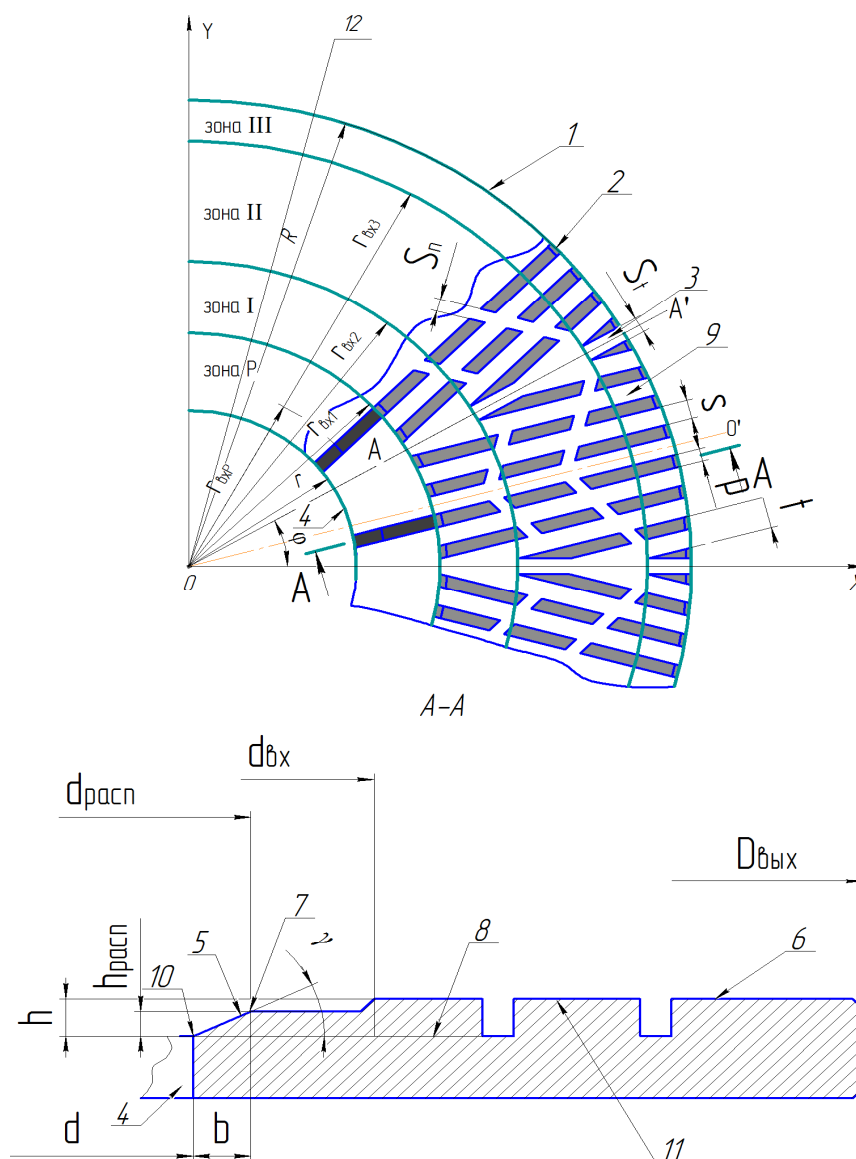
На рисунке 2.1 изображена фронтальная проекция отдельного элемента и радиальное сечение гарнитуры дисковой мельницы. Размалывающие поверхности ножей затемнены. Гарнитура дисковой мельницы включает кольцо 1, рабочая поверхность которого в отличие от других видов гарнитур условно разделена на двенадцать идентичных секторов, включающих две зоны: распределительную (заходную) зону Р для равномерной подачи и распределения древесной массы и основную зону размола (рафинирования). Распределительная зона снабжена одним ножом высотой $h_{расп}$ в пределах каждого сектора, обеспечивая равномерное распределение и вход древесноволокнистой массы в основную зону размола. Сектора выполнены зеркально относительно центральной оси АА' технологических канавок 3. В свою очередь основную размалывающую поверхность гарнитуры условно можно разделить на три зоны размола (I, II, III). Боковая поверхность 4 внутреннего диаметра кольца 1 снабжена скосом ножей 5, линия пересечения которой с:

- размалывающей поверхностью 6 является ограничивающей её входной окружной кромкой 7 ножей зоны Р;
- боковой поверхностью 4 внутреннего диаметра кольца 1 и дном 8 ячеек 9 является окружной кромкой 10, на которой расположены вершины углов γ (образованных скосом ножей зоны Р и ячеек 9).

На рабочей поверхности сектора основной зоны размола распределены прямолинейные параллельные ножи 2 с выполненными прорезями шириной S_n , чередующиеся с межножевыми ячейками 9. Ножи 2 и ячейки 9 выполнены зеркально относительно центральной оси ОО' срединной межножевой ячейки, которая делит сектор на две равные части. Сечение А–А выполнено вдоль ножа 2. Прямые линии режущих кромок 11 располагаются по обе стороны от центра 12.

Количество единичных ножей 2 и смежных с ними межножевых ячеек 9 равномерно увеличивается от центра к периферии основной зоны размола (от

начальной зоны I к периферийной зоне III). Ножи основной зоны размола по всей длине от центра к периферии имеют одинаковую высоту, а отношение ширины межножевой ячейки к его высоте равно единице.



1 – кольцо; 2 – нож; 3 – технологическая ячейка; 4 – боковая поверхность внутреннего диаметра; 5 – скос ножа; 6 – размалывающая поверхность; 7 – входная окружная кромка ножа зоны P; 8 – дно межножевой ячейки; 9 – межножевая ячейка; 10 – окружная кромка; 11 – режущая кромка; 12 – центр; 13 – выходная окружная кромка

Рисунок 2.1 – Элемент размольной гарнитуры

Количество m_P ножей 2 ротора равно количеству m_C ножей 2 статора, т. е. $m_P = m_C$, их установочные углы наклона относительно образующей единичного

сектора также равны и составляют 15° . В отличие от известных гарнитур в предлагаемом исполнении, рисунок размалывающей поверхности ротора при сопряжении зеркален поверхности статора, ножи 2 с поперечными прорезями обеспечивают прохождение древесноволокнистой массы и ее циркуляцию. Плотное расположение ножей 2, циклично образующих различные углы скрещивания, предположительно сможет обеспечить увеличение основных технологических параметров. Режущие кромки 11 ножей 2 за счет их установочного угла (вращающегося диска ротора и неподвижного диска статора), по нашему мнению, оказывают преимущественно фибриллирующий эффект воздействия в процессе размола волокнистого полуфабриката.

Определим аналитические зависимости, необходимые для расчёта основных геометрических параметров данной гарнитуры. Для расчета воспользуемся методикой, разработанной авторами [4, 6], преобразовав формулы для каждой зоны размола.

Радиус входной окружной кромки ножа распределительной зоны 7 гарнитуры, обеспечивающей нормальный вход волокнистой массы в зону размола

Согласно рисунку 2.1

$$r_{BXP} = r + \frac{h_{расн}}{tg\gamma}, \quad (2.1)$$

тогда

$$d_{расн} = d + 2 \cdot \frac{h_{расн}}{tg\gamma}, \quad (2.2)$$

где r – внутренний радиус кольца 1;

d – внутренний диаметр кольца 1;

r_{BXP} – радиус входной окружной кромки 7 кольца 1;

$d_{расн}$ – диаметр входной окружной кромки 7 кольца 1;

$h_{расн}$ – высота ножей 2 (зоны Р);

h – высота ножей 2 (глубина межножевых ячеек 9);

γ – угол, образованный окружной поверхностью скоса ножа распределительной зоны 5 кольца 1 и дном 8 (межножевой ячейки 9), пересекающейся на окружной кромке 10 с боковой поверхностью 4 внутреннего диаметра кольца 1.

Для определения длины режущих кромок 11 ножей 2 основной зоны размола воспользуемся зависимостью [4], преобразовав ее. Из рисунка 2.1 видно, что ножи первой, второй, третьей зоны рафинирования имеют различную длину, поэтому длину определяли последовательно для каждой зоны.

Длина режущих кромок зоны I

Для цельного ножа

$$l_{цI} = r_{BX2} - r_{BX1}. \quad (2.3)$$

Для ножа с прорезью

$$l_{nI} = (r_{BX2} - r_{BX1} - n \cdot S_{np}). \quad (2.4)$$

Длина режущей кромки зоны II

$$l_{nII} = (r_{BX3} - r_{BX2} - n \cdot S_{np}). \quad (2.5)$$

Длина режущих кромок зоны III

$$l_{цIII} = R - r_{BX3}, \quad (2.6)$$

где R – радиус наружной выходной окружной кромки 13 кольца 1;

$r_{вх1}$ – входной радиус зоны I рафинирования;

$r_{вх2}$ – входной радиус зоны II рафинирования;

$r_{вх3}$ – входной радиус зоны III рафинирования;

n – количество прорезей на ноже;

S_{np} – ширина прорези (4 мм).

Дуговой шаг между параллельными ножами 2 определяем последовательно.

На входном радиусе зоны I рафинирования

Длина кромки

$$\tilde{c}_{BX1} = 2 \cdot \pi \cdot r_{BX1}. \quad (2.7)$$

Дуговой шаг между ножами 2

$$t' = \frac{\tilde{c}_{BX1}}{m}. \quad (2.8)$$

После подстановки (2.7) в (2.8) получим

$$t' = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_{BX1}}{m}. \quad (2.9)$$

На входном радиусе зоны II рафинирования

Длина кромки

$$\tilde{c}_{BX2} = 2 \cdot \pi \cdot r_{BX2}. \quad (2.10)$$

Дуговой шаг между ножами 2

$$t' = \frac{\tilde{c}_{BX2}}{m}. \quad (2.11)$$

После подстановки (2.10) в (2.11) получим

$$t' = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_{BX2}}{m}. \quad (2.12)$$

На входном радиусе зоны III рафинирования

Длина кромки

$$\tilde{c}_{BX2} = 2 \cdot \pi \cdot r_{BX3}. \quad (2.13)$$

Дуговой шаг между ножами 2

$$t' = \frac{\tilde{c}_{BX3}}{m}. \quad (2.14)$$

После подстановки (2.13) в (2.14) получим

$$t' = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_{BX3}}{m}. \quad (2.15)$$

На выходном радиусе зоны рафинирования

Длина кромки

$$\tilde{c}_R = 2 \cdot \pi \cdot R. \quad (2.16)$$

Дуговой шаг между ножами 2 на выходе равен

$$t' = \frac{\tilde{c}_R}{m}. \quad (2.17)$$

После подстановки (2.16) в (2.17) получим

$$t' = \frac{2 \cdot \pi \cdot R}{m}. \quad (2.18)$$

Общая площадь кольца зоны рафинирования определяется из выражения

$$f_{(R-r_{BX1})} = \pi \cdot (R^2 - r_{BX1}^2). \quad (2.19)$$

2.2 Определение основных технологических параметров предлагаемой размольной гарнитуры

Существуют основные технологические параметры, позволяющие характеризовать эффективность размольной дисковой гарнитуры, используемой в быстроходных ножевых размалывающих установках. Представляет большой интерес рассмотреть данные параметры гарнитуры, предлагаемой для подготовки древесноволокнистого полуфабриката на второй ступени размола в производстве ДВП. Как видно из рисунка 2.1 и было упомянуто ранее, размалывающая поверхность зоны размола условно состоит из трех зон, каждая из которых имеет разную длину и количество ножей, следовательно, различные значения технологических параметров. Чтобы определить значения технологических параметров гарнитуры, определим их величины последовательно для каждой зоны рафинирования, используя специально разработанные методики авторов [11].

Рассмотрим следующие технологические параметры гарнитуры:

- секундная режущая длина;
- площадь контакта ножевых поверхностей за один оборот ротора;
- секундная площадь контакта ножевых поверхностей;
- циклическая элементарная длина.

Определение секундной режущей длины

Секундная режущая длина (L_s) ножевой гарнитуры позволяет оценить общую длину пересечения режущих кромок ножей ротора с ножами статора за одну секунду, характеризуя количество одновременно обрабатываемых волокон [11].

Данный технологический параметр традиционно определяется по формуле

$$L_s = \frac{n}{60} \cdot \sum_{i=1}^m L_{ci} = \frac{n}{60} \cdot \sum_{i=1}^m z_{ci} \cdot z_{pi} \cdot l_i, \quad (2.20)$$

где L_{ci} - секундная режущая длина в пределах одного участка гарнитуры м/с;

z_{ci} - число ножей статора в пределах одного участка, шт.;

z_{pi} - число ножей ротора в пределах одного участка, шт.;

l_i - длина образующей i - го участка, м;

n - частота вращения ротора, об/мин;

m - число участков гарнитуры.

При определении параметра по традиционной формуле не учитывается динамика изменения величины секундной режущей длины за полный оборот ротора, не учитываются установочные углы ножей гарнитуры, что недостаточно отражает картину формирования данного параметра в динамике процесса размола для гарнитуры, используемой в дисковых мельницах.

Существенной величиной, формирующей основные технологические параметры размола, является количество точек пересечения (t) режущих кромок ножей ротора с ножами статора, участвующие в образовании секундной режущей длины (L_s) размольной гарнитуры в пределах единичного сектора [11, 84]. Качественные и количественные значения технологических параметров новой конструкции гарнитуры будут отличаться от ранее используемых видов ножевых гарнитур.

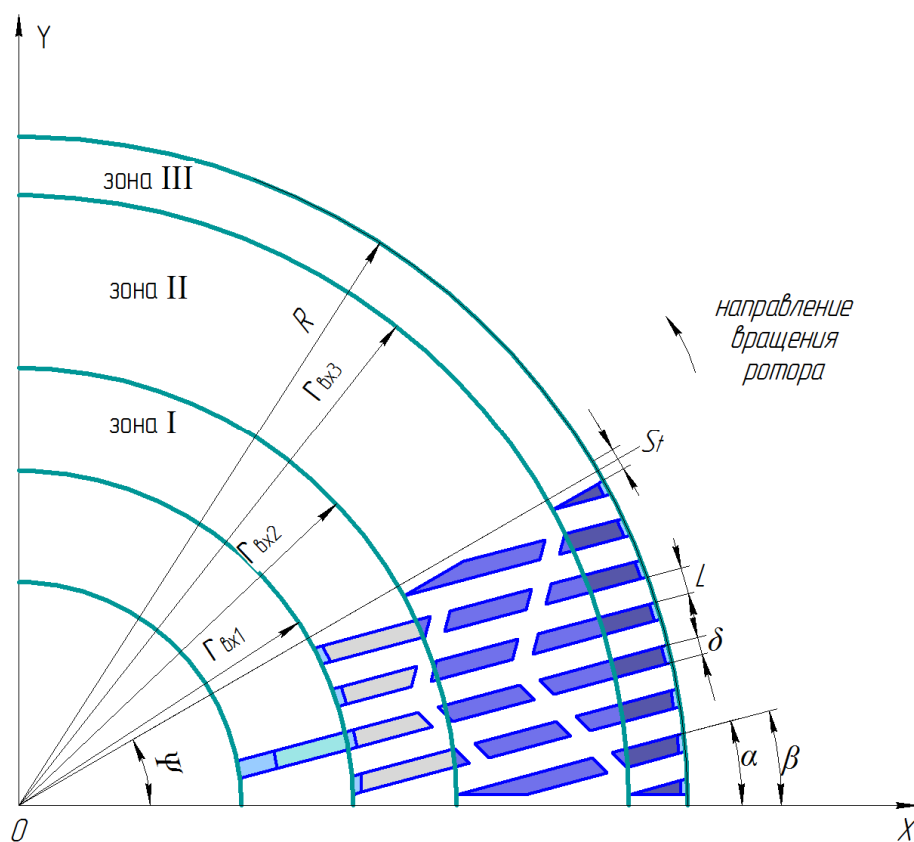
Таким образом, для определения истинного значения секундной режущей длины, определяемой на основании вышеприведенной формулы и количества одновременно движущихся точек пересечения гарнитуры, авторами, А. А. Набиевой, Е. Е. Нестеровым, Ю. Д. Алашкевичем и Д. С. Карпенко [8, 39, 84], была составлена программа при использовании современного пакета прикладных программ Matlab.

Расчет данных параметров гарнитуры в программе производился с учетом скорости вращения ротора, ширины ножа, ширины ячейки между ножами, углов установки ножей к образующей единичного сектора гарнитуры, внутреннего и внешнего радиусов рабочей зоны размола рисунка гарнитуры, количества секторов на размольном диске, ширины технологической канавки.

Программа защищена свидетельством о государственной регистрации программы для ЭВМ и повсеместно используется для научного обоснования и точного расчета различных рисунков ножевых гарнитур, используемых в целлюлозно-бумажной промышленности для получения различных волокнистых полуфабрикатов, с целью оценки их дальнейшего эффективного использования.

Программа позволяет вычислить среднее значение величины секундной режущей длины, формируемое при повороте ротора относительно статора за один оборот, и количество точек пересечения ножей размольной гарнитуры. При этом получить наглядную графическую зависимость изменения количества точек пересечения t , образованных контактом ножей одного сектора ротора с определенным углом его установки с ножами сектора статора, определить длину ножа, «отрезаемую» при таком контакте за период, равный углу сектора [84].

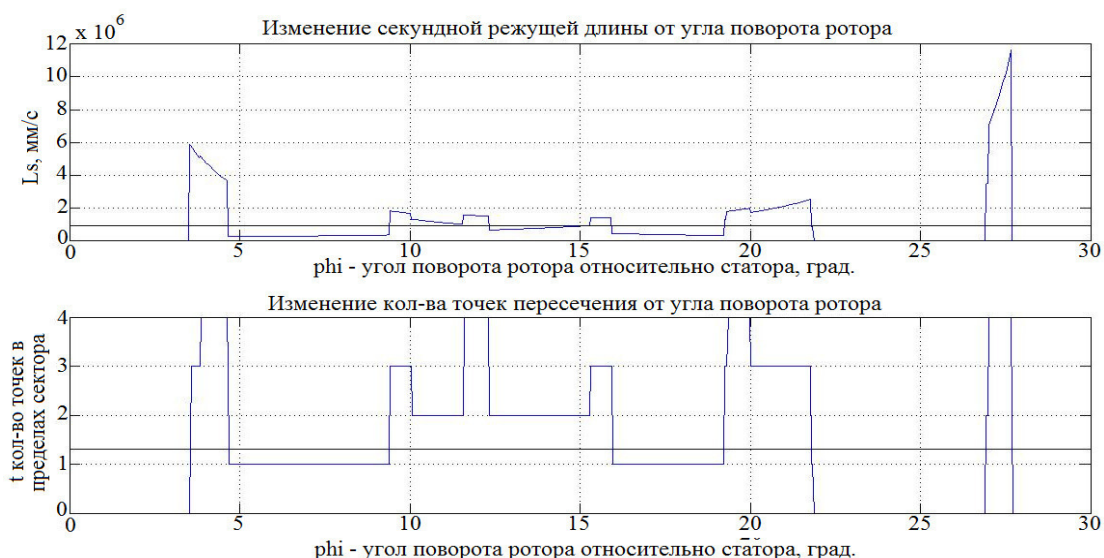
Для расчета технологических параметров в программе воспользуемся схемой, изображенной на рисунке 2.2, на которой представлены конструктивные параметры гарнитуры.



α, β - углы установки ножей ротора и статора относительно образующей единичного сектора; ψ - угол при вершине сектора; δ - ширина ножа; L - ширина ячейки между ножами; S_t - ширина технологической ячейки, $r_{вх1}, r_{вх2}, r_{вх3}$ - внутренние радиусы I, II, III зоны рафинирования; $r_{вх1}, R$ - внутренний и внешний радиус рабочей зоны размола гарнитуры

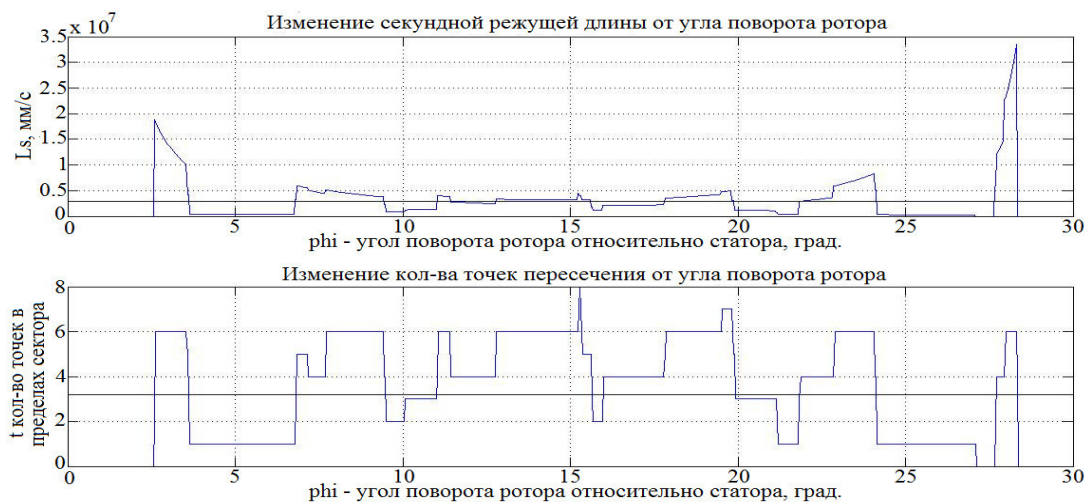
Рисунок 2.2 – Расчетная схема для определения технологических параметров гарнитуры

На рисунках 2.3-2.4 представлены зависимость секундной режущей длины L_s и количества контактов ножевых кромок t от угла поворота ротора относительно статора последовательно для каждой зоны рафинирования предлагаемой размольной гарнитуры зеркального исполнения.



Ширина ножа $\delta=4$ мм; ширина ячейки $L=6$ мм; угол установки ножей статора $\alpha=15^\circ$; угол установки ножей ротора $\beta=15^\circ$; ширина технологической ячейки $S_t=5$ мм; входной радиус зоны рафинирования $r_{\text{ex1}}=75$ мм; выходной радиус зоны рафинирования $r_{\text{ex2}}=98$ мм.

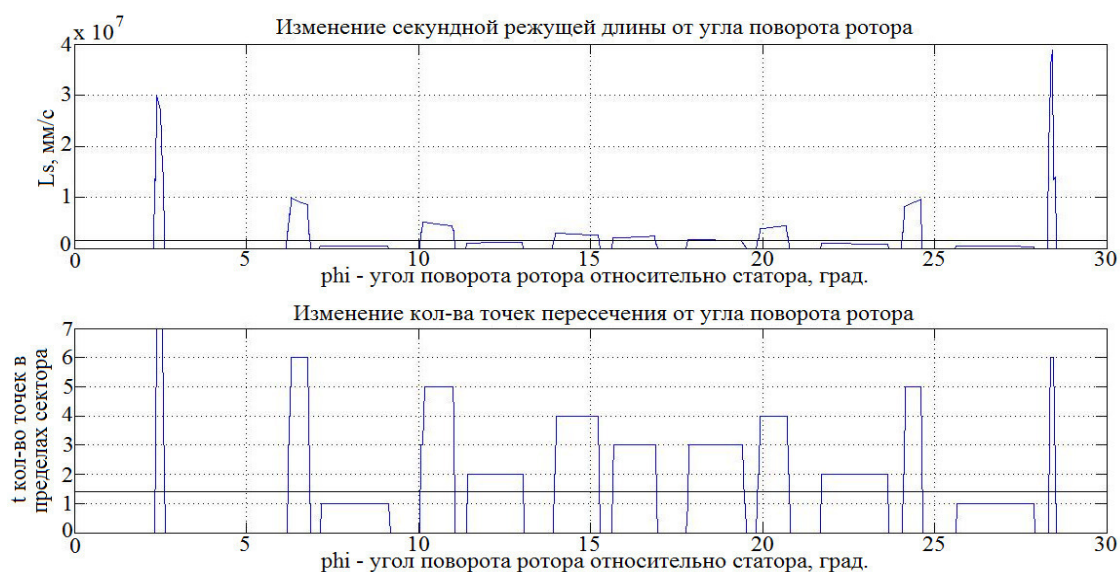
а) I зона



Ширина ножа $\delta=4$ мм; ширина ячейки $L=6$ мм; угол установки ножей статора $\alpha=15^\circ$; угол установки ножей ротора $\beta=15^\circ$; ширина технологической ячейки $S_t=5$ мм; входной радиус зоны рафинирования $r_{\text{ex2}}=98$ мм; выходной радиус зоны рафинирования $r_{\text{ex3}}=136$ мм.

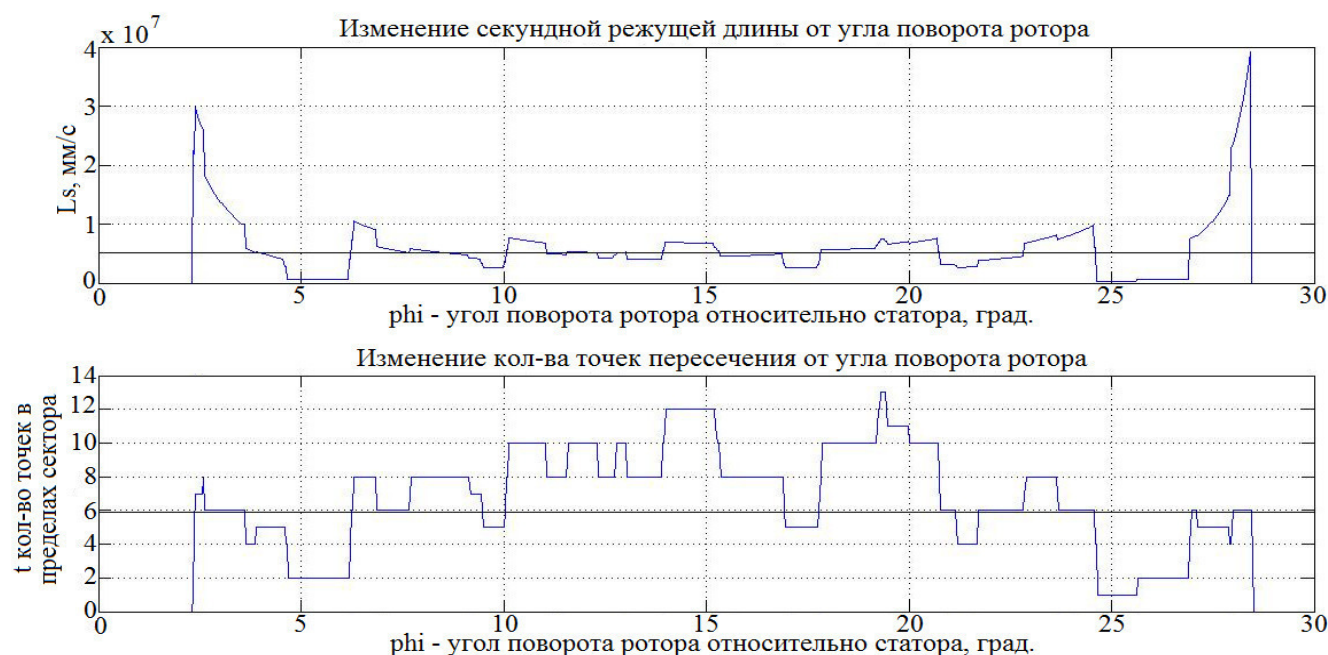
б) II зона

Рисунок 2.3 - Зависимость секундной режущей длины L_s и количества контактов ножевых кромок t от угла поворота ротора относительно статора (I и II зоны)



Ширина ножа $\delta=4$ мм; ширина ячейки $L=6$ мм; угол установки ножей статора $\alpha=15^\circ$; угол установки ножей ротора $\beta=15^\circ$; ширина технологической ячейки $S_t=5$ мм; входной радиус зоны рафинирования $r_{\text{вх}}=136$ мм; выходной радиус зоны рафинирования $R=149$ мм.

в) III зона



ширина ножа $\delta=4$ мм; ширина ячейки $L=6$ мм; угол установки ножей статора $\alpha=15^\circ$; угол установки ножей ротора $\beta=15^\circ$; ширина технологической ячейки $S_t=5$ мм; входной радиус зоны рафинирования $r_{\text{вх}}=75$ мм; выходной радиус зоны рафинирования $R=149$ мм

г) суммарная зона

Рисунок 2.4 - Зависимость секундной режущей длины L_s и количества контактов ножевых кромок t от угла поворота ротора относительно статора (III и суммарная зоны)

Анализируя графические зависимости, представленные на рисунках 2.3-2.4, можно отметить, что для всех трех зон размола изменение L_s и t происходит аналогичным образом: при повороте ножевой гарнитуры ротора относительно статора от 0° до 2° и от 25° до 30° образуется минимальное количество точек пересечения (t) в пределах единичного сектора, соответственно равное 2 и 6 шт., при этом секундная режущая длина (L_s) размольной гарнитуры достигает максимальных значений до $4,2503 \cdot 10^7$ мм/с. При угле поворота ножевой гарнитуры ротора от 5° до 23° количество t составляет до 12 шт., а L_s при этом возрастает до $1,0652 \cdot 10^7$ мм/с. Согласно представлениям авторов [11, 40], достаточно высокие значения L_s , при малом количестве t , характеризуют превалирование фибриллирующего над укорачивающим эффектом воздействия гарнитуры. Изменение значений L_s и t в динамике говорит о том, что в процессе поворота ножи ротора относительно статора гарнитуры, образуя различные углы скрещивания, поверхность размола, характеризуют переменные воздействия на древесное волокно, способствуя разработке его поверхности, а также сохранению его исходной длины.

Полученные данные по результатам расчета технологических параметров в программе сведены в таблицу 2.1.

Таблица 2.1- Результаты расчета технологических параметров в программе

Зона размола	Технологический параметр	
	L_s , м/с	t , шт.
I	874	1,3
II	2854	3,29
III	1477	1,41
по всей площади гарнитуры	5205	(6·12)72

Определение рабочей площади контакта ножевых поверхностей гарнитуры за один оборот ротора

Площадь рабочей размалывающей поверхности гарнитуры определяли по формуле

$$F_{H.ПОВ.} = (((\pi \cdot (R^2 - r_{BX1}^2)) - (\sum l \cdot \sum S) - (n_{np} \cdot S_{np}^2))). \quad (2.21)$$

Для наглядного определения площадь рабочей размалывающей поверхности дополнительно определяли графоаналитическим методом [6, 11] при использовании современной среды проектирования КОМПАС-3D V16 (рисунок 2.4).

Площадь контакта ножей ротора с ножами статора определяли по разработанной методике [6], преобразовав формулу для каждой зоны размола.

Площадь контакта равна

$$\sum F = \sum_{i=1}^{i=n} l_i \cdot \delta - (n_{np} \cdot S_{np}), \quad (2.22)$$

где l_i – длина ножа i -й зоны размола;

δ – ширина ножа;

n_{np} – количество прорезей ножей в зоне размола;

S_{np} – площадь прорези ножа.

Секундная площадь контакта равна произведению суммарной площади контакта ножей и угловой скорости вращения ротора, т. е.

$$F_c = \sum_{i=1}^{i=n} F_{p_i} \cdot \frac{\pi d_i n_D}{60}; \quad (2.23)$$

Чтобы определить и оценить изменение площади контакта ножей ротора с ножами статора размольной гарнитуры в динамике, при использовании пакета прикладных программ КОМПАС-3D V16 графоаналитическим методом [6, 11] была определена рабочая размалывающая поверхность гарнитуры при различных углах поворота ротора относительно статора. Для этого были изготовлены прозрачные модели дисков в натуральном масштабе. Используя инструментальную панель программы КОМПАС-3D V16, производился поворот ротора на заданный градус, при этом фиксировалась площадь контакта, образованная ножами размольной гарнитуры. На рисунке 2.4 в качестве примера представлены прозрачные модели дисков ротора и статора в рабочем состоянии при заданном угле поворота ротора гарнитуры.

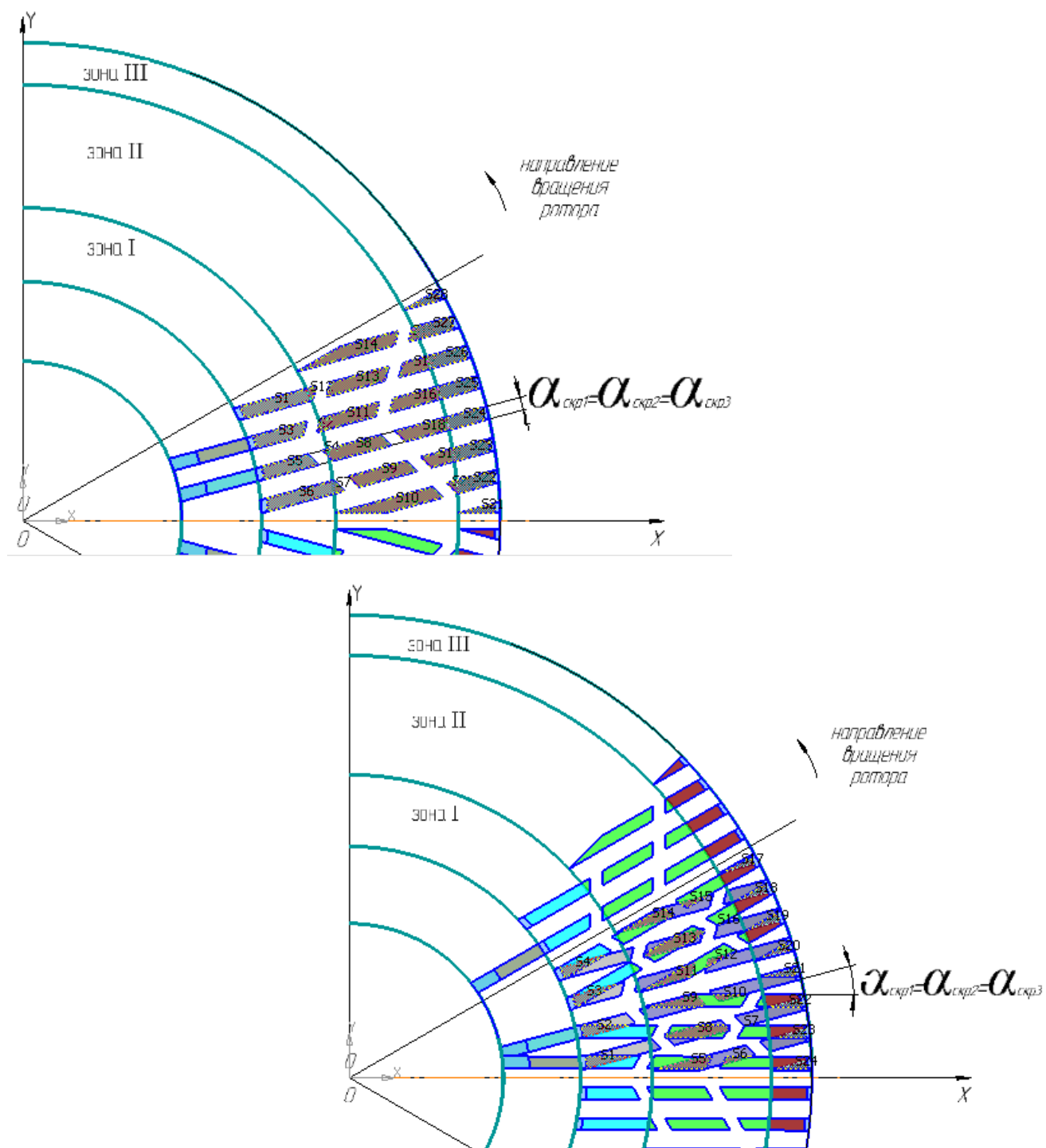


Рисунок 2.5 – Расчетная схема для определения технологических параметров

Из рисунка 2.5 видно, что рабочая площадь контакта ножей ротора с ножами статора гарнитуры определялась последовательно для каждой зоны размола.

Для каждой зоны размола площадь контакта в пределах единичного сектора гарнитуры равна

$$\sum F_i = \sum_{i=1}^{i=n} S_i, \quad (2.24)$$

где s_i – площадь контактов ножей ротора с ножами статора гарнитуры в пределах одного сектора каждой зоны размола;

i – номер зоны размола, соответственно.

Общая площадь контакта ножей I зоны равна произведению площади контакта ножей в пределах сектора гарнитуры и количества секторов, т.е.

$$\sum F_i = F_i \cdot (2\pi / \psi), \quad (2.25)$$

где $2\pi / \psi$ – число секторов на диске ножевой гарнитуры.

Определение циклической элементарной длины

Согласно методикам, разработанным Ю. Д. Алашкевичем [40], А. А. Набиевой [11], технологический параметр «циклическая элементарная длина, $L_{\omega.эл.}$ », характеризующий среднюю длину, «отрезаемую» парой ножей за один оборот ротора» [11] определяли с учетом предлагаемой конструкции гарнитуры для каждой зоны размола, последовательно, преобразовав известную формулу.

$$L_{\omega.эл.i} = \sum_{i=1}^{n=i} \frac{L_{s_i} \cdot 60}{n \cdot t_i \cdot (2\pi / \psi)}, \text{ м} \quad (2.26)$$

где L_{s_i} – секундная режущая длина, м/с;

n – частота вращения ротора, об/мин;

t_i – количество движущихся точек пересечения ножей ротора с ножами статора в пределах одного сектора, шт.;

$2\pi / \psi$ – количество секторов на диске ножевой гарнитуры;

i – порядковый номер зоны размола.

В формуле учитывается количество движущихся точек пересечения режущих кромок, которое является существенной величиной, формирующей циклическую элементарную длину гарнитуры.

Общее значение параметра по всем зонам размола определяли по формуле

$$\sum L_{\omega.эл.} = \sum_{i=I}^{n=i} \frac{L_{\omega.эл.I} + L_{\omega.эл.II} + L_{\omega.эл.III}}{N}, \text{ м}, \quad (2.27)$$

где $L_{\omega.эл.I,II,III}$ – циклическая элементарная длина гарнитуры I, II, III зоны размола, м;

N – количество зон размола, шт. ($N=3$).

Расчетные данные по определению $L_{\omega.эл}$ применительно к различным типам гарнитур представлены в таблице 2.3.

В исследованиях авторов отмечается, что «с увеличением количества точек контакта значение циклической элементарной длины уменьшается, что может снизить качество помола, а также производительность установки» [11].

Оценку влияния углов установки ножей, обеспечивающих определенную величину углов скрещивания в точках контакта, производили с учетом количества движущихся точек пересечения режущих кромок, с увеличением которых понижается значение циклической элементарной длины $L_{\omega.эл}$.

Определение коэффициента интенсивности разработки древесного волокна

Для объективной оценки эффективности гарнитуры необходимо сопоставление количественных значений технологических параметров процесса размола волокнистых (L_S , $L_{\omega.эл}$) с величинами коэффициентов укорочения [6, 65]. В исследованиях [21, 32, 38, 47, 87], связанных с процессом размола древесноволокнистых полуфабрикатов при производстве ДВП, определение коэффициента укорочения не проводилось. В производстве ДВП известен показатель отношения длины волокна к его диаметру, который, и по нашему мнению, более объективно может охарактеризовать воздействие ножевой гарнитуры на полуфабрикат. Преобразовав формулу определения коэффициента укорочения [11] с учетом отношения L/d , получим коэффициент интенсивности разработки древесного волокна при его размоле:

$$K_p = \frac{\ln \frac{L/d_0}{L/d}}{ДС_K - ДС_0}, \quad (2.28)$$

где L/d_0 – исходное отношение длина волокна к его диаметру;

L/d – необходимое отношение длины волокна к его диаметру после размола;

$ДС_0$, $ДС_K$ – степень помола массы соответственно до и после размола.

2.3 Влияние углов скрещивания ножей ротора и статора на процесс размола

Формирование основных технологических и конструктивных параметров размольной гарнитуры, согласно результатам исследования авторов [6, 11, 95], зависят от углов скрещивания $\alpha_{скр}$, образующихся в результате набегания ножей ротора на ножи статора в процессе размола. При малых значениях углах скрещивания преобладает фибриллирующее воздействие, при больших значениях, преобладает укорачивающее воздействие на волокнистый полуфабрикат [6, 11].

С целью оценки эффективности размольной гарнитуры для подготовки древесного волокна определены углы скрещивания ножей и их влияние на формирование технологических параметров. Для этого согласно методикам [6, 11], в системе КОМПАС-3D V16 были выполнены прозрачные модели размольной гарнитуры (рисунок 2.6), которые представлены на рисунке 2.7 а – е, при различных углах поворота ротора относительно статора.

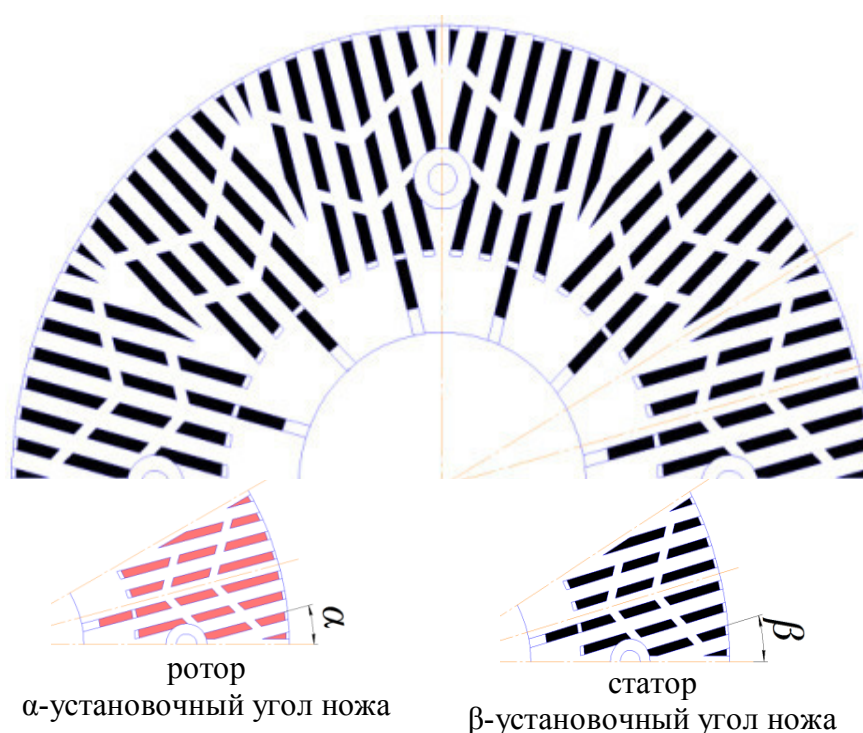


Рисунок 2.6 – Элемент размольной гарнитуры и ее единичных секторов статора и ротора

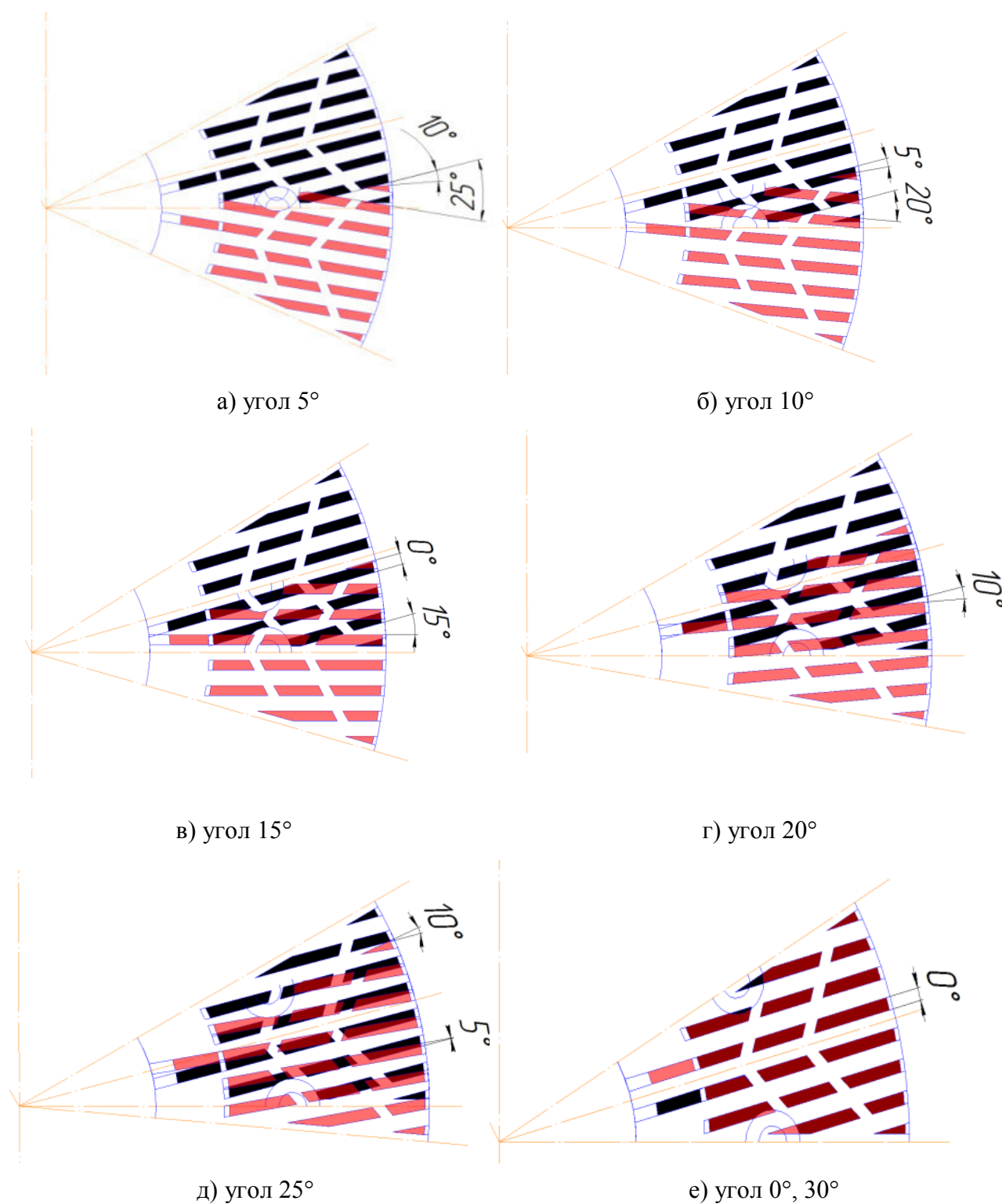


Рисунок 2.7 – Изменение углов скрещивания ножей ротора и статора в динамике

Используя пакет прикладных программ КОМПАС-3D V16 графоаналитическим методом [6, 11] были определены углы скрещивания ножей, а также при помощи инструментальной панели системы найдена рабочая

поверхность размольной гарнитуры при различных углах скрещивания в процессе поворота ротора (таблица 2.2).

Таблица 2.2 – Поверхность размола при различных значениях углов скрещивания ножей ротора с ножами статора

Угол скрещивания ножей ротора с ножами статора $\alpha_{скр}, ^\circ$												
при набег.	0	-2,5	-5	-7,5	-10	-12,5	-15	-17,5	-20	-22,5	-25	-27,5
при схожд.		27,5	25	22,5	20	17,5	15	12,5	10	7,5	5	2,5
Зона размола	Поверхность размола $F \cdot 10^{-3}, м^2$											
I	2,854	0,294	0,686	1,653	0,055	0,828	0,742	0,092	0,474	0,252	0,008	-
		-	0,006	0,243	0,469	0,091	0,703	0,858	0,039	1,599	0,737	0,225
общая	2,854	0,294	0,692	1,896	0,524	0,919	1,445	0,950	0,513	1,851	0,745	0,225
II	9,302	0,003	4,916	0,688	2,899	1,051	1,759	0,719	1,205	0,417	0,454	-
		-	0,439	0,373	1,126	0,683	1,658	0,995	2,737	0,613	4,836	-
общая	9,302	0,003	5,355	1,061	4,025	1,734	3,417	1,714	3,942	1,030	5,290	-
III	3,808	0,661	1,150	1,913	0,010	1,458	0,655	0,239	0,770	0,334	0,030	0,130
		-	-	-	-	0,254	0,617	1,302	0,053	1,976	1,565	0,130
общая	3,808	0,661	1,150	1,913	0,010	1,712	1,272	1,541	0,823	2,310	1,595	0,260
по всей площади гарнитуры	15,96	0,958	7,197	4,870	4,559	4,365	6,134	4,205	5,278	5,191	7,630	0,485
Угол скрещивания ножей, $\alpha_{скр}, ^\circ$												
	0	2,5	5	7,5	10	12,5	15	17,5	20	22,5	25	27
Доля участия ножей при $\alpha_{скр}, \%$	100	82	94	85	60	75	100	24	41	16	6	27
	85							22				

Как видно из таблицы 2.2, для данного рисунка гарнитуры, при повороте ротора относительно статора наибольшие значения поверхности размола ($4,4-15,9 \cdot 10^{-3}, м^2$) были зафиксированы при углах скрещивания $\alpha_{скр}$ от 0 - 15°, наименьшие при увеличении данного параметра до 27,5° ($0,13 \cdot 10^{-3}, м^2$). Также можно наблюдать, что преимущественная доля ножей ($\approx 85\%$) образует углы скрещивания в диапазоне 0 - 15°. Периодичное и постепенное образование углов скрещивания ножей, не превышающих в среднем 22,5°, согласно исследованиям авторов [4, 6, 11], характеризуется преимущественно фибриллирующим воздействием на волокнистый полуфабрикат, а динамичное и цикличное изменение углов скрещивания, образующихся при набегании ножей ротора и

после их схождения с ножей статора способствует удержанию древесноволокнистого полуфабриката в зоне размола и постепенной эффективной разработки его волокон.

Для наглядности на рисунке 2.8 представлены зависимости формирования основных технологических параметров (L_s , t , $L_{\omega.эл}$, F) предлагаемой размольной гарнитуры от углов скрещивания.

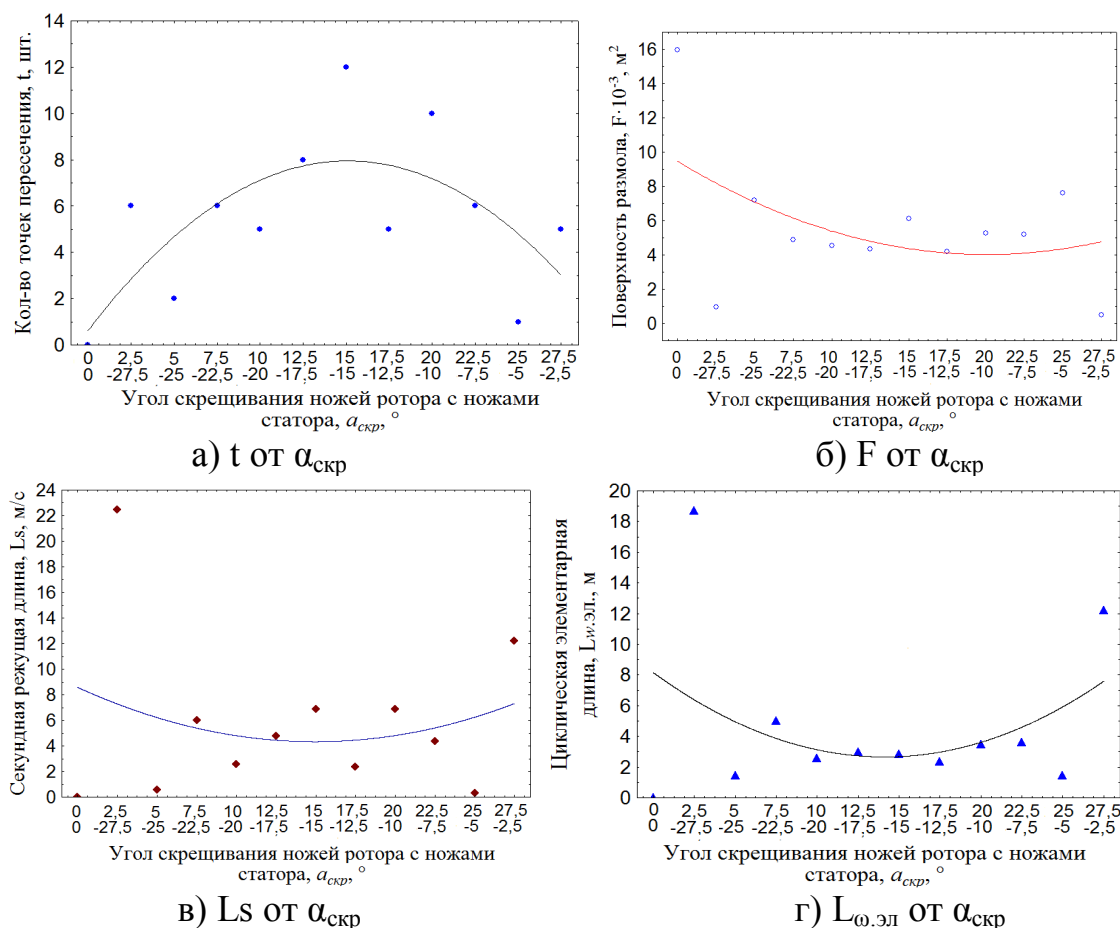


Рисунок 2.8 – Зависимость технологических параметров от углов скрещивания ножей

При формировании значений технологических параметров размольной гарнитуры (рисунок 2.7) снижение значений углов скрещивания ножей в диапазоне $0-15^\circ$ и преимущественное их образование ($\approx 85\%$), способствует уменьшению количества точек пересечения ножей ротора и статора при повышении значений размалывающей поверхности, секундной режущей длины, циклической элементарной длины размольной гарнитуры. При увеличении угла скрещивания ножей наблюдается некоторое снижение значений технологических параметров при увеличении количества

точек пересечения ножей гарнитуры. Согласно исследованиям [11], чем меньше углы скрещивания ножей ротора и статора, тем меньше количество точек пересечения (t) и больше значения секундной режущей длины и соответственно циклической элементарной длины, что обеспечивается в новой конструкции, характеризует ее превалирующее фибриллирующее воздействие и высокую эффективность процесса размола древесного волокна в дисковых размольных установках.

В таблице 2.3 представлены расчетные значения технологических параметров предлагаемой конструкции авторского исполнения в сравнении с используемой размольной гарнитурой в настоящее время в производстве ДВП, при приведенных диаметрах, соответствующих промышленным и полупромышленным размерам.

Таблица 2.3 – Конструктивные особенности и технологические параметры ножевых гарнитур

Ширина, мм			Угол, град.				шт.		$(ДС)^{-1}$	м/с	Кол-во точек пересеч., шт.		За оборот, м	$м^2$
ножа δ	межножевой ячейки L	глубина h	установки 1-го ножа ротора α_2	установки 1-го ножа статора α_1	повторяемости рисунка	скрещивания	кол-во секторов π/ψ	с повтором рисунка	коэффициент интенсивности разработки	истинное значение секундной режущей длины L_s	на секторе	на диске	циклическая элементарная длина, $L_{\omega,эл.}$	поверхность размола при скрещивании ножей, F
Размольная гарнитура, применяемая в производстве ДВП при диаметре 300 мм														
Традиционная размольная гарнитура									Частота вращения ротора 980 об/мин					
3	9	9	12,4	168,2	60	24,2	6	6	0,05-0,06	3480	25	150	1,42	0,006
Предлагаемая размольная гарнитура									Частота вращения ротора 980 об/мин					
4	6	6	15	15	30	0 до 27,5	6	12	0,1-0,12	5205	6	72	4,4	0,01- 0,016
Размольная гарнитура, применяемая в производстве ДВП при диаметре 1000 мм														
Традиционная размольная гарнитура									Частота вращения ротора 980 об/мин					
3	9	9	12,4	168,2	60	24,2	6	6	0,05-0,06	91072	166	996	5,59	0,03
Предлагаемая размольная гарнитура									Частота вращения ротора 980 об/мин					
4	6	6	15	15	30	0 до 27,5	6	12	0,1-0,12	136450	44	528	15,65	0,06-0,1

С целью объективной оценки эффективности размольной гарнитуры в производстве ДВП уместно использовать коэффициент *интенсивности разработки волокна* (отношение длины волокна к его диаметру), см. формулу (2.28), т.е. чем больше его значения, тем более гибкие и хорошо разработанные волокна полуфабриката, поскольку интенсивней отщепляются фибриллы вдоль оси и снижаются значения величины его диаметра. При определении циклической элементарной длины ($L_{\text{ц. эл.}}$), как известно (диссертация, стр. 53), увеличение количества точек пересечения (контактов) ножей ротора с ножами статора влечет за собой большее укорачивание волокон, чем их фибриллирование.

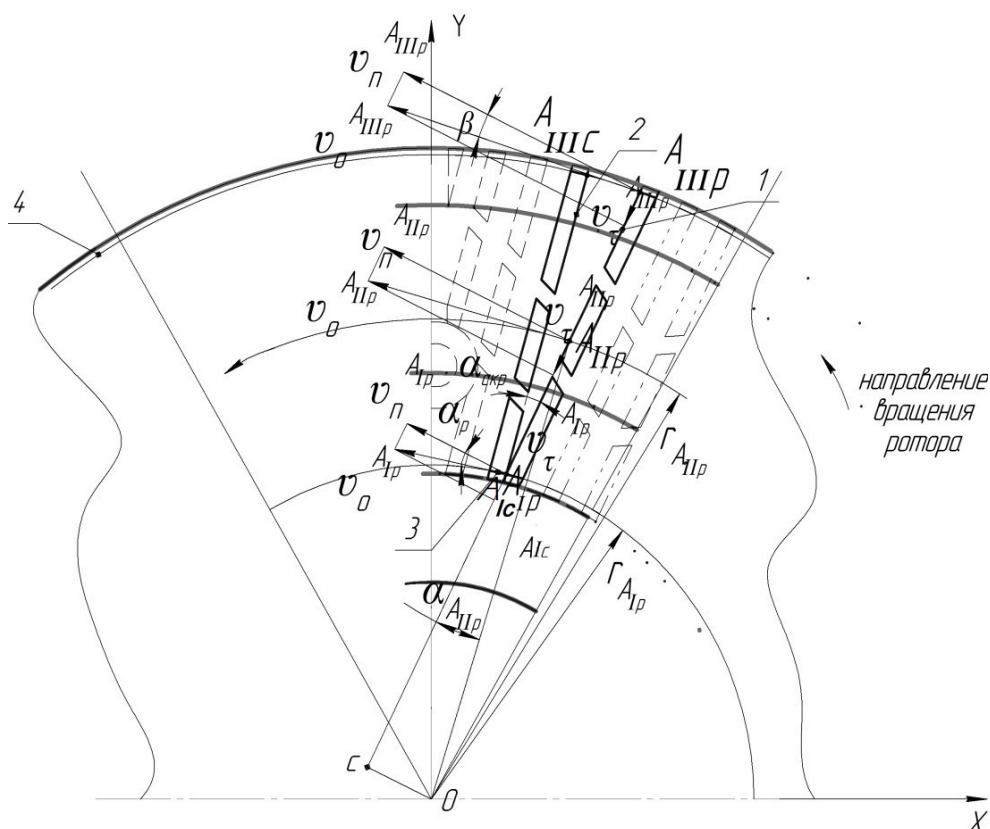
Из таблицы видно, что для предлагаемой конструкции по сравнению с традиционной гарнитурой характерны меньшее количество точек пересечения ножей (предлагаемая – 528 (72) шт., традиционная – 996 (150) шт.) и более высокие значения коэффициента интенсивности разработки волокна (предлагаемая - 0,1-0,12, традиционная - 0,05-0,06), циклической элементарной длины (предлагаемая - 15,65 (4,4) м, традиционная - 5,59 (1,42) м), размалывающей поверхности (предлагаемая - 0,06-0,1 (0,01-0,016) м², традиционная - 0,03 (0,006) м²), что свидетельствует о преимущественной эффективности и фибриллирующем воздействии. Традиционная конструкция гарнитуры, используемая в производстве ДВП, не обеспечивает высокие значения технологических параметров (табл. 2.3) и относится к укорачивающему типу [4, 11]. По нашему мнению, предлагаемая гарнитура в сравнении с традиционной, в соответствии с представлениями и результатами исследований авторов, позволит подготавливать древесноволокнистый полуфабрикат с хорошо разработанной фибриллированной поверхностью, обеспечивая преимущественное разделение волокон в продольном направлении, тем самым повышая физико-механические свойства готовой продукции и эффективность производства ДВП в целом.

2.4 Силовые характеристики движения ножей ротора при скрещивании режущих кромок с ножами статора

Для выяснения и расчета силовых характеристик ножей, согласно авторам разработанной методики [4, 6], необходимо определить величину окружной скорости.

Определение скоростных характеристик ножей

На рисунке 2.9 представлена часть фронтальной проекции гарнитуры статора с режущей кромкой $A_{Ic}A_{IIIc}$ (поз. 2) единичного ножа с условно наложенной на нее режущей кромкой $A_{Ip}A_{IIIp}$ (поз. 1) единичного ножа гарнитуры ротора. Штриховыми линиями изображены контуры ножей статора, штрихпунктирными - контуры ножей ротора.



1 – режущая кромка ножа ротора; 2 – режущая кромка ножа статора, 3 – входная окружная кромка размольной зоны диска; 4 – наружная окружная кромка диска, $r_{A_{Ip}}$ – радиус входной окружной кромки размольной зоны диска; R – радиус наружной окружной кромки 4, $r_{A_{IIp}}$ – радиус произвольной окружности рабочей кольцевой зоны диска, проходящей через произвольную точку пересечения A_{IIp} режущих кромок $A_{Ip}A_{IIIp}$ и $A_{Ic}A_{IIIc}$ соответственно, ротора и статора; α – угол наклона режущей кромки 1 единичного ножа к радиусу $r_{A_{Ip}}$ входной окружной 3 кромки размольной зоны диска, β – угол наклона режущей кромки 1 единичного ножа ротора к радиусу R наружной окружной кромки 4.

Рисунок 2.9 – Скоростные факторы в точках пересечения режущих кромок ножей

Представлены скоростные факторы имеющие место при пересечении ножей гарнитуры, образуя положительный угол скрещивания (рисунок 2.9), где $V_0^{A_{lp}}$, $V_0^{A_{llp}}$ и $V_0^{A_{lllp}}$ – окружные скорости во входной точке размольной зоны A_{lp} , в произвольной точке A_{llp} и в выходной точке зоны A_{lllp} режущей кромки $A_{lp}A_{lllp}$.

Величина окружной скорости $V_0^{A_{llp}}$ кромки $A_{lp}A_{lllp}$ (поз.1) единичного ножа ротора в произвольной точке A_{llp} рабочей размольной зоны диска будет определена, преобразовав исходную формулу с учетом предлагаемой геометрии гарнитуры

$$V_0^{A_{llp}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_{A_{llp}} \cdot n_D}{60}. \quad (2.29)$$

В предлагаемом исполнении, как выяснилось ранее, ножи ротора при набегании на ножи статора, образуют циклично как положительные (при набегании), так и отрицательные (после схождения) углы скрещивания, аналогичные друг другу, за счет зеркальности рисунка гарнитуры. Характерным отличием является эффект удержания массы в зоне размола при отрицательных значениях угла, в остальном скоростные факторы аналогичны.

В упрощенном виде

$$V_o^{A_{llp}} = 0,10472 \cdot r_{A_{llp}} \cdot n_D, \quad (2.30)$$

где n_D - частота вращения диска ротора, мин⁻¹.

Согласно методикам авторов [4, 6], с учетом геометрических особенностей гарнитуры, рассмотрим и определим касательную и нормальную составляющие окружной скорости, преобразовав исходные формулы.

Касательная составляющая. На режущей кромке $A_{lp}A_{lllp}$ (поз.1) ножа ротора, во входной точке A_{lp} , в произвольной точке A_{llp} и в выходной точке A_{lllp} рабочей зоны гарнитуры стрелками показаны векторы окружных скоростей $V_0^{A_{lp}}$, $V_0^{A_{llp}}$ и $V_0^{A_{lllp}}$. Разложим скорость $V_0^{A_{llp}}$ перемещения произвольной точки режущей кромки $A_{lp}A_{lllp}$

диска ротора, вращающегося относительно центра O с частотой n_p , на две составляющие: нормальную к кромке — $V_n^{A_{IIp}}$ и направленную вдоль неё — $V_\tau^{A_{IIp}}$.

Из рисунка 2.8 следует

$$V_\tau^{A_{IIp}} = V_o^{A_{IIp}} \cdot \sin \alpha_{A_{IIp}}. \quad (2.31)$$

Из формулы (2.31) с учетом (2.30)

$$V_\tau^{A_{IIp}} = 0,10472 \cdot r_{A_{IIp}} \cdot n_p \cdot \sin \alpha_{A_{IIp}}. \quad (2.32)$$

Значение касательной составляющей $V_\tau^{A_{IIp}}$ окружной скорости $V_o^{A_{IIp}}$ произвольной точки прямолинейной режущей кромки $A_{Ip}A_{IIIp}$ неизменно по величине на всей её длине. Для точек прямой $A_{Ip}A_{IIIp}$ оно остаётся одним и тем же, так как проекции скоростей точек движущейся прямой на направление самой прямой всегда равны [70].

Нормальная составляющая. Согласно разработанным методикам [6], с учетом геометрии гарнитуры нормальную составляющую определяли, преобразовав исходные формулы

$$V_n^{A_{IIp}} = V_o^{A_{IIp}} \cdot \cos \alpha_{A_{IIp}}, \quad (2.33)$$

$$V_n^{A_{IIp}} = 0,10472 \cdot n \cdot r_{A_{IIp}} \cdot \cos \alpha_{A_{IIp}}. \quad (2.34)$$

В правую часть зависимости (2.34) входит, помимо заданных параметров постоянной величины, радиус $r_{A_{IIp}}$ переменной величины, увеличивающийся по величине от центра к периферии. Отсюда следует, что нормальная составляющая $V_n^{A_{IIp}}$ окружной скорости $V_o^{A_{IIp}}$ произвольной точки A_{IIp} режущей кромки $A_{Ip}A_{IIIp}$ ротора стремится к увеличению значений в направлении от центра к периферии.

Определение силовых характеристик при скречивании режущих кромок ножей

На рисунке 2.10 представлена часть фронтальной проекции предлагаемой гарнитуры статора с режущей кромкой $A_{Ic}A_{IIIc}$ (поз. 2) единичного ножа с условно наложенной на нее режущей кромкой $A_{Ip}A_{IIIp}$ (поз. 1) единичного ножа гарнитуры

ротора. Режущие кромки $A_{Ic}A_{IIIc}$ и $A_{Ip}A_{IIIp}$ пересекаются в точке A_{Ip} , лежащей на входной окружной кромке размольной зоны 3, и образуют углы α с её радиусом $r_{A_{Ip}}$, проведённым из центра O в точку скрещивания A_{Ip} . На режущей кромке $A_{Ip}A_{IIIp}$ (поз.1) ножа ротора, во входной точке A_{Ip} , в произвольной точке A_{IIp} и в выходной точке A_{IIIp} размольной зоны стрелками графически изображены соответствующие расчётным значениям векторы окружных сил $N_o^{A_{Ip}}$, $N_o^{A_{IIp}}$ и $N_o^{A_{IIIp}}$.

Окружное усилие кромки $A_{Ip}A_{IIIp}$ (поз.1) единичного ножа ротора гарнитуры, с учетом геометрии гарнитуры, а также скоростных характеристик, присущих предлагаемому исполнению, определим, по формуле используя методику авторов [4, 6]

$$N_o = \frac{P_{\text{дв}} \cdot \eta}{V_o}, \quad (2.35)$$

где $P_{\text{дв}}$ - мощность электродвигателя, кВт; η - коэффициент полезного действия механической передачи от двигателя;

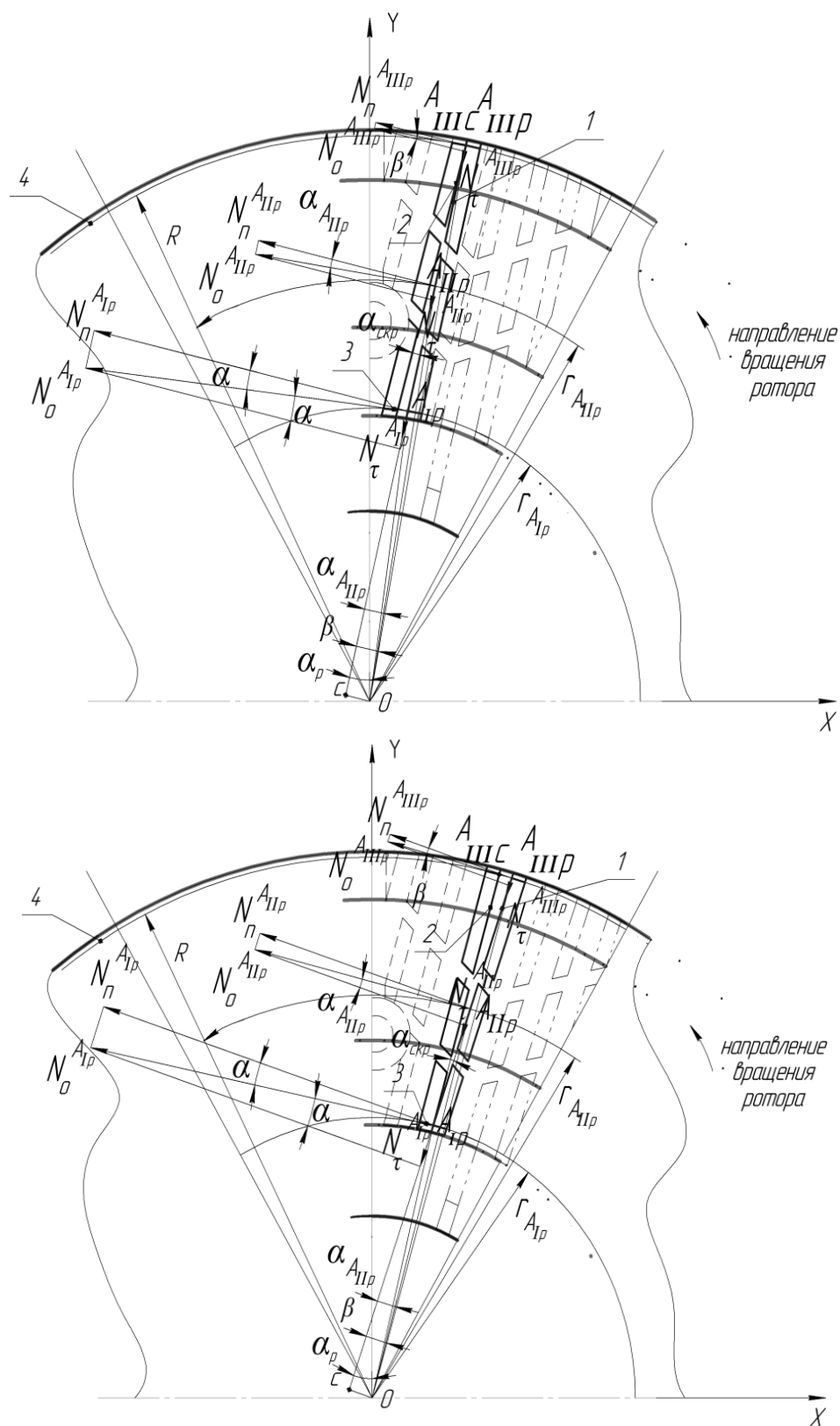
$\eta = \eta_1^2 \cdot \eta_2$ [3], где η_1 - потери на трение в подшипниках качения;

η_2 - потери на трение в ременной передаче с клиновыми ремнями.

В направлении от центра к периферии усилие определяется

$$N_o^{A_{IIp}} = \frac{N_o^{A_{Ip}}}{k_{A_{IIp}}}, \quad (2.36)$$

где $N_o^{A_{Ip}}$ - величина окружного усилия на входной окружной кромке размольной зоны диска, Н; $k_{A_{IIp}}$ - коэффициент, равный отношению радиуса $r_{A_{IIp}}$ промежуточной окружности, на которой в определенный момент находится точка пересечения A_{IIp} , к радиусу $r_{A_{Ip}}$ входной окружной кромки 3, т.е. $k_{A_{IIp}} = \frac{r_{A_{IIp}}}{r_{A_{Ip}}}$.



$N_o^{A_{Ip}}$, $N_o^{A_{IIP}}$ и $N_o^{A_{IIIp}}$ – окружные силы во входной точке размольной зоны A_{Ip} , в произвольной точке A_{IIP} и в выходной точке зоны A_{IIIp} режущей кромки $A_{Ip} A_{IIIp}$.

Рисунок 2.10 – Силовые факторы в точках пересечения кромок ножей

Окружную силу $N_o^{A_{lp}}$ можно разложить на нормальную составляющую к кромке $-N_n^{A_{lp}}$ и касательную вдоль неё $-N_\tau^{A_{lp}}$. Касательная составляющая окружного усилия согласно методике определяли по формуле

$$N_\tau^{A_{lp}} = N_o^{A_{lp}} \cdot \sin \alpha_{A_{lp}}. \quad (2.37)$$

Нормальная составляющая окружного усилия

Согласно используемой методике [6]

$$N_n^{A_{lp}} = N_o^{A_{lp}} \cdot \cos \alpha_{A_{lp}}. \quad (2.38)$$

Определив и разложив окружное усилие на его составляющие, найдем их соотношение между собой

Из рисунка 2.10 следует

$$\frac{N_\tau^{A_{lp}}}{N_n^{A_{lp}}} = \frac{OC}{A_{lp}C} = \operatorname{tg} \alpha_{A_{lp}}. \quad (2.39)$$

По полученным данным на рисунке 2.11 представлена зависимость окружного усилия от радиуса движущейся точки кромки ножа ротора при контакте с ножом статора.

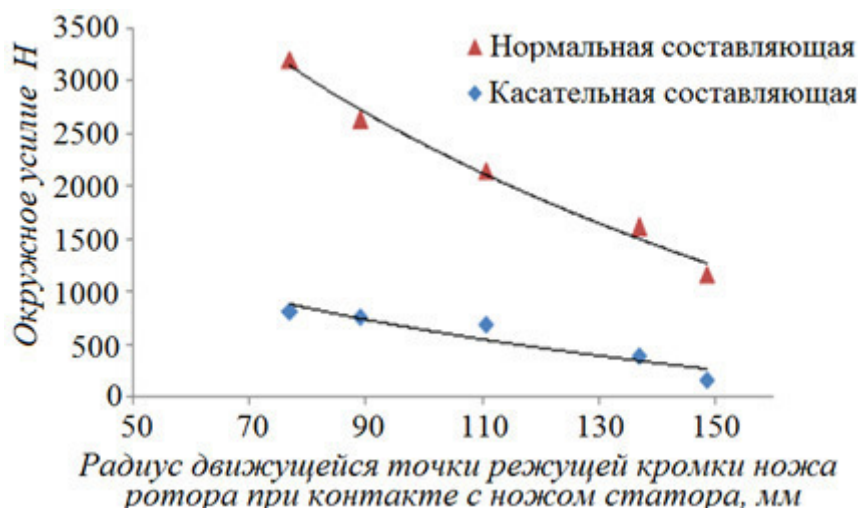


Рисунок 2.11 - Зависимость окружного усилия режущей кромки ножа гарнитуры ротора от центра к периферии

Из рисунка 2.11 видно, что окружное усилие для нормальной и касательной составляющих изменяется по одному закону, при движении точки скрещивания от

центра к периферии происходит снижение окружного усилия и соответственно его составляющих, при этом нормальные усилия значительно превышают касательные. Это обусловлено построением единичных ножей на рабочей поверхности ротора и статора гарнитуры, углами скрещивания, образуемыми при их контакте.

Установлено, что предлагаемая конструкция гарнитуры обеспечивает превалирование доли нормальной составляющей окружного усилия, свидетельствуя о преобладании фибриллирующего воздействия на волокнистый полуфабрикат [4, 11].

Чтобы установить и оценить характер воздействия ножей гарнитуры предлагаемого исполнения на волокнистый полуфабрикат, согласно методике [6] определим силы трения Q^p и Q^c волокнистого материала о режущие кромки, которые направлены в сторону периферии диска

$$Q^p = Q^c = N_n^p(N_n^c) \cdot f, \quad (2.40)$$

где $f = \operatorname{tg} \varphi$ – коэффициент размола; φ – угол трения волокнистого материала о кромки ножей [6].

В соответствии с теоретическими выкладками, определив силы трения Q^p и Q^c волокнистого полуфабриката о режущие кромки ножей ротора и статора и сравнив их с нормальной составляющей усилия при углах скрещивания, характерных для гарнитуры предлагаемого исполнения, можно сделать вывод о том, что преимущественно силы трения меньше нормальных составляющих и равны им и лишь в небольшом соотношении превышают их [4, 6, 11].

Таким образом, при значениях угла скрещивания режущих кромок ножей ротора и статора меньших, равных и не намного превышающих двойной угол трения волокнистого материала о них [6] процесс размола интенсифицируется за счёт наиболее оптимального фибриллирующего режима механического воздействия на волокна. На основании анализа литературных источников и теоретических исследований можно предположить, что при традиционном используемом *двухстороннем исполнении* гарнитуры при размоле древесного волокна в производстве ДВП характерно то, что углы скрещивания режущих

кромок значительно превышают двойной угол трения волокнистого полуфабриката о них [6, 11], оказывая преимущественно укорачивающее воздействие, не позволяя эффективно подготавливать полуфабрикат с необходимыми размерно-качественными характеристиками, снижая физико-механические свойства получаемой продукции и эффективность производства ДВП в целом.

Выводы ко второй главе

1. Впервые на основании анализа литературных источников других авторов, конструктивных особенностей размольных гарнитур, их влияния на размерно-качественные характеристики волокнистого полуфабриката для производства древесноволокнистых плит мокрым способом предложен рисунок поверхности размольной гарнитуры комбинированного исполнения преимущественно фибриллирующего воздействия на волокно.

2. Проведен теоретический анализ построения рисунка предлагаемой конструкции гарнитуры, распределения ножей по зонам размола на ее рабочей поверхности, обеспечивающих фибриллирующее воздействие (табл. 2.3) при размоле древесноволокнистого полуфабриката в производстве ДВП.

3. Определены основные технологические параметры гарнитуры по зонам размола: секундная режущая длина, количество точек пересечения ножей ротора с ножами статора, поверхность размола, циклическая элементарная длина ножевой гарнитуры, позволяющие оценить эффективность в сравнении с традиционной конструкцией (табл. 2.3).

4. Используя разработанную методику, определены силовые характеристики движения ножей ротора при скрещивании их с ножами статора, а также нормальные и касательные составляющие усилия, которые по-разному влияют на процесс размола и позволяют его регулировать.

3 Экспериментальная часть

В результате проведенного критического анализа литературных источников было установлено, что работы авторов [21, 32, 38, 87], посвященные процессу размола волокнистых полуфабрикатов в плитном производстве, несомненно, очень хорошо вписываются в технологический процесс производства ДВП. Однако некоторые вопросы до сегодняшнего дня недостаточно изучены. В частности, отсутствуют исследования, связанные с изменением конструкции размольной гарнитуры, влиянием ее особенностей на процесс подготовки волокнистых полуфабрикатов в производстве ДВП мокрым способом.

В настоящем разделе представлены: программа и методики экспериментальных исследований, планирование эксперимента, выбраны основные характеристики моделей, результаты эксперимента, реализованного в производственных и лабораторных условиях с целью подтверждения теоретических исследований и обоснования эффективности разработанной конструкции размольной гарнитуры для подготовки волокнистого полуфабриката на второй ступени размола при производстве ДВП мокрым способом.

В ходе настоящих исследований необходимо было решить следующие задачи:

- установить количественные зависимости размерно-качественных характеристик древесноволокнистого полуфабриката и физико-механических свойств готовых плит от технологических и конструктивных параметров процесса размола при использовании новой конструкции гарнитуры;
- выполнить сравнительный анализ размерно-качественных характеристик волокнистого полуфабриката и физико-механических свойств готовых плит при эксплуатации новой и традиционной конструкций размольных гарнитур в производстве ДВП мокрым способом.

3.1 Выбор основных направлений и методов исследований процесса размола волокнистых полуфабрикатов

Важнейшей составной частью научных исследований является построение математической модели объекта, совокупности математических зависимостей, описывающих процесс размола волокнистого полуфабриката в производстве ДВП, а также получения готовой продукции из него при эксплуатации предлагаемой конструкции размольной гарнитуры. Построенная математическая модель объекта является хорошим инструментом исследования, позволяющим определять интересующие характеристики волокнистого полуфабриката, результаты влияния на него тех или иных факторов процесса размола, оптимальные режимы функционирования размалывающего оборудования.

3.1.1 Выбор методов исследований

Экспериментальные методы исследований - «планирование эксперимента». Планирование эксперимента - это совокупность приемов, позволяющих правильно выстроить эксперимент и получить адекватное описание процесса размола волокнистых полуфабрикатов.

Для решения поставленных задач использовались методы математического планирования с целью получения математического описания процесса размола при использовании новой конструкции гарнитуры. Экспериментальный метод получения математических моделей был выбран нами, по той причине, что его применяют для сложных многофакторных процессов, к которым можно отнести процесс размола. В свою очередь экспериментальные исследования подразделяются на пассивные и активные [88-90]. Однако уравнение регрессии, полученное при пассивном эксперименте, справедливо лишь только в том узком диапазоне изменений входных параметров, который существовал во время проведения эксперимента. Таким образом, для исследования процесса размола нами был принят активный эксперимент.

Важным этапом экспериментальных исследований является планирование эксперимента, где необходимо обеспечить: «минимальное количество опытов; одновременное варьирование всеми факторами, определяющими протекание процесса, по специальным алгоритмам; правильную обработку и интерпретирование результатов эксперимента» [89].

По сравнению с традиционным методом, математические планы эксперимента значительно сокращают необходимое число его опытов и более равномерно исследуют факторное пространство. Но они могут быть использованы только при условии нормального закона распределения исходных параметров.

В настоящей работе для решения поставленных задач были использованы методы статистически-математического планирования с целью получения математических моделей, описывающих процесс размола волокнистого полуфабриката при использовании разработанной конструкции гарнитуры после дефибратора в производстве ДВП мокрым способом. Полученные модели позволят произвести полный статистический анализ уравнений: «построить доверительные интервалы для оценок, определить надежность прогнозирования исследуемых факторов и т.д., что может служить основой для практического использования и технологической интерпретации моделей». Для реализации наших экспериментальных исследований, согласно известным методикам [89], был выбран трехфакторный эксперимент по В-плану второго порядка. «В-план второго порядка близок к D-оптимальным планам», также его выбор определяется следующими достоинствами.

Минимальное количество опытов, необходимых для реализации эксперимента, определяется по формуле:

$$N = 2^K + 2K, \quad (3.1)$$

где K - количество факторов.

Целью экспериментальных исследований настоящей работы является подтверждение теоретических исследований процесса подготовки древесноволокнистого полуфабриката на второй ступени размола в производстве ДВП мокрым способом при использовании предлагаемой размольной гарнитуры,

а также получение статистически-математического описания исследуемого процесса. Для возможности установления влияния парного взаимодействия основных технологических и конструктивных параметров процесса размола при использовании новой конструкции гарнитуры на размерно-качественные характеристики древесноволокнистого полуфабриката и физико-механические свойства готовой ДВП плиты нами был выбран многофакторный эксперимент, так как «он позволяет при переходе к каждому последующему опыту варьировать все или почти все факторы одновременно» [89].

Установленные объективные закономерности, выражающие «влияние различных факторов как друг на друга, так и на выходную величину», позволят использовать полученную информацию для управления технологическим процессом размола в желаемом направлении [89]. Таким образом, для получения математического описания процесса размола волокнистого полуфабриката в производстве ДВП в виде полиномов второго порядка нами был спланирован и реализован трехфакторный эксперимент (приложение Г).

Для «планов второго порядка в общем случае, когда число варьируемых факторов равно K , модель имеет следующий вид» [89]

$$Y = B_0 + \sum_{i=1}^K B_{iX_i} + \sum_{i,j=1}^K B_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^K B_{ii} X_i^2, \quad (3.2)$$

где Y - исследуемый выходной параметр;

X_i, X_j - независимые переменные факторы в условном (нормализованном) масштабе (i и j принимают от 1 до 3, но $i \neq j$);

K - число независимых переменных ($K=3$);

B_0 - свободный член уравнения регрессии, характеризующий средний уровень выходного параметра;

B_i - коэффициенты регрессии, характеризующие влияние входных факторов X_i на выходной параметр Y ;

B_{ij} - коэффициенты регрессии, характеризующие эффективности парных взаимодействий входных параметров.

Уравнение (3.2) содержит «все слагаемые линейной модели, свободный член, линейные члены, квадратичные члены, являющиеся произведениями

коэффициентов регрессии на квадраты факторов и члены с парными взаимодействиями, которые представляют собой коэффициенты регрессии, умноженные на произведения двух различных факторов». Расчет коэффициентов регрессии производился по известной методике [89]. Оценка значимости коэффициентов регрессии осуществлялась при помощи критерия Стьюдента. Проверка адекватности математической модели соответствующему технологическому процессу проводилась по критерию Фишера. Проверка однородности выборочных оценок - по критерию Кохрена [89].

Из вышесказанного можно заключить, что план, выбранный нами для реализации эксперимента, дает возможность получить математические модели, адекватно описывающие исследуемые процессы, установить влияние отдельных факторов на некоторые выходные параметры, а также позволяет исследовать влияние всех входных факторов на выходные величины. Уравнения математической модели, описывающие процесс размола древесноволокнистых полуфабрикатов после дефибратора в производстве ДВП, должны устанавливать зависимость размерно-качественных характеристик древесноволокнистого полуфабриката и физико-механических свойств готовой плиты от конструктивных и технологических параметров процесса размола.

3.1.2 Методики определения размерно-качественных характеристик волокнистого полуфабриката, физико-механических свойств готовых плит и удельного расхода электроэнергии

Размерно-качественные характеристики древесноволокнистого полуфабриката

Степень помола (ДС). В производстве ДВП мокрым способом для оценки качества волокнистого полуфабриката используется прибор фирмы «Defibrator» (Швеция) «Дефибратор-секунда», при помощи которого определяется степень помола (ДС) волокнистого полуфабриката согласно паспорту прибора.

Степень фибриллирования полуфабриката (Fbr). Степень фибриллирования полуфабриката является важнейшим показателем, характеризующим разработку волокон и обеспечивающим межволоконные связи в готовой продукции. Для оценки степени фибриллирования нет общепринятого универсального стандарта, и поэтому, чтобы определить (Fbr), идентифицировали ряд образцов волокнистого полуфабриката при микроскопическом анализе. Затем подсчитывали количество волокон с наличием фибрилл (тонких волосоподобных ворсинок, отходящих от основного волокна), образовавшихся в процессе размола. Путем соотношения волокон к общей массе полуфабриката условно присваивали максимальное и минимальное значение степени фибриллирования в процентах. Значения показателя остальных образцов определяли аналогичным образом.

Фракционный состав полуфабриката (Вк, Вс, Вм, %). Работа прибора для фракционирования волокна основана на пропуске определенного количества древесного волокна через сита с отверстиями, соответствующими группам качественной оценки. После фракционирования волокно с каждого сита отдельно взвешивалось, и вес каждой фракции выражался в процентах от общей массы. Данный способ оценки древесного волокна определяет гранулометрический состав волокна с оценкой геометрических характеристик каждой фракции (длина, диаметр).

При разделении волокнистого полуфабриката по фракциям на фракционаторе марки ФВГ-2 происходило измерение длины и диаметра древесных волокон с использованием цифрового микроскопа Digital Microscope с максимальным увеличением до 500 крат, после чего определялась принадлежность волокон к той или иной фракции [32, 36].

Процентное содержание каждой группы волокна в общей массе определялось по формуле (3.3)

$$X = \frac{m_z}{m_n} \cdot 100, \quad (3.3)$$

где m_z – масса волокон группы (крупной, средней, мелкой) фракции, г;

m_n – масса всей навески, г.

Средняя длина волокна (L_{cp}) и его диаметр (d_{cp}), мм, являются одними из важнейших плитообразующих показателей волокнистого полуфабриката. В данной работе среднеарифметическая длина волокна определялась по следующей формуле

$$L_{cp} = \frac{\sum \ell}{n}, \quad (3.4)$$

где $\sum \ell$ - суммарная длина волокна, мм;

n – число волокон, шт.

Среднеарифметический диаметр волокон d_{cp} определялся по следующей формуле

$$d_{cp} = \frac{\sum d}{n}, \quad (3.5)$$

где $\sum d$ - суммарный диаметр волокон, мм.

Отношение длины волокна (L_{cp}) к его диаметру (d_{cp}), мм, является одним из важнейших плитообразующих показателей волокнистого полуфабриката, который характеризует интенсивность изменения геометрических размеров древесных волокон в продольном и поперечном направлениях, определяя в большей степени их удельную поверхность и гибкость. В данной работе соотношения длины волокон полуфабриката к их диаметру определялось по следующей формуле:

$$L / d = \frac{L_{cp}}{d_{cp}}. \quad (3.6)$$

Физико-механические свойства древесноволокнистых плит

Физико-механические свойства ДВП определяли стандартными методами, разработанными для «контроля качества продукции и проведения производственного процесса». Физико-механические свойства готовой плиты (плотность, предел прочности при статическом изгибе, водопоглощение за 24 ч) определялись по ГОСТ 10633-2018 «Плиты древесноволокнистые. Методы испытаний» [29].

В таблице 3.1 представлены требования к физико-механическим свойствам ДВП мокрого способа производства в соответствии с ГОСТ 4598-2018 «Плиты древесноволокнистые» [91].

Таблица 3.1 – Физико-механические свойства ДВП согласно ГОСТ 4598-2018

Группа плит	Плотность плиты, кг/м ³	Прочность плиты, МПа	Водопоглощение за 24 ч, %
А	850-1100	38	20
Б	800-1100	33	23

Плотность древесноволокнистой плиты P , кг/м³, вычислялась с точностью до 10 кг/м³ по формуле

$$P = m/L \cdot B \cdot s, \quad (3.7)$$

где m – масса образца, кг;

L , B , s – соответственно длина, ширина и толщина образца, м.

Предел прочности при статическом изгибе древесноволокнистой плиты определялся напряжением, при котором опытный образец разрушился под действием изгибающего усилия. Это определяющая характеристика древесноволокнистой плиты, по которой можно судить о качестве готовой продукции.

Прочность на изгиб $\sigma_{изг}$, МПа, с точностью до 0,1 МПа, определялась по формуле

$$\sigma_{изг} = \frac{3P_{раз}l}{2bh^2}, \quad (3.8)$$

где $P_{раз}$ – сила нагружения, действующая на образец в момент разрушения, Н;

l – расстояние между центрами опор, мм;

b – ширина образца, мм;

h – толщина образца, мм.

Водопоглощение за 24 ч A , %, с точностью до 0,1 %, определялось по формуле

$$A = \frac{m_2 - m}{m} \cdot 100, \quad (3.9)$$

где m – масса образца до погружения в воду, г;

m_2 – масса образца после извлечения из воды, г.

Удельный расход электроэнергии на размол E , кВт·ч/ΔДС·т

Потребляемая мощность установки на размол полуфабриката определялась с использованием стационарного переносного прибора К-50.

Удельный расход электроэнергии E , $\text{кВт}\cdot\text{ч}/\Delta\text{ДС}\cdot\text{т}$, рассчитывался по формуле

$$E = (N \cdot t) / m \cdot \Delta\text{ДС}, \quad (3.10)$$

где N - расходуемая мощность, Вт;

t – время размола, ч;

m – масса абсолютно сухого волокна, т.

Расходуемая мощность определяется по формуле

$$N = \sqrt{3} \cdot U_{\phi} \cdot I \cdot \cos \varphi, \quad (3.11)$$

где $\cos \varphi = 0,9$.

3.2 Планирование эксперимента

При математическом описании сложного многомерного объекта, каким является процесс подготовки древесноволокнистого полуфабриката, в первую очередь выбираются наиболее важные его выходные параметры. Анализируя результаты предыдущих исследований [21, 22, 38], литературные источники [4, 20, 24, 32, 40, 41, 92], было определено, что в качестве выходных параметров необходимо выбрать качественные характеристики волокнистого полуфабриката, физико-механические свойства готовой плиты ДВП, а также расход электроэнергии, затрачиваемой на размол.

На основании анализа литературных источников, а также проведенных многочисленных предварительных исследований были выявлены величины основных параметров, влияющих на размерно-качественные характеристики древесноволокнистого полуфабриката и физико-механические свойства готовой плиты.

В настоящей работе для решения поставленных задач на второй ступени процесса размола необходимо иметь информацию по результатам размола древесного волокна на первой ступени после дефибратора:

- породный состав исходного сырья – П (100 % – X);
- степень помола (после дефибратора) ДС_д;
- степень фибриллирования (после дефибратора) Fbr_д, %;

- фракционный состав волокна (после дефибратора) $B_{K\partial}, B_{C\partial}, B_{M\partial}, \%$;
- средняя длина волокна (после дефибратора) $L_{ср\partial}, \text{мм}$;
- средний диаметр волокна (после дефибратора) $d_{ср\partial}, \text{мм}$;
- отношение длины волокна к его диаметру (после дефибратора) L/d_{∂} ;

При исследовании процесса размол волокнистого полуфабриката на рафинаторе в качестве входных параметров рассматривались:

- степень помола (после дефибратора) $ДС_{\partial}$;
- величина рабочего зазора $z, \text{мм}$;
- продолжительность размол $\tau, \text{с}$;
- концентрация древесноволокнистой массы $c, \%$;
- частота вращения ротора $n, \text{об/мин}^{-1}$.

А также качественные и количественные показатели, которые рассматривались как выходные параметры процесса размол:

- степень помола древесноволокнистого полуфабриката $ДС$;
- степень фибриллирования волокнистого полуфабриката $Fbr, \%$;
- фракционный состав полуфабриката $B_K, B_C, B_M, \%$;
- средняя длина волокна $L_{ср}, \text{мм}$;
- средний диаметр волокна $d_{ср}, \text{мм}$;
- отношение длины волокна к его диаметру l/d ;
- предел прочности при статическом изгибе плиты $\sigma_{изг}, \text{МПа}$;
- водопоглощение плиты за 24 ч $A, \%$;
- плотность плиты P ;
- удельный расход электроэнергии на размол $E, \text{кВт}\cdot\text{ч}/\Delta ДС\cdot\text{т}$.

Статистическая обработка результатов экспериментов осуществлялась в соответствии с теорией математической статистики [90], представленной в приложении Г. Коэффициент вариации и показатель точности в известной мере характеризуют надежность результатов наблюдений. Определение предельной ошибки и оценка степени влияния каждого входного параметра на выходные величины осуществлялась

по методике [88, 89], с применением программы Microsoft Excel 2007 и пакета программ STATISTICA – 6 [90, 93].

На основании серии предварительных исследований были выбраны входные величины, оказывающие наибольшее влияние на выходные параметры исследуемого процесса для обоснования интервалов, уровней и шагов варьирования, используемых для дальнейших исследований.

Главным направлением исследований данной работы явилось совершенствование процесса размола древесноволокнистого полуфабриката в производстве ДВП мокрым способом за счет использования новой конструкции размольной гарнитуры, основываясь на анализе механизма исследуемого процесса и полученных статистически-математических уравнений.

В качестве исходного сырья использовали волокнистый полуфабрикат после первой ступени размола из технологической щепы, получаемой из древесных отходов лесопильного производства и низкокачественной древесины со склада сырья, хвойного породного состава (99 ± 1) %, соответствующей стандартам ГОСТ 15815-83 «Щепа технологическая. Технические условия».

На рисунке 3.1 представлена схема проведения многофакторного эксперимента для определения оптимальных условий процесса размола при использовании новой конструкции гарнитуры. По данным цеха ДВП используемый для проведения исследований волокнистый полуфабрикат после первой ступени размола (дефибратор) имел следующие качественные показатели:

- $K_{д1} = (ДС_{д1} = 10,5 \text{ ДС}; Fbr_{д1} = 18\%; Lcp_{д1} = 8,57 \text{ мм}; dcp_{д1} = 0,32 \text{ мм}; l/d_{д1} = 26,6; B_{Kд1} = 48 \%; B_{Cд1} = 32 \%; B_{Mд1} = 20 \%)$;
- $K_{д2} = (ДС_{д2} = 12 \text{ ДС}; Fbr_{д2} = 20\%; Lcp_{д2} = 6,85 \text{ мм}; dcp_{д2} = 0,25 \text{ мм}; l/d_{д2} = 27,6; B_{Kд2} = 40 \%; B_{Cд2} = 38 \%; B_{Mд2} = 22 \%)$;
- $K_{д3} = (ДС_{д3} = 13,5 \text{ ДС}; Fbr_{д3} = 22\%; Lcp_{д3} = 5,13 \text{ мм}; dcp_{д3} = 0,18 \text{ мм}; l/d_{д3} = 28,6; B_{Kд3} = 32 \%; B_{Cд3} = 44 \%; B_{Mд3} = 24 \%)$;

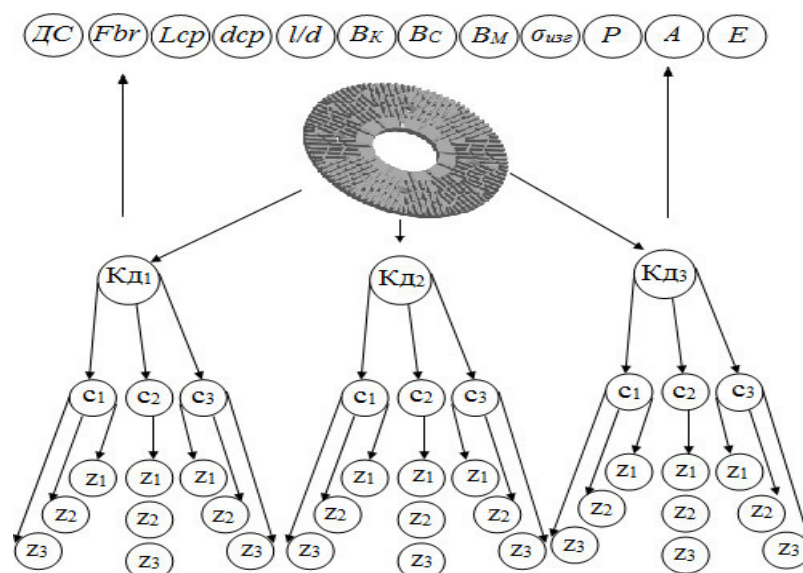


Рисунок 3.1 – Структурная схема проведения эксперимента

При анализе работы предприятия выяснилось: при нестабильной работе дефибратора в производстве ДВП происходят колебания степени помола древесного волокна после первой ступени размол в диапазоне 10,5-13,5 ДС, что в результате значительно оказывает влияние как на дальнейший процесс размол, качественные характеристики полуфабриката и физико-механические свойства готовой продукции, так и на энергопотребление процесса.

Таким образом, одним из входных параметров многофакторного эксперимента рассматривалась степень помола древесного волокна после дефибратора, в указанном диапазоне значений при ($K_{д1}(ДС_{д}=10,5ДС)$, $K_{д2}(ДС_{д}=12ДС)$, $K_{д3}(ДС_{д}=13,5ДС)$).

В таблице 3.2 и на рисунке 3.1 представлены исследуемые входные и выходные параметры эксперимента. В результате анализа коэффициентов вариации нестабильности и результатов предварительных исследований был спланирован и реализован многофакторный эксперимент, позволяющий получить математическое описание процесса размол древесноволокнистого полуфабриката при использовании предлагаемой конструкции гарнитуры. Также определены уровни и интервалы варьирования входных факторов, согласно В-плану второго порядка для трехфакторного эксперимента.

Таблица 3.2 – Входные и выходные параметры эксперимента

Параметр	Обозначение	
	натуральное	нормализованное
1	2	3
Входные параметры (управляемые факторы)		
Величина рабочего зазора, мм	z	X ₁
Концентрация древесноволокнистой массы, %	c	X ₂
Степень помола (дефибратор), ДС	K _д (ДС _д)	X ₃
Выходные параметры (контролируемые факторы)		
Степень помола древесноволокнистого полуфабриката, ДС	ДС	Y ₁
Степень фибриллирования волокнистого полуфабриката, %	Fbr	Y ₂
Средняя длина волокна, мм	L _{ср}	Y ₃
Средний диаметр волокна, мм	d _{ср}	Y ₄
Отношение длины волокна к его диаметру	l/d	Y ₅
Содержание крупной фракции волокон в общей массе, %	B _K	Y ₆
Содержание средней фракции волокон в общей массе, %	B _C	Y ₇
Содержание мелкой фракции волокон в общей массе, %	B _M	Y ₈
Предел прочности твердой ДВП при статическом изгибе, МПа	σ _{изг}	Y ₉
Плотность твердой древесноволокнистой плиты, кг/м ³	P	Y ₁₀
Водопоглощение твердой ДВП за 24 часа, %	A	Y ₁₁
Удельный расход электроэнергии на размол, кВт·ч/т	E	Y ₁₂

В работе был спланирован и реализован трехфакторный эксперимент, получено математическое описание процесса размола волокнистого полуфабриката на второй ступени, позволяющее оценить влияние степени помола после дефибратора, концентрации древесноволокнистой массы и рабочего зазора при использовании разработанной конструкции гарнитуры на качественные характеристики древесноволокнистого полуфабриката, а также на физико-механические свойства готовых плит из него. Многофакторный эксперимент был спланирован и реализован по В-плану второго порядка. В таблицах 3.2 - 3.3 приведены входные и выходные факторы, уровни и интервалы варьирования для многофакторного эксперимента.

Таблица 3.3 - Уровни и интервалы варьирования исследуемых факторов для трехфакторного эксперимента

Фактор	Обозначение		Интервал варьи- рования фактора	Уровень варьирования фактора		
	натуральное	нормализо- ванное		- 1	0	+ 1
рафинатор						
Величина рабочего зазора, мм	z	X ₁	0,05	0,05	0,1	0,15
Концентрация древесноволокнистой массы, %	c	X ₂	0,5	2	2,5	3
Степень помола (дефибратор), ДС	K _д (ДС _д)	X ₃	1,5	10,5	12	13,5

Планирование многофакторного эксперимента позволило разработать математические модели, адекватно описывающие процесс подготовки волокнистого полуфабриката при использовании предлагаемой конструкции размольной гарнитуры по всем представленным выше направлениям исследований, реализовать в последующем спланированный эксперимент, оценить явления процесса размола и влияние на него как отдельных факторов, так и их парное взаимодействие.

Результаты многофакторного эксперимента позволяют выбрать оптимальные режимы размола для обеспечения необходимых размерно-качественных характеристик волокнистого полуфабриката и физико-механических свойств готовых плит в производстве ДВП мокрым способом. Полученные математические модели в виде регрессионных зависимостей адекватны при доверительной вероятности 95 – 99 %. Величина достоверности аппроксимации составила $0,9902 \leq R^2 \leq 0,9987$. Расчетные коэффициенты и их парные составляющие показывают значимость и характер влияния на исследуемые факторы. Также в ходе работы была произведена оценка предельной абсолютной ошибки исследуемых уравнений регрессии по известной методике (приложение Д). В работе не приводятся модели с нормализованными обозначениями факторов и построенные по ним графические зависимости.

Для решения задачи оптимизации процесса размола при использовании новой конструкции гарнитуры, анализа зависимости качественных показателей полуфабриката и физико-механических свойств плиты от технологических и конструктивных параметров процесса размола получены модели с натуральными обозначениями факторов, которые представлены в третьей главе диссертационной работы.

Таким образом, *процесс размола при производстве ДВП мокрым способом* представлен регрессионными зависимостями в виде

$$ДС, L_{ср}, d_{ср}, l/d, B_K, B_C, B_M, \sigma_{изг}, P, A, E = f(K_d (ДС_d), c, z). \quad (3.12)$$

3.3 Реализация эксперимента

3.3.1 Экспериментальные установки для проведения исследований

Схема технологического процесса производства древесноволокнистых плит мокрым способом представлена на рисунке А1 (приложение А).

Основные исследования процесса подготовки волокнистого полуфабриката проводились на полупромышленной дисковой мельнице МД размола на базе лаборатории кафедры МАПТ СибГУ при использовании разработанной и изготовленной собственными силами конструкции гарнитуры для второй ступени размола древесной массы в производстве ДВП.

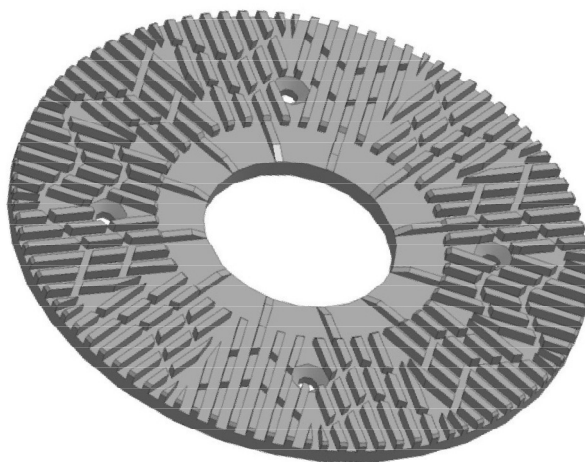


Рисунок 3.2 - Конструкция размольной гарнитуры (патент № 2652177)

Гарнитура комбинированного исполнения отличается от традиционной конструкции двухстороннего исполнения, используемой в производстве ДВП, своими конструктивными особенностями: количеством секторов, значениями установочных углов ножей ротора и статора и углов их скрещивания, ширины ножей и межножевых ячеек, наличием ножевых прорезей (табл. 2.3). В процессе размола конструктивные особенности ножевой гарнитуры обеспечивают снижение количества точек контактов ножей ротора и статора при повышении секундной режущей длины, циклической элементарной длины, размалывающей поверхности, обуславливая преобладание над касательными составляющими нормальных усилий, характеризуя преимущественно фибрилирующее воздействие [4, 11] на волокнистый полуфабрикат (табл. 2.3). Фибриллирующее воздействие гарнитуры на древесные волокна в большей мере обеспечивает их разделение в продольном направлении, что позволяет эффективно подготавливать древесноволокнистый полуфабрикат с преобладающим в своем составе соотношением средней фракции, состоящей из хорошо разработанных волокон с высоким отношением длины к диаметру, повышая межволоконные связи и плитообразующие свойства полуфабриката в целом. На разработанную размольную гарнитуру получен патент на изобретение № 2 652 177 от 17.05.2016 «Размольная гарнитура дисковой мельницы» [94].

Ряд экспериментов по качественным показателям процесса размола проводились в промышленных условиях центральной лаборатории завода ДВП лесоперерабатывающего предприятия Segezha group ОАО «Лесосибирский ЛДК №1». Также при реализации эксперимента использовались данные предприятия по качественным характеристикам полуфабриката после второй ступени (рафинатор RR-70) для дальнейшего сопоставления результатов исследований.

Исследование процесса размола волокнистого полуфабриката при всех прочих равных условиях производства ДВП мокрым способом проводилось при использовании моделей, имеющих близкие к реальным натуральным размерам, что было соблюдено при выборе экспериментальной установки, проектировании и изготовлении ножевой гарнитуры на нее.

Общий вид установки представлен на рисунке Б.1 (приложение Б).

Для регулирования скорости вращения мельницы имеется набор шкивов, с помощью которого получали следующие частоты вращения ротора в минуту: 1250, 1500, 1750, 2000.

Механизм присадки представляет собой соединение винт-гайка с шагом 2 мм. Установка межножевого рабочего зазора осуществляется винтовым приспособлением. Точность установки зазора - 0,01 мм при использовании универсального координатного устройства.

3.3.2 Последовательность проведения экспериментов

В соответствии с планом эксперимента исследования реализовывались в следующей последовательности.

В производстве ДВП мокрым способом, при изменении параметров процесса размола, мельнице необходимо проработать 1,5 ч, чтобы произошёл обмен массы в горизонтальном бассейне, как минимум, на 80 %, поэтому для чистоты нашего эксперимента, массу набирали непосредственно сразу после прохождения размольной камеры дефибратора до попадания ее в горизонтальный бассейн. Таким образом, набиралось необходимое для эксперимента количество древесного волокна требуемого качества. Условия реализуемого многофакторного эксперимента, а также данные промышленного предприятия по характеристикам древесного волокна после дефибратора, исследуемого нами в качестве входного параметра, представлены на рисунке 3.1.

При реализации экспериментов по размолу волокнистого полуфабриката с использованием разработанной гарнитуры на полупромышленной размалывающей установке выставлялись необходимые значения технологических и конструктивных параметров, соответствующие промышленным условиям.

Выставление параметров происходило следующим образом: перед началом пуска машины размалывающие диски разводились, путем вращения механизма присадки по часовой стрелке. После запуска установки диски постепенно сводили, вращая механизм присадки против часовой стрелки, до появления свистящего звука (величина рабочего зазора нуль), осуществлялась корректировка

координатного устройства. Затем, по показаниям координатного устройства выставлялся необходимый рабочий зазор между размалывающими дисками, согласно плану эксперимента.

Экспериментальные исследования проводились при концентрации от 1 до 3 %, при частоте вращения ротора от 1250 до 2000 об/мин, рабочем зазоре между размалывающими дисками от 0,05 до 0,2 мм.

Древесное волокно (после дефибратора), разбавлялось водопроводной водой (65-75 С°) до необходимой концентрации в специальной емкости, из которой масса подавалась самотеком через систему трубопроводов в дисковую мельницу.

После прохождения древесноволокнистой массы через дисковую мельницу, установка останавливалась, осуществлялся отбор пробы для последующего определения размерно-качественных характеристик полуфабриката. В процессе подготовки осуществлялся контроль и фиксировались расход затрачиваемой мощности на размол с использованием переносного прибора К-50, а также продолжительность прохождения волокнистого полуфабриката через размольную камеру дисковой мельницы. Дальнейший эксперимент по прессованию древесноволокнистой плиты из полученного полуфабриката, осуществлялся мокрым способом на заводе ДВП Лесосибирского ЛДК №1 в промышленном прессе при всех прочих равных условиях производства. Перед прессованием плиты в древесноволокнистую массу добавлялись парафиновая эмульсия и водный раствор серной кислоты согласно нормам, указанным в таблице В.1 (приложение В). Отлив древесноволокнистого ковра осуществлялся на отливной установке с дальнейшей холодной подпрессовкой в лаборатории цеха ДВП. Горячее прессование плиты осуществлялось в промышленных условиях производства в 25-этажном промышленном прессе. Рецептура древесноволокнистой массы и условия технологических этапов (проклейки, отлива, прессования) производства ДВП мокрым способом, соответствующие при реализации многофакторного эксперимента, представлены в приложении В.

Полученные плиты в лаборатории цеха раскраивались на образцы определенного размера для замера и сравнительного анализа физико-

механических свойств с образцами плит, изготовленными из полуфабриката, полученного при эксплуатации традиционной гарнитуры на производстве.

В результате предварительных исследований определены входные технологические и конструктивные параметры процесса размола, их уровни и шаги варьирования для проведения многофакторного эксперимента, реализованного в лабораторных условиях на полупромышленной дисковой мельнице МД, согласно плану исследования, представленному в разделе 3.2. Техническая характеристика установки приведена в приложении Б.3.

В ходе реализации многофакторного эксперимента, после подготовки древесноволокнистого полуфабриката при заданных технологических и конструктивных параметрах процесса размола осуществлялась оценка его размерно-качественных характеристик, таких как степень помола, степень фибриллирования, фракционный показатель качества и состав, средняя длина и диаметр волокон, показатель их отношения. Оценку физико-механических свойств готовых плит осуществляли согласно известным методикам [29]. Результаты реализации экспериментов приведены в разделе 3.4 диссертационной работы.

3.4 Результаты экспериментальных исследований процесса размола волокнистого полуфабриката

Для подтверждения теоретических разработок настоящей работы и возможности эффективного использования предлагаемой конструкции гарнитуры при размоле древесноволокнистого полуфабриката в данном разделе представлены результаты экспериментальных исследований процесса его размола, дана сравнительная оценка размерно-качественных характеристик полуфабриката (степени помола и фибриллирования, фракционного показателя качества и состава, средней длины и диаметра волокон, показателя их отношения), физико-механических свойств готовых плит.

С целью определения интервалов и уровней варьирования входных параметров многофакторного эксперимента, анализа процессов и явлений, имеющих место при размоле в дисковой мельнице МД с использованием гарнитуры авторского исполнения, была реализована серия предварительных экспериментов.

На основании предварительных исследований [94-96], было определено и выбрано значение частоты вращения диска ротора ($n=1500 \text{ об/мин}^{-1}$) для реализации последующих экспериментальных исследований по причине наиболее стабильной и устойчивой работы дисковой мельницы, при достижении значений показателей качества полуфабриката и готовой продукции, близких к максимальным значениям.

На рисунке Е1 (приложение Е) в качестве примера представлены зависимости степени помола волокнистого полуфабриката (а, б) и физико-механических свойств плиты (в-е) от рабочего зазора и концентрации массы при использовании предлагаемой гарнитуры в сравнении с использованием традиционной конструкции. На рисунке видно, что при увеличении рабочего зазора снижается прирост степени помола волокнистого полуфабриката, как при традиционной гарнитуре, так и при предлагаемой. Увеличение рабочего зазора до 0,1 мм способствует улучшению прочностных свойств плиты. При повышении концентрации массы до 2-3 % увеличивается прирост степени помола, а также физико-механические свойства плиты. Сравнивая влияние рабочего зазора и концентрации массы при использовании традиционной и предлагаемой конструкций, стоит отметить, что зависимости имеют аналогичный качественный характер, несколько отличаясь количественными значениями, однако конструкция авторского исполнения позволяет получать ДВП из древесноволокнистого полуфабриката без применения связующего, обеспечивая более высокие прочностные свойства готовой плиты.

В процессе размола на первой ступени рабочий диапазон изменения степени помола находится в пределах 10,5-13,5 ДС. Наша задача исследовать процесс размола волокнистого полуфабриката на второй ступени размола при различной степени разработки древесного волокна на дефибраторе, поскольку это оказывает значительное влияние на качество древесноволокнистого полуфабриката и готовой продукции.

Таким образом, в ходе предварительных исследований были определены входные факторы, их диапазоны варьирования для реализации многофакторного эксперимента и установлению количественных зависимостей качественных показателей волокнистого полуфабриката и готовой продукции: $(10,5 \pm 0,5) \text{ ДС} \leq K_0$ ($ДС_0$) $\leq (13,5 \pm 0,5) \text{ ДС}$; $(0,05 \pm 0,01) \text{ мм} \leq z \leq (0,15 \pm 0,01) \text{ мм}$; $(2 \pm 0,1) \% \leq c \leq (3 \pm 0,1) \%$.

Для решения поставленных задач был спланирован и реализован трехфакторный эксперимент по В-плану второго порядка. Исследуемые факторы, интервалы и уровни варьирования входных параметров эксперимента представлены в разделе 3.2.

Результаты обрабатывались в пакете программ «STATISTICA-6» с использованием метода Квази-Ньютона. Коэффициенты регрессионных зависимостей, стоящие перед факторами, говорят о значимости и их влиянии на исследуемый процесс. Оценка значимости коэффициентов проводилась в соответствии с методикой, с помощью t-критерия Стьюдента [89, 90]. Проверка моделей с помощью F-критерия Фишера показала их адекватность.

Регрессионные зависимости представлены с натуральными обозначениями факторов с целью описания исследуемого процесса размола волокнистого полуфабриката при использовании новой конструкции гарнитуры и дальнейшей ее эксплуатации в промышленных условиях.

Таким образом, полученные регрессионные зависимости достоверно описывают исследуемый процесс размола волокнистого полуфабриката при использовании новой конструкции в производстве ДВП мокрым способом. Регрессионные зависимости позволяют выполнить расчет значений показателей качества волокнистого полуфабриката и физико-механических свойств ДВП, определить влияние парного взаимодействия управляющих факторов и их значения для стабилизации выходных факторов исследуемого процесса.

Наглядное представление о влиянии входных параметров процесса размола и их взаимодействиях на выходную величину дают графические зависимости, построенные по полученным моделям с натуральными обозначениями факторов.

3.4.1 Исследование влияния конструктивных и технологических параметров процесса размола на размерно-качественные характеристики волокнистого полуфабриката

В ходе экспериментальных исследований получены регрессионные зависимости, адекватно описывающие влияние основных технологических и конструктивных параметров процесса размола на размерно-качественные характеристики волокнистого полуфабриката, имеющие вид

$$DC = -140,78 + 26,7 \cdot z + 22,563 \cdot K_d(DC_d) + 19,71 \cdot c - 235 \cdot z^2 - 0,9056 \cdot K_d(DC_d)^2 - 1,35 \cdot c^2 + 3 \cdot z \cdot K_d(DC_d) - 17 \cdot z \cdot c - 0,7 \cdot K_d(DC_d) \cdot c; \quad (3.13)$$

$$Fbr = -1165,65 + 1044,25 \cdot z + 182,5083 \cdot K_d(DC_d) + 92,825 \cdot c - 5587,5 \cdot z^2 - 7,5417 \cdot K_d(DC_d)^2 - 5,875 \cdot c^2 + 10,83333 \cdot z \cdot K_d(DC_d) - 57,5 \cdot z \cdot c - 3,5833 \cdot K_d(DC_d) \cdot c; \quad (3.14)$$

$$Bк = 247,58 + 134,7 \cdot z - 31,467 \cdot K_d(DC_d) - 24,99 \cdot c + 205 \cdot z^2 + 1,272 \cdot K_d(DC_d)^2 + 1,85 \cdot c^2 - 13,333 \cdot z \cdot K_d(DC_d) + 25 \cdot z \cdot c - 0,533 \cdot K_d(DC_d) \cdot c; \quad (3.15)$$

$$Bс = -30,57 + 29,45 \cdot z + 12,14167 \cdot K_d(DC_d) - 3,335 \cdot c - 767,5 \cdot z^2 - 0,6083 \cdot K_d(DC_d)^2 - 1,475 \cdot c^2 + 4,16667 \cdot z \cdot K_d(DC_d) + 12,5 \cdot z \cdot c + 1,15 \cdot K_d(DC_d) \cdot c; \quad (3.16)$$

$$Bм = -114,89 - 138,3 \cdot z + 19,36 \cdot K_d(DC_d) + 26,52 \cdot c + 500 \cdot z^2 - 0,733 \cdot K_d(DC_d)^2 - 1,2 \cdot c^2 + 6,334 \cdot z \cdot K_d(DC_d) - 29 \cdot z \cdot c - 1,133 \cdot K_d(DC_d) \cdot c; \quad (3.17)$$

$$Lcp = -16,4861 + 32,7045 \cdot z + 3,0488 \cdot K_d(DC_d) + 0,6651 \cdot c - 90,675 \cdot z^2 - 0,1352 \cdot K_d(DC_d)^2 - 0,2568 \cdot c^2 - 1,175 \cdot z \cdot K_d(DC_d) + 2,585 \cdot z \cdot c + 0,0625 \cdot K_d(DC_d) \cdot c; \quad (3.18)$$

$$dcp = 1,516 - 0,2102 \cdot z - 0,239 \cdot K_d(DC_d) - 0,0389 \cdot c + 3,52 \cdot z^2 + 0,0101 \cdot K_d(DC_d)^2 - 0,0038 \cdot c^2 - 0,00333 \cdot z \cdot K_d(DC_d) - 0,04 \cdot z \cdot c + 0,00267 \cdot K_d(DC_d) \cdot c; \quad (3.19)$$

$$L/d = -1125,6 + 883,1 \cdot z + 172,3367 \cdot K_d(DC_d) + 112,41 \cdot c - 5555 \cdot z^2 - 6,95 \cdot K_d(DC_d)^2 + 1,65 \cdot c^2 + 37 \cdot z \cdot K_d(DC_d) - 141 \cdot z \cdot c - 6,7 \cdot K_d(DC_d) \cdot c. \quad (3.20)$$

Интерпретация регрессионных моделей в виде графических зависимостей и поверхностей отклика, устанавливающих закономерность изменения качественных характеристик древесноволокнистого полуфабриката от исследуемых конструктивных и технологических параметров процесса размола, представлена на рисунках 3.3 - 3.8.

Анализируя графики на рисунках 3.3 - 3.4, стоит отметить, что независимо от входной степени помола после дефибратора Кд(ДС_д) влияние рабочего зазора (z) и концентрации массы (с) на степень помола волокнистого полуфабриката (ДС) и фибриллирования (Fbr) имеют аналогичный качественный характер изменения, однако при Кд (ДС_д) = 12 ДС наблюдается

более интенсивный прирост степени помола и рост количества фибриллированных волокон в общей массе.

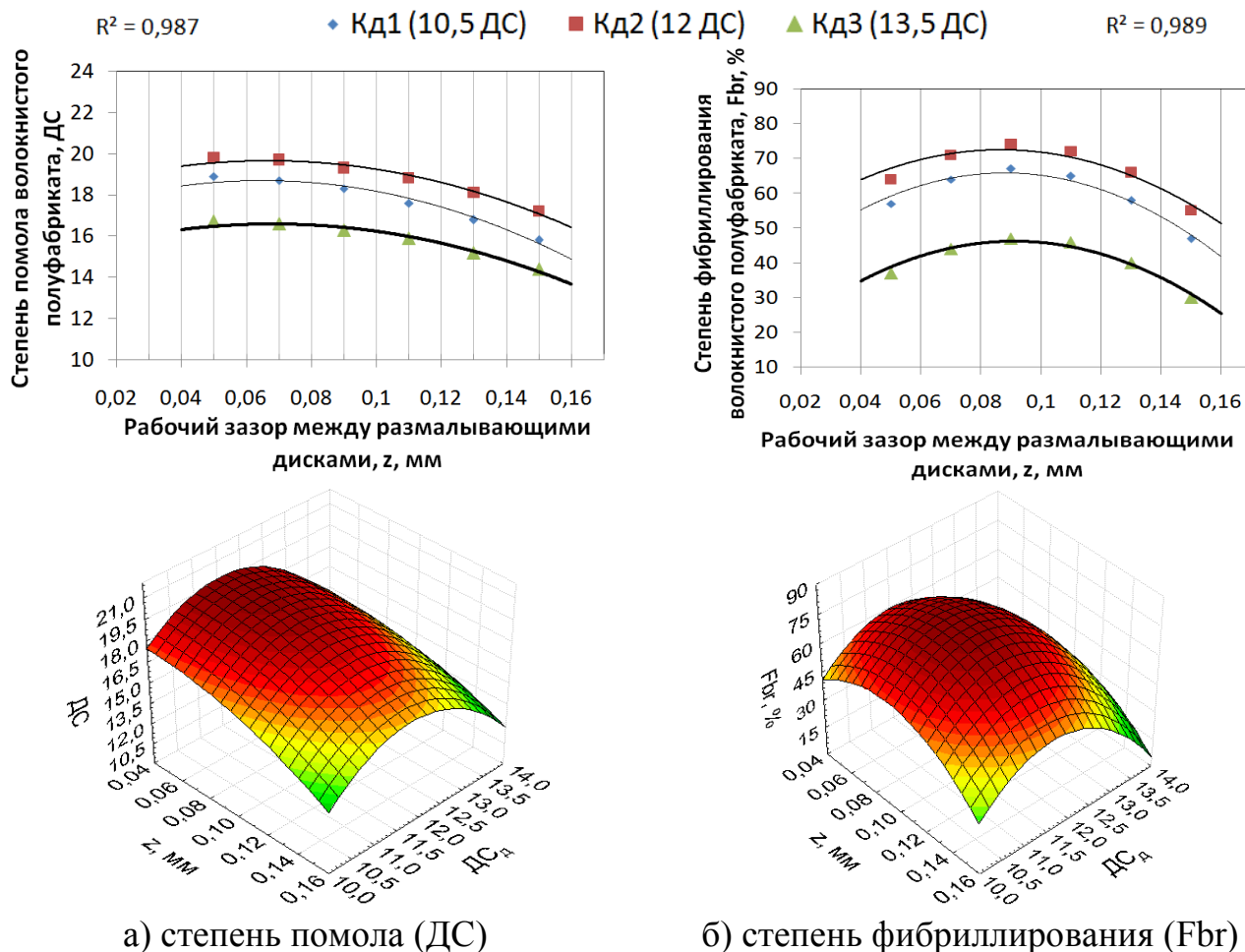


Рисунок 3.3 – Зависимость качественных характеристик волокнистого полуфабриката от величины рабочего зазора и степени помола древесного волокна

На рисунке 3.3 (а и б) видно, что с увеличением рабочего зазора (z) снижается прирост степени помола, в результате уменьшения удельного давления в зазоре между ножами ротора и статора. Наряду с некоторым снижением степени помола, наблюдается рост количества фибриллированных волокон полуфабриката при величине рабочего зазора $\approx 0,08-0,1$ мм.

На рисунке 3.4 (а и б) представлены графики, наглядно демонстрирующие изменение степени помола и фибриллирования древесноволокнистого

полуфабриката в зависимости от концентрации массы при различных значениях степени помола древесного волокна после дефибратора.

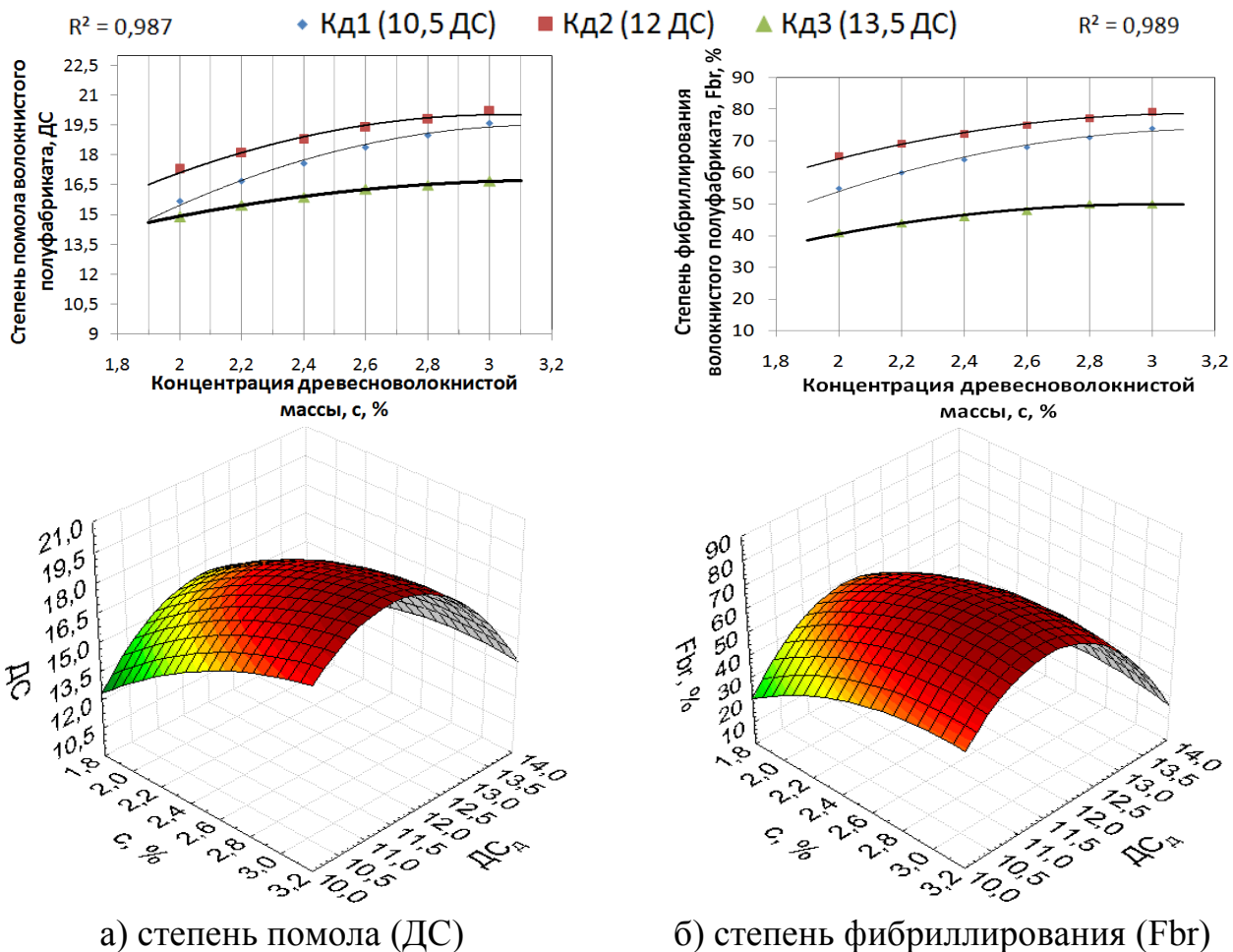


Рисунок 3.4 – Зависимость качественных характеристик волокнистого полуфабриката от изменения концентрации массы при различных значениях степени помола древесного волокна после дефибратора

При увеличении концентрации древесноволокнистой массы (с) повышается степень помола (ДС), что подтверждает ранее проводимые многочисленные исследования [21, 36, 40, 66]. Интенсивное истирание пучков волокон и отдельных волокон друг о друга способствует их фибриллированию и увеличению их количества в общей массе полуфабриката.

Повышение показателя Fbr полуфабриката положительно сказывается на его качестве, так как преобладание хорошо разработанных фибриллированных

волокон, способствует развитию прочных межволоконных связей в древесноволокнистом ковре и соответственно в готовой плите. Достаточно высокие значения показателя (Fbr) свидетельствуют об эффективном воздействии гарнитуры на древесное волокно.

Прирост степени помола полуфабриката обуславливается разработкой древесных волокон, а также непосредственно связан с изменением процентного содержания и соотношения их различных фракций в общей массе.

Соотношение фракций волокон полуфабриката характеризует его размерно-качественный состав и эффективность процесса размола, обеспечивая структурообразование в плите и соответственно ее физико-механические свойства.

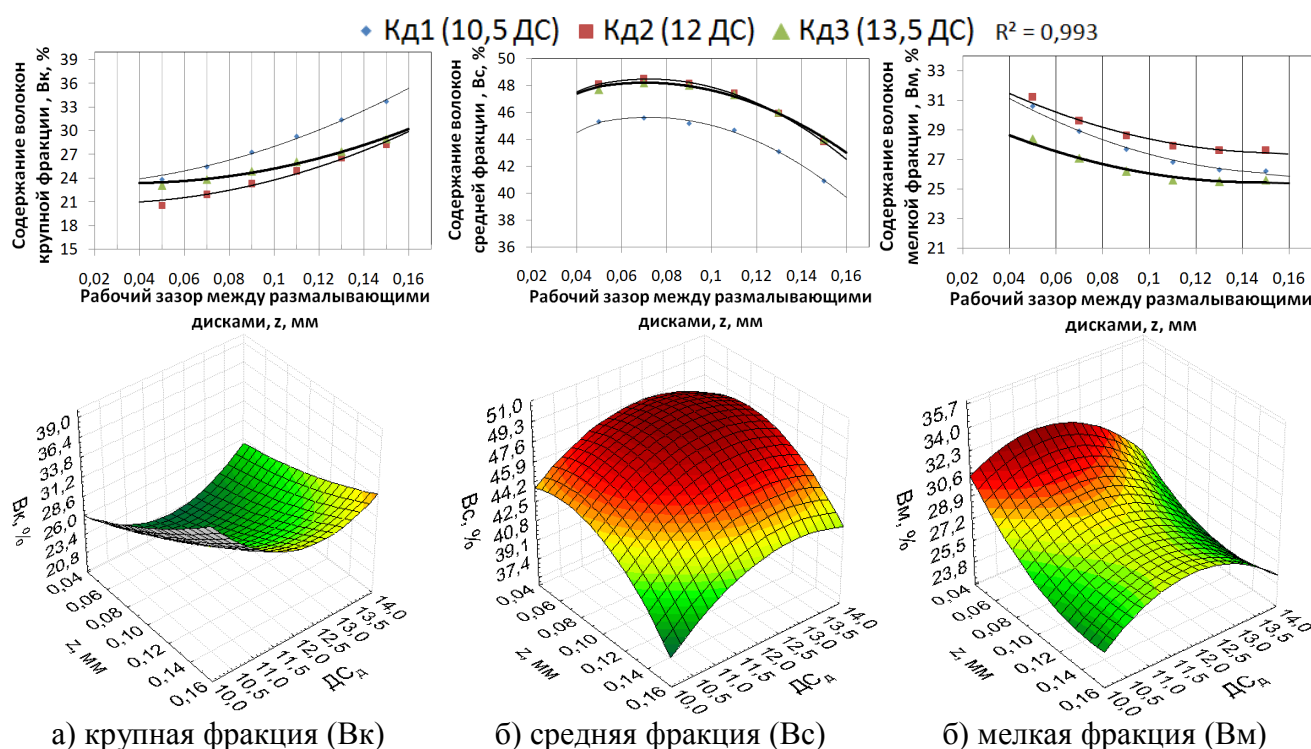


Рисунок 3.5 – Зависимость фракционного состава полуфабриката от величины рабочего зазора и степени помола древесного волокна

Из приведенных на рисунке 3.5 графических зависимостей, видно, что при увеличении рабочего зазора (z) менее интенсивно происходит снижение крупной (Вк) и возрастание мелкой (Вм) фракций, при этом содержание доли

волокон средней фракции (Вс) в общей массе полуфабриката повышается при величине рабочего зазора $\approx 0,08-0,1$ мм. Согласно исследованиям [21, 32, 36] средняя фракция состоит преимущественно из достаточно длинных и тонких, хорошо разработанных фибриллированных волокон, отвечающих за связеобразование в плите. Соответственно снижение содержания таких волокон в общей массе полуфабриката ухудшает его качество. Преимущественное их содержание, при наличии мелких волокон в общей массе до 40 % положительно сказывается на качестве полуфабриката в целом, улучшаются прочностные свойства плиты [21, 22].

На рисунке 3.6 (а и б) представлены графики, отражающие влияние степени помола древесного волокна и концентрации древесноволокнистой массы, при фиксировании рабочего зазора (0,1 мм) на изменение фракционного состава полуфабриката при его размоле.

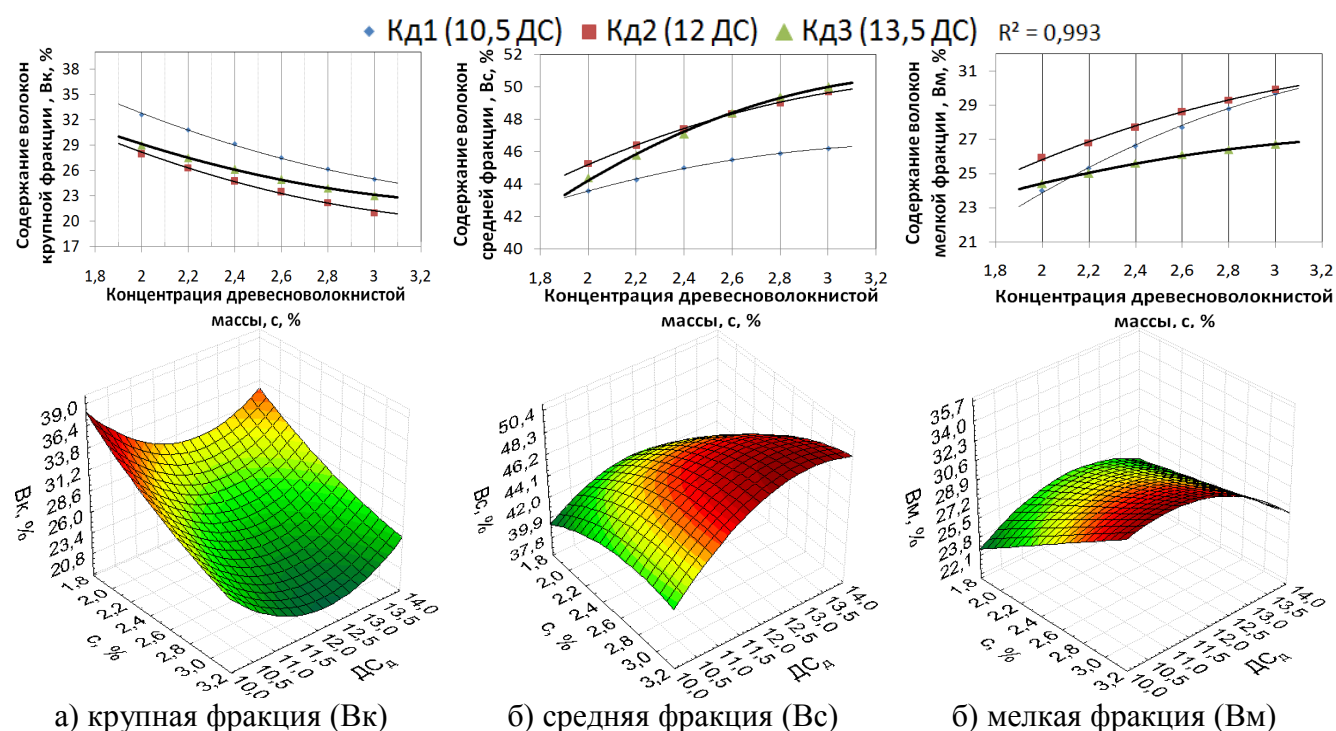


Рисунок 3.6 – Зависимость фракционного состава полуфабриката от изменения концентрации массы и степени помола древесного волокна

При увеличении концентрации массы, согласно исследованиям авторов [21, 36 40, 49, 66], повышается толщина прослойки в зазоре между ножами

гарнитуры, происходит щадящий размол, что способствует преимущественному возрастанию доли средней фракции волокон, увеличивается их фибриллирование, несколько возрастает содержание мелкой фракции, что является следствием измельчения крупной фракции, улучшается фракционный состав. Грубые волокна разрабатываются, а оставшееся их содержание, согласно исследованиям авторов

[21, 32], выполняет армирующую роль в структурообразовании плиты, так что присутствие их в небольшом соотношении необходимо.

Таким образом, на основании анализа фракционного состава полуфабриката, можно сделать вывод, что для повышения его качества, при регулировании режимных параметров процесса размола, необходимо стремиться к увеличению в общей массе полуфабриката волокон средней фракции (до 46-50 %), при достаточном содержании мелкой (до 28-31 %) и снижении доли крупной фракций (до 20-24 %). Наилучшее соотношение фракций полуфабриката, обеспечивается в процессе размола древесного волокна имеющего степень помола после дефибратора $K_d(DC_d) \approx 10,5 - 12$ ДС, при рабочем зазоре (z) $\approx 0,08-0,1$ мм и концентрации массы (c) $\approx 2,5-3$ %. При повышении степени помола древесного волокна после дефибратора $K_d(DC_d)$ до $\approx 13,5$ ДС, при дальнейшей обработке снижается интенсивность процесса размола и образования различных фракций волокон полуфабриката.

Соотношение различных фракций полуфабриката напрямую связано с изменением геометрических размеров древесных волокон, а именно средней длины и диаметра, их отношения, обуславливающее воздействие ножевой гарнитуры и эффективность процесса размола в целом. На рисунках 3.7 - 3.8 представлены графические зависимости, отражающие влияние исследуемых параметров процесса размола на среднюю длину (а) и диаметр волокна (б), их отношение (в).

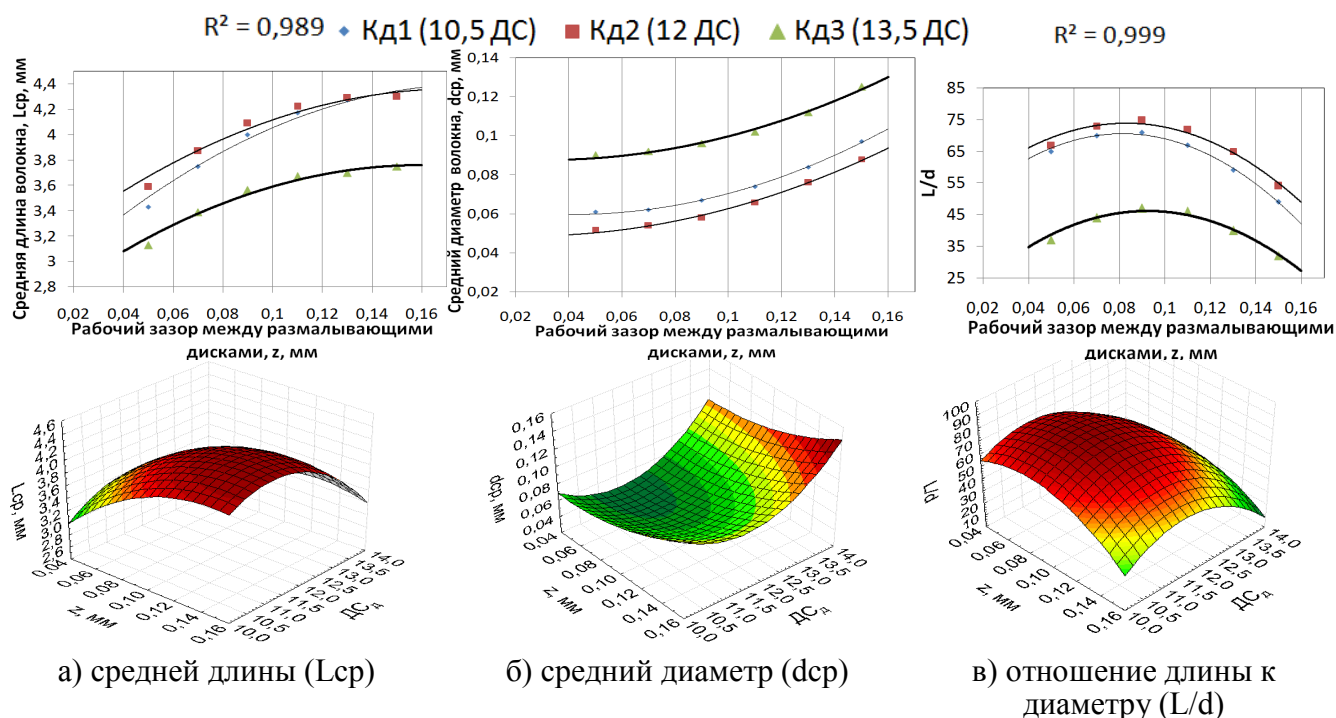


Рисунок 3.7 – Зависимость изменения геометрических размеров волокон от величины рабочего зазора и степени помола древесного волокна

Из графической зависимости, представленной на рисунке 3.7, при фиксировании концентрации массы (2,5 %) видно, что увеличение рабочего зазора (z) способствует снижению процесса укорачивания длины древесных волокон, в результате уменьшения удельного давления в зазоре между ножами ротора и статора, и, в связи с этим, происходит снижение интенсивности разрушения диаметра волокон.

Повышение концентрации массы способствует снижению содержания перерубленных волокон, а также сохранению длины, при уменьшении их диаметра, увеличивается показатель отношения длины к диаметру волокна, следовательно, и в целом удельная поверхность полуфабриката [36]. Увеличение показателя (L/d) полуфабриката, свидетельствует об интенсивной разработке волокон, разделении их преимущественно вдоль своей оси, обеспечивая гибкость, эластичность, хорошее их переплетение между собой при формовании древесноволокнистого ковра, и соответственно повышение физико-механических свойств готовых плит ДВП.

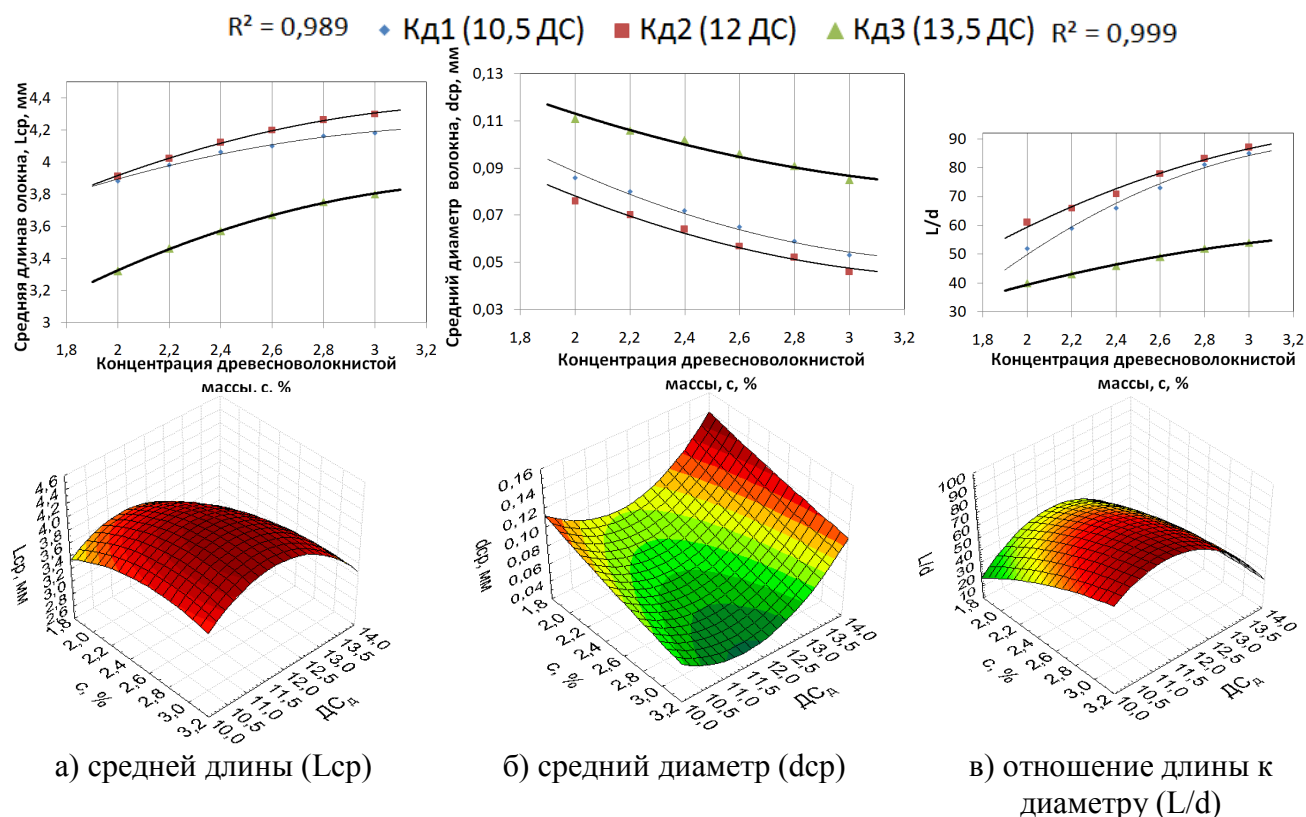


Рисунок 3.8 – Зависимость изменения геометрических размеров волокон полуфабриката от концентрации массы и степени помола древесного волокна

Стоит заметить, что фибриллирующее воздействие конструкции гарнитуры авторского исполнения, обеспечивает при увеличении удельного давления плавное неинтенсивное снижение средней длины волокон полуфабриката (в среднем на 25-40 %), достигая минимальных своих значений 3-3,6 мм. Наряду с некоторым укорачиванием происходит выраженное уменьшение среднего диаметра волокон до 0,04-0,069 мм (в 4-7 раз). Преимущественное снижение диаметра древесных волокон, чем их длины, свидетельствует о высокой эффективности гарнитуры и процесса размола в целом.

При воздействии гарнитуры неотъемлемо происходит некоторое укорачивание длины, и, в общем, изменение размеров волокон фракционного состава, определяющихся конструкцией и воздействием гарнитуры, значениями основных параметров размола. Результаты экспериментальных исследований представленных на рисунках 3.3 - 3.8, показали, что при размоле древесного волокна, имеющего степень помола после дефибратора в пределах $K_d(ДС_d) \approx 10,5 - 12$ ДС достигаются близкие по значениям при этом наилучшие размерно-качественные характеристики

древесноволокнистого полуфабриката и соотношение его фракций волокон в общей массе. Данные в таблице 3.4 демонстрируют интенсивность изменения геометрических размеров древесных волокон в процессе размола.

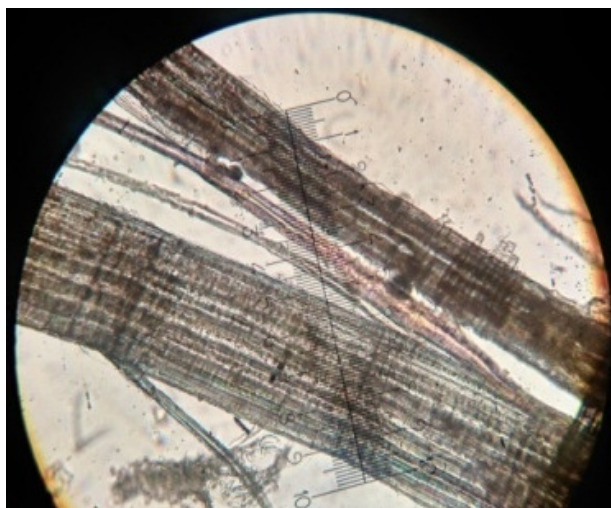
Таблица 3.4 - Изменение геометрических размеров волокон полуфабриката

Качество массы, К _д (ДС _д)	Геометрические размеры древесных волокон, мм		
	сред. дл. (L _{ср}), мм	сред. диам. (d _{ср}), мм	отн. дл. к диам. (L/d)
	до размола		
10,5 ДС	8,57	0,32	26,6
12 ДС	6,85	0,25	27,6
13,5 ДС	5,13	0,18	28,6
	после размола при z=0,1 мм и с=3%		
10,5 ДС	3,94	0,05	78,8
12 ДС	4,29	0,046	93,3
13,5 ДС	3,8	0,085	44,8

Как видно из таблицы 3.4, в процессе размола древесных волокон со степенью помола после дефибратора в пределах К_д(ДС_д)≈10,5-12 ДС, происходит наиболее интенсивное их разделение в продольном направлении - d_{ср}≈0,046-0,05 мм, чем в поперечном - L_{ср}≈3,94-4,29 мм, обеспечиваются наибольшие значения показателя отношения длины волокон к их диаметру - L/d≈79-93,3, что свидетельствует о высокой эффективности процесса размола.

На рисунке 3.9 представлены фотографии древесного волокна с различной степенью разработки после дефибратора (К_д (ДС_д)=10,5; 12; 13,5 ДС) до и после его размола с использованием предлагаемой конструкции гарнитуры при z = 0,1 мм и с = 3%. На рисунке видно, что степень разработки древесного волокна и его качественные характеристики отличаются. Оценка и анализ качества древесного волокна проводились при помощи цифрового микроскопа ЛВ-34 с максимальным увеличением до 1280 крат.

По фотографии, представленной на рисунке 3.9 (а) видно, что до размола в волокнистом полуфабрикате, можно наблюдать значительное количество неразмолотых пучков, грубых недостаточно хорошо разработанных волокон. В свою очередь, фотография на рисунке 3.9 (б) наглядно демонстрирует, что после размола при концентрации древесноволокнистой массы 3 % и величине рабочего зазора 0,1 мм полуфабрикат содержит волокна с хорошо разработанной фибриллированной поверхностью, не содержит неразмолотых, грубых волокон «спичек», которые отрицательно сказываются на процессе формования ковра и качестве готовых плит.



$K_d (ДС_d)=10,5 ДС$



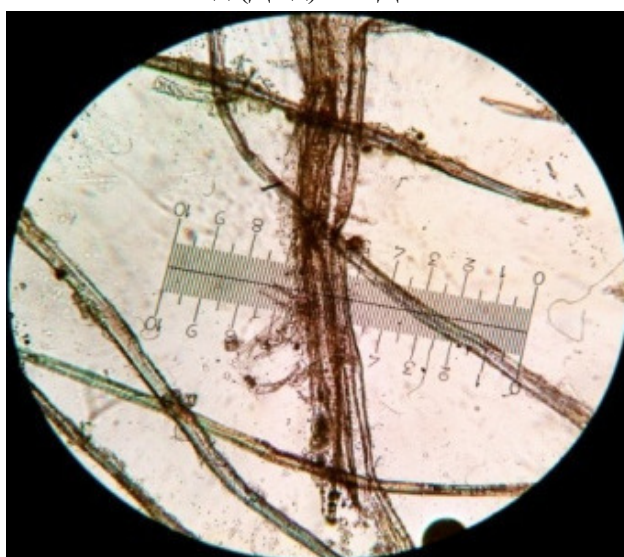
$ДС=19,5; Fbr=77 \%; L/d=79$



$K_d (ДС_d)=12 ДС$



$ДС=20; Fbr=80 \%; L/d=93$



$K_d (ДС_d)=13,5 ДС$



$ДС=17; Fbr=45 \%; L/d=45$

а) до размола

б) после размола

Рисунок 3.9 – Древесное волокно до и после размола, (увеличение 120 крат)

3.4.2 Физико-механические свойства древесноволокнистых плит

По результатам обработки экспериментальных данных, были получены регрессионные уравнения, по нашему мнению, позволяющие оценить влияние конструктивных и технологических параметров процесса размола на физико-механические свойства ДВП, а также прогнозировать значения их качественных показателей.

Результаты исследований физико-механических свойств представлены следующими регрессионными зависимостями:

- прочность плиты при статическом изгибе

$$\sigma_{\text{изг}} = -269,3 + 154,35 \cdot z + 41,895 \cdot K_{\partial}(ДС_{\partial}) + 47,065 \cdot c - 937,5 \cdot z^2 - 1,6639 \cdot K_{\partial}(ДС_{\partial})^2 - 4,575 \cdot c^2 + 2,5 \cdot z \cdot K_{\partial}(ДС_{\partial}) - 10,5 \cdot z \cdot c - 1,5167 \cdot K_{\partial}(ДС_{\partial}) \cdot c; \quad (3.21)$$

- плотность

$$\rho = 660,08 + 390,55 \cdot z + 26,89 \cdot K_{\partial}(ДС_{\partial}) + 88,05 \cdot c - 507,5 \cdot z^2 - 0,99 \cdot K_{\partial}(ДС_{\partial})^2 - 11,68 \cdot c^2 - 28,17 \cdot z \cdot K_{\partial}(ДС_{\partial}) - 38,5 \cdot z \cdot c - 1,38 \cdot K_{\partial}(ДС_{\partial}) \cdot c; \quad (3.22)$$

- водопоглощение за 24 часа

$$A = 93,61 - 27,05 \cdot z - 9,97 \cdot K_{\partial}(ДС_{\partial}) - 10,79 \cdot c + 447,5 \cdot z^2 + 0,48 \cdot K_{\partial}(ДС_{\partial})^2 + 2,68 \cdot c^2 - 1,83 \cdot z \cdot K_{\partial}(ДС_{\partial}) - 4,5 \cdot z \cdot c - 0,45 \cdot K_{\partial}(ДС_{\partial}) \cdot c. \quad (3.23)$$

На рисунках 3.10 - 3.12 представлена графическая интерпретация в виде зависимостей и поверхностей отклика, построенные по полученным моделям в результате реализации многофакторного эксперимента.

В производстве ДВП, важнейшим свойством плиты, по которому оценивается ее качество, является ее прочность. Показатель прочности характеризует способность твердых тел не поддаваться разрушению, сохраняя целостность при воздействии внешних напряжений.

При испытании определяют разрушающие напряжения при растяжении перпендикулярно пласти и при статическом изгибе, в зависимости от вида деформации. В нашем случае, при исследовании прочности ДВП, проводились ее испытания при статическом изгибе.

Математическая зависимость влияния исследуемых факторов на прочность древесноволокнистой плиты при статическом изгибе представлена выражением (3.21).

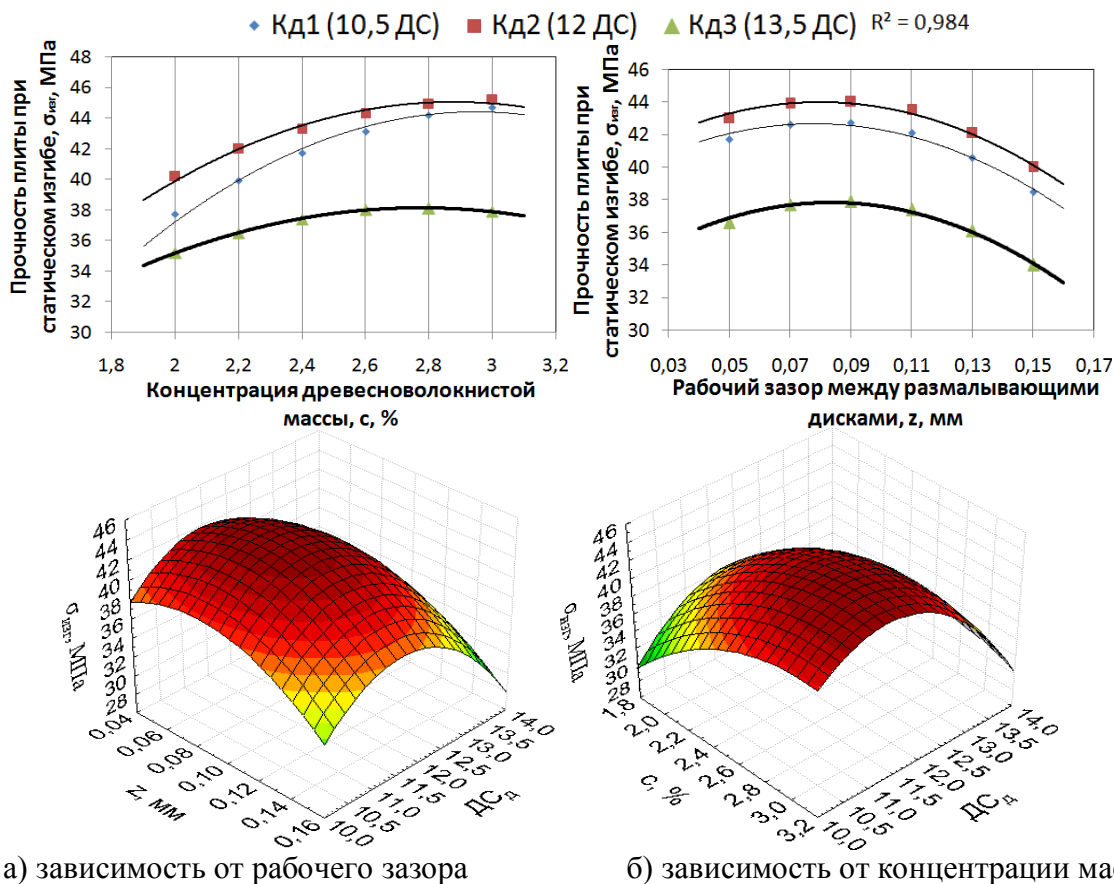


Рисунок 3.10 – Влияние параметров процесса размола на показатель прочности ДВП при статическом изгибе

На рисунке 3.10 можем наблюдать, что прочность плит возрастает с повышением концентрации и при увеличении рабочего зазора до $z = 0,08-0,1$ мм, вследствие улучшения размерно-качественных характеристик полуфабриката, обеспечивающих развитие межволоконного взаимодействия. При дальнейшем увеличении рабочего зазора ожидаемо улучшение прочностных свойств, однако в производстве ДВП физико-механические свойства плиты в частности ее прочность имеют тенденцию к снижению, аналогичным образом, как и при использовании традиционной конструкции гарнитуры (приложение Е). Это можно объяснить тем, что при увеличении рабочего зазора, снижается производительность мельницы и интенсивность процесса размола, волокнистая масса не успевает обработаться должным образом, ограничивается рост качественных показателей полуфабриката. Из

графиков, можно наблюдать, что характер изменения прочностных свойств сохраняется при любой степени помола после дефибратора, однако как указывалось ранее, при значениях входного параметра K_d ($ДС_d$) $\approx 10,5-12$ ДС достигаются наилучшие значения показателей качества размола полуфабриката, которые обеспечивают лучшие показания физико-механических свойств древесноволокнистой плиты, в частности ее прочности $\sigma_{изг} \approx 37-45,2$ МПа. В связи с высокими прочностными свойствами плиты, обеспечиваемыми за счет повышения качества древесноволокнистого полуфабриката, мы имеем возможность изготавливать плиту в соответствии с требованиями ГОСТ 4596-2018, а самое главное – при этом не требуется применение дополнительных связующих смол.

Плотность древесноволокнистой плиты – это показатель, определяющий вид плиты, характеризующий материалоемкость продукции и технико-экономический уровень производства, но не потребительские свойства плит [97]. Тем не менее, плотность взаимосвязана со всеми физико-механическими свойствами плит, являясь значимым показателем ДВП. Уравнение в виде регрессионной зависимости (3.22) описывает влияние исследуемых параметров процесса размола на плотность.

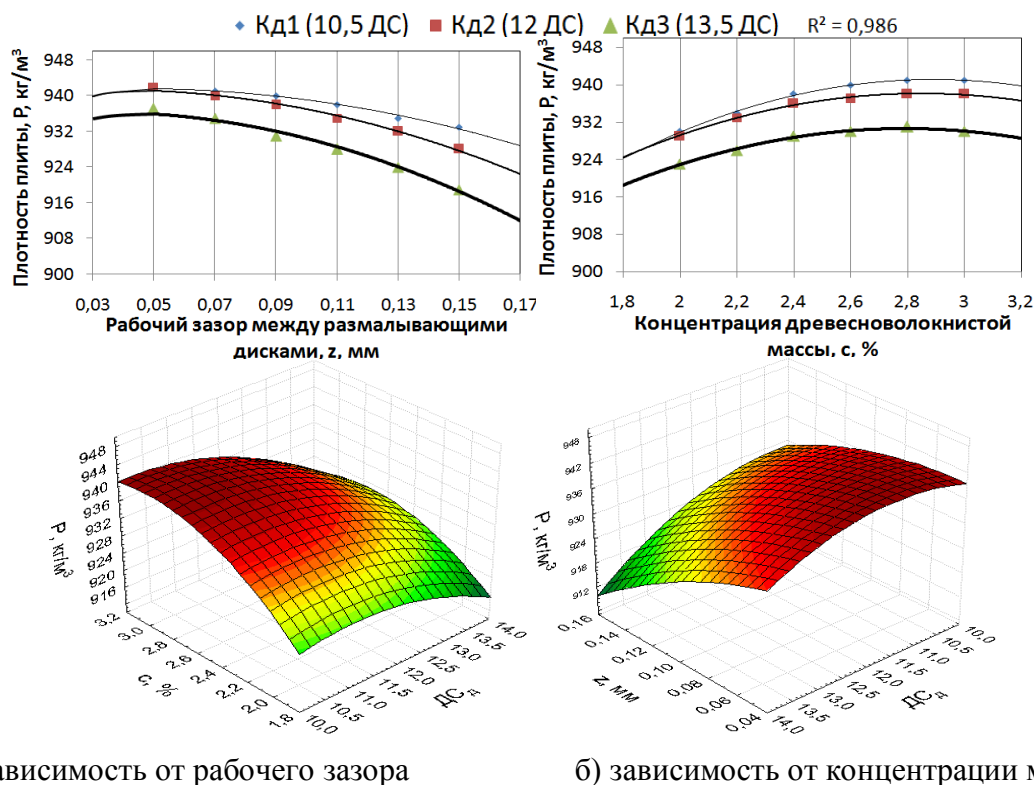


Рисунок 3.11 – Зависимость плотности ДВП от параметров процесса размола

На рисунке 3.11 представлено изменение плотности ДВП, в зависимости от величины рабочего зазора, концентрации древесноволокнистой массы при различной степени помола волокна после дефибратора.

Снижение плотности плиты наблюдается при увеличении рабочего зазора, понижении концентрации массы, что характерно при любой степени помола древесного волокна после дефибратора, изменяются лишь количественные значения. Плотность плиты величина обратно пропорциональная ее прочности, и во многом определяется, гибкостью и пластичностью волокон, их геометрическими размерами, обуславливая плотный их контакт при изготовлении плиты. Следует подчеркнуть, как указывалось ранее, при стремлении к максимальному увеличению прочности плиты, снижение значений показателя ее плотности должно быть до определенных пределов, соответствующим стандартам. На основании анализа графической интерпретации изменения плотности на рисунке 3.11, стоит отметить, что во всем исследуемом диапазоне значений входных параметров, показатель плотности находится в пределах $P \approx 913-947 \text{ кг/м}^3$, что соответствует требованиям для всех групп твердых плит ДВП.

Водопоглощение плиты - обратная величина водостойкости и является неотъемлемым показателем качества древесноволокнистых плит, наряду с ее прочностными свойствами, при снижении водопоглощения улучшается качество готовой плитной продукции, и в соответствии с ГОСТ 4596-2018 значения показателя не должны превышать 20-23 % для твердых ДВП. Водостойкость плиты при производстве ДВП определяют при погружении плит в воду на 24 часа, с последующей оценкой, характеризующей качество плитной продукции. В процессе водопоглощения плиты ДВП, под воздействием влаги, ослабляются межволоконные связи и внутренние напряжения в точках контакта, что объясняется капиллярно-пористой структурой плиты (гигроскопичностью). В результате проникновения воды путем капиллярного впитывания, ее удаление из

плиты происходит только вследствие молекулярной диффузии водяных паров, что является особенностью капиллярно-пористой структуры [28, 98, 99].

Влияние конструктивных и технологических параметров процесса размола на водопоглощение плиты за 24 часа описывается уравнением (3.23).

Графическая интерпретация, полученной регрессионной зависимости, представлена на рисунке 3.12

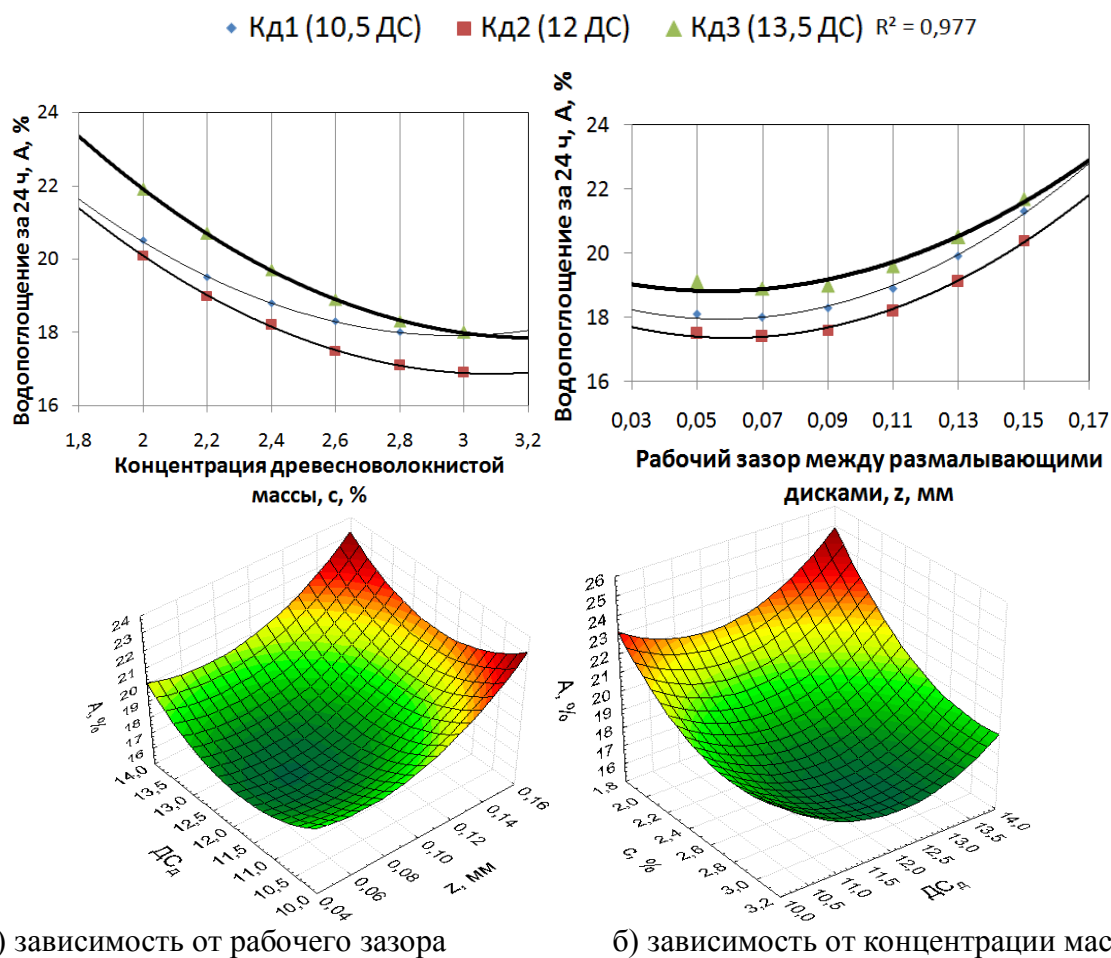


Рисунок 3.12 – Зависимость водопоглощения ДВП за 24 часа от параметров процесса размола

При повышении концентрации древесноволокнистой массы (c) и изменении рабочего зазора (z) до 0,09 мм, водостойкость плиты улучшается, поскольку снижается ее водопоглощение, сохраняется качественная закономерность при различной степени помола древесного волокна после дефибратора Кд (ДС_д). Дальнейшее увеличение рабочего зазора способствует некоторому ухудшению показателю водостойкости плиты ввиду снижения интенсивности разработки

волокон полуфабриката, его качественных показателей. Ухудшение степени разработки волокнистого полуфабриката, влечет к снижению плотности ДВП, что соответственно негативно сказывается на ее водостойкости, менее прочные межволоконные связи легче разрушаются, способствуя впитыванию воды. Наоборот, прочные связи между волокнами, соответственно и высокая плотность плиты, ограничивают проникновение влаги.

Вогнутые кривые графических зависимостей, отражающие водостойкость испытуемых образцов, обусловлены образованием сшивок в структуре плиты, а также включением полярных групп и их взаимодействием, что исключает сорбцию воды. Повысить временную водостойкость возможно при введении гидрофобизаторов в древесноволокнистую массу перед отливом ковра, тем самым воздействуя на процесс смачивания, в то же время термическая обработка плит (углубление реакций дегидратации, этерификации, уплотнение структуры плиты) позволит повысить их долгосрочную водостойкость [28, 98].

При размоле древесного волокна со степенью помола после дефибратора в пределах $K_d (ДС_d) \approx 10,5-12$ ДС, при рабочем зазоре (z) $\approx 0,08-0,1$ мм и концентрации массы (c) $\approx 2,5-3$ %, обеспечиваются наименьшие значения водопоглощения плиты (A) $\approx 17-19$ %.

Представленные зависимости показали, что при использовании новой конструкции гарнитуры водостойкость плиты повышается, что связано с улучшением качества древесноволокнистого полуфабриката и практически во всем исследуемом диапазоне значений входных параметров, показатель водопоглощения не превышает 23 %, что соответствует требованиям ГОСТ 4596-2018.

3.4.3 Сопоставление теоретических исследований с экспериментальными данными

Для подтверждения экспериментальных данных в таблице 3.5 представлены теоретические зависимости при сравнении результатов процесса размола на гарнитуре авторского исполнения и традиционной гарнитуре.

Таблица 3.5 – Результаты процесса размола волокнистого полуфабриката на разных видах гарнитур

Конструкция	Технологический параметр			Размерно-качественные характеристики волокнистого полуфабриката							Физико-механические свойства ДВП	
	$L_{\omega, \text{эл}}, \text{м}$	$F, \text{м}^2$	$t, \text{шт.}$	ДС	$V_k, \%$	$V_c, \%$	$V_m, \%$	$L_{\text{ср}}, \text{мм}$	$d_{\text{ср}}, \text{мм}$	L/d	прочность ($\sigma_{\text{изг}}$), МПа	плотность (P), кг/м ³
Предл-ая	15,56	0,06-0,1	528	20	21-23	47-50	28-31	4-4,3	0,05-0,06	80-93	44-45	925-930
Традиц-ая	5,59	0,03	996	20	28-30	26-27	44-45	5,1-5,3	0,12-0,13	40-48	35-36	860-865

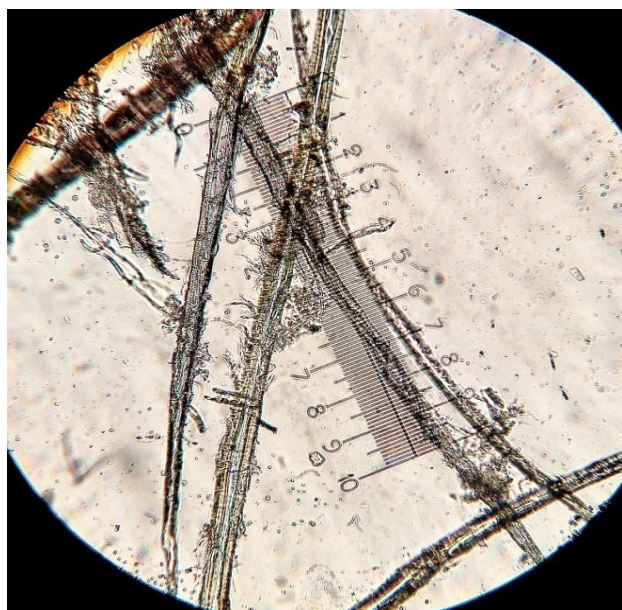
Как видно из результатов таблицы 3.5, для предлагаемой конструкции гарнитуры в сравнении с традиционной гарнитурой в промышленности наблюдается более высокие значения показателей. В частности, повышение технологических параметров гарнитуры (в три раза): поверхность размола ($F, \text{м}^2$) – предлагаемая (0,06-0,1), традиционная (0,03); величина циклической элементарной длины ($L_{\omega, \text{эл}}, \text{м}$) – предлагаемая (15,56), традиционная (5,59), при снижении (практически в два раза) количества точек контактов ножей ротора с ножами статора ($t, \text{шт.}$) – предлагаемая (528), традиционная (996). В результате конструкция гарнитуры авторского исполнения в сравнении с традиционной гарнитурой, в процессе размола позволяет подготовить полуфабрикат с преобладанием в общей массе средней фракции ($V_c, \%$) – предлагаемая (47-50), традиционная (26-27), при снижении крупной фракции ($V_k, \%$) – предлагаемая (21-23), традиционная (28-30) и мелкой фракции ($V_m, \%$) – предлагаемая (28-31), традиционная (44-45). Улучшаются качественные показатели полуфабриката в целом, наблюдается более интенсивное (в два-три раза) снижение диаметра волокон ($d_{\text{ср}}, \text{мм}$) – предлагаемая (0,05-0,06), традиционная (0,12-0,13), чем их длины ($L_{\text{ср}}, \text{мм}$) – предлагаемая (4-4,3), традиционная (5,1-5,3), способствуя увеличению (в два раза) отношения длины волокон к их диаметру (L/d) – предлагаемая (80-93), традиционная (40-48). В связи с улучшением качественных характеристик полуфабриката при использовании предлагаемой конструкции гарнитуры, обеспечивается возможность изготовления плитной продукции (ДВП) без применения связующих при повышении ее физико-механических свойств, в

частности ее прочности ($\sigma_{изг} \approx 44-45$ МПа) и плотности ($P \approx 925-930$ кг/м³), что соответствует ГОСТ 4598-2018 Группа А I сорта, в отличие использование традиционной конструкции гарнитуры обеспечивает прочность ($\sigma_{изг} \approx 35-36$ МПа) и плотность ($P \approx 860-865$ кг/м³) плиты, соответствуя ГОСТ 4598-2018 Группа Б II сорта.

Эффект использования гарнитуры авторского исполнения при процессе размола подтверждается теоретическими данными, связанными с определением движения ножей гарнитуры ротора и статора относительно друг друга. Известно, что при нормальных воздействиях на волокно, происходит разрушение волокна по слабым связям в продольном направлении, поэтому необходимо стремиться к преобладанию нормальных составляющих усилий, в отличие от касательных, которые воздействуют в поперечном направлении.

Согласно теоретическим данным для конструкции авторского исполнения нормальные составляющие имеют большие значения, чем касательные, что может подтверждать возможность разработки древесных волокон в направлении их фибриллирования.

В результате, в общей массе полуфабриката преобладает содержание длинных и относительно тонких, соответственно гибких фибриллированных волокон, обеспечивающих хорошее межволоконное взаимодействие, что дает возможность изготавливать плиты без применения связующих смол, что осуществляется при использовании традиционной гарнитуры в промышленности.



а) предлагаемая конструкция
(авторское исполнение)



б) традиционная конструкция

Рисунок 3.13 – Древесное волокно, степень помола 20 ДС (увеличение 120 крат)

В результате, в общей массе полуфабриката преобладает содержание длинных и относительно тонких, соответственно гибких фибриллированных волокон (рисунок 3.13 а), обеспечивающих хорошее межволоконное взаимодействие, позволяя изготавливать плиты без применения связующих смол, что не обеспечивает использование традиционной гарнитуры в промышленности (рисунок 3.13 б).

Выводы к третьей главе

В настоящем разделе диссертационной работы решены следующие задачи:

1. Выполнена серия предварительных исследований по установлению эффективности процесса подготовки древесноволокнистых полуфабрикатов при использовании новой конструкции размольной гарнитуры, что позволило определить входные параметры, их диапазоны и уровни варьирования, спланировать и реализовать многофакторный эксперимент по В-плану второго порядка.

2. При обработке результатов спланированного и реализованного многофакторного эксперимента получены регрессионные зависимости, устанавливающие влияние входных конструктивных и технологических параметров процесса размола: степени помола после дефибратора K_d ($ДС_d$), рабочего зазора (z , мм); концентрации древесноволокнистой массы (c , %) на качественные показатели волокнистого полуфабриката при использовании гарнитуры авторского исполнения. При исследовании входных параметров процесса размола выяснилось, что при значениях степени помола после дефибратора K_d ($ДС_d$) $\approx 10,5-12$ ДС, рабочего зазора $z \approx 0,08 - 0,1$ мм; концентрации древесноволокнистой массы $c \approx 2,5 - 3$ % достигаются наилучшие качественные характеристики древесноволокнистого полуфабриката.

3. Установлены аналитические зависимости, отражающие влияние исследуемых параметров процесса размола на физико-механические свойства ДВП плиты: прочности при статическом изгибе ($\sigma_{изг}$, МПа); плотности (P , кг/м³); водопоглощения (A , %). Полученные статистически-математические уравнения,

адекватно описывают исследуемый процесс, а построенные по ним графические зависимости, представленные в работе, удовлетворяют требованию о том, что экспериментальные точки в совокупности находятся достаточно близко к кривой, которая является графиком искомой зависимости. По нашему мнению, полученные уравнения, позволяют прогнозировать при размоле необходимые размерно-качественные характеристики волокнистого полуфабриката, соотношение его фракций, а также физико-механические свойства ДВП из него в зависимости от режимных параметров процесса размола при использовании новой конструкции размольной гарнитуры. В результате экспериментальных исследований подтверждено, что качественные характеристики волокнистого полуфабриката определяют качество готовой продукции из него.

4. Результаты экспериментальных исследований подтвердили, что увеличение значений циклической элементарной длины, размалывающей поверхности при снижении количества точек контактов ножей гарнитуры, обеспечивает повышение эффективности процесса размола древесноволокнистого полуфабриката, оказывая преимущественно фибриллирующее воздействие разработанной конструкции за счет увеличения соотношения доли нормальных составляющих усилия над касательными. До настоящего времени при технологии производства ДВП для изготовления готовой продукции в качестве упрочняющих добавок применяют дополнительное связующее в связи с тем, что традиционная гарнитура, не обеспечивает необходимое качество древесноволокнистого полуфабриката. В нашем случае использование предлагаемой конструкции гарнитуры позволяет интенсифицировать процесс размола древесноволокнистого полуфабриката, значительно улучшая его размерно-качественные характеристики в сравнении с традиционной гарнитурой. В связи с этим возможно изготавливать древесноволокнистую плиту без применения связующих при всех прочих равных условиях производства ДВП, физико-механические свойства которой соответствуют требованиям ГОСТ 4598-2018.

4 Практическая реализация результатов работы

На основании представленных в диссертационной работе теоретических исследований, планирования и реализации многофакторного эксперимента были получены статистически-математические уравнения, которые адекватно описывают процесс размола волокнистого полуфабриката при использовании новой конструкции гарнитуры. Результаты экспериментальных исследований позволяют говорить о возможности использования новой научно-обоснованной конструкции гарнитуры для размола волокнистого полуфабриката в промышленных условиях производства ДВП мокрым способом при оптимальных условиях ее эксплуатации. В качестве практической реализации результатов научной работы выбраны следующие направления:

- исследование и оценка удельного расхода электроэнергии при подготовке древесноволокнистого полуфабриката, с использованием предлагаемой гарнитуры в сравнении с традиционной конструкцией;
- оптимизация процесса размола волокнистого полуфабриката и его качества при эксплуатации новой конструкции гарнитуры в производстве ДВП мокрым способом;
- оценка экономической эффективности эксплуатации предлагаемой размольной гарнитуры при размоле древесноволокнистого полуфабриката в производстве ДВП.

4.1 Удельный расход электроэнергии при размоле волокнистого полуфабриката

Процесс размола волокнистого полуфабриката в общей технологии производства готовой продукции считается наиболее энергоемким (в среднем составляет 60-65 % всех затрат электроэнергии [21, 32, 38, 39, 49, 69]).

В связи с этим, важнейшим вопросом является снижение энергопотребления размалывающего оборудования, определение его оптимальных режимных параметров, обеспечивающих необходимые размерно-качественные характеристики полуфабриката, соответственно физико-механические свойства плит из него, минимизировав затраты электроэнергии.

Как отмечалось в предыдущей главе диссертационной работы, при реализации эксперимента, параллельно с исследованием влияния конструктивных и технологических параметров процесса размола на размерно-качественные характеристики полуфабриката и физико-механические свойства готовой плиты, определялся удельный расход электроэнергии. Исследования проводились в условиях изменения режимных параметров процесса размола при всех прочих равных условиях.

При изменении значений одного из параметров осуществлялось фиксирование потребляемой мощности установки при помощи стационарного переносного прибора К-50, а затем рассчитывался удельный расход электроэнергии, затрачиваемый на процесс размола по известной методике [41, 68].

Уровни, шаги и интервалы варьирования входных факторов представлены в разделе 3.2 предыдущей главы настоящей работы.

На основании проведенных экспериментальных исследований, была получена статистически-математическая зависимость, отражающая влияние исследуемых параметров процесса размола на удельный расход электроэнергии

$$E = 961,95 - 684,55 \cdot z - 155,768 \cdot K_d(ДС_d) - 22,035 \cdot c + 1172,5 \cdot z^2 + 7,4472 \cdot K_d(ДС_d)^2 + 13,925 \cdot c^2 + 43,833 \cdot z \cdot K_d(ДС_d) + 34,5 \cdot z \cdot c - 5,9167 \cdot K_d(ДС_d) \cdot c. \quad (4.1)$$

По полученному уравнению представлена графическая интерпретация на рисунке 4,1, по которой можно наблюдать изменение удельного расхода электроэнергии при размоле древесного волокна в зависимости от степени помола после дефибратора, рабочего зазора, концентрации древесноволокнистой массы.

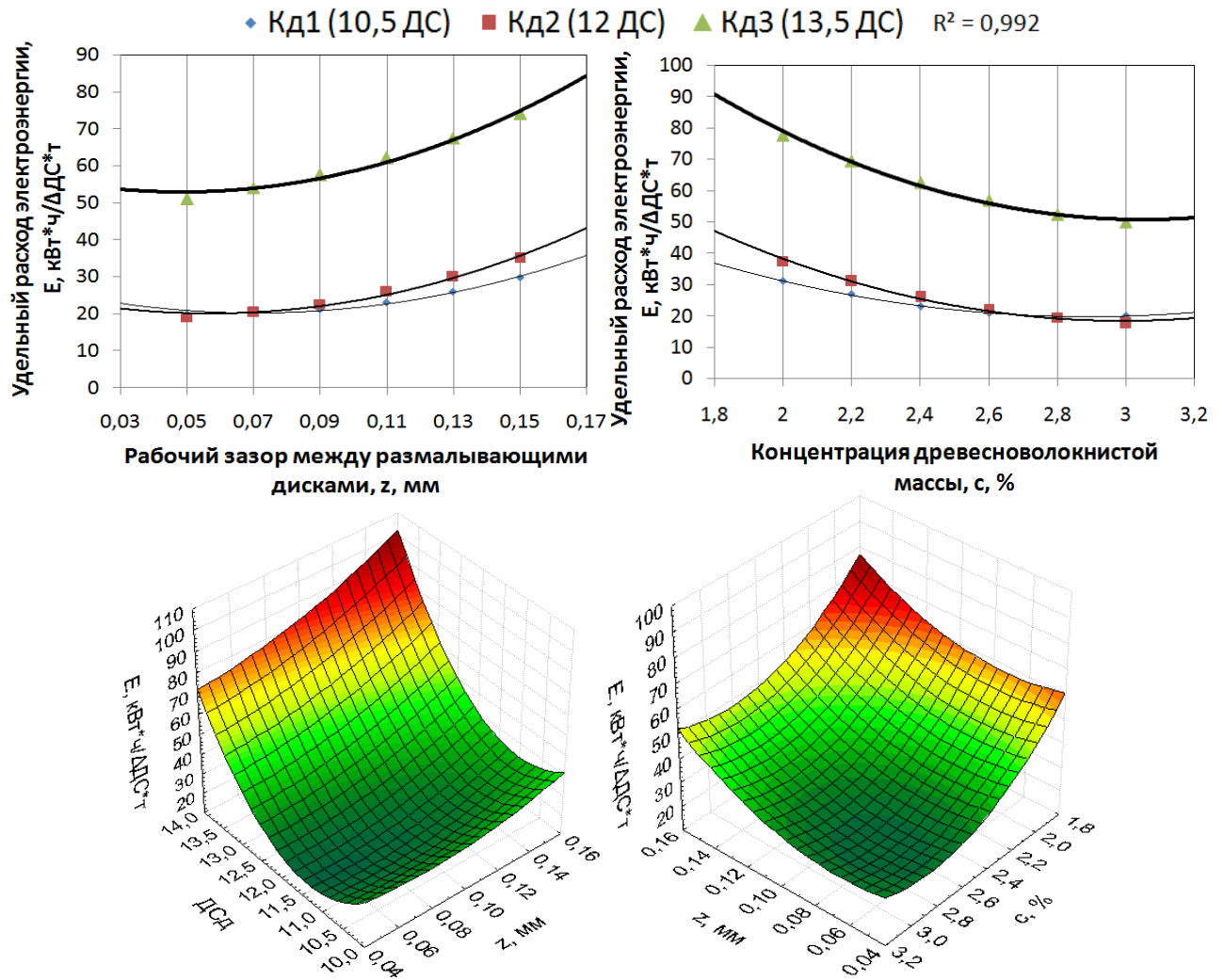


Рисунок 4.1 – Зависимость удельного расхода электроэнергии от параметров процесса размола

Данные графические зависимости дают наглядное представление о влиянии исследуемых факторов на удельный расход электроэнергии. Анализируя их, можно определить значения режимных параметров процесса размола при использовании предлагаемой конструкции гарнитуры, позволяющих минимизировать энергопотребление.

Из рисунка 4.1 видно, что с увеличением рабочего зазора (z), а также снижении концентрации массы ($с$) удельный расход электроэнергии на размол повышается, при этом качественный характер влияния сохраняется при различной степени помола древесного волокна после дефибратора Кд (ДС_д). Количественные значения имеют отличия, данные представлены в таблице 4.1.

Повышение удельного расхода электроэнергии на размол при увеличении рабочего зазора, можно объяснить тем, что снижается производительность мельницы и интенсивность процесса размола полуфабриката. Представленные зависимости удельного расхода электроэнергии при использовании предлагаемой конструкции гарнитуры, а также производственные данные, подтверждают целесообразность поддержания средней степени разработки древесного волокна на дефибраторе, не превышающей 10,5-12 ДС, как с точки зрения расхода электроэнергии, так и повышения эффективности процесса размола древесноволокнистого полуфабриката в рафинаторе.

На рисунке 4.2 представлены результаты удельного расхода электроэнергии при размоле массы на дисковой мельнице с гарнитурой авторского исполнения и мельницы в промышленных условиях.

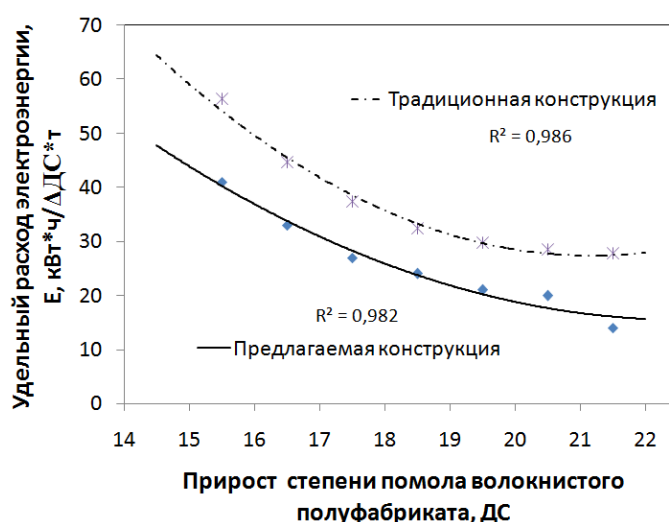


Рисунок 4.2 – Удельный расход электроэнергии при размоле полуфабриката

Из рисунка можно заключить, что в процессе размола волокнистого полуфабриката при использовании новой гарнитуры в сравнении с существующей конструкцией на промышленной установке, средний удельный расход электроэнергии при достижении одной и той же степени помола имеет более низкие значения. Например, для достижения степени помола полуфабриката до 18 ДС, разница в потреблении энергии составляет $\approx 23 \%$.

Результаты эксперимента, представленные в виде графических зависимостей и математических моделей, позволяют определить значения

режимных параметров процесса размола, обеспечивающие заданные размерно-качественные характеристики полуфабриката, и соответственно значения физико-механических свойств готовых плит, при этом оценить удельный расход электроэнергии на размол. Комплексные исследования показали, что в сравнении с традиционной гарнитурой использование новой конструкции, при изменении режимных параметров, позволяет снизить удельный расход электроэнергии на процесс размола, обеспечив высокие показатели качества полуфабриката и соответственно готовой продукции при всех прочих равных условиях производства ДВП.

4.2 Оптимизация процесса размола древесноволокнистого полуфабриката и его размерно-качественных характеристик в производстве ДВП

В реальных условиях действующего предприятия, учитывая технологию производства, эксплуатируемое оборудование и др., целесообразно выбрать наиболее значимый (определяющий) критерий качества, установив оптимальные режимные параметры, при которых его значения достигнут экстремума. Результаты эксперимента, реализованного в условиях максимально приближенных к технологическому процессу производства ДВП мокрым способом, подтвердили высокую эффективность использования новой конструкции гарнитуры при всех прочих равных условиях. Таким образом, есть необходимость при изменении режимных параметров процесса размола установить оптимальное качество древесноволокнистого полуфабриката, обеспечивающее необходимые физико-механические свойства готовой продукции, регламентируемые государственными стандартами, при минимальном энергопотреблении.

По этим причинам и на основании результатов расчетов, представленных в третьей главе диссертационной работы, критерием оптимизации нами выбран обобщенный показатель качества древесноволокнистого полуфабриката, который обусловлен значениями его качественных характеристик, их соотношением, в свою очередь определяющих качество готовой продукции. Для обеспечения эффективности процесса размола древесного волокна, так и всего производства в целом, стремления к улучшению качества готовых плит при

минимизации энергопотребления, необходимо иметь возможность оперативно перестраивать производственный процесс в соответствии с изменениями технологических параметров и согласно с изменяющимися требованиями заказчика к физико-механическим показателям плиты.

Было установлено, что степень помола (ДС) и фибриллирования (Fbr), определяющие интенсивность и количество разработанных волокон в общей массе полуфабриката, отношение длины к диаметру его волокон (L/d), при этом их средняя длина (L_{cp}) и содержание средней фракции (B_c), обуславливают межволоконные связи и структурообразование плиты, и в своей совокупности могут составлять обобщенный показатель качества древесноволокнистого полуфабриката – $П_{кв}$ (ДС, Fbr, L/d , L_{cp} , B_c).

Древесноволокнистый полуфабрикат оценивается несколькими показателями, характеризующими его качество, и согласно методике, используя способ свертки критериев, был сформирован обобщенный показатель $П_{кв}$ в виде взвешенной суммы частных критериев [88, 89]

$$П_{кв} = \lambda_1 \cdot w_1 + \lambda_2 \cdot w_2 + \lambda_n \cdot w_n, \quad (4.2)$$

где λ – вес соответствующего критерия;

w_i – составляющий критерий обобщенного показателя качества.

Абсолютные величины коэффициентов λ_i , берутся пропорциональными важности соответствующего частного критерия с учетом требования их нормированности

$$|\lambda_1| + |\lambda_2| + |\lambda_n| = 1. \quad (4.3)$$

В нашем случае частные критерии обобщенного показателя качества $П_{кв}$, имеют различную размерность, и поэтому осуществляли переход к безразмерным величинам согласно методике [88, 89] по формуле

$$w_i = (W_i - W_{i \min}) / (W_{i \max} - W_{i \min}) \quad (4.4)$$

где $W_{i \max}$ и $W_{i \min}$ – соответственно максимальное и минимальное значения частного критерия W_i .

Полученные в работе функциональные зависимости: ДС, Fr, L_{cp} , d_{cp} , L/d , Вк, B_c , Вм, $\sigma_{изг}$, Р, А, $E = f(K_d (ДС_d), z, c)$; можно использовать для установления значений изменяемых параметров внутри диапазона их варьирования, при которых достигаются заданные наилучшие значения размерно-качественных характеристик полуфабриката,

обеспечивающих необходимое качество готовой плиты, соответствующей ГОСТ 4598-2018 при минимизации удельного расхода электроэнергии на размол.

Для решения поставленной задачи составлена математическая модель, в которой целевой функцией (f) выступает требование максимизации (уравнения 3.13 – 3.23) показателя качества волокнистого полуфабриката. Система ограничений состоит из ограничений режимных параметров, изменяющихся в установленных пределах, размерно-качественных характеристик полуфабриката и физико-механических свойств готовой продукции согласно ГОСТ 4598-2018, а также условия минимизации удельного расхода электроэнергии на размол.

Приведенные ограничения и целевая функция носят нелинейный характер, следовательно, оптимизационная задача относится к классу задач нелинейного программирования. Решение ее осуществлялось с применением метода Квази-Ньютона при использовании пакета прикладных программ STATISTIKA-6 [93]. На первом этапе в электронную таблицу вносятся ограничения по режимным параметрам процесса размола $ПК_v$ (K_d ($ДС_d$, z , c)). Дополнительно вводятся ограничения по размерно-качественным характеристикам $ПК_v$ ($ДС$, Fbr , L/d , Lcp , Bc) полуфабриката и физико-механическим свойствам ДВП ($\sigma_{изг}$, P , A).

Математическая модель задачи оптимизации качества древесноволокнистого полуфабриката в процессе его размола при использовании предлагаемой конструкции гарнитуры в производстве ДВП мокрым способом будет иметь вид

$$\underline{f = ПК_v(ДС, Fbr, Bc, L/d, Lcp(K_d(ДС_d); z; c;)) \rightarrow max}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} z_{min} \leq z \leq z_{max}; \\ K_d(ДС_d)_{min} \leq K_d(ДС_d) \leq K_d(ДС_d)_{max}; \\ c_{min} \leq c \leq c_{max}; \\ ДС \geq 18 ДС \\ Fbr \geq 65 \% \\ Bc \geq 47 \% \\ L/d \geq 60 \\ Lcp \geq 4 \text{ мм} \\ E \rightarrow min; \\ \sigma_{изг} \geq 43 \text{ МПа}; \\ 1100 \geq P \geq 850 \text{ кг/м}^3; \\ A \leq 20 \%; \end{array} \right.$$

Решение этой задачи позволило определить оптимальные значения размерно-качественных характеристик и режимных параметров процесса размола, обеспечивающих их при использовании новой конструкции размольной гарнитуры, которые для данных условий производства составят: степень помола древесного волокна после дефибратора – Кд (ДСд) = 12 ДС; рабочий зазор – $z = 0,1$ мм; концентрация древесноволокнистой массы – $c = 3$ %. Физико-механические свойства плиты при этом: прочность – $\sigma_{изг} \approx 45,2$ МПа; плотность – $P \approx 938,2$ кг/см³; водопоглощение – $A \approx 16,9$ %.

Найденные режимные параметры обеспечивают оптимальные значения размерно-качественных характеристик, обуславливающих показатель качества полуфабриката $П_{кв} = 0,7$: ДС = 20,2 ДС; Fbr = 80 %; $L_{ср} = 4,29$ мм; $L/d = 93,3$; $V_c = 49,7$ %, при удельном расходе электроэнергии на размол $E = 18$ кВт·ч/ΔДС·т.

При решении задачи оптимизации качества волокнистого полуфабриката при его размоле с использованием новой конструкции гарнитуры была построена сводная таблица 4.1, содержащая все основные режимные параметры процесса, размерно-качественные характеристики древесноволокнистого полуфабриката и физико-механические свойства готовой ДВП. $П_{кв}$ принимает три диапазона значений, которые определяют качество готовой продукции: согласно ГОСТ 4598-2018 плита группы А и Б, а также плита группы А с повышенной прочностью: плита группы Б – $0 < П_{кв} < 0,32$; плита группы А – $0,33 < П_{кв} < 0,66$; плита группы А с повышенной прочностью – $0,67 < П_{кв} < 1$.

В результате решения задачи оптимизации были определены оптимальные режимные параметры процесса размола в зависимости от размерно-качественных характеристик волокнистого полуфабриката, готовой плиты и удельного расхода электроэнергии (таблица 4.1). Из таблицы видно, какие режимы процесса размола, позволяют подготовить полуфабрикат определенного качества, обеспечивающий плиту с необходимыми физико-механическими свойствами (группы А, Б) при этом оценить затрачиваемый удельный расход электроэнергии на размол.

Полученные данные, представленные в таблице 4.1, могут быть использованы при эксплуатации предлагаемой размольной гарнитуры в производственных условиях.

Таблица 4.1 – Основные показатели, определяющие эксплуатацию предлагаемой конструкции размольной гарнитуры в производстве ДВП мокрым способом

Значение входных параметров			Значение выходных параметров												
Кд (ДС _д), ДС	z, мм	с, %	размерно-качественные характеристики волокнистого полуфабриката									физико-механические свойства ДВП			Е, кВт · ч
			ДС	Fbr, %	Lcp, мм	dcp, мм	L/d	Вк, %	Вс, %	Вм, %	Пкв	σ _{изг} , МПа	Р, кг/м ³	А, %	ΔДС · т
10,5	0,05	2	16,2	44	3,36	0,076	41,2	29,9	44,4	25,7	0,29	36,8	933,3	19,9	30
10,5	0,1	2	15,7	54	3,64	0,086	42,4	33,3	43,5	23,2	0,33	37,7	930,4	20,5	31
10,5	0,15	2	14	37	4,05	0,113	35,8	38,1	38,9	23	0,23	33,9	924,9	23,3	38
10,5	0,05	2,5	19	57	3,41	0,061	53,9	23,6	45,8	30,6	0,42	41,8	942,8	18,1	20
10,5	0,1	2,5	18	67	3,83	0,07	54,8	27,6	45,3	27,1	0,46	42,5	939	18,5	22
10,5	0,15	2,5	15,8	47	4,29	0,097	44,2	32,9	40,9	26,2	0,33	38,5	932,5	21,3	30
10,5	0,05	3	21	65	3,51	0,045	78	20,5	46,4	33,1	0,56	44,5	946,5	17,6	17
10,5	0,1	3	19,6	77	3,94	0,05	78,8	25,1	46,2	28,7	0,61	44,9	941,7	17,9	20
10,5	0,15	3	17	54	4,44	0,078	56,9	30,6	42,1	27,3	0,41	40,7	934,3	20,5	28
12	0,05	2	17,6	53	3,3	0,066	50	26,1	45,9	28	0,37	39,1	934	19,7	33
12	0,1	2	17,3	64	3,9	0,075	52	29	45,3	25,7	0,43	40,2	928,9	20,1	37
12	0,15	2	15,8	48	3,96	0,103	38,5	33,6	41	25,4	0,29	36,7	921,4	22,8	47
12	0,05	2,5	19,8	63	3,49	0,052	67,1	20,7	48,1	31,2	0,51	42,9	942,5	17,5	19
12	0,1	2,5	19,1	73	4,16	0,061	68,2	24	47,9	28,1	0,57	43,8	936,5	17,8	24
12	0,15	2,5	17,2	55	4,28	0,088	48,6	28,5	43,8	27,7	0,40	40	928	20,4	35
12	0,05	3	21,4	70	3,56	0,039	91,2	17,2	49,6	33,2	0,65	44,6	945,1	16,6	12
12	0,1	3	20,2	80	4,29	0,046	93,3	20,9	49,7	29,4	0,7	45,2	938,2	16,9	18
12	0,15	3	17,8	60	4,48	0,071	63,1	25,4	45,9	28,7	0,49	41,1	928,7	19,3	30
13,5	0,05	2	15	34	2,9	0,101	28,7	29,8	44,6	25,6	0,19	33,9	930,2	21,6	70
13,5	0,1	2	14,9	38	3,27	0,111	29,5	31,5	43,6	24,9	0,21	35,3	923	21,9	77
13,5	0,15	2	13,6	28	3,32	0,138	24,1	32,5	43	24,5	0,14	31,9	913,4	24,4	90
13,5	0,05	2,5	16,6	37	3,14	0,090	34,8	24,3	47,7	28	0,27	36,6	937,7	19,1	51
13,5	0,1	2,5	16,1	45	3,62	0,099	36,6	26,9	47,8	25,3	0,33	37,7	929,5	19,3	59
13,5	0,15	2,5	14,4	30	3,66	0,125	29,3	31,2	44	24,8	0,19	34	918,9	21,7	74
13,5	0,05	3	17,6	40	3,25	0,077	42,2	20,9	50	29,1	0,31	37	939,3	17,9	39
13,5	0,1	3	16,7	45	3,8	0,085	44,8	24,1	50,4	25,5	0,36	38	930,2	18	48
13,5	0,15	3	14,6	30	3,9	0,110	35,5	27,7	47	25,3	0,24	34,1	918,6	20,3	63

Анализируя качественные характеристики, составляющие Пкв, стоит отметить, что снижение одних характеристик в определенных пределах, могут компенсироваться повышением значений других более весомых, при сохранении в целом качества древесноволокнистого полуфабриката и физико-механических свойств готовой продукции (таблица 4.1).

Таким образом, эксплуатация новой конструкции размольной гарнитуры для размола древесного волокна и оптимизация его качественных характеристик позволяет повысить эффективность существующего размалывающего оборудования, и производства ДВП в целом при всех прочих равных условиях, обеспечив необходимое качество древесноволокнистого полуфабриката и возможность изготовления экологически чистой плитной продукции (ввиду отсутствия связующих смол), физико-механические свойства которой соответствуют стандарту ГОСТ 4598-2018 плиты группы А I сорта. Использование конструкции авторского исполнения по сравнению с традиционной конструкцией также положительно отразится на себестоимости плитной продукции за счет предполагаемого увеличения срока эксплуатации гарнитуры, исключения высокотоксичных связующих смол, снижения трудовых затрат и удельного расхода электроэнергии на размол.

4.3 Оценка экономической эффективности эксплуатации предлагаемой конструкции размольной гарнитуры при размоле древесноволокнистого полуфабриката в производстве ДВП

В результате представленных в работе решений выполнена оценка экономической эффективности при внедрении и эксплуатации предлагаемой размольной гарнитуры в существующем размалывающем оборудовании для размола древесного волокна при производстве ДВП.

В таблице 4.2 приведены затраты на изготовление новой конструкции размольной гарнитуры, состоящей из двенадцати секторов, которые могут изготавливаться методом фрезерования на станке с ЧПУ.

Общая сумма расходов на изготовление определяется путем составления сметы затрат. Для расчета необходимой стоимости на изготовление комплекта гарнитуры из стали 40ХН последовательно определим затраты:

- составление программы для фрезерного станка с ЧПУ;
- металл (сталь 40ХН);
- фрезерование на станке ЧПУ.

Экономический расчет изготовления предлагаемой размольной гарнитуры. Расчеты представим в форме таблицы 4.2.

Таблица 4.2 – Смета затрат на изготовление размольной гарнитуры

Наименование затрат	Объем работ или количество оборудования	Единицы, шт.	Стоимость	
			единица, руб.	всего, руб.
1 Составление программы для ЧПУ	1	1	3000	3000
2 Заготовка из стали 40ХН	5 кг	12	1000	12000
3 Фрезеровочные работы на станке ЧПУ	24ч		3500	84000
Итого				99000

Затраты на изготовление комплекта гарнитуры складываются из стоимости металла, составления управляющей программы, а также количества времени использованного на изготовление сегментов гарнитуры ротора и статора.

Итого затраты на изготовление одного комплекта гарнитуры составляет 99 тыс. руб. В таблице 4.3 представлены затраты на производство древесноволокнистых плит мокрым способом по данным Segezha group ОАО «Лесосибирский ЛДК №1» за 2018 год. В цехе по производству ДВП работают два потока, а размольное отделение состоит из 5 дефибраторов (1 резервный) и 3 рафинаторов (1 резервный).

Таблица 4.3 – Затраты на производство ДВП

Наименование затрат	Затраты за 2018 год	
	всего, тыс. руб.	на 1 м ² , руб.
Оплата труда	90267	3,67
Материалы	45264	1,84
Страховые взносы	27703	1,12
Электроэнергия и пар	100795	4,09
Затраты на сырье	70682	2,87
Внутрицеховые расходы	106961	4,34
Общезаводские расходы	24125	0,97
Итого	465797	18,9

Как видно из таблицы затраты за 2018 год на производство ДВП составили 465 млн 797 тыс. руб., при этом себестоимость на 1 м² плиты составила 18,9 руб.

В таблице 4.4 представлены затраты на материалы производства ДВП при использовании существующей размольной гарнитуры и предполагаемые затраты при эксплуатации новой научно-обоснованной конструкции (рафинатор).

Таблица 4.4 – Затраты на материалы для производства ДВП при использовании существующей и предлагаемой гарнитуры

Наименование	Существующая гарнитура		Предлагаемая гарнитура		Откл., руб.
	кол-во	стоимость без НДС, руб.	кол-во	стоимость без НДС, руб.	
Произ-во ДВП, тыс. м ²		24612		24612	
Гарнитура - Д, компл.	72	3522816	72	3522816	-
Гарнитура - Р, компл.	24	1622400	6	594000	1028400
Лист противоиз. /имп/, шт.	72	1764000	72	1764000	-
Лист трансп. /имп./, шт.	72	2819088	72	2819088	-
Сетка: 1980-26400, шт.	12	422151	12	422151	-
Сетка: 3980-10200, шт.	9	159510	9	159510	-
Сетка: 1980-6100, шт.	14	150126	14	150126	-
Сетка трансп.:1800-5750, шт.	600	5179140	600	5179140	-
Сетка подкл.:1780-5670, шт.	168	2176534	168	2176534	-
Лигносulfонат, т.	120	744000	120	744000	-
Парафин, т.	312	9590479	312	9590479	-
Серная кислота, т.	60	414313	60	414313	-
Смола СФЖ /ТН/, т.	120	2880000	-	-	2880000
Смола КФМТ, кг.	3000	120000	-	-	120000
Сода каустическая, т.	5,1	199470	5,1	199470	-
Постоянные затраты	-	13500000	-	13500000	-
Итого	-	45264027	-	41235627	4028400

Как видно из таблицы 4.4, затраты на материалы при производстве ДВП составляют 45264,027 тыс. руб. Традиционная конструкция размольной гарнитуры, эксплуатируемая до настоящего времени в размалывающем оборудовании, имеет небольшой срок эксплуатации и не позволяет подготавливать древесноволокнистый полуфабрикат необходимого качества, о чем свидетельствуют результаты исследований, использование дополнительного связующего (высокотоксичных смол), и как результат изготовление плит ДВП группы Б 2 сорта. Однако стоит отметить то, что для производства ДВП мокрым способом, используются хвойные породы древесины, и при качественной разработке волокнистого полуфабриката, возможно изготовление экологически чистых плит без применения связующего. Качество готовой продукции определяет спрос, ценовую политику, а также эксплуатационные свойства и область применения. В разделе 3.4.3 в таблице 3.3 приведены результаты сравнительного анализа традиционной и предлагаемой конструкций размольных гарнитур, их технологических параметров, обуславливающих размерно-качественные характеристики волокнистых полуфабрикатов и физико-механических свойств готовых ДВП.

Сравнительный анализ показал, что традиционная гарнитура в сравнении с предлагаемой конструкцией имеет низкие значения технологических параметров, качественных показателей древесноволокнистого полуфабриката, и, соответственно, физико-механических свойств готовых плит, что обуславливает применение высокотоксичных смол, в качестве дополнительного связующего при их изготовлении. Продолжительность эксплуатации предлагаемой гарнитуры в сравнении с существующей будет увеличена по нашему мнению, в результате снижения контактов при пересечении ножей ротора и статора; снижения нагрузок на рабочие кромки; более равномерного распределения массы в зоне размола; возможности изготовления ее методом фрезерования на станке с ЧПУ и реверсивной работы, положительно сказываясь на ее эксплуатационных характеристиках, сохранении прочностных свойств металла.

В таблице 4.5 представлена калькуляция стоимости ДВП при использовании существующей размольной гарнитуры и предлагаемой.

Таблица 4.5 – Калькуляция стоимости ДВП

Выпуск продукции и статьи затрат	Существующая гарнитура		Предлагаемая гарнитура	
	всего, тыс. руб.	на 1 м ² , руб.	всего, тыс. руб.	на 1 м ² , руб.
Валовый выпуск, тыс. м ²	24612,0	-	24612,0	-
Зарплата	90267	3,67	90267	3,67
Страховые взносы	27703	1,12	27703	1,12
Затраты на сырье	70682	2,87	70682	2,87
Внутрицеховые расходы	106961	4,34	105561	4,29
Электроэнергия и пар	100795	4,09	94545	3,84
Затраты на материалы	45264,027	1,84	41235,627	1,68
в том числе:				
смола СФЖ /ТН/	2880	0,12	-	-
смола КФМТ	120	0,005	-	-
гарнитура - Р	1622,4	0,06	594	0,03
прочие затраты	40641,627	1,65	40641,627	1,65
Общезаводские расходы	24125	0,97	24125	0,97
Полная себестоимость	465797	18,92	454118	18,44

Как видно из калькуляционной стоимости ДВП, после внедрения и эксплуатации новой конструкции размольной гарнитуры предполагается снижение расхода электроэнергии на процесс размол в рафинаторе в среднем на ≈ 23 %, уменьшение внутрицеховых расходов, затрат на материалы, включая размольную гарнитуру для рафинаторов, а также исключение высокотоксичных смол. В результате чего произойдет уменьшение себестоимости 1 м² готовой плиты на 0,48 руб., но при этом улучшится качество готовой продукции и можно прогнозировать в дальнейшем увеличение спроса на плиты ДВП ввиду высокого качества и их экологичности, а также соответственно повышения цены реализации.

Прирост прибыли за счет уменьшения себестоимости, определяем по формуле

$$\Delta\Pi_C = Q_{np} |(C_{np} - C_{np}) - (C_{\delta} - C_{\delta})|, \quad (4.5)$$

где Q_{np} – годовой объем ДВП по проекту, м² – 24612 тыс. м²;

C_{np} – цена реализации 1 м² по проекту, руб. – 30 руб.;

C_{δ} – цена реализации 1 м² по базовому варианту – 30 руб.;

C_{δ} – себестоимость 1 м² по базовому варианту;

C_{np} – себестоимость 1 м² по проекту.

$$\Delta\Pi_C = 24612 \cdot |(30 - 18,44) - (30 - 18,92)| = 11679 \text{ тыс. руб.}$$

Прирост прибыли с учетом вычета 20 % налога составит 8860,32 тыс. рублей.

Экономическая эффективность эксплуатации предлагаемой размольной гарнитуры, $\mathcal{E}_\kappa$ оценивается коэффициентом общей эффективности капитальных вложений и определяется по формуле

$$\mathcal{E}_\kappa = \frac{\Delta\Pi_c}{K}, \quad (4.6)$$

где $\Delta\Pi$ – прирост прибыли, с учетом вычета 20 % налога, руб.;

K – величина капитальных вложений (594 тыс. руб.).

$$\mathcal{E}_\kappa = \frac{8860,32}{594} = 14,9.$$

Полученный коэффициент эффективности сравниваем с нормативным значением коэффициента общей эффективности $\mathcal{E}_н=0,15$. Рассчитанный нами коэффициент эффективности существенно больше нормативного, следовательно, внедрение и эксплуатация предлагаемой гарнитуры экономически эффективны.

Срок окупаемости капиталовложений, T_κ , лет, определяется по формуле

$$T_\kappa = \frac{K}{\Delta\Pi_c}, \quad (4.7)$$

$$T_\kappa = \frac{594}{8860,32} \approx 0,067 \text{ лет.}$$

Все расчеты, проведенные в данной работе, сведены в таблицу 4.6.

Таблица 4.6 – Основные технико-экономические показатели завода ДВП

Показатель	Существующая гарнитура	Предлагаемая гарнитура	Отклонения
Валовый выпуск ДВП, тыс. м ²	24612,0	24612,0	-
Затраты на производство, тыс. руб.	465797	454118	11679
Себестоимость 1 м ² , руб.	18,9	18,45	0,45
Капитальные вложения, тыс. руб.	-	594	-
Чистая прибыль, тыс. руб.	218554,6	227414,9	8860,3
Коэффициент экон. эффективности	-	14,9	-
Срок окупаемости, год	-	0,067	-

Как видно из таблицы, капитальные вложения в размере 594 тыс. руб. на приобретение необходимого количества комплектов предлагаемой гарнитуры для рафинаторов окупится в течение 0,067 года, при этом затраты на производство ДВП уменьшатся на 11679 тыс. руб.

Использование новой конструкции размольной гарнитуры для подготовки древесноволокнистого полуфабриката в производстве ДВП мокрым способом позволит сократить расходы на материалы, в том числе на размольную гарнитуру и высокотоксичные смолы; повысить эффективность процесса размола древесноволокнистого полуфабриката на существующем размольном оборудовании; уменьшить затраты на обслуживание размалывающих машин, при этом получать готовую продукцию высокого качества согласно ГОСТ 4598-2018 [91], не используя дополнительные связующие, обеспечивая экологичность древесноволокнистых плит. В результате эксплуатации предлагаемой размольной гарнитуры и оптимизации этого процесса годовая прибыль предприятия увеличится на 8 млн 860,32 тыс. руб.

Выводы к четвертой главе

1 Выполнена оценка и сравнительный анализ удельного расхода электроэнергии на процесс размола древесноволокнистого полуфабриката, в результате чего установлено снижение энергозатрат при использовании предлагаемой размольной гарнитуры в среднем на $\approx 23\%$ в сравнении с традиционной конструкцией.

2 Определены оптимальные режимные параметры процесса размола при использовании новой конструкции гарнитуры в производственных условиях, позволяющие прогнозировать и оптимизировать качество волокнистого полуфабриката, обеспечивающее заданные физико-механические свойства плиты соответствующие стандарту ГОСТ 4598-2018, а также возможность ее изготовления без применения связующих смол, снижая при этом энергетические затраты на процесс размола.

3 Выполнена экономическая оценка использования новой конструкции гарнитуры для размола древесноволокнистого полуфабриката, которая показала, что за счет сокращения материальных, трудовых, и энергетических затрат, на процесс размола в производстве ДВП годовая прибыль предприятия увеличится на 8 млн 660,32 тыс. руб.

Таким образом, в ходе выполнения диссертационной работы проведены исследования и предложены реальные решения по повышению эффективности процесса размола древесноволокнистого полуфабриката, в результате наблюдается снижение себестоимости готовой продукции при улучшении ее качества и экологичности.

Основные выводы и результаты диссертационной работы

1. В результате анализа литературных источников выявлено, что наряду с основными факторами (концентрации массы, рабочего зазора, частоты вращения ротора) процесса размола волокнистых полуфабрикатов, определяющую роль играют конструктивные параметры размольной гарнитуры, от которых зависят производительность установки, энергопотребление, размерно-качественные характеристики волокнистого полуфабриката и физико-механические свойства готовой плитной продукции. В рассмотренной литературе наблюдается отсутствие теоретического обоснования построения рисунка гарнитуры и ее эффективности при размоле древесноволокнистого полуфабриката в производстве ДВП.

2. Теоретически обосновано построение единичного ножа и предлагаемого рисунка гарнитуры в целом, определены скоростные характеристики движения ножей ротора относительно ножей статора, выявлены усилия, возникающие при их контакте, что в результате позволило оценить эффективность воздействия гарнитуры и прогнозировать процесс размола.

3. Определены значения основных технологических параметров гарнитуры (секундной режущей длины – $L_s=136450$ м/с; количества контактов при скрещивании ножей – $t = 528$ шт.; циклической элементарной длины – $L_{\omega.эл.} = 15,56$ м; поверхности размола – $F = 0,06 - 0,1$ м²; коэффициента интенсивности разработки волокна – $K_p = 0,1 - 0,12$), позволяющих характеризовать ее высокую эффективность в сравнении с традиционной конструкцией ($L_s = 91072$ м/с; $t = 996$ шт.; $L_{\omega.эл.} = 5,59$ м; $F = 0,03$ м²; $K_p = 0,05 - 0,06$).

4. Определены силовые характеристики ножей ротора при контакте с ножами статора. В результате установлено, что динамика и циклическое изменение углов скрещивания ножей ($\alpha_{скр} = 0 - 27,5^\circ$) ротора и статора, способствуя снижению количества точек контактов при их пересечении, обеспечивает преобладание нормальных составляющих усилий над касательными, характеризуя преимущественно фибриллирующее воздействие гарнитуры на древесное волокно в процессе его размола.

5. Для подтверждения теоретических исследований был спланирован и реализован многофакторный эксперимент, получены математические модели, что

позволило установить влияние технологических, конструктивных, энергосиловых параметров процесса размола на размерно-качественные характеристики древесноволокнистого полуфабриката и физико-механические свойства плитной продукции в производстве ДВП при использовании новой конструкции гарнитуры. Таким образом, установлено, что разработанная конструкция гарнитуры, позволяет улучшить качество древесноволокнистого полуфабриката, за счет интенсивного разделения волокон по слабым связям в продольном направлении (фибриллировании). В результате чего в общей массе преобладает содержание длинных и относительно тонких, соответственно гибких волокон с хорошо разработанной фибриллированной поверхностью. Высокие значения отношения длины волокон к их диаметру L/d (до ≈ 93), а также соотношение фракций волокон с превалированием средней V_c (до $\approx 50\%$), обеспечивают хорошее связеобразование в ковре и возможность изготовления плит с высокими физико-механическими свойствами без применения дополнительного связующего при всех прочих равных условиях производства ДВП.

6. Решение задачи оптимизации процесса размола древесного волокна при использовании новой конструкции гарнитуры позволило определить оптимальные размерно-качественные характеристики древесноволокнистого полуфабриката – степень помола (ДС) = 20 ДС; степень фибриллирования (Fbr) = 80 %; среднюю длину волокна (L_{cp}) = 4,29 мм; отношение длины волокна к его диаметру (L/d) = 93,3; содержание волокон средней фракции (V_c) = 49,7 % и параметры процесса размола – величина рабочего зазора (z) = 0,1 мм; концентрация древесноволокнистой массы (c) = 3 %, степень помола после дефибратора (K_d (ДСд)) = 12 ДС, обеспечивающие его высокую эффективность и необходимые качественные показатели плиты ДВП – прочность ($\sigma_{изг}$) $\approx 45,2$ МПа; плотность (P) $\approx 938,2$ кг/см³; водопоглощение за 24 часа (A) $\approx 16,9\%$ при сниженном удельном расходе электроэнергии на размол (E) = 18 кВт·ч/ΔДС·т. Расчетный ожидаемый экономический эффект при производстве ДВП в результате эксплуатации предлагаемой размольной гарнитуры на примере Segezha group ОАО «Лесосибирский ЛДК №1» составит около 8 млн 660,32 тыс. руб. в год.

Библиографический список

1. Лесная промышленность России [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org>
2. Древесноволокнистые плиты (ДВП) – прошлое и настоящее [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.allfanera.ru>
3. Чернавский, С. А., Курсовое проектирование деталей машин / С. А. Чернавский, К. Н. Боков, И. М. Чернин. – М.: Машиностроение, 1987. – 416 с.
4. Кожухов, В. А. Размол волокнистых полуфабрикатов в размольных ножевых машинах при ударном воздействии на волокно: дис...канд. техн. наук: 05.21.03: защищена 10.04.15 / В. А. Кожухов – Красноярск, 2015. – 161 с.
5. Пат. 2227825. Российская Федерация, МПК⁷ D21D, B02C 7/12. Размалывающая гарнитура дисковой мельницы/ Алашкевич Ю. Д., Ковалев В. И., Невзоров А. И.; заявитель и патентообладатель: Сибир. госуд. технолог. ун-т № 2003122181.; заявл. 15.07.2003; опубл. 27.04.2004, Бюл. № 12. – 8 с.
6. Ковалев, В. И. Размол волокнистых полуфабрикатов при различном характере построения рисунка ножевой гарнитуры[Текст]: дис...канд. техн. наук: 05.21.03: защищена 26.10.07/ Ковалев В. И. – Красноярск, 2007. – 209 с.
7. Пат. 2227826. Российская Федерация, МПК⁷ D 21 D 1/30. В 02 С 7/12. Размалывающая гарнитура для дисковой мельницы / Алашкевич Ю. Д., Ковалев В. И., Саргсян К. Х., Набиева А. А., Щербаков. В. Н.; заявитель и патентообладатель: Сибир. госуд. технолог. ун-т № 2003122252. Заявл.16.07.2003; опубл. 27.04.2004, Бюл. №12. – 8 с.
8. Решение о выдаче патента на изобретение от 25. 07. 2007 г. Заявка 2006121708/12 (023570) Российская Федерация, МПК⁷ D 21 D 1/30. В 02 С 7/12. Размалывающая гарнитура дисковой мельницы / Алашкевич Ю. Д., Ковалев В. И., Карбышев М. А., Кожухов В. А., Барановский В. П. (Россия); заявитель Сибир. госуд. технолог. ун-т. / пат. поверенный Куличкова И. П.; заявл. 19. 06. 2006.

9. Кожухов, В. А. Ударный эффект при воздействии ножевой гарнитуры как фактор повышения качества размола / В. А. Кожухов, Ю. Д. Алашкевич, В. И. Ковалёв // ВЕСТНИК СибГАУ. – 2006. – С. 131–132.

10. Решение о выдаче патента на изобретение от 25. 07. 2007 г. Заявка 2006121711/12 (023573) Российская Федерация, МПК⁷ D 21 D 1/30. В 02 С 7/12. Размалывающая гарнитура для дисковой мельницы / Алашкевич Ю. Д., Ковалев В. И., Набиева А. А. (Россия); заявитель Сибир. госуд. технолог. ун-т. / пат. поверенный Куличкова И. П. ; заявл. 19. 06. 2006.

11. Набиева, А. А. Оценка влияния и совершенствования технологических параметров ножевых размалывающих машин: дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук: 05.21.03 / А. А. Набиева. – Красноярск, – 2004. – 156 с.

12. Пат. 2227826. Российская Федерация, МПК⁷ D 21 D 1/30. В 02 С 7/12. Размалывающая гарнитура для дисковой мельницы / Алашкевич Ю. Д., Ковалев В. И., Саргсян К. Х., Набиева А. А., Щербаков. В. Н.; заявитель и патентообладатель: Сибир. госуд. технолог. ун-т № 2003122252. Заявл.16.07.2003; опубл. 27.04.2004, Бюл. № 12. – 8 с.

13. Решение о выдаче патента на изобретение от 25. 07. 2007г. Заявка 2006121708/12 (023570) Российская Федерация, МПК⁷ D 21 D 1/30. В 02 С 7/12. Размалывающая гарнитура дисковой мельницы / Алашкевич Ю. Д., Ковалев В. И., Карбышев М. А., Кожухов В. А., Барановский В. П. (Россия); заявитель Сибир. госуд. технолог. ун-т. / пат. поверенный Куличкова И. П.; заявл. 19. 06. 2006.

14. Леонович, А. А. Актуальные вопросы производства древесных плит на юбилейной конференции [Текст] / А. А. Леонович // Древесные плиты: теория и практика: 10-я междунар. науч.-практ. конф. / под ред. А. А. Леоновича. – СПб., 2007. – С. 3-6.

15. Идеология управления лесным комплексом [Текст] / Д. Б. Зуев, А. В. Радионов, А. М. Цыпук, А. И. Шишкин // Целлюлоза, бумага и картон. – 2004. – № 8. – С. 46-51.

16. Мосягин, В. И. Экономические проблемы использования лигнина [Текст] / В. И. Мосягин. – Л.: Изд-во ЛГУ. – 1981. – 195 с.

17. Балмасов, Е. А. Исследование и разработка технологических основ производства древесноволокнистых плит с целью его оптимизации [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.05: защищена 1979 / Е. Я. Балмасов. – М., 1979. – 327 с.
18. Леонович, А. А. Технология древесных плит [Текст]: прогрессивные решения: учеб. пособие / А. А. Леонович. – СПб.: ХИМИЗДАТ, 2005. – 208 с.
19. Челпанова, М. Красноярский край в цифрах [Текст] / М. Челпанова // Леспром Информ: науч.-практ. журн. – 2008. – № 9. – С. 54–63.
20. Ребрин, С. П. Технология древесноволокнистых плит [Текст] / С. П. Ребрин, Е. Д. Мерсов, В. Г. Евдокимов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Лесн. пром-сть, 1982. – 272 с.
21. Чистова, Н. Г. Переработка древесных отходов в технологическом процессе получения древесноволокнистых плит [Текст]: дис. ... докт. техн. наук. – Красноярск, 2010. – 415 с.
22. Чистова, Н. Г. Размол древесноволокнистой массы на промышленных установках при производстве ДВП [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.21.03: защищена 20.12.2000 / Н. Г. Чистова. – Красноярск, 2000. – 170 с.
23. Карасев, Е. И. Развитие производства древесных плит [Текст] / Е. И. Карасев. – 2-е изд. – М.: МГУЛ, 2002. – 127 с.
24. Мелони, Т. Современное производство древесностружечных и древесноволокнистых плит [Текст] / Т. Мелони; пер. с англ. В. В. Амалицкого и Е. И. Карасева. – М.: Лесн. пром-сть, 1982. – 416 с.
25. Техническая энциклопедия (2-ое изд.); гл. ред. Л. К. Мартенс. Главная редакция технических энциклопедий и словарей. – М.: ОНТИ, НКТП, СССР, 1938. – С. 963.
26. Блюхер, Г. Прерывистость в микроскопической структуре древесных волокон [Текст] / Г. Блюхер. – М.: Гослесбумиздат, 1962. – 40 с.
27. Рюхин, Н. В. Справочник технической литературы по целлюлозно-бумажной промышленности / Н. В. Рюхин – Библиография. – М.: Лесная промышленность, 1976. – С. 536.

28. Леонович, А. А. Физико-химические основы образования древесных плит [Текст] / А. А. Леонович. – СПб.: ХИМИЗДАТ, 2003. – 192 с.
29. ГОСТ 10633-2018. Плиты древесноволокнистые. Методы испытаний [Текст]. – Взамен ГОСТ 19592-74, ГОСТ 19592-80; введен 01.04.2019. – М.: Изд-во стандартов, 2018. – 9 с.
30. Хинчин, Я. Г. О значении гемицеллюлоз в ЦБП [Текст] / Я. Г. Хинчин. – Бумажная пром-сть. – М., 1939. – № 12. – С. 4-16.
31. Kottrall, L.G. Using Laboratory Methods for Beating Investigation [Text] / L. Konttral // Svensk Papiers Tidning. – 1938. – № 41. – P. 175-183.
32. Зырянов, М. А. Получение полуфабрикатов в одну ступень размола для производства древесноволокнистых плит мокрым способом: дис. канд. техн. наук. – Красноярск, 2012. – 171 с.
33. Чистова, Н. Г. Влияние режимов размола на качество подготовки древесного волокна для изготовления ДВП [Текст] / Н. Г. Чистова, В. Н. Матыгулина // Вестник КрасГАУ. – 2007. – № 4. – С. 139–143.
34. Фляте, Д. М. Свойства бумаги [Текст] / Д. М. Фляте. – М.: Лесн. пром-сть, 1976. – 648 с.
35. Апсит, С. О. Бумагообразующие свойства волокнистых полуфабрикатов [Текст] / С. О. Апсит. – М.: Лесн. пром-сть, 1972. – 142 с.
36. Ласкеев, П. Х. Производство древесной массы [Текст] / П. Х. Ласкеев. – Л., 1967. – 180 с.
37. Аликин В. П. Физико-механические свойства природных целлюлозных волокон. – М.: Лесн. пром-сть, 1969. – 139 с.
38. Матыгулина, В. Н. Подготовка древесноволокнистых полуфабрикатов в производстве древесноволокнистых плит сухим способом [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.21.03: защищена 20.09.2007 / В. Н. Матыгулина. – Красноярск, 2007. – 156 с.

39. Алашкевич, Ю. Д. Исследование гидродинамических явлений в процессе размола волокон в ножевых и размалывающих машинах [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.06.03: утв. 24.11.1970 / Ю. Д. Алашкевич. – Л., 1970. – 143 с.
40. Алашкевич, Ю. Д. Основы теории гидродинамической обработки волокнистых материалов в размольных машинах [Текст]: дис. ... докт. техн. наук / Ю. Д. Алашкевич. – Красноярск, 1987. – 361 с.
41. Алашкевич, Ю. Д. Оборудование для подготовки бумажной массы [Текст]: курс лекций для студ. спец. 170404, 030528 и 260304 всех форм обучения / Ю. Д. Алашкевич. – Красноярск: СибГТУ, 2000. – 248 с.
42. Фляте, Д. М. Свойства бумаги [Текст] / Д. М. Фляте. – М.: Лесн. пром-сть, 1976. – 648 с.
43. Pfarr, F. Uber die Dewegung der Papirmasse im Rollapparat [Text] / F. Pfarr // Wochenblatt fir Papierfabrikation. – 1907. – NR. 37. – P. 30–32.
44. Липцев Н. В. Технология древесноволокнистых плит [Текст]: метод. указания для студ. химико-технол. фак. / Н. В. Липцев. – Л., 1978. – 36 с.
45. Немировский Л. Г. Экономический анализ размола целлюлозы в мельнице жордана // Труды ЦНИИБ / Гослесбумиздат. – М.-Л., 1938. – Вып.27. – С.44-49.
46. Аликин В. П. Вопросы реологии и размола целлюлозных материалов: Автореф. дис. ...канд. техн. наук. – Л., 1960. –21 с.
47. Петрушева, Н. А. Подготовка вторичного волокна при производстве древесноволокнистых плит мокрым способом [Текст]: дис. ... канд. техн. наук. – Красноярск, 2003. – 115 с.
48. Кац, Л. И. Технологические основы получения плит МДФ мокрым способом [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.21.03: защищена 2000 / Л. И. Кац. – Минск, 2000. – 131 с.
49. Алашкевич Ю. Д. Влияние рисунка гарнитуры на процесс размола волокнистых полуфабрикатов: Монография в 2-х частях. Часть 1 / Ю. Д. Алашкевич, В. И. Ковалев, А. А. Набиева. – Красноярск: СибГТУ, 2010. – 168 с.
50. Чистова, Н. Г. Подготовка древесного волокна в производстве

древесноволокнистых плит [Текст] / Н. Г. Чистова, Ю. Д. Алашкевич // Лесной журнал. – 2009. – № 4. – С. 60–64.

51. Солечник, Н. Я. Вопросы деформации и размола технической целлюлозы [Текст] / Н. Я. Солечник, В. П. Аликин // Бумажная пром-сть. – 1959. – № 12. – С 7-8.

52. Стратегия социально–экономического развития Красноярского края на период до 2020 года [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://econ.krskstate.ru>

53. Анализ рынка древесно-волоконных плит в России прогноз на 2012-2016 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ruelect.com>

54. Вититнев, А. Ю. Совершенствование оборудования для создания новой, более чистой технологии подготовки древесноволокнистой массы / А. Ю. Вититнев, И. М. Морозов, Н. Г. Чистова, Н. В. Аксенов. – К: В мире научных открытий, 2015. – С. 854-865.

55. Шаломов, А. П. Состояние производства древесноволокнистых плит в России [Текст] / А. П. Шаломов, Т. М. Поблагуева, И. М. Грошев // Вестник ВНИИДРЕВ: сб. материалов 18-ой науч.-практ. конф. «Древесные плиты: теория и практика», 2015. – Вып. 1. – С. 2–5.

56. Матюшенкова, Е. Плитники повысят квалификацию [Текст] / Е. Матюшенкова // Леспром Информ: науч.-практ. журн. – 2009. – № 1. – С. 116-117.

57. Wickery C. H. Stock Preparation Equipment // Pulp Paper Magazine Canada. – 1945 – "7.46, N 3. – P 181-184.

58. Российский рынок древесноволокнистых плит [Электронный ресурс]. – Режим доступа:// lesprominform.ru/jarchive/articles/itemshow/4468.

59. Шуркина, В. И. Совершенствование ножевого размола волокнистых растительных полимеров в целлюлозно-бумажном производстве: дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук : 05.21.03 / В. И. Шуркина. – Красноярск, 2016. – 145 с.

60. Легоцкий, С. С. Размалывающее оборудование и подготовка бумажной массы [Текст] / С. С. Легоцкий, В. Н. Гончаров. – М.: Лесн. пром-сть, 1990. – 224 с.

61. Изменение удельной поверхности целлюлозных волокон при их дегидрации / Г.К. Малиновская, Н.И. Антонова, И.И. Еремеева, Г.В. Себелева // Бумажная пром-сть. – 1987. – № 4. – С. 8.
62. Оборудование целлюлозно – бумажного производства: под ред. В. А. Чичаева. – М.: Лесная промышленность, 1981. – т. 1. – 365 с.
63. Пашинский, В. Ф. Машины для размол волокнистой массы / В. Ф. Пашинский. – М.: Лесная промышленность, 1972. – С. 160.
64. Киселев, С. С. Эксплуатация и ремонт дисковых и конических мельниц/ С. С. Киселев, В. Ф. Пашинский – М.: Лесная промышленность, 1979. – С. 208.
65. Легоцкий, С. С. Размол бумажной массы / С. С. Легоцкий, Л.Н. Лаптев. – М.: Лесная промышленность, 1981. – 93 с.
66. Smith, S. Die rationelle Theorie des Ganzzugmüllens. Otto Ernst Verlag. – Teil I/ S. Smith – Berlin, 1922. – 105 p.
67. Smith, S. Die rationelle Theorie des Ganzzugmüllens. Otto Ernst Verlag. – Teil I/ S. Smith – Berlin, 1922.
68. Алашкевич, Ю. Д. Оборудование предприятий ЦБП. Часть 2 [Текст] / Ю. Д. Алашкевич, В. П. Барановский, Л. Г. Деянова, Н. С. Решетова. – учебное пособие для студентов специальностей 170404 (150405), 260304 (240406) и 030528 (050501) очной, очной сокращенной, заочной и заочной сокращенной форм обучения – Красноярск: СибГТУ, 2007 – 173 с.
69. Брокгауз – Ефрон. Энциклопедический словарь. – Санкт-Петербург: Типо-Литография И. А. Ефрона. – т. XIX, кн. 37, 1896. – С. 476.
70. Горячкин, В. П. Собрание сочинений.: в 3-х т., т. 3/ В. П. Горячкин – М.: Колос, 1968. – С. 384.
71. Брокгауз – Ефрон. Энциклопедический словарь. – Санкт-Петербург: Типо-Литография И. А. Ефрона. – Т. XVI^a, кн. 32, 1895. – С.854 – 857.
72. Никольский, С. Н. Беленая целлюлоза: соотношение между способностью к размолу и сопротивлением раздираания [Текст] / С. Н. Никольский // Химия древесины. – 1992. – № 2. – С. 90-95.

73. Гончаров, В. Н. Ножевые размалывающие машины [Текст] / В. Н. Гончаров // учебн. пособие ЛТА. – Л., 1980. – 105 с.
74. Гончаров, В. Н. Теоретические основы размола волокнистых материалов в ножевых машинах [Текст]: дис. ... докт. техн. наук: 05.21.03 / В. Н. Гончаров. – Л., 1990 – 433 с.
75. Тотухов, Ю. А., Смирнова, Э. А. Энергетическая оценка влияния технологических добавок на структурообразование волокнистых суспензий [Текст] / Ю. А. Тотухов, Э. А. Смирнова// Машины и аппараты целлюлозно-бумажного производства. Межвуз. сб. – СПб, 1997. – С. 30–33.
76. Корда, И. Размол бумажной массы [Текст] / И. Корда, З. Либнар, И. Прокоп. – М.: Лесн. пром-сть, 1967. – 402 с.
77. Афанасьев, П. А. Курс мукомольных мельниц / П. А. Афанасьев – Санкт-Петербург, 1876. – 387 с.
78. Афанасьев, П. А. Мукомольные мельницы / П. А. Афанасьев – Санкт-Петербург, 1883. – 761 с.
79. Симигин, П. С. О размоле и размалывающем оборудовании / П. С. Симигин // Бумажная пром-ть, 1970. – №6. – С. 15–17.
80. Швальбе, Х. Приготовление бумажной массы «РАЗМОЛ» / Х. Швальбе. – Ленинград.: Гослестехиздат, 1935. – 172 с.
81. Dyck, A. W. Focus on Stock Preparation and refining / A. W. Dyck // American Paper Industry. – 1968. – № 20. – P. 32–35.
82. Рублев, А. И. и др. Дисковые мельницы (Обзор) / А. И. Рублев – М.: 1971. – С.57.
83. Беркман, Е. М. Словарь целлюлозно-бумажной промышленности / Е. М. Беркман – М.: Лесная промышленность, 1985. – С. 312
84. 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. // 10.07.2009. Заявка № 2009612514.

85. Tyralski T. Analiza doboru podstawowych parametron konstrukcyjnych mlynów tarerjwyenh . – Przegląd Papierniczy / T. Tyralski, 1972. № 8. – S. 229–240.

86. Проблемы бумажной промышленности Канады. Technology: the classic Canadian dilemma – short-term gain for long-term pain! / Wright Joseph D. // Forest. Chron. – 2002. – 78, № 1. – С. 124-127.

87. Морозов, И. М. Подготовка и использование древесных отходов в производстве древесноволокнистых плит : дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук : 05.21.03 / И. М. Морозов. – Красноярск, – 2016. – 195 с.

88. Пижурин, А. А. Основы научных исследований [Текст]: учеб. для вузов / А. А. Пижурин, А. А. Пижурин. – М.: МГУЛ, 2005. – 305 с.

89. Пижурин, А. А. Моделирование и оптимизация процессов деревообработки [Текст]: учебник / А. А. Пижурин, А. А. Пижурин. – М.: МГУЛ, 2004. – 375 с.

90. Пен, Р. З. Статистические методы в бумажном производстве [Текст] / Р. З. Пен, Э. М. Менчер. – М.: Лесн. пром-сть, 1978. – 120 с.

91. ГОСТ 4598-2018. Плиты древесноволокнистые мокрого способа производства. Технические условия [Текст]. – Взамен ГОСТ 4598-86; введ. 01.04.2019. – М.: Изд-во стандартов, 2018. – 11 с.

92. Мерсов, Е.Д. Производство древесно-волоконных плит [Текст]: учеб. пособие / Е.Д. Мерсов // М.: высш. шк., 1989. – 232 с.

93. Боровиков, В. П. STATISTICA. Статистический анализ и обработка данных в среде Windows [Текст] / В. П. Боровиков, И. П. Боровиков. – М., 1998. – 605 с.

94. Пат. 2 652 177. Российская Федерация, СПК⁷ D 21 D 1/30. В 02 С 7/12. Размольная гарнитура дисковой мельницы/ Вититнев А. Ю., Чистова Н. Г. Алашкевич Ю. Д., Дирацуян А. А.; заявитель и патентообладатель: СибГУ им. академика М. Ф. Решетнева. № 2016119218. Заявл.17.05.2016; опубл. 25.04.2018, Бюл. № 12. – 9 с.

95. Вититнев, А. Ю. Совершенствование рабочих органов размольных установок для получения древесноволокнистых материалов / А. Ю. Вититнев, В. А. Якимов, Н. Г. Чистова, Ю. Д. Алашкевич – К: В мире научных открытий, 2015. – С. 833–847.

96. Вититнев, А. Ю. Влияние продолжительности подготовки волокнистого полуфабриката на его размерно-качественные характеристики при производстве древесноволокнистых плит /А. Ю. Вититнев, Ю. Д. Алашкевич, Н. Г. Чистова, Ю. В. Вититнева // Решетневские чтения: материалы XXII междунар. науч. - практ. конф., посвящ. памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева. Красноярск: СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2018. - Ч. 2. – С. 80-81

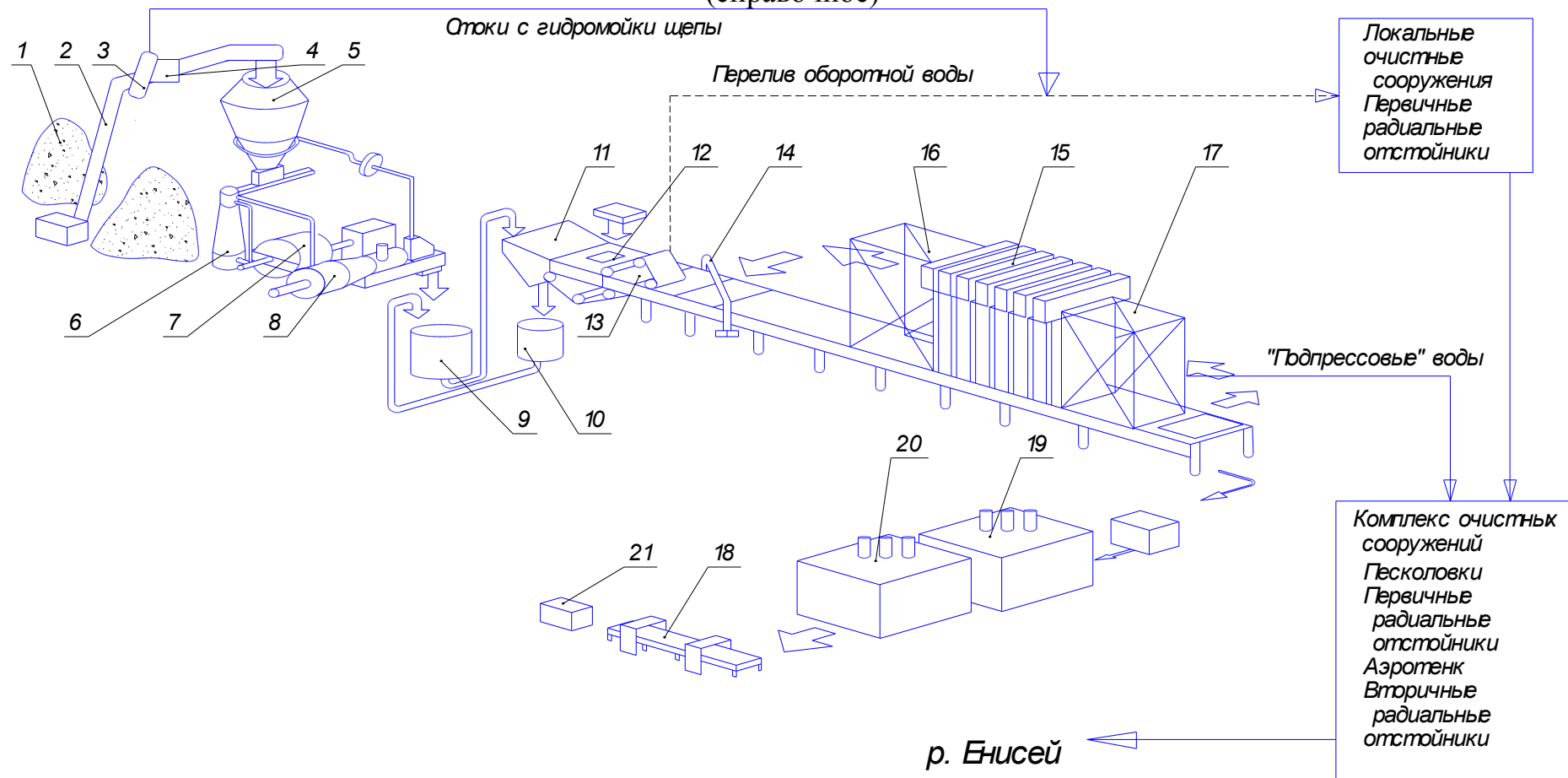
97. Идеология управления лесным комплексом [Текст] / Д. Б. Зуев, А. В. Радионов, А. М. Цыпук, А. И. Шишкин // Целлюлоза, бумага и картон. – 2004. – № 8. – С. 46-51.

98. Липцев, Н. В. Теоретические основы технологии древесноволокнистой массы и пути повышения эффективности производства древесноволокнистых плит [Текст]: автореф. дис. ... д-ра техн. Наук: 05.21.03 / Н. В. Липцев. – Л., 1982. – 39 с.

99. Карасев, Е. И. Водостойкость древесноволокнистых плит [Текст] / Е. И. Карасев, И. Ю. Киселев, Е. Д. Мерсов // Экспрес-информ.: Зарубежный опыт. – М.: ВНИПИЭИлеспром, 1986. – 20 с. – (Плиты и фанера; вып. 5).

100. Основные представления о волокнах, применяемых в бумажной промышленности, материалы симпозиума. – М.: Гослесбумиздат, 1962. – 498 с.

Приложение А
(справочное)



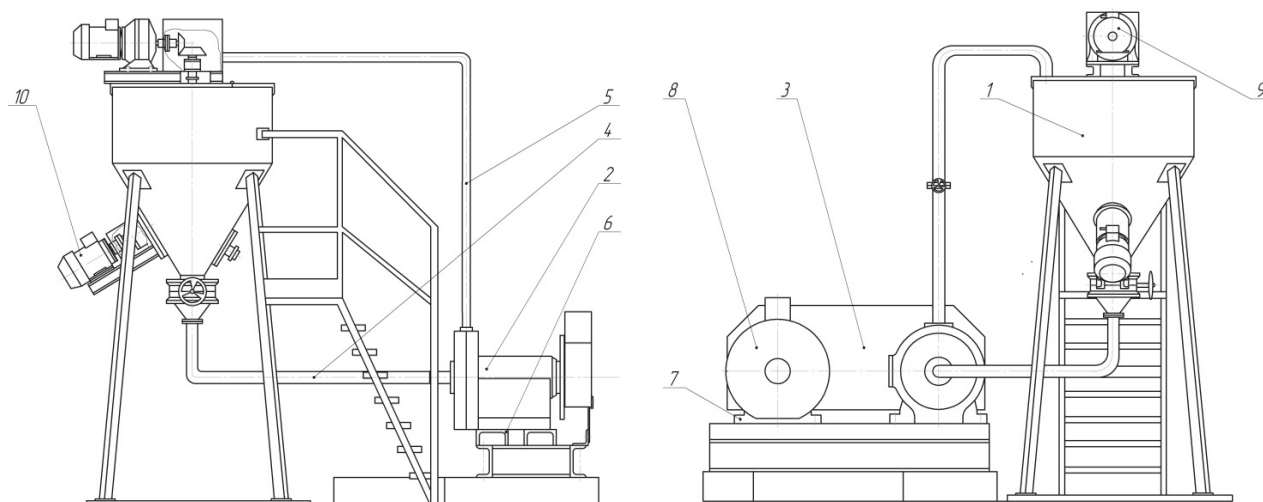
1 – открытый склад щепы; 2 – пневмотранспортер; 3 – гидромойка; 4 – металлоуловитель; 5 – бункер щепы; 6 – пропарочная камера; 7 – дефибратор; 8 – рафинатор; 9 – проклеивающая установка; 10 – проклеивающая установка; 11 – напорный ящик; 12 – отливочная машина; 13 – прессовая часть; 14 – форматно-обрезная резка ковра; 15 – горячий пресс; 16 – загрузочная этажерка; 17 – разгрузочная этажерка; 18 – форматно-обрезная резка плиты; 19 – закалочная камера; 20 – термо-влажгообработка плиты; 21 – склад готовой продукции.

Рисунок А 1 - Схема производства ДВП мокрым способом

Приложение Б

(справочное)

Общий вид экспериментальной установки и ее характеристики



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

Рисунок Б.1 – Общий вид экспериментальной установки

Таблица Б.1 — Техническая характеристика установки:

Дисковая мельница		
Габаритные размеры	м	0,95x0,6x0,8
Межножевой зазор	мм	0 - 6
Число оборотов	об/мин	0 - 2000
Гарнитура мельницы		
Материал		Сталь 40ХН
Диаметр наружный	мм	300
Диаметр внутренний	мм	120
Число ножей диска	мм	60
Ширина ножей	мм	от 3 до 7,5
Привод мельницы		
Номинальная мощность	кВт	22
Число оборотов	об/мин	750
Гидроразбиватель		
Ёмкость	л	320
Расход жидкости из гидроразбивателя	л/с	0 - 3
Мешалка гидроразбивателя вертикальная		
Тип мешалки		рамная
Число оборотов	об/мин	60
Мощность привода	кВт	1,7
Мешалка гидроразбивателя наклонная		
Тип мешалки		дисковая
Число оборотов	об/мин	900
Мощность привода	кВт	3

Приложение В

(справочное)

Условия и рецептура производства ДВП

Таблица В.1– Состав древесноволокнистой массы для получения ДВП

Наименование компонента	Массовая доля, % а.с.в.
Древесное волокно	98-96
Водный раствор серной кислоты	1,0
Парафиновая эмульсия	1,0

Неконтролируемые факторы соответствовали значениям, указанным ниже.

Проклейка:

- парафиновая эмульсия 8-10 %
- водный раствор серной кислоты 4–4,2 %.

Отлив и формование ковра:

- концентрация древесного волокна в общей массе 1,5 %;
- температура ковра 50 °С;
- кислотность массы рН = 4,2-4,5;
- влажность ковра 70-75 %.

Режимы прессования:

- отжим 90 с, давление 29 МПа, температура 190 °С;
- сушка 5 мин, давление 70 МПа, температура 190 °С;
- закалка 40 с, давление 24 МПа, температура 190 °С.

Приложение Г

(справочное)

Матрица планирования эксперимента исследований работы

Таблица Г. 1 – Матрица планирования эксперимента по В-плану второго порядка для трехфакторного эксперимента

Номер опыта	X_1	X_2	X_4
1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1
3	-1	+1	-1
4	+1	+1	-1
5	-1	-1	+1
6	+1	-1	+1
7	-1	+1	+1
8	+1	+1	+1
9	-1	0	0
10	+1	0	0
11	0	-1	0
12	0	+1	0
13	0	0	-1
14	0	0	+1

Приложение Д (справочное)

Статистическая обработка результатов эксперимента

Программа экспериментальных исследований реализована комплексом активных однофакторных и многофакторных опытов. В основе обработки результатов лежали корреляционный и регрессионный анализы, включающие метод наименьших квадратов и статистическую обработку данных.

Методы планирования и обработки результатов эксперимента получили широкое распространение и достаточно апробированы [88-90, 93].

Поэтому коротко отметим только основные пункты, которые были выполнены при обработке результатов опытов.

Результаты эксперимента обрабатывались методами, разработанными для получения математических моделей с целью описания исследуемого процесса и решения задач оптимизации условий функционирования этого процесса.

Обработка результатов опытов многофакторных экспериментов для всех зависимостей осуществлялась по следующей методике.

Для планов второго порядка, в общем случае, когда число варьируемых факторов равно K , модель имеет следующий вид [89]

$$Y = B_0 + \sum_{i=1}^K B_{iX_i} + \sum_{i,j=1}^K B_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^K B_{ii} X_i^2, \quad (1)$$

где Y – исследуемый выходной параметр;

X_i, X_j – независимые переменные факторы в условном (нормализованном) масштабе (i и j принимают от 1 до 3, но $i \neq j$);

K – число независимых переменных ($K=3$);

B_0 – свободный член уравнения регрессии, характеризующий средний уровень выходного параметра;

B_i – коэффициенты регрессии, характеризующие влияние входных факторов X_i на выходной параметр Y ;

B_{ij} – коэффициенты регрессии, характеризующие эффективности парных взаимодействий входных параметров.

Уравнение (1) содержит все слагаемые линейной модели, свободный член, квадратичные члены, являющиеся произведениями коэффициентов регрессии на квадраты факторов и члены с парными взаимодействиями, которые представляют собой коэффициенты регрессии, умноженные на произведение двух различных факторов.

Например, для расчёта коэффициентов регрессии трехфакторного эксперимента необходимо получить матрицу базисных функций в нормализованных значениях факторов. Поскольку выбрана модель второго порядка, то матрица базисных функций этой модели должна содержать столбцы: $X_0, X_1, X_2, X_3, X_1^2, X_2^2, X_3^2, X_{12}, X_{13}, X_{23}$. Число опытов для В – плана второго порядка с тремя факторами, $N = 2^3 + 2 \cdot 3 = 14$. Поэтому количество экспериментов изменится с 27 до 14.

Необходимо определить объём выборки, т.е. минимальное число n повторений опытов, при котором среднее арифметическое $\bar{y}$, найденное по той же выборке, отличалось бы от математического ожидания не более, чем на заданную величину Δ . Минимальное число повторения опыта, n , определялось по формуле

$$n = t^2 s^2 / \Delta^2, \quad (2)$$

где t – табличное [89] при уровне значимости q и числе степеней свободы f , связанном с S^2 ;

S^2 – оценка дисперсии;

Δ – величина максимальной ошибки.

Оценка дисперсии, S^2 , определялась по формуле

$$S^2 = \frac{(Y_1 - \bar{Y})^2 + (Y_2 - \bar{Y})^2 + \dots + (Y_n - \bar{Y})^2}{n-1}, \quad (3)$$

где $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$ – результаты дублирования опыта;

$\bar{Y}$ – среднее арифметическое по результатам дублирования опыта.

Средне арифметическое по результатам дублирования опытов, $\bar{Y}$,

$$\bar{Y} = \left(\sum_{i=1}^n Y_i \right) / n, \quad (4)$$

Предварительная обработка результатов измерений состояла в отсеивании грубых погрешностей измерений и проверке соответствия распределения этих измерений закону нормального распределения. Отсев грубых погрешностей производился наиболее простым способом по t – критерию Стьюдента [88]

$$t_{\text{расч}} = |Y_i - \bar{Y}| / S, \quad (5)$$

где Y_i – грубое наблюдение (промах);

$\bar{Y}$ – среднее арифметическое безошибочного результата;

S – дисперсия без результата, который считается промахом.

Если $t_{\text{расч}} > t_{\text{табл}}$, то сомнительный результат – грубая ошибка. В этом случае параллельный опыт повторялся.

Проверка нормальности распределения (для не очень больших выборок как в рассматриваемом случае $n < 120$) производилась с использованием среднего абсолютного отклонения (CAO) по формуле

$$CAO = \frac{\sum |Y_i - \bar{Y}|}{n}, \quad (6)$$

где n – количество параллельных опытов;

Y_i – элемент выборки;

$\bar{Y}$ – среднее арифметическое.

Для выборок, имеющих близкое к нормальному распределение, должно выполняться неравенство

$$\left| \frac{CAO}{S^2} - 0.7979 \right| < \frac{0.4}{\sqrt{n}}, \quad (7)$$

где S^2 – среднее квадратическое отклонение.

Для проверки однородности нескольких дисперсий при равных объёмах всех рассматриваемых выборок был использован G-критерий Кохрена. Расчётное значение G-критерия Кохрена, $G_{расч.}$, находится по формуле

$$G_{расч.} = S_{\max}^2 / (S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 + \dots + S_m^2), \quad (8)$$

где m – количество дисперсий однородность которых проверяется;

$S_{\max}^2$ – наибольшая из рассматриваемых дисперсий.

По выбранному уровню значимости q , числу степеней свободы f и по количеству выборок m из таблиц распределения Кохрена [88, 89] находим величину $G = G_{табл.}$. Если $G_{расч.} < G_{табл.}$, то можно принять гипотезу об однородности дисперсий. В противном случае она отвергается.

Далее находилась дисперсия воспроизводимости, $S^2\{y\}$, по формуле

$$S^2\{y\} = (S_1^2 + S_2^2 + \dots + S_N^2) / N = \sum_{j=1}^N S_j^2 / N, \quad (9)$$

где S_j^2 – дисперсия j -го опыта;

N – количество опытов.

Число степеней свободы дисперсии воспроизводимости, f_y ,

$$f_y = \sum_{j=1}^N f_j = N(n-1), \quad (10)$$

где n – число дублирования J -го опыта.

Коэффициенты регрессии, b_0 , b_i , b_{ii} , b_{iu} , для В – планов второго порядка рассчитываются по формулам

$$\left. \begin{aligned} b_0 &= T_1(0y) - T_2 \sum_{j=1}^k (iiy) \\ b_i &= T_3(iy) \\ b_{ii} &= T_4(iiy) + T_5 \sum_{i=1}^k (iiy) - T_2(0y) \\ b_{iu} &= T_6(iuy) \end{aligned} \right\}, \quad (11)$$

где b_0 – свободный член;

b_i – линейные коэффициенты регрессии;

b_{ii} – квадратные коэффициенты регрессии;

b_{iu} – коэффициенты при парных взаимодействиях;

k – количество варьируемых факторов;

T_i – поправочные коэффициенты.

В формулах обозначено

$$\left. \begin{aligned} (0y) &= \sum_{j=1}^N y_j; \\ (iiy) &= \sum_{j=1}^N x_{ij}^2 y_j; \\ (iy) &= \sum_{j=1}^N x_{ij} y_j; \\ (iuu) &= \sum_{j=1}^N x_{ij} x_{uj} y_j, i \neq u \end{aligned} \right\}, \quad (12)$$

где y_i – среднее арифметическое по результатам i -ой серии дублированных опытов;

N – число серий дублированных опытов.

Дисперсии коэффициентов регрессии, $S^2\{b_0\}$, $S^2\{b_i\}$, $S^2\{b_{ii}\}$, $S^2\{b_{iu}\}$ и ковариации между ними, $\text{cov}\{b_0, b_{ii}\}$, $\text{cov}\{b_{ii}, b_{iu}\}$,

$$\left. \begin{aligned} S^2\{b_0\} &= (T_1 / n) S^2\{y\}; \\ S^2\{b_i\} &= (T_3 / n) S^2\{y\}; \\ S^2\{b_{ii}\} &= [(T_4 + T_5) / n] S^2\{y\}; \\ S^2\{b_{iu}\} &= (T_6 / n) S^2\{y\}; \\ \text{cov}\{b_0, b_{ii}\} &= -(T_2 / n) S^2\{y\}; \\ \text{cov}\{b_{ii}, b_{iu}\} &= (T_5 / n) S^2\{y\}; \end{aligned} \right\}, \quad (13)$$

где $S^2\{b\}$ – дисперсия исследуемого коэффициента;

$S^2\{y\}$ – дисперсия воспроизводимости;

n – количество всех опытов.

Затем для каждого коэффициента регрессии b_i находилось t -отношение

$$t_i = |b_i| / S\{b_i\}, \quad (14)$$

где $|b_i|$ – абсолютная величина коэффициента регрессии;

$S\{b_i\}$ – эмпирический стандарт коэффициента регрессии.

Вычисленная величина t_i сравнивалась с табличным значением $t_{\text{табл.}}$ t -критерием Стьюдента [89] для заданного уровня значимости q и числа степеней свободы f , с которым определялась дисперсия воспроизводимости $S^2\{y\}$. Если $t_i < t_{\text{табл.}}$, то коэффициент регрессии b_i незначим и соответствующий член в уравнении регрессии должен быть отброшен. С учётом вышеперечисленного условие того, что коэффициент регрессии незначим, можно записать в более удобном виде

$$|b_i| \leq S\{b_i\} t_{\text{табл.}}, \quad (15)$$

где $t_{\text{табл.}}$ – значение t -критерия Стьюдента при уровне значимости q и числе степеней свобод f .

Регрессионная модель, построенная по результатам эксперимента, позволяет рассчитать значение отклика в разных точках области варьирования факторов. Проверка адекватности математической модели даёт возможность нам ответить на вопрос, будет ли построенная модель предсказывать значение выходной величины с той же точностью, что и результаты эксперимента.

Порядок проверки адекватности модели.

а) определяем сумму квадратов, характеризующую адекватность модели $S^2_{\text{ад.}}$. При равномерном дублировании сумму квадратов, $S_{\text{ад.}}$, рассчитываем по формуле

$$S_{\text{ад}} = n \left[\left(\bar{y}_1 - \hat{y}_1 \right)^2 + \left(\bar{y}_2 - \hat{y}_2 \right)^2 + \dots + \left(\bar{y}_N - \hat{y}_N \right)^2 \right] = n \sum_{i=1}^N \left(\bar{y}_i - \hat{y}_i \right)^2, \quad (16)$$

где n – число дублированных опытов в каждой серии;

$\bar{y}_i$ – среднее значение результатов эксперимента в i серии дублированных опытов, $i=1,2,3,\dots,N$;

$\hat{y}_i$ – значение выходной величины рассчитанное по уравнению регрессии для i опыта.

б) число степеней свободы дисперсии адекватности, $f_{\text{ад.}}$,

$$f_{ad} = N - P , \quad (17)$$

где N – число опытов;

P – число оцениваемых коэффициентов регрессии.

в) дисперсия адекватности, $S^2_{ад}$,

$$S^2_{ад} = S_{ад} / f_{ад} , \quad (18)$$

г) с помощью F-критерия Фишера проверяем однородность дисперсии адекватности $S^2_{ад}$ и дисперсии воспроизводимости $S^2\{y\}$.

$$F_{расч} = S^2_{ад} / S^2\{y\} , \quad (19)$$

$F_{расч}$ сравнивалось с табличным значением F-критерия Фишера, $F_{табл.}$, найденным при выбранном уровне значимости q для чисел степеней свободы $f_{ад}$ в числителе и f_y в знаменателе [89]. Если $F_{расч.} < F_{табл.}$, то модель считается адекватной и может быть использована для описания объекта. В противном случае модель неадекватна.

Перевод уравнения из нормализованного вида в натуральный производился по формуле перехода

$$x_i = (X_i - X_i^{(0)}) / \Delta_i , \quad (20)$$

где x_i – нормализованное значение фактора;

X_i – натуральное значение фактора;

$X_i^{(0)}$ – середина диапазона варьирования фактора X_i или основной уровень;

Δ_i – интервал варьирования фактора.

Приложение Е

(справочное)

Результаты предварительных исследований

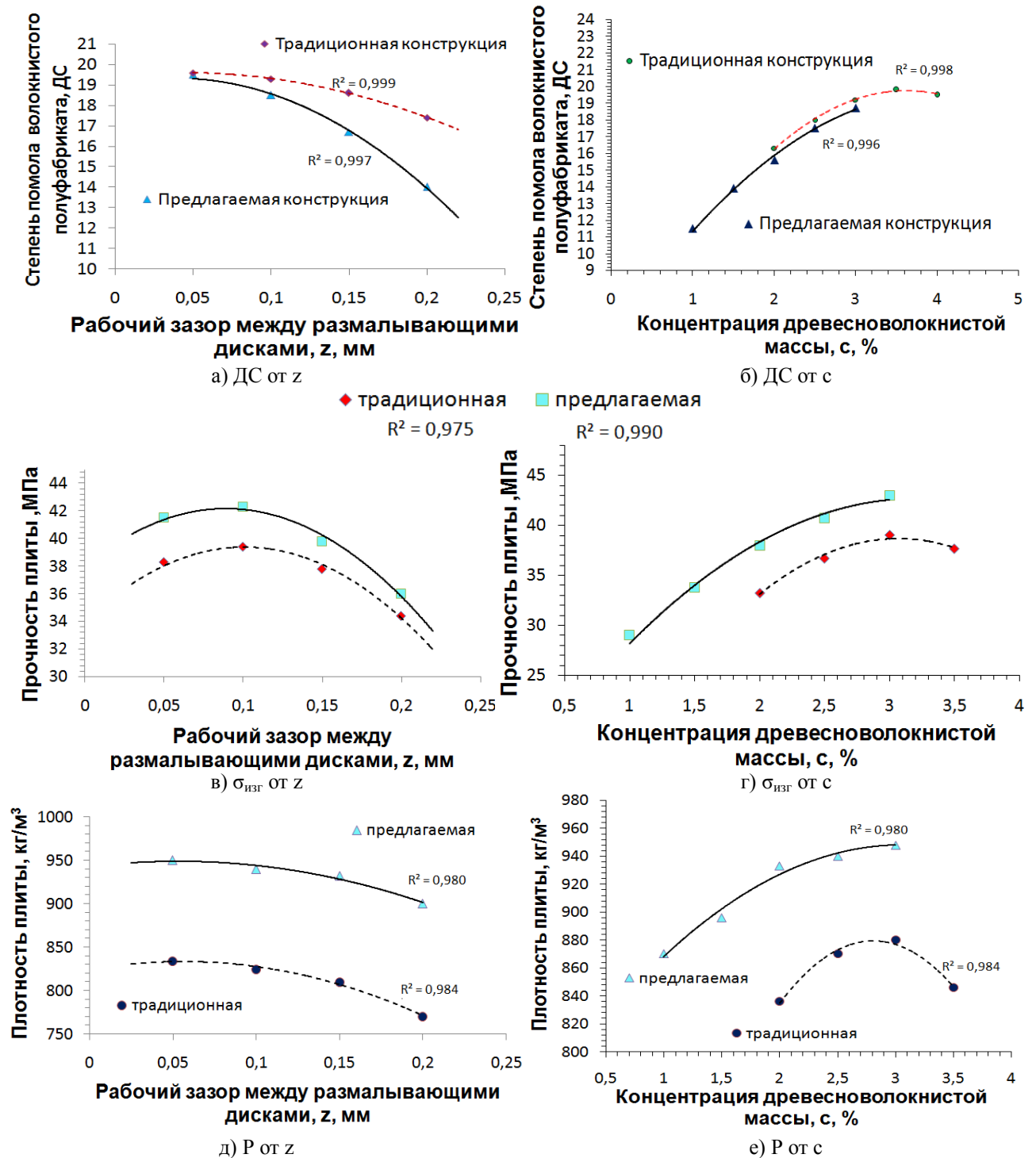


Рисунок Е1 – Влияние рабочего зазора и концентрации массы на степень помола волокнистого полуфабриката (а, б) и физико-механические свойства (в-е) ДВП