*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

Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук

Красноярск – 2019

Работа выполнена на кафедре Машин и аппаратов промышленных технологий ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», г. Красноярск

**Научный руководитель:**
академик РАО, доктор технических наук, профессор ***Алашкевич Юрий Давыдович***

**Официальные оппоненты:**

Бурындин Виктор Гаврилович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», кафедра «Технологии переработки пластических масс», заведующий кафедрой

Шишлов Олег Федорович, доктор технических наук, ПАО «Уралхимпласт», директор по науке и развитию

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова»

Защита состоится «22» ноября 2019 года в $10^{00}$ ч на заседании диссертационного совета Д 212.249.07 при Сибирском государственном университете науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева по адресу: 660049, г. Красноярск, пр. Мира, 82, аудитория Ц-110 (зал заседания).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписями, заверенными печатью, просим направлять по адресу: 660049, г. Красноярск, пр. Мира, 82, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, учёному секретарю диссертационного совета. E-mail: dissovetsibgtu01@mail.ru

В отзыве указывается фамилия, имя отчество, почтовый адрес, телефон и адрес электронной почты (при наличии), наименование организации и должность лица, представившего отзыв (п. 28 Положения о присуждении учёных степеней).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева и на сайте: www.sibsau.ru.

Автореферат разослан «_____» _____ 2019 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук,
профессор Исаева Елена Владимировна

## Общая характеристика работы

**Актуальность работы.** Наряду с различными операциями в общем технологическом процессе производства древесноволокнистых плит (ДВП) важнейшей является процесс размола, который обеспечивает качество готовой продукции, производительность подготовки полуфабриката и эффективность производства в целом.

Размол волокнистых полуфабрикатов осуществляется в быстроходных ножевых дисковых мельницах (дефибратор, рафинатор), где основной размалывающий элемент это размольная гарнитура, конструкция которой определяет качественные показатели полуфабриката и в свою очередь, физико-механические свойства плит.

В настоящее время учеными научной школы Алашкевича Ю. Д. исследованы теоретические вопросы по разработке различных видов рисунков гарнитур для размола целлюлозного волокна в ЦБП (см. раздел 1 в диссертации), при этом остались нераскрытыми вопросы, связанные с подготовкой древесноволокнистого полуфабриката для производства ДВП, его размерно-качественными характеристиками и физико-механическими свойствами и физико-механическими свойствами продукции, изготавливаемой из него. Чтобы обеспечить необходимое качество плит согласно стандарту ГОСТ 4598-2018, приходится применять дополнительное связующее, что можно объяснить недостаточным качеством процесса размола.

На протяжении уже 60-70 лет эффективность процесса размола обеспечивается не в полной мере, так как накопленные в течение многих лет практические данные не позволяют при использовании новых технологий и современного оборудования получать высококачественную экологичную продукцию, создавать конкурентоспособность на рынке плитных материалов, снижая тем самым рентабельность производства ДВП.

В работе рассмотрены и предложены результаты исследования по созданию и разработке научно-обоснованной конструкции размольной гарнитуры для эффективной подготовки волокнистых полуфабрикатов на существующих машинах в производстве ДВП.

Вышеизложенное определяет актуальность исследований в области создания новой конструкции размольной гарнитуры, позволяющей эффективно подготавливать волокнистый полуфабрикат с заданными размерно-качественными характеристиками на существующем оборудовании и изготавливать из него плитную продукцию высокого качества, что, несомненно, позволит повысить как эффективность размалывающих машин, процесса размола, так и производства ДВП в целом.

**Цель работы.** Совершенствование процесса размола волокнистых полуфабрикатов в производстве ДВП.

Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд задач.

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 гарнитуры 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 эффективную конструкцию размольной гарнитуры и прогнозировать ее при размоле волокнистых полуфабрикатов в производстве ДВП;

- результаты исследования процесса размола волокнистого полуфабриката с использованием разработанной конструкции гарнитуры фибриллирующего воздействия на волокно, позволяют обеспечить необходимые размерно-качественные характеристики полуфабриката и физико-механические свойства готовых плит без применения дополнительных связующих за счет дифференциального характера распределения силовых воздействий на волокно в процессе его размола;

- установленные оптимальные режимы процесса размола древесного волокна, его качественные характеристики позволяют повысить эффективность процесса, качество готовой продукции, снизив энергопотребление при использовании

конструкции гарнитуры (авторское исполнение), которая обеспечивает увеличение нормальных составляющих в отличие от касательных усилий, оказывая фибриллирующее воздействие на волокно, разрушая его преимущественно вдоль оси.

Преемственность 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 полуфабрикат;

- 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), 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 г.), «В мире научных открытий» (Ульяновск, 2015).

**Публикации.** По результатам исследований опубликованы 20 печатных работ, из них две – в изданиях, индексируемых базой Scopus, две – в изданиях, рекомендованных ВАК, два патента (патент на изобретение № 2652177, патент на полезную модель № 160973).

**Объем и структура диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка из 100 наименований. Объем работы – 149 страниц машинописного текста, включая 27 иллюстраций, 19 таблиц и 6 приложений.

## Основное содержание работы

**Во введении** обоснована актуальность исследований по совершенствованию процесса размола волокнистого полуфабриката в производстве древесноволокнистых плит мокрым способом. Сформулирована цель и определены задачи исследования.

**В первой главе** диссертационной работы произведен критический анализ литературных источников, связанных с процессом размола волокнистых полуфабрикатов в производстве ДВП. Изучены исследования различных авторов по влиянию основных технологических и конструктивных параметров процесса размола на размерно-качественные характеристики волокнистых полуфабрикатов. Установлено, что помимо основных факторов размола, первостепенным и определяющим эффективность данного процесса, является конструкция размольной гарнитуры, исследованиям которой, в производстве ДВП до настоящего времени не уделялось должного внимания. Также рассмотрены конструктивные особенности гарнитур ножевых дисковых мельниц и их влияние на процесс размола волокнистых полуфабрикатов, в том числе гарнитуры традиционно используемой при производстве ДВП.

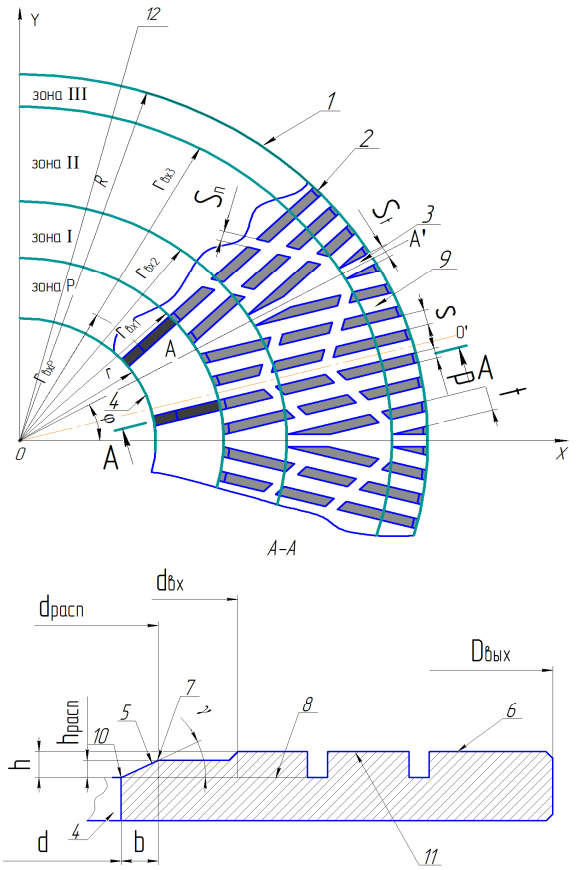
**Во второй главе** диссертационной работы рассматривается:

- теоретическое обоснование построения единичного ножа предлагаемой конструкции размольной гарнитуры на поверхности диска и в целом проектирование рисунка гарнитуры авторского исполнения;
- определение основных технологических параметров гарнитуры: секундной режущей длины, поверхности размола, циклической элементарной длины ножевой гарнитуры в сравнении с традиционной конструкцией;
- определение силовых характеристик при контакте ножей ротора с ножами статора гарнитуры.

Предлагаемая конструкция гарнитуры включает диск ротора и статора, каждый из которых состоит из двенадцати идентичных между собой секторов.

*Построение единичного ножа.*

На рисунке 1 представлен фрагмент гарнитуры дисковой мельницы для теоретического расчета ее конструктивных особенностей (проектирование единичного ножа, расположение ножей по поверхности). 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 и боковой поверхностью 4 внутреннего диаметра кольца 1 и дном 8 ячеек 9, является окружной кромкой 10, на которой расположены вершины углов $\gamma$ (образованных скосом ножей зоны Р и ячеек 9).




1 – кольцо; 2 – нож; 3 – технологическая ячейка; 4 – внутреннее отверстие; 5 – скос ножа; 6 – размалывающая поверхность; 7- входная окружная кромка ножа зоны Р; 8 – дно межножевой ячейки; 9 – межножевая ячейка; 10 – окружная кромка; 11 – режущая кромка; 12 – центр; 13 – выходная окружная кромка.

Рисунок 1 – Фрагмент размольной гарнитуры

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.

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, тем самым повышая пропускную способность мельницы. Плотное расположение ножей 2, которые при пересечении циклично образуют различные углы скрещивания, предположительно сможет обеспечить увеличение основных технологических параметров гарнитуры (секундной режущей длины, размалывающей поверхности, циклической элементарной длины).

В работе для расчёта основных геометрических параметров данной гарнитуры, определялись зависимости, согласно методики, представленной в диссертации (см. с.43-45).

*Основные технологические параметры гарнитуры:* секундная режущая длина (*Ls*, м/с); поверхность размола (*F*, м$^2$); циклическая элементарная длина ($L_{\omega.эл.}$, м); коэффициент интенсивности разработки древесного волокна ($K_p$).

*Определение секундной режущей длины*

Для определения истинного значения секундной режущей длины и количества, одновременно движущихся точек пересечения гарнитуры, использовали программу, разработанную в работах Ю. Д. Алашкевичем, А. А. Набиевой (см. диссертацию, с. 46). Расчет данных параметров в программе производился с учетом геометрических особенностей рисунка гарнитуры. Программа дает возможность определить среднее значение секундной режущей длины (*Ls*), формируемое при вращении ротора относительно статора за один оборот и количество точек пересечения (t) ножей размольной гарнитуры.

*Определение рабочей площади контакта рабочих поверхностей ножей гарнитуры за один оборот ротора*

Площадь контакта размалывающей поверхности ножей ротора с ножами статора определяли по разработанной методике, преобразовав формулу для каждой зоны размола.

*Площадь контакта* равна

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

где $\delta$ – ширина ножа; $L_i$- длина ножа i-ой зоны размола; $n_{пр}$ – количество прорезей ножей в зоне размола; $S_{пр}$ – площадь прорези ножа.

*Секундная площадь контакта* равна произведению суммарной площади контакта ножей и частоты вращения ротора, т. е.

$$F_c = \sum_{i=1}^{i=n} F_{p_i} \cdot \frac{n_Д}{60}. \quad (2)$$

Чтобы определить и оценить изменение площади контакта ножей ротора с ножами статора размольной гарнитуры в динамике, при использовании пакета прикладных программ графоаналитическим методом была определена рабочая размалывающая поверхность гарнитуры при различных углах поворота ротора относительно статора. Для этого были изготовлены прозрачные модели дисков в натуральном масштабе (диссертация, рис.2.4-2.6).

*Определение циклической элементарной длины*

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

$$L_{\omega.эл.i} = \sum_{i=I}^{n=i} \frac{L_{si} \cdot 60}{n \cdot t_i \cdot (2\pi/\psi)}, \text{ м}, \quad (3)$$

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

$$\sum L_{\omega.эл.} = \sum_{i=I}^{n=i} \frac{L_{\omega.эл.I} + L_{\omega.эл.II} + L_{\omega.эл.III}}{N}, \text{ м}, \quad (4)$$

где $L_{\omega.эл.I,II,III}$ – циклическая элементарная длина гарнитуры I, II, III зоны размола, м; N– количество зон размола, шт. (N=3).

В исследованиях авторов, отмечается, что с увеличением количества точек контакта значение циклической элементарной длины уменьшается, что может снизить качество помола, а так же производительность установки. 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 $L_{\omega.эл}$ (диссертация, с.57).

Определение коэффициента интенсивности разработки древесного волокна

Для объективной оценки эффективности гарнитуры, необходимо сопоставление количественных значений технологических параметров процесса размола волокнистых ($Ls$, $L_{\omega.эл}$) с величинами коэффициента укорочения. Ранее в исследованиях, связанных с процессом размола волокнистых полуфабрикатов при производстве ДВП, определение коэффициента укорачивания не обнаружено. В производстве древесноволокнистых плит известен показатель отношения (L/d), который в сравнении с коэффициентом укорачивания по нашему мнению, более объективно может охарактеризовать воздействие ножевой гарнитуры на полуфабрикат при его размоле, определяя интенсивность изменения длины волокна относительно его диаметра. Поэтому с использованием известной методики, преобразовав формулу с учетом отношения L/d, определяли коэффициент интенсивности разработки древесного волокна при его размоле (см. диссертацию, с.58).

$$K_p = \frac{\ln \frac{L/d_0}{L/d}}{ДС_К - ДС_0}, \qquad (5)$$

где $L/d_0$– исходное отношение длины волокна к его диаметру; L/d – необходимое отношение длины волокна к его диаметру после размола; $ДС_0$, $ДС_К$ – степень помола массы соответственно до и после размола.

*Влияние углов скрещивания ножей ротора и статора на основные технологические параметры гарнитуры в процессе размола*

С целью оценки эффективности размольной гарнитуры для размола древесного волокна, определены углы скрещивания ножей и их влияние на формирование технологических параметров, для чего согласно методикам, были выполнены прозрачные модели гарнитуры. Используя пакет прикладных программ, графоаналитическим методом 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.

На основании полученных результатов и сопоставлении данных, можно отметить, что изменение углов скрещивания ножей ротора с ножами статора в значительной степени оказывает влияние на формирование значений технологических параметров размольной гарнитуры (диссертация, рис.2.7).

Расчет и определение технологических параметров гарнитуры с целью объективной их оценки осуществлялись при использовании современного программного обеспечения (Matlab, КОМПАС-3DV16, STATISTICA 6.0).

В таблице 1 представлены результаты расчетов технологических параметров и влияние на них конструктивных особенностей гарнитур различного исполнения при приведенных диаметрах, соответствующих промышленным размерам.

Таблица 1 – Конструктивные особенности и технологические параметры ножевых гарнитур

| *Ширина, мм* | | *глубина ячейки, h, мм* | *Угол, градусы* | | | | *Количество, шт.* | | *Коэффициент интенсивности разработки, (ДС)$^{-1}$* | *Истинное значение секундной режущей длины Ls, м/с* | *Количество точек пересечения, шт.* | | *Циклическая элементарная длина $L_{ω.эл}$, м* | *Поверхность размола всей площади диска F, м$^2$* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *ножа,δ* | *межножевой ячейки,L* | | *уст.1-го ножа ротора, $α_2$* | *уст.1-го ножа статора $α_1$* | *повторяемости рисунка* | *скрещивания* | *секторов π/ψ* | *секторов с повтором рисунка* | | | *на секторе диска* | *полная поверхность диска* | | |
| *Размольная гарнитура, применяемая в производстве ДВП* | | | | | | | | | | | | | | |
| *Традиционная конструкция* | | | | | | | | | *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 конструкция* | | | | | | | | | *Частота вращения ротора 980об/мин* | | | | | |
| *4* | *6* | *6* | *15* | *15* | *30* | *0-27,5* | *6* | *12* | *0,1-0,12* | *136450* | *44* | *528* | *15,65* | *0,06-0,1* |

При определении циклической элементарной длины ($L_{ω.эл}$), как известно (диссертация, с.53), увеличение количества точек пересечения (контактов) ножей ротора с ножами статора влечет за собой большее укорачивание волокон, чем их фибриллирование.

Анализируя результаты расчетов технологических параметров гарнитуры (таблица 1), видно, что для предлагаемой конструкции по сравнению с традиционной гарнитурой характерны меньшее количество точек пересечения ножей (авторское исполнение -528 шт., традиционная -996 шт.) и более высокие значения коэффициента интенсивности разработки волокна (авторское исполнение - 0,1- 0,12, традиционная -0,05-0,06), циклической элементарной длины (авторское исполнение -15,65 м, традиционная -5,59 м), размалывающей поверхности (авторское исполнение - 0,06-0,1 м$^2$, традиционная - 0,03 м$^2$), что свидетельствует о преимущественной эффективности и фибриллирующем воздействии. Традиционная конструкция гарнитуры, используемая в производстве ДВП, не обеспечивает высокие значения технологических параметров и относится к укорачивающему типу. По нашему мнению предлагаемая гарнитура в сравнении с традиционной, в соответствии с представлениями и результатами исследований авторов, позволит подготавливать древесноволокнистый полуфабрикат с разработанной фибриллированной поверхностью, сохраняя исходную длину волокон при производстве ДВП, тем самым повышая физико-механические свойства готовой продукции, и эффективность производства в целом.

*Силовые характеристики при контакте ножей ротора с ножами статора*

Для выяснения и расчета силовых характеристик ножей определяли величину окружной скорости (диссертация, раздел. 2.4). В работе было определено окружное усилие, его нормальные и касательные составляющие, найдены их соотно-

шение между собой, в связи с тем, что нормальные усилия обеспечивают превалирующее разрушение волокон вдоль их оси (фибриллирование), а касательные поперек (укорачивание). На рисунке 2 представлена зависимость окружного усилия от радиуса движущейся точки кромки ножа ротора при контакте с ножом статора. По оси абсцисс проградуировано значения радиуса движущейся точки от центра к периферии.

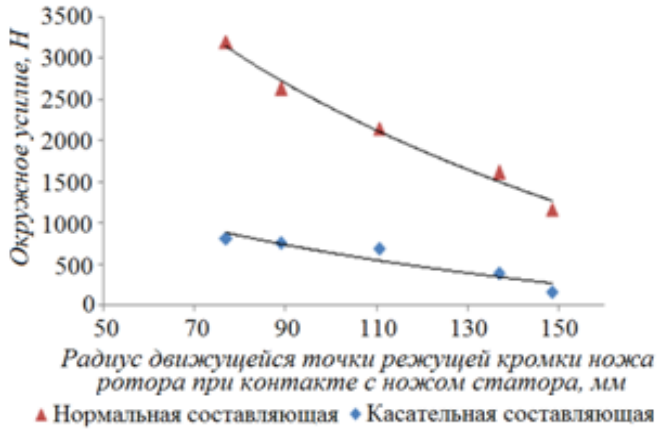



Рисунок 2- Зависимость окружного усилия режущей кромки ножа ротора при контакте с ножом статора

Из рисунка 2, видно, 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.

С целью оценки характера воздействия гарнитуры на древесное волокно, определяли силы трения $Q^p$ и $Q^c$ волокнистого материала о режущие кромки ножей

$$Q^p = Q^c = N_n{}^p (N_n{}^c) \cdot f \,, \tag{6}$$

где $f = tg\varphi$ – коэффициент размола, а $\varphi$ – угол трения волокнистого материала о кромки ножей

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 (диссертация, с.73).В соответствии с теоретическими выкладками обеспечивается разрушение волокон вдоль их оси.

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 (диссертация, с.73), процесс размола интенсифицируется за счёт наиболее оптимального фибриллирующего режима механического воздействия гарнитуры на волокна, что по нашему мнению позволит эффективно подготавливать древесноволокнистый полуфабрикат с необходимыми размерно-качественными характеристики, обеспечивающими высокие физико-механические свойства готовой продукции в производстве ДВП.

**В третьей главе** диссертационной работы представлены: программа и методики экспериментальных исследований, планирование эксперимента, выбраны ос-

новные характеристики моделей; описание промышленных и экспериментальных установок, их характеристика и принцип работы; последовательность реализации эксперимента; результаты эксперимента процесса размола древесного полуфабриката, реализованного на полупромышленной дисковой мельнице МД на базе лаборатории кафедры МАПТ СибГУ с использованием разработанной конструкции гарнитуры, а также результаты полученной готовой плитной продукции из него, при всех прочих равных условиях производства ДВП мокрым способом.

Общий вид конструкции гарнитуры (авторское исполнение) для проведения экспериментальных исследований представлен на рисунке 3.

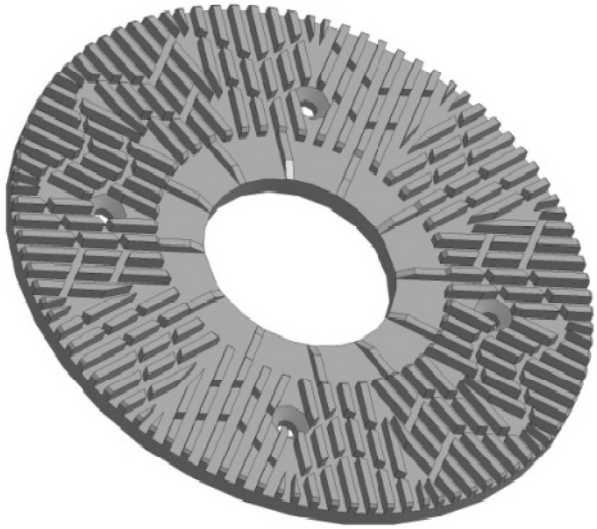


Рисунок 3- Конструкция гарнитуры (авторское исполнение)

Ряд экспериментов по качественным показателям процесса размола проводились в промышленных условиях центральной лаборатории завода ДВП предприятия Segezha group ОАО «Лесосибирский ЛДК №1». Также при реализации эксперимента использовались данные предприятия по качественным характеристикам древесного волокна после первой ступени размола (дефибратор RT-50), и данные после второй ступени (рафинатор RR-70) для дальнейшего сопоставления результатов исследований.

На основании анализа результатов серии предварительных исследований были определены входные факторы, их диапазоны и уровни варьирования с целью реализации многофакторного эксперимента. В связи с тем, что в промышленности при получении древесного волокна на дефибраторе, степень его разработки имеет нестабильный характер и может колебаться в диапазоне 10,5-13,5 ДС, нашей задачей явилось установить его оптимальное значение для наиболее эффективного процесса размола в рафинаторе. Исследования процесса размола проводились для древесного волокна с различной степенью его разработки после дефибратора $К_д$, имеющего следующие качественные характеристики:

-**$К_{д1}$**($ДС_{д1}$=10,5 ДС;$Fbr_д$=18 %;$Lcp_{д1}$=8,57 мм; $dcp_{д1}$=0,32 мм;$L/d_{д1}$=26,6;$В_{Кд1}$=48 %;$В_{Сд1}$=32 %; $В_{Мд1}$=20 %);
-**$К_{д2}$**($ДС_{д2}$=12 ДС; $Fbr_д$=20 %; $Lcp_{д2}$=6,85 мм; $dcp_{д2}$=0,25 мм; $L/d_{д2}$=27,6; $В_{Кд2}$=40 %; $В_{Сд2}$=38 %; $В_{Мд2}$=22 %);
-**$К_{д3}$**($ДС_{д3}$=13,5 ДС; $Fbr_д$=22 %; $Lcp_{д3}$=5,13 мм; $dcp_{д3}$=0,18 мм; $L/d_{д3}$=28,6; $В_{Кд3}$=32 %; $В_{Сд3}$=44 %; $В_{Мд3}$=24 %).

В качестве входных параметров эксперимента были выбраны: величина рабочего зазора (z), концентрация древесноволокнистой массы (с), степень помола после дефибратора $К_д$ ($ДС_д$). Структурная схема проведения трехфакторного эксперимента представлена на рисунке 4.

В работе был спланирован и реализован трехфакторный эксперимент, получено математическое описание процесса размола волокнистого полуфабриката, позволяющее оценить влияние входных параметров при использовании разрабо-

танной 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 (диссертация, раздел 3.2). В таблицах 2, 3 приведены входные и выходные факторы, уровни и интервалы варьирования эксперимента.

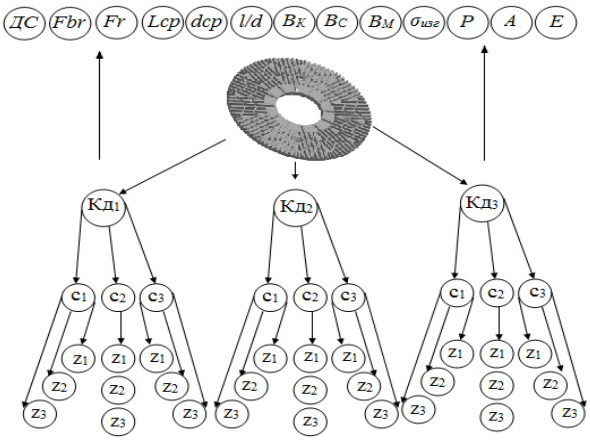



Рисунок 4 – Структурная схема проведения эксперимента

Таблица 2 – Входные и выходные параметры эксперимента

| Параметр | Обозначение | |
|---|---|---|
| | натуральное | нормализованное |
| Входные параметры (управляемые факторы) | | |
| Величина рабочего зазора, мм | z | $X_1$ |
| Концентрация древесноволокнистой массы, % | c | $X_2$ |
| Степень помола (дефибратор), ДС | $К_д$ ($ДС_д$) | $X_3$ |
| Выходные параметры (контролируемые факторы) | | |
| Степень помола древесноволокнистого полуфабриката, ДС | ДС | $Y_1$ |
| Степень фибриллирования волокнистого полуфабриката, % | Fbr | $Y_2$ |
| Средняя длина волокна, мм | Lcp | $Y_4$ |
| Средний диаметр волокна, мм | dcp | $Y_5$ |
| Отношение длинны волокна к его диаметру | L/d | $Y_6$ |
| Содержание крупной фракции волокон в общей массе, % | $B_К$ | $Y_7$ |
| Содержание средней фракции волокон в общей массе, % | $B_С$ | $Y_8$ |
| Содержание мелкой фракции волокон в общей массе, % | $B_М$ | $Y_9$ |
| Предел прочности твердой ДВП при статическом изгибе, МПа | $\sigma_{изг}$ | $Y_{10}$ |
| Плотность твердой древесноволокнистой плиты, кг/м$^3$ | P | $Y_{11}$ |
| Водопоглощение твердой ДВП за 24 ч, % | A | $Y_{12}$ |
| Удельный расход электроэнергии на размол, кВт·ч/ΔДС·т | E | $Y_{13}$ |

Таблица 3 - Уровни и интервалы варьирования исследуемых факторов для трехфакторного эксперимента

| Фактор | Обозначение | | Интервал варьирования фактора | Уровень варьирования фактора | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | натуральное | нормализованное | | - 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 | $К_д$ ($ДС_д$) | $X_3$ | 1,5 | 10,5 | 12 | 13,5 |

Процесс размола древесноволокнистого полуфабриката при производстве ДВП мокрым способом представлен регрессионными зависимостями в виде

$$ДС, Fbr, Lcp, dcp, L/d, B_К, B_С, B_М, \sigma_{изг}, P, A, E = f(К_д\ (ДС_д), c, z) \quad (7)$$

Результаты эксперимента обрабатывались при использовании пакета программ «STATISTICA-6» с применением метода Квази-Ньютона. В ходе обработки экспериментальных исследований получены статистически-математические модели, описывающие исследуемый процесс и позволяющие установить количественные зависимости размерно-качественных характеристик волокнистого полуфабриката, подготовленного при использовании новой конструкции гарнитуры и физико-механических свойств готовой древесноволокнистой плиты от технологических и конструктивных параметров процесса размола. Полученные модели адекватны при доверительной вероятности 95 – 99 %. Величина достоверности аппроксимации близка к единице. Оценка значимости коэффициентов, входящих в модели проводилась в соответствии с методикой, при помощи t-критерия Стьюдента. 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 (диссертация, с.90).

По результатам экспериментальных исследований получены регрессионные зависимости по нашему мнению, позволяющие оценить влияние входных параметров процесса размола на все исследуемые выходные параметры размерно-качественных характеристик древесноволокнистого полуфабриката и физико-механических свойств готовых плит из него, а также прогнозировать значения их качественных показателей (диссертация, с.116). В качестве примера представлены следующие статистически-математические модели в виде уравнений регрессий:

$$ДС, Fbr, L/d, Вк, B_С, B_М, \sigma_{изг} = f(К_д\ (ДС_д), c, z).$$

*Размерно-качественные характеристики древесноволокнистого полуфабриката:*

$$ДС = -140{,}78 + 26{,}7 \cdot z + 22{,}56333 \cdot К_д(ДС_д) + 19{,}71 \cdot c - 235 \cdot z^2 - 0{,}9056 \cdot К_д(ДС_д)^2 - 1{,}35 \cdot c^2 + 3 \cdot z \cdot К_д(ДС_д) - 17 \cdot z \cdot c - 0{,}7 \cdot К_д(ДС_д) \cdot c \quad (7)$$

$$Fbr = -1165{,}65 + 1044{,}25 \cdot z + 182{,}5083 \cdot К_д(ДС_д) + 92{,}825 \cdot c - 5587{,}5 \cdot z^2 - 7{,}5417 \cdot К_д(ДС_д)^2 - 5{,}875 \cdot c^2 + 10{,}83333 \cdot z \cdot К_д(ДС_д) - 57{,}5 \cdot z \cdot c - 3{,}5833 \cdot К_д(ДС_д) \cdot c \quad (8)$$

$$Вк = -183{,}38 - 144{,}25 \cdot z + 28{,}715 \cdot К_д(ДС_д) + 37{,}305 \cdot c + 672{,}5 \cdot z^2 - 1{,}1194 \cdot К_д(ДС_д)^2 - 3{,}275 \cdot c^2 + 5{,}1667 \cdot z \cdot К_д(ДС_д) - 34{,}5 \cdot z \cdot c - 1{,}1167 \cdot К_д(ДС_д) \cdot c \quad (9)$$

$$Вс = -30{,}57 + 29{,}45 \cdot z + 12{,}14167 \cdot К_д(ДС_д) - 3{,}335 \cdot c - 767{,}5 \cdot z^2 - 0{,}6083 \cdot К_д(ДС_д)^2 - 1{,}475 \cdot c^2 + 4{,}16667 \cdot z \cdot К_д(ДС_д) + 12{,}5 \cdot z \cdot c + 1{,}15 \cdot К_д(ДС_д) \cdot c \quad (10)$$

$$Вм = -114{,}89 - 138{,}3 \cdot z + 19{,}36 \cdot К_д(ДС_д) + 26{,}52 \cdot c + 500 \cdot z^2 - 0{,}733 \cdot К_д(ДС_д)^2 - 1{,}2 \cdot c^2 + 6{,}334 \cdot z \cdot К_д(ДС_д) - 29 \cdot z \cdot c - 1{,}133 \cdot К_д(ДС_д) \cdot c \quad (11)$$

$$L/d = -1125{,}6 + 883{,}1 \cdot z + 172{,}3367 \cdot К_д(ДС_д) + 112{,}41 \cdot c - 5555 \cdot z^2 - 6{,}95 \cdot К_д(ДС_д)^2 + 1{,}65 \cdot c^2 + 37 \cdot z \cdot К_д(ДС_д) - 141 \cdot z \cdot c - 6{,}7 \cdot К_д(ДС_д) \cdot c \quad (12)$$

*Физико-механические свойства плиты ДВП:*

$$\sigma_{изг} = -269{,}3 + 154{,}35 \cdot z + 41{,}895 \cdot К_д(ДС_д) + 47{,}065 \cdot c - 937{,}5 \cdot z^2 - 1{,}6639 \cdot К_д(ДС_д)^2 - 4{,}575 \cdot c^2 + 2{,}5 \cdot z \cdot К_д(ДС_д) - 10{,}5 \cdot z \cdot c - 1{,}5167 \cdot К_д(ДС_д) \cdot c \quad (13)$$

Анализируя графики на рисунках 5,6 стоит отметить, что независимо от входной степени помола после дефибратора Кд ($ДС_д$) влияние рабочего зазора (z) и концентрации массы (c) на размерно-качественные характеристики волокнистого полуфабриката

и прочностные свойства плиты имеют аналогичный качественный характер, однако при Кд ($ДС_д$)=10,5-12 ДС наблюдается более интенсивное изменение значений показателей. Из рисунка 5 видно, что при c≈2,5 %, Кд ($ДС_д$)≈10,5-12 ДС, с увеличением рабочего зазора до значений z≈0,08-0,1 мм в результате уменьшении удельного давления и режущего воздействия ножей гарнитуры несколько снижается прирост степени помола полуфабриката (ДС)≈18,5-19,5 ДС, однако при этом наблюдается увеличение показателя среднего значения фибриллированных волокон (Fbr)≈65-73 %, увеличивается отношение их длины к диаметру (L/d)≈55,5-68,2 - обеспечивается эффективная разработка, разделение и расщепление волокон преимущественно в продольном направлении. Улучшается фракционный состав полуфабриката за счет увеличения содержания в общей массе средней фракции (Вс)≈46-49 %, крупной фракции (Вк)≈22-26 %, уменьшения доли мелкой фракции (Вм)≈28-29,5 % волокон. В целом улучшается качество волокнистого полуфабриката, обуславливая повышение прочностных свойств готовой плитной продукции - $\sigma_{изг}$≈42,5-44 МПа.

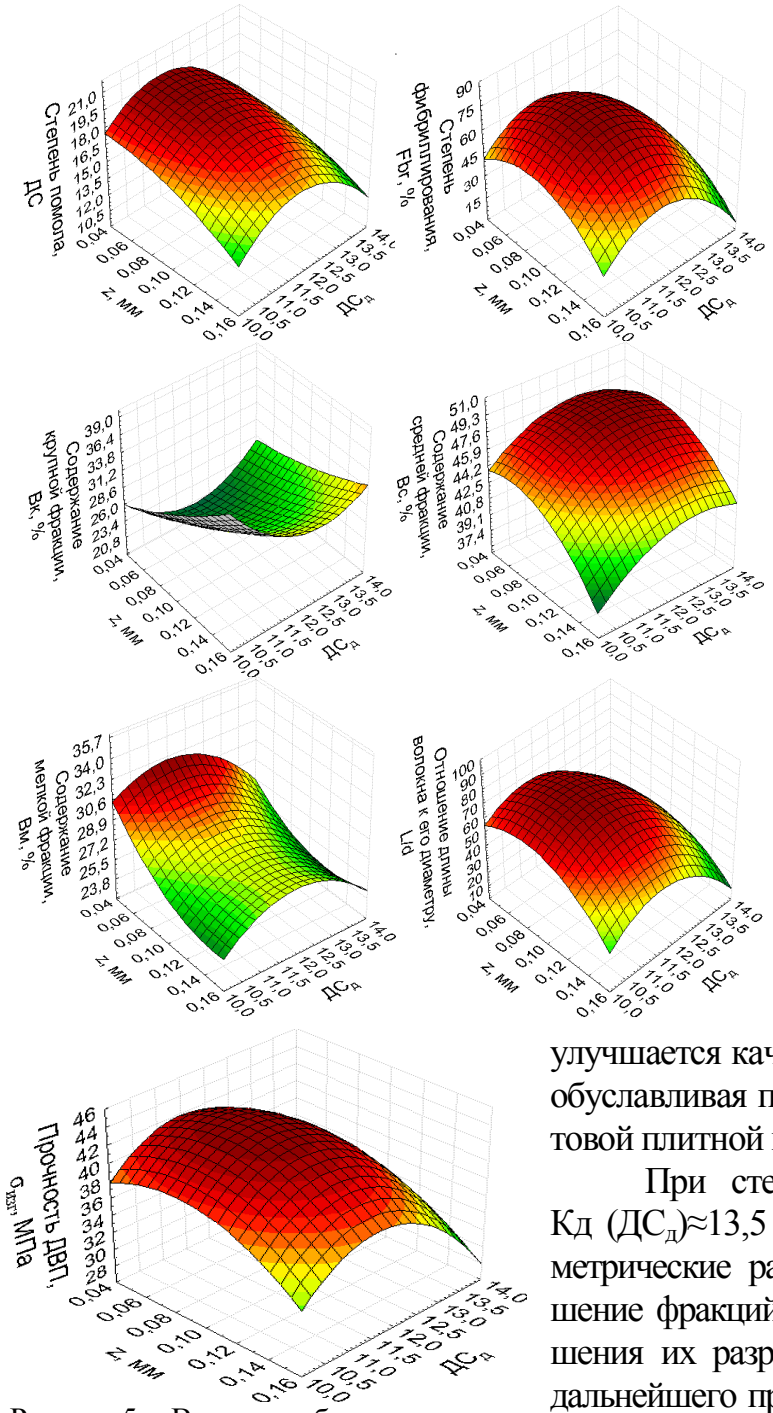






Рисунок 5 – Влияние рабочего зазора на размерно-качественные характеристики полуфабриката и прочность ДВП

При степени помола после дефибратора Кд ($ДС_д$)≈13,5 ДС, значительно уменьшаются геометрические размеры древесных волокон, соотношение фракций в общем массе, в результате повышения их разработки, что снижает интенсивность дальнейшего процесса размола и ограничивает рост значений качественных показателей полуфабриката - ДС=16-16,5 ДС; Fbr=45-47 %; L/d=36-36,6; Вк=26-27 %; Вс=47,7-47,8 %; Вм=25,3-26 %, и соответственно прочностные свойства плиты - $\sigma_{изг}$≈37-37,7 МПа. Средняя фракция (Вс) состоит преимущественно из достаточно длинных и тонких, хорошо разработанных (фибриллированных) волокон, с высоким отношением L/d, что способствует развитию прочных межволоконных связей в древесноволокнистом ковре, обеспечивая

структурообразование и увеличивая в целом удельную поверхность контактов в плите. Соответственно увеличение доли таких волокон и их преимущественное содержание в общей массе, при наличии мелких волокон до ≈30-32 %, положительно сказывается на качестве полуфабриката и прочностных свойствах плиты. При дальнейшем увеличении (z) ожидаемо улучшение прочностных свойств, однако в производстве ДВП значения качественных показателей плиты в частности ее прочность имеют тенденцию к снижению. Это можно объяснить тем, что при достижении требуемой степени разработки волокнистого полуфабриката в процессе его размола, древесные волокна не успевают обработаться должным образом, чтобы обеспечить прочные межволоконные связи, в общей массе возрастает доля волокон крупной фракции (Вк), при уменьшении средней (Вс) и мелкой (Вм) фракций, в целом ухудшается фракционный состав, наблюдается тенденция к снижению качества полуфабриката и соответственно готовых плит.

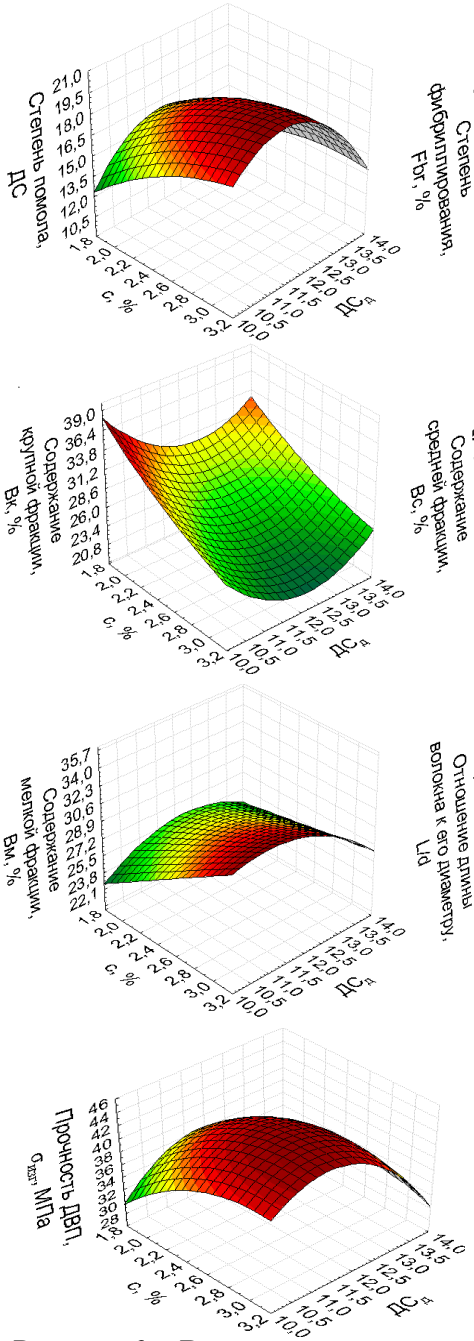



Рисунок 6 – Влияние концетрации массы на размерно-качественные характеристики полуфабриката и прочность ДВП

Из рисунка 6, видно, что при рабочем зазоре (z)≈0,1 мм и степени помола после дефибратора Кд(ДСд)≈10,5-12 ДС, с увеличением концентрации древесноволокнистой массы (с)≈2,8-3 %, повышается степень помола полуфабриката (ДС)≈19,5-20,5 ДС в результате более интенсивного истирания пучков волокон и отдельных волокон друг о друга и расщепления их вдоль оси, увеличивается показатель средней фибриллированности (Fbr)≈74-80 %, отношение длины волокон к их диаметру (L/d)≈80-93. Повышение толщины прослойки в зазоре между ножами гарнитуры, обеспечивает щадящий размол, и преимущественное увеличение доли (Вс)≈47-50 % волокон, несколько возрастает содержание (Вм)≈29-30 %, что является следствием измельчения (Вк)≈21-24 %, в целом улучшается фракционный состав и качество полуфабриката, обеспечивая повышение прочности ДВП ($\sigma_{изг}$)≈44,5-45,2 МПа.

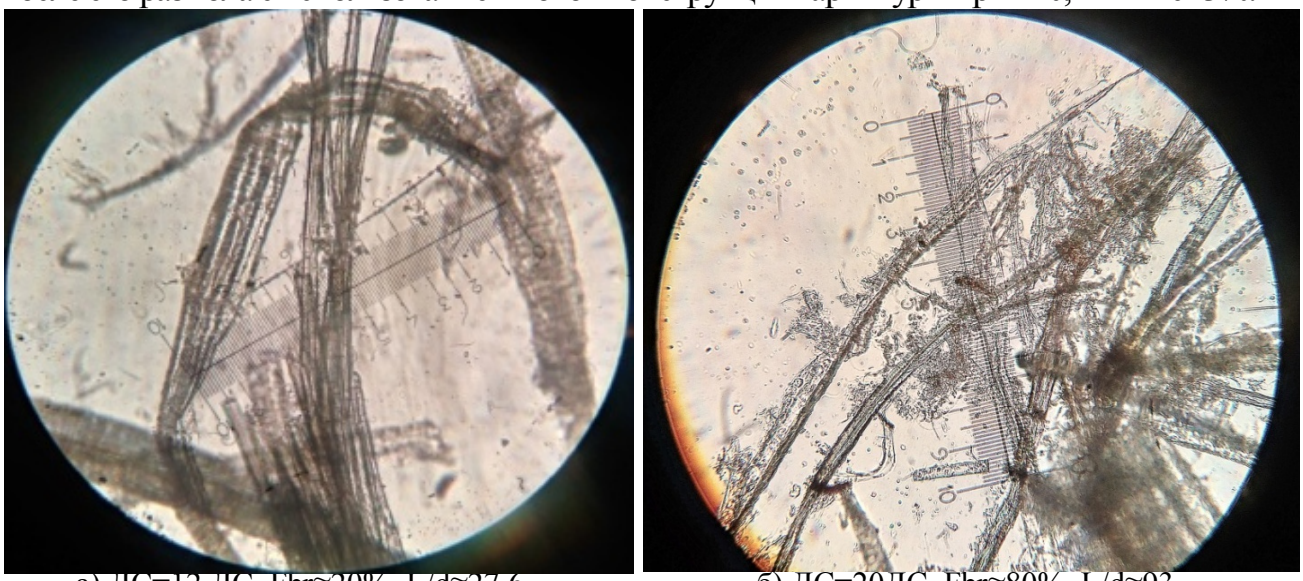
При увеличении Кд(ДСд)≈13,5 ДС снижается интенсивность роста качественных

показателей полуфабриката - ДС=16,5-16,7 ДС; Fbr=44-45 %; L/d=42-45,8; Вк=24,1-25 %; Вс=49-50 %; Вм=25,3-25,5 %, соответственно и прочность плиты - $\sigma_{изг}$≈37,7-38 МПа.

Таким образом, можно заключить, что увеличение рабочего зазора и концентрации массы в процессе размола, способствует сохранению длины древесных волокон. Наилучшие результаты наблюдаются при степени разработки древесного волокна после дефибратора в пределах Кд (ДСд)≈10,5-12 ДС, достигается наибольшая эффективность процесса размола, улучшается качество полуфабриката в целом. Происходит снижение содержания перерубленных волокон, повышаются значения показателя среднего фибриллирования волокон (Fbr), свидетельствуя о высоком образовании межволоконных связей, в результате интенсивной разработки волокон, разделении их преимущественно вдоль своей оси (фибриллировании) - увеличивается показатель отношения длины волокон к их диаметру (L/d), обуславливая гибкость, эластичность волокон и преимущественное содержание средней фракции (Вс) в общей массе полуфабриката (диссертация, раздел 3.3)., обеспечивая хорошее переплетение волокон между собой при формовании древесноволокнистого ковра, следовательно, и повышение физико-механических свойств готовых плит ДВП.

Анализ результатов показал, что показатели физико-механических свойств (диссертация, п. 3.4.2), соответствующие требованиям плиты ГОСТ 4598-2018, обеспечиваются размерно-качественными характеристиками древесноволокнистого полуфабриката практически во всем диапазоне изменения входных параметров процесса размола, однако свойства плиты группы А достигаются при: z≈0,05-0,15 мм; с≈2,5-3%, Кд (ДС)≈10,5-12 ДС.

На рисунке 7 в качестве примера представлены фотографии древесного волокна до и после его размола с использованием новой конструкции гарнитуры при z=0,1 мм и с=3%.



а) ДС=12 ДС, Fbr≈20%, L/d≈27,6 б) ДС=20ДС, Fbr≈80%, L/d≈93

Рисунок 7 – Древесное волокно после дефибратора до и после размола (увеличение 120 крат)

Из фотографии, представленной на рисунке 9 видно, что до размола (рисунок 7 а) можно наблюдать значительное количество неразмолотых пучков, грубых недостаточно хорошо разработанных волокон.

В свою очередь, фотография наглядно демонстрирует, что после размола при концентрации древесноволокнистой массы 3 % и величине рабочего зазора 0,1 мм (рисунок 7 б) полуфабрикат содержит волокна, интенсивно расщепленные преимущественно вдоль своей оси, их фибриллирование, частичное разрушение

первичных и вторичных стенок клетки, наблюдается отсутствие неразмолотых, грубых волокон «спичек», наличие которых отрицательно сказывается на процессе формования ковра и качестве готовых плит.

Для подтверждения экспериментальных данных в таблице 4 представлены теоретические зависимости при сравнении результатов процесса размола на гарнитуре авторского исполнения и традиционной гарнитуре.

Таблица 4 – Сравнение результатов процесса размола древесноволокнистого полуфабриката на различных видах гарнитур

| Конструкция | Технологический параметр | | | Размерно-качественные характеристики волокнистого полуфабриката | | | | | | | Физико-механические свойства ДВП | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $L_{ω.эл}$, м | F, м$^2$ | t, шт. | степень помола, ДС | крупная фракция, $B_К$, % | средняя фракция, $B_С$, % | мелкая фракция $B_М$, % | средняя длина волокон, Lср, мм | средний диаметр волокон, dср, мм | отношение длины волокна к его диаметру, L/d | прочность ($σ_{изг}$), МПа | плотность (Р), кг/м$^3$ |
| Предлагаемая | 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 |
| Традиционная | 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 4, 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, м$^2$) – предлагаемая (0,06-0,1), традиционная (0,03); величина циклической элементарной длины ($L_{ω.эл}$, м) - предлагаемая (15,56), традиционная (5,59), при снижении (практически в два раза) количества точек контактов ножей ротора с ножами статора (t, 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 (Вс, %) - предлагаемая (47-50), традиционная (26-27), при снижении крупной фракции (Вк, %) - предлагаемая (21-23), традиционная (28-30) и мелкой фракции (Вм, %) - предлагаемая (28-31), традиционная (44-45). Улучшаются качественные показатели полуфабриката в целом, наблюдается более интенсивное (в два-три раза) снижение диаметра волокон (dср, мм) - предлагаемая (0,05-0,06), традиционная (0,12-0,13), чем их длины (Lср, 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 ($σ_{изг}$≈44-45 МПа) и плотности (Р≈925-930 кг/м$^3$), что

соответствует ГОСТ 4598-2018 Группа А I сорта, в отличие использование традиционной конструкции гарнитуры обеспечивает прочность ($\sigma_{изг}$≈35-36 МПа) и плотность (Р≈860-865 кг/м$^3$) 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.

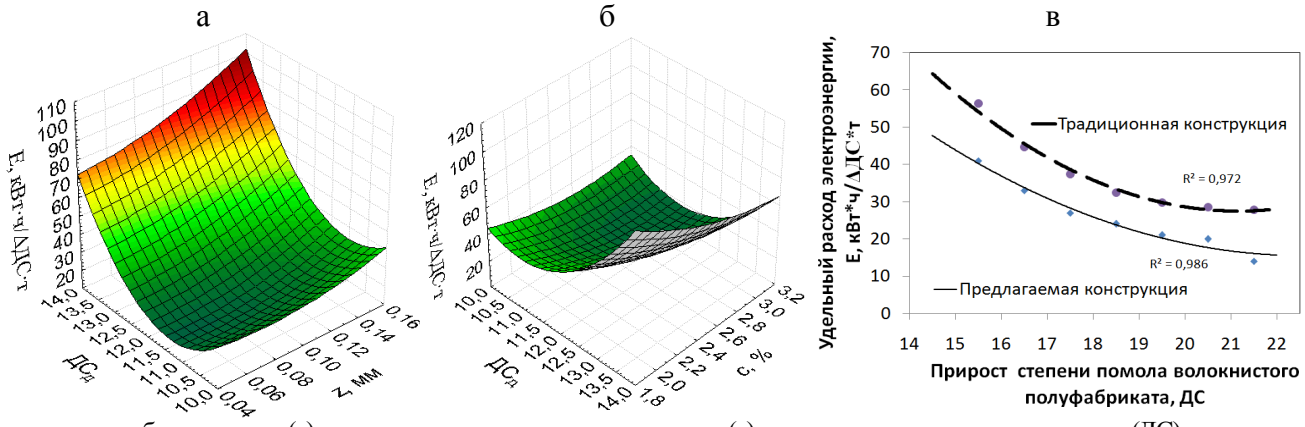
Согласно теоретическим данным (см. с.9, рис.2) для конструкции авторского исполнения - нормальные составляющие имеют большие значения, чем касательные, что может подтверждать возможность разработки древесных волокон в направлении их фибриллирования. В результате, в общей массе полуфабриката преобладает 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.

**В четвертой главе** диссертации в качестве практической реализации результатов научной работы с целью возможности эффективного использования научно-обоснованной конструкции гарнитуры (авторское исполнение) в производстве ДВП мокрым способом при оптимальных условиях ее эксплуатации 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.

*Оценка удельного расхода электроэнергии.* В ходе реализации эксперимента при варьировании исследуемых параметров процесса размола согласно плану эксперимента фиксировался удельный расход электроэнергии. В результате обработки данных получено статистически-математическое описание в виде регрессионной зависимости:

$$E=961{,}95 - 684{,}55\cdot z - 155{,}768\cdot К_д(ДС_д) - 22{,}035\cdot c + 1172{,}5\cdot z^2 + 7{,}4472\cdot К_д(ДС_д)^2 + 13{,}925\cdot c^2 + 43{,}833\cdot z\cdot К_д(ДС_д) + 34{,}5\cdot z\cdot c - 5{,}9167\cdot К_д(ДС_д)\cdot c \quad (14)$$




от рабочего зазора (z) от концентрации массы (c) от степени помола (ДС)

Рисунок 8 – Влияние процесса размола на удельный расход электроэнергии

Как видно из рисунка 8 а, при увеличении рабочего зазора (z) между ножами ротора и статора повышается удельный расход электроэнергии, затрачиваемый на процесс размол, а при повышении концентрации массы (с) (рисунок 8 б) наблюдается его снижение. Также можно наблюдать, что качественный характер изменения сохраняется при различной степени помола после дефибратора Кд (ДСд), однако при ее поддержании в пределах Кд (ДСд)≈10,5-12ДС энергозатраты на размол имеют наименьшие значения.

Из рисунка 8 в видно, что по мере увеличения степени помола - удельный расход электроэнергии имеет тенденцию к снижению, при этом использование новой конструкции гарнитуры обеспечивает снижение энергозатрат в сравнении традиционной гарнитурой в среднем на ≈20-25% в результате эффективного фибриллирующего воздействия, обеспечивающего более интенсивную и качественную разработку древесного волокна (диссертация, раздел 4.1).

*Оптимизация процесса размола.* Для решения задачи оптимизации качества древесноволокнистого полуфабриката и режимов процесса размола при эксплуатации новой конструкции размольной гарнитуры в производстве ДВП, на основании результатов экспериментальных исследований, сформирован обобщенный показатель качества (Пкв), который определяется и регулируется составлением математической модели, где в качестве целевой функции *(f)* выступает требование максимизации качественных характеристик, обуславливающих в совокупности показатель качества древесноволокнистого полуфабриката (диссертация, раздел 4.2). Поэтому в модель оптимизации вводится система ограничений режимных параметров, изменяющихся в установленных пределах, размерно-качественных характеристик полуфабриката и физико-механических свойств готовой продукции согласно ГОСТ 4598-2018, а также условие минимизации удельного расхода электроэнергии на размол. Все приведенные ограничения и целевая функция носят нелинейный характер. Данная оптимизационная задача относится к классу задач нелинейного программирования.

Математическая модель задачи оптимизации качества древесноволокнистого полуфабриката в процессе его размола в производстве ДВП будет иметь вид:

$$f = \text{Пкв}(\text{ДС}, \text{Fbr}, \text{Bc}, \text{L/d}, \text{Lcp}(К_д(\text{ДС}_д); z; c)) \rightarrow max$$

$$\begin{cases} z_{min} \le z \le z_{max}; \\ К_д(\text{ДС}_д)_{min} \le К_д(\text{ДС}_д) \le К_д(\text{ДС}_д)_{max}; \\ c_{min} \le c \le c_{max}; \\ \text{ДС} \ge 18\text{ДС} \\ \text{Bc} \ge 47\ \% \\ \text{L/d} \ge 60 \\ \text{Lcp} \ge 4\text{мм} \\ E \rightarrow min; \\ \sigma_{изг} \ge 43\text{МПа}; \\ 1100 \ge P \ge 850\ \text{кг/м}^3; \\ A \le 20\ \%; \end{cases}$$

Решение этой задачи позволило определить оптимальные значения размерно-качественных характеристик, обуславливающих показатель качества полуфабриката Пкв=0,7 (ДС=20,2 ДС; Fbr=80 %; Lcp=4,29 мм; L/d=93,3; Bc=49,7 %), и при этом физико-механические свойства плиты: $\sigma_{изг} \approx 45{,}2$ МПа; $P \approx 938{,}2$ кг/см$^3$; $A \approx 16{,}9$ %, обеспечивающиеся при использовании предложенной конструкции размольной гарнитуры и установлении режимных параметров процесса размола, которые при данных условиях производства составят: Кд (ДСд)=12 ДС; z=0,1 мм; с=3 %. Удельный расход электроэнергии на размол при этом будет Е=18 кВт·ч/ΔДС·т.

Пкв 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<Пкв<0,32; плита группы А - 0,33 <Пкв<0,66; плита группы А с повышенной прочностью - 0,67<Пкв<1 (диссертация, табл.4.1).

*Оценка экономической эффективности* показала, что 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; уменьшить затраты на обслуживание размалывающих машин; повысить эффективность процесса размола древесноволокнистого полуфабриката и его качественные характеристики, позволяющие изготавливать готовую продукцию высокого качества, экологически чистые плиты ДВП без применения дополнительного связующего согласно ГОСТ 4598-2018, что не обеспечивается при использовании традиционной гарнитуры. В результате эксплуатации предлагаемой размольной гарнитуры и оптимизации этого процесса годовая прибыль предприятия увеличится на 8,6 млн руб. (диссертация, раздел 4.3).

**Выводы по диссертации**

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 – *Ls*=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 м$^2$; коэффициента интенсивности разработки волокна – Кр=0,1-0,12), позволяющих характеризовать ее высокую эффективность в сравнении с традиционной конструкцией (*Ls*=91072 м/с; t=996 шт.; $L_{\omega.эл.}$=5,59 м; F=0,03 м$^2$; Кр=0,05-0,06).

4. Определены силовые характеристики ножей ротора при контакте с ножами статора. В результате установлено, что динамика и цикличное изменение углов скрещивания ножей ($\alpha_{скр}$=0-27,5°) 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 Вс (до ≈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 %; средняя длина волокна (Lcp)=4,29 мм; отношение длины волокна к его диаметру (L/d)=93,3; содержание волокон средней фракции (Вс)=49,7 % и параметры процесса размола – величина рабочего зазор (z)=0,1 мм; концентрация древесноволокнистой массы (с)=3 %, степень помола после дефибратора (Кд(ДСд))=12 ДС, обеспечивающие его высокую эффективность и необходимые качественные показатели плиты ДВП – прочность ($\sigma_{изг}$)≈ 45,2 МПа; плотность (Р)≈938,2 кг/см$^3$; водопоглощение за 24 ч (А)≈16,9 % при сниженном удельном расходе электроэнергии на размол (Е)=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 8,6 млн руб. в год.

**Основное содержание диссертации отражено в следующих работах:**

**Статьи в журналах, индексируемых базой Scopus:**

1 Evaluation of possibility of obtaining woodchips from wood residues / А. Ю. Вититнев и [др.] // Journal of Applied Engineering Science. – 2019. Vol.17. – № 2 – С. 140-143, автора – 0,063 п.л.

2 Optimization of recycling strategy for solid industrial waste / А. Ю. Вититнев и [др.] // IOP Conference series: materials science and engineering. – 2018. – Vol. 450. – doi:10.1088/1757-899X/450/6/062016, автора – 0,06 п.л.

**Статьи в журналах, рекомендованных ВАК:**

3 Совершенствование рабочих органов размольных установок для получения древесноволокнистых материалов / А. Ю. Вититнев, Н. Г. Чистова, Ю. Д. Алашкевич, В. А. Якимов // В мире научных открытий. – 2015. – Т. 68, № 8.2. – С. 833-847, автора – 0,24 п.л.

4 Совершенствование оборудования для создания новой, более чистой технологии подготовки древесноволокнистой массы / А. Ю. Вититнев, Н. Г. Чистова, Н. В. Аксенов, И. М. Морозов // В мире научных открытий. – 2015. – Т. 72, № 12.3. – С. 854-865, автора – 0,19 п.л.

5 Пат. № 160973. Российская Федерация, МПК51D21D1/02, 2006.1. Размольная гарнитура дисковой мельницы [Текст] / Вититнев А. Ю., Чистова Н. Г, Алашкевич Ю. Д., Зырянов М. А., Кожевников А. К.; заявитель и патентообладатель: Сибир. госуд. технолог. ун-т № 2015118105/12.; заявл. 14.05.2015; опубл. 10.04.2016, Бюл. №10.

6 Пат. № 2 652 177. Российская Федерация, СПК B02C7/12 D21D1/30. Размольная гарнитура дисковой мельницы [Текст] / Вититнев А. Ю., Чистова Н. Г, Алашкевич Ю. Д., Дирацуян А. А.; заявитель и патентообладатель: СибГУ им. М. Ф. Решетнева. ун-т № 2016119218. ; заявл. 17.05.2016; опубл. 25.04.2018, Бюл. №12.

**Материалы конференций:**

7 Вититнев, А. Ю. Влияние рисунка ножевой размольной гарнитуры на качество получаемого древесноволокнистого полуфабриката в производстве ДВП / А. Ю. Вититнев, Н. Г. Чистова // Молодые ученые в решении актуальных проблем науки: материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. – Красноярск : СибГТУ, 2015. – Т. 1. – С. 208-211, автора – 0,125 п.л.

8 Вититнев, А. Ю. Размольная гарнитура для обработки древесноволокнистых материалов / А. Ю. Вититнев, Н. Г. Чистова // В мире научных открытий: материалы IV Всерос. студ. науч. конф. с междунар. участием. – Ульяновск : ГСХА им. П.А.Столыпина, 2015. – Т. 1. – С. 40-42, автора – 0,095 п.л.

9 Вититнев, А. Ю. Совершенствование рисунка гарнитуры ножевых размалывающих машин / А. Ю. Вититнев, Ю. Д. Алашкевич, Н. Г. Чистова // Новейшие достижения в области инновационного развития в химической промышленности и производстве строительных материалов: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Минск : БГТУ, 2015. – С. 355-358, автора – 0,083 п.л.

10 Вититнев, А. Ю. К вопросу о совершенствовании процесса подготовки древесноволокнистых полуфабрикатов / А. Ю. Вититнев, Ю. Д. Алашкевич, Н. Г. Чистова // Лесной и химический комплексы – проблемы и решения: материалы Всерос. науч.-практ. конф. – Красноярск : СибГТУ, 2015. – Т. 1. – С. 279-283, автора – 0,104 п.л.

11 Вититнев, А. Ю. Расчет циклической элементарной длины ножевой гарнитуры в производстве ДВП / А. Ю. Вититнев, Ю. Д. Алашкевич, Н. Г. Чистова // Лесной и химический комплексы – проблемы и решения: материалы Всерос. науч.-практ. конф. – Красноярск : СибГАУ имени М.Ф. Решетнева, 2016 г. – Т.1. – С. 253-257, автора – 0,104 п.л.

12 Вититнев, А. Ю. Зависимость технологических параметров дисковой размольной гарнитуры от углов скрещивания ножей ротора и статора / А. Ю. Вититнев, Ю. Д. Алашкевич, Н. Г. Чистова // Новые достижения в химии и химической технологии растительного сырья: материалы VII Всерос. конф. – Барнаул : Изд-во Алт. ун-та, 2017. – С. 371-373, автора – 0,063 п.л.

Сдано в печать .09.2019 Формат 60x84 1/16.

Объем 1,0 п.л. Тираж 100 экз. Изд. №____Заказ №____

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
660049, г. Красноярск, пр. им. газеты Красноярский рабочий, 31
Редакционно-издательский центр
Тел. (391) 227-69-90