

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СЕВЕРНОГО ЗАУРАЛЬЯ»

О. А. Фомина, С. В. Фокин

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ
ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ
ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ТОПЛИВНОЙ ЩЕПЫ
ИЗ ОТХОДОВ ЛЕСОЗАГОТОВОК**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Государственный аграрный университет Северного Зауралья»

О. А. Фомина, С. В. Фокин

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ
ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ
ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ТОПЛИВНОЙ ЩЕПЫ
ИЗ ОТХОДОВ ЛЕСОЗАГОТОВОК**

Монография

Текстовое (символьное) электронное издание

Редакционно-издательский отдел ФГБОУ ВО ГАУ Северного Зауралья
Тюмень 2023

© О. А. Фомина, С. В. Фокин, 2023
© ФГБОУ ВО ГАУ Северного Зауралья, 2023

ISBN 978-5-98346-152-9

УДК 674.059:621.9

ББК 37.130

Рецензенты:

заместитель директора, АО «Тюменский научно-исследовательский и проектный институт лесной и деревообрабатывающей промышленности «НИИПлесдрев», кандидат технических наук В. Б. Семёнова;

доцент кафедры лесного хозяйства, деревообработки и прикладной механики, ФГБОУ ВО «Государственный аграрный университет Северного Зауралья», кандидат технических наук А. А. Побединский

Фомина, О. А.

Совершенствование конструкции технических средств для производства топливной щепы из отходов лесозаготовок : монография / О. А. Фомина, С. В. Фокин. – Тюмень : ФГБОУ ВО ГАУ Северного Зауралья, 2023. – 119 с. – URL: <https://www.gausz.ru/nauka/setevye-izdaniya/2023/fomina-fokin.pdf>. – Текст : электронный.

В монографии проведено исследование конструкции механизма и рабочего процесса выброса щепы в рубительных машинах дискового типа, работающих в условиях лесосеки для производства топливной щепы из отходов лесозаготовок. Разработана и исследована математическая модель технологического процесса выброса щепы из кожуха рубительной машины с помощью новой конструкции механизма. Рассмотрены зависимости конструктивно-технологических параметров нового механизма выброса, и их влияние на эффективность процесса удаления щепы из кожуха машины. Рассчитаны геометрические параметры кожуха, лопаток и щепопровода, а также технологические параметры процесса, которые создают оптимальные условия для выброса щепы из рубительной машины. Проведены лабораторные и полевые испытания опытного образца рубительной машины, включающей в себя новую конструкцию механизма выброса топливной щепы и щепопровод. Даны рекомендации по выбору конструктивно-технологических параметров механизма выброса щепы и щепопровода для мобильных рубительных машин дискового типа.

Предназначено для инженерно-технических и научных работников лесопромышленного комплекса, бакалавров и магистров направления 350302 «Технология лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств», аспирантов специальности 4.3.4. Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и переработки древесины.

Текстовое (символьное) электронное издание

© О. А. Фомина, С. В. Фокин, 2023

© ФГБОУ ВО ГАУ Северного Зауралья, 2023

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ	9
1.1 Методологические принципы проводимых научных исследований	9
1.2 Состояние лесосырьевой базы Тюменской области для целей производства топливной щепы	10
1.3 Оценка перспектив использования отходов лесозаготовок в биоэнергетике	14
1.4 Анализ теплотворной способности различных видов топлива	17
1.5 Анализ основных технологий производства древесного топлива в условиях лесосеки	22
1.6 Анализ конструкций технических средств для производства топливной щепы из отходов лесозаготовок	24
1.7 Анализ применяемых способов выброса щепы из дисковых рубительных машин	31
1.8 Анализ исследований рабочего процесса выброса щепы из дисковых рубительных машин с верхним выбросом	35
1.9 Выводы	43
ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ВЫБРОСА ЩЕПЫ ИЗ ДИСКОВОЙ РУБИТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ ДЛЯ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ОТХОДОВ ЛЕСОЗАГОТОВОК	44
2.1 Общие положения модели рабочего процесса выброса щепы из дисковой рубительной машины для измельчения отходов лесозаготовок	44
2.2 Представление в модели рабочих поверхностей механизма выброса щепы	47
2.3 Расчет показателей эффективности механизма выброса щепы	55

2.4 Начальные и граничные условия, допущения модели рабочего процесса выброса щепы	56
2.5. Компьютерная программа для моделирования механизма выброса щепы из дисковой рубительной машины	56
2.6 Особенности проведения компьютерного эксперимента по обоснованию конструктивно-технологических параметров механизма выброса щепы из дисковой рубительной машины	57
2.6.1 Стратегия теоретического исследования	58
2.7 Влияние конструктивных и технологических параметров на эффективность механизма выброса щепы из дисковой рубительной машины	59
2.7.1 Влияние частоты вращения рубительного диска	59
2.7.2 Влияние количества лопастей на эффективность рабочего процесса выброса щепы из дисковой рубительной машины	61
2.7.3 Влияние зазора между лопастями и кожухом на эффективность рабочего процесса выброса щепы из дисковой рубительной машины	63
2.7.4 Влияние диаметра круглой зоны щепопровода на эффективность рабочего процесса выброса щепы из дисковой рубительной машины	64
2.7.5 Влияние высоты круглой зоны щепопроводана эффективность рабочего процесса выброса щепы из дисковой рубительной машины	65
2.7.6 Влияние размеров выходного окна щепопроводана эффективность рабочего процесса выброса щепы из дисковой рубительной машины	67
2.8 Зависимость производительности дисковой рубительной машины от ее конструктивно-технологических параметров	68
2.8.1 Влияние числа оборотов рубительного диска и числа лопастей на производительность механизма	68

2.8.2 Влияние величины зазора между краем лопасти и боковой стенкой кожуха на производительность механизма	69
2.8.3 Влияние параметров щепопровода на производительность дисковой рубительной машины	70
2.9 Влияние отверстий в кожухе рубительного диска на показатели эффективности выброса щепы	71
2.10 Оптимизация конструктивных параметров механизма выброса щепы из дисковой рубительной машины	74
2.11 Конструктивно-технологическая схема дисковой рубительной машины, оснащенная новым механизмом выброса щепы	79
Выводы	81
ГЛАВА 3. ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ВЫБРОСА ЩЕПЫ ИЗ ДИСКОВОЙ РУБИТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ	83
3.1. Описание лабораторной установки и методики проведения исследований	83
3.2 Подготовка и выполнение лабораторных исследований	86
3.3 Методика многофакторного планирования лабораторных исследований	87
3.4 Методика обработки результатов лабораторных исследований	88
3.5 Описание конструкции и принципа действия опытного образца дисковой рубительной машины, оснащенной новой конструкцией механизма выброса щепы	89
ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ВЫБРОСА ЩЕПЫ ИЗ ДИСКОВОЙ РУБИТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ	93
4.1 Результаты исследования закономерностей влияния частоты вращения рубительного диска, количества отверстий в кожухе и скорости выброса щепы на эффективность механизма	

выброса щепы из дисковой рубительной машины	93
4.2 Результаты исследования фракционного состава щепы в зависимости от конструктивно-технологических параметров механизма выброса щепы из дисковой рубительной машины	98
Выводы	101
ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ	103
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	105

ВВЕДЕНИЕ

Насущной необходимостью лесопромышленного комплекса, в последнее десятилетие, стало вовлечение в переработку древесного сырья в полном объеме, и по мере разработки стратегий рационального использования лесных ресурсов приобретает все большее значение в экономике страны.

Несмотря на развитие науки и техники в области лесозаготовительного производства технологический процесс сплошных рубок сопровождается образованием значительного объема древесных отходов – вершины, сучья, ветви, куски стволовой древесины, откомлевки, козырьки, пни, корни, низкокачественное сырье, которые частично или полностью утратили потребительскую стоимость делового сырья. В настоящее время из общего запаса насаждений, отводимых в рубку на каждой лесосеке, лесозаготовители перерабатывают только стволовую часть древесины, что примерно составляет 60-80% биомассы дерева, а остальную часть, представляющую собой отходы лесозаготовок, обычно, не используют и оставляют на лесосеках. Данное обстоятельство, прежде всего, не отвечает условиям рационального использования лесных ресурсов к тому же, разбросанные по лесосеке остатки деревьев не улучшают экологическое состояние лесов и лесозаготовителям приходится выделять средства на их утилизацию.

Практический опыт показывает, что, несмотря на не высокую товарность, отходы лесозаготовок могут найти широкое применение как сырье в различных сферах, после их соответствующей обработки. Не заинтересованность лесопромышленников в данных видах древесных ресурсов объясняется, прежде всего, тем, что транспортировать остатки деревьев на терминалы для переработки неудобно, по причине низкой плотности их укладки, в связи с чем, экономически не выгодно. Поэтому актуальным остается вопрос переработки отходов непосредственно на лесосеке, либо рядом с местами заготовок древесины. Производство работ на лесосеке позволит предприятиям значительно расширить сырьевую базу, отказаться от дорогостоящих и энергоемких участков первичного измельчения, сократить площади хранения сырья.

Кроме того причиной, сдерживающей использование отходов лесозаготовок, является отсутствие у лесозаготовителей высоко технологичного и не дорогого оборудования для их переработки. Так как древесные отходы имеют характерные особенности: не стандартную форму, размеры, различные физико-механические свойства и пр. требуется особая технология их механической обработки и применение специализированного оборудования. До сих пор распространенным и легким способом переработки отходов лесозаготовок остается их измельчение, как правило, на щепу различного назначения. При выполнении данной технологической операции, в условиях лесосеки, наибольшее применение получили дисковые рубительные машины. Причем очень широко используются мобильные рубительные машины, так как их можно без труда доставить к месту скопления сырья и они

не требуют дополнительных работ по обеспечению рабочего процесса (возведения фундамента, прокладки энергетических коммуникаций и пр.), легко агрегируются с тракторами общего назначения либо имеют независимый привод. Широкий спектр, применяемых машин данного типа свидетельствует об универсальности используемых конструктивных схем, которым свойственны маневренность, высокая производительность и компактность. Однако, при измельчении отходов лесозаготовок производительность мобильных рубительных машин снижается в несколько раз в сравнении с измельчением круглых сортиментов, что приводит к дополнительным экономическим затратам. Кроме того, мобильные дисковые рубительные машины, имеющие в своей конструкции верхний механизм выброса щепы, отличаются низкой эффективностью данного процесса.

Учитывая выше изложенное, актуальной является проблема разработки рубительных машин дискового типа с эффективным механизмом выброса, для производства топливной щепы в условиях лесосеки. Для этого необходимо совершенствовать конструктивную схему используемого технологического оборудования, за счет применения дополнительных устройств, обеспечивающих наиболее полный объем выброса щепы и повышение ее качества, за счет снижения ударных нагрузок, действующих на элементы щепы со стороны рабочих элементов механизма, а также способствующих снижению энергоемкости рабочего процесса, тем самым увеличивая производительность мобильной рубительной машины.

Так как щепа, получаемая из порубочных остатков, имеет различный фракционный состав, включая мелкие элементы, вследствие особенностей измельчаемого материала, то основное влияние на вынос данных частиц из кожуха рубительной машины оказывает скорость движения щепы, ее траектория, а также конструктивные особенности лопаток и щепопровода. Поэтому, требуются дополнительные теоретические и экспериментальные исследования конструктивных схем механизма выброса щепы, с целью совершенствования конструктивно-технологических параметров мобильных дисковых рубительных машин.

Внедрение данного типа оборудования в производственный процесс лесозаготовок является одним из путей повышения производительности работы дисковых рубительных машин, при производстве топливной щепы в условиях лесосеки, позволяя решать проблему вовлечения отходов лесозаготовок в переработку и рационализации использования древесных ресурсов.

ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

1.1 Методологические принципы проводимых научных исследований

Методологическая работа исследования включает в себя следующие критерии: используемый принцип решения проблемы; направления исследований; механизм реализации программы; программные мероприятия; комплексный системный результат.

В решение проблемы совершенствования конструкции технических средств производства топливной щепы из отходов лесозаготовок был положен один принципиальный подход – модернизация конструкции механизма выброса и щепопровода рубительной машины, обеспечивающей более полный объем удаления щепы из кожуха рубительной машины и обоснование конструктивно-технологических параметров механизма выброса щепы и щепопровода, а так же их влияния на показатели эффективности процесса.

Для реализации данного принципа выбраны следующие направления исследований: анализ конструкций машин для измельчения древесных отходов и видов щепы, получаемой с их помощью; анализ исследований рабочего процесса выброса щепы из рубительных машин; теоретическое исследование механизма выброса щепы из дисковой рубительной машины для измельчения отходов лесозаготовок; экспериментальные исследования.

Проводимый анализ конструкций машин и рабочего процесса выброса щепы из дисковых рубительных машин позволяет сформулировать задачи и цели исследований, которые проходят в техническом и технологическом направлениях.

Полученные результаты исследований, сформулированные в выводах позволяют разработать следующий механизм реализации программы, который включает в себя следующие блоки: научно-методический, пропагандистский, производственно-технический.

Научно-методический блок предусматривает: выпуск учебных пособий, методических указаний, использование результатов исследований в учебном процессе, публикации статей в научных изданиях, участие в научных конференциях и выставках. При реализации пропагандистского блока предусматривается выпуск рекламных изданий в виде буклетов, проспектов и участие в конкурсных мероприятиях различного уровня.

В рамках производственно-технического блока необходимо проводить испытательные мероприятия, разработанных средств механизации с разработкой необходимой технической документации.

Комплексным системным результатом исследований является внедрение разработанных технологических операций и средств механизации в производство.

1.2 Состояние лесосырьевой базы Тюменской области для целей производства топливной щепы

Тюменская область обладает мощным лесным потенциалом. По материалам лесоустройства, лесохозяйственных регламентов лесничеств Тюменской области на 28.01.2022 общая площадь земель лесного фонда составляет 11396 тыс. га, что составляет 71,3% территории Тюменской области, из которых на лесные земли приходится 7 067,4 тыс. га, покрытые лесной растительностью земли охватывают площадь 6863,8 тыс. га представлены ценными хвойными породами – 37%, мягколиственными породами и кустарниками – 63 %.

Лесные насаждения Тюменской области имеют весьма однообразный возрастной и породный состав [113]. На юге области в лесостепной зоне, доминируют мягколиственные насаждения березы 53,4%, причем наибольший процент березовых насаждений приходится на Сладковское и Сорокинское лесничества, встречается осина, хвойные – довольно редко. Доля хвойных насаждений, среди которых, основной лесобразующей породой, является сосна – 27,9% возрастает в северной части области – Вагайское, Тобольское и Уватское лесничества.

В целом лесистость территории области составляет 44%, на долю эксплуатационных лесов приходится 9934,5 тыс. га, что составляет 81,7% общего запаса насаждений, общий запас древесины оценивается на уровне 963,6 млн. м³, потенциально возможный ежегодный объем заготовки древесины определен в 15,826 млн. м³[40].

Основные резервы эксплуатационных лесов находятся в Западно-Сибирском равнинном таежном лесном районе – Вагайском, Тобольском и Уватском лесничествах и составляют 60,8%.

Лидирующей возрастной группой эксплуатационных лесов являются спелые и перестойные насаждения – 50,1%, запас древесины составляет 487,71 млн. м³ корневой массы. При этом хвойные породы, имеющие наибольшее промышленное значение, составляют 32 % запасов эксплуатационного фонда, а мягколиственные – 68 % [40].

Следует сказать, что со времен последнего лесоустройства площадь спелых и перестойных насаждений увеличилась по хвойному хозяйству на 95,9 тыс. га, в т.ч. перестойные на 33,12 тыс. га, по мягколиственному хозяйству на 318,05 тыс. га, в т.ч. перестойные на 262,87 тыс.га.

Среди других возрастных групп насаждения распределяются следующим образом: средневозрастные – 25,5%, приспевающие – 15,1%, молодняки – 9,3%.

Данные лесного плана показывают, что спелые и перестойные насаждения имеют устойчивую тенденцию к постоянному накоплению, что указывает на низкий уровень вовлеченности лесов в промышленную эксплуатацию. В будущем это может привести к увеличению объемов древесины низкой товарности, валежной древесины и т.д.

За период действия предыдущего лесного плана в Тюменской области фактические объемы заготовки древесины спелых и перестойных насаждений составили 284,4 тыс. м³, из них древесины хвойных пород – 73,7 тыс. м³, древесины мягколиственных пород – 210,7 тыс. м³. Из общего объема заготовленной древесины 39,4% (112,0 тыс. м³) составляет деловая древесина. При проведении сплошных рубок заготовлено 230,0 тыс. м³ или 80,9% от общего объема, доля деловой древесины составила 37,5% от общего объема. При проведении выборочных рубок заготовлено 54,4 тыс. м³, доля деловой древесины составила – 47,2% [40].

Исходя из выше изложенного, можно сделать вывод, что на долю деловой древесины, при всех видах рубок, приходится примерно 42 % от всей заготовленной, следовательно, значительная доля представлена древесиной неликвидной. Кроме того, в результате производственной деятельности неизбежно возникают отходы древесины [81].

Согласно товарным таблицам [96], нормативный коэффициент использования лесосечного фонда должен достигать 75-93%. Выход деловой древесины у лиственных пород – 27-57%, у хвойных – 68-80%. Отходы должны составлять 7-25% от общего запаса. Фактическое же количество древесных отходов значительно превышает эти нормативы.

Объем отходов, образуемых на лесосеке, зависит от ряда факторов: технологии лесозаготовок и системы применяемых машин; таксационного состава лесонасаждений; времени проведения лесозаготовок и пр. и может местами составлять 30-40 % объема заготовленной древесины [81].

Вместе с тем, леса лесостепной зоны Тюменской области в настоящее время представлены преимущественно производными березняками, которые возобновляются в основном за счет пневой поросли, формируя искривленные стволы, пораженные ложным ядром и сердцевинной гнилью [98, 128]. Поэтому, характеризуются низкой товарностью: выход деловой древесины березы, прежде всего, снижается кривизной стволов и заготовкой, как правило, только длинномерных кряжей. Реальный выход фанерного кряжа в большинстве древостоев не превышает 20% общего запаса древесины. Например, средний выход деловой древесины в березняках Исетского лесхоза находится в пределах 50-55 % [40,117]. Лиственная древесина при возможной ежегодной заготовке по всем 11 районам в размере 2,9 млн. м³ используется в незначительных количествах и, в основном, на дрова. По данным ученых [33] среднее содержание низкокачественной древесины при сплошных рубках может составлять в сосновых и еловых древостоях 15-25%, в лиственных 25-35%, в березовых 45-75%, в осиновых 55-80%.

Таким образом, следует отметить, что в лесах Тюменской области имеется значительный объём перестойной древесины низкого качества с преобладанием мягколиственных пород. Это обстоятельство затрудняет полное использование лесосечного фонда. Поэтому, в ряде районов, огромные сырьевые ресурсы березовых лесов остаются неиспользованными. По мнению лесозаготовителей, высокие издержки при заготовке такой древесины делают

неконкурентоспособными получаемую из нее продукцию. Повысить рентабельность лесной отрасли региона возможно вовлечением мягколиственной древесины, низкосортного сырья и лесосечных отходов в промышленную переработку, а также путем инвестиционной деятельности, в том числе, и на технические разработки эффективного оборудования.

На севере Тюменской области в Ханты-Мансийском автономном округе-Югра по состоянию на 01.01.2018 площадь лесного фонда составляет 49 353 462 га, что составляет 97,9% общей площади земель автономного округа, на которых расположены леса [41].

Породная структура лесных насаждений автономного округа неоднородна и характеризуется преобладанием хвойных пород. Леса в основном представлены низкобонитетными, среднеполнотными насаждениями сосны, березы, ели и кедра. Преобладают насаждения V класса бонитета – 39,4% покрытых лесной растительностью земель лесного фонда. Насаждения II класса бонитета и выше занимают всего лишь 1,2 %.

Хвойные насаждения занимают 79,9%, среди которых преобладающей породой является сосна обыкновенная – 53,3%, сопутствующей породой – сосна сибирская (кедр) сучастием 15,1 %, незначительная доля представлена еловыми насаждениями – 8,9 %, а также имеются примеси лиственничных и пихтовых насаждений – 2,3% и 0,3% соответственно. Мягколиственные насаждения в составе древостоев занимают здесь меньшее участие – 19,6 %, в основном представлены березой – 16,2% и примесью осины – 2,7%.

В возрастной структуре лесного фонда так же как и на юге области, преобладают спелые и перестойные насаждения – 57,9%, в том числе перестойные – 21,1%, далее средневозрастные – 18,5% и приспевающие – 13,2%, молодняки занимают всего 10,4% лесопокрытых земель.

За период действия предыдущего Лесного плана площадь эксплуатационных лесов увеличилась на 28,5 тыс. га.

Общий запас насаждений в лесном фонде автономного округа – Югры составляет 3173,2 млн. куб.м. Из общего запаса насаждений на долю хвойных насаждений приходится 80%, мягколиственных – 19,9%. Запас древесины спелых и перестойных насаждений в лесном фонде автономного округа составляет 2096,68 млн. м³. Основные запасы качественной древесины связаны с Белоярским, Березовским, Советским, Октябрьским районами, которые характеризуются меньшей степенью заболоченности территории, это, в свою очередь, облегчает технологический процесс и снижает себестоимость заготовки древесины [41].

Лесопромышленную деятельность в автономном округе осуществляют более 80 организаций и индивидуальных предпринимателей. Общий объем перерабатываемой производственными комплексами ХМАО – Югры низкосортной древесины, отходов древесного сырья, отходов лесопиления составляет около 600 тыс. м³ в год [90].

На землях лесного фонда Тюменской области заготовка древесины осуществляется арендаторами лесных участков, гражданами для собственных

нужд и органами государственной власти при выполнении работ по охране, защите, воспроизводству лесов. В аренде находится примерно 20% лесов [78]. На долю заготовки арендаторами лесных участков приходится 68,3%, гражданами для собственных нужд заготовлено 18,6% от общего объема, 13,0% заготовлено при осуществлении мероприятий по охране, защите, воспроизводству лесов 205,6 тыс. м³ ликвидной древесины [40, 41].

Согласно статистическим данным в отрасли региона преобладает сортиментная заготовка древесины с использованием цепных пил и трелевочных тракторов. Так как заготовкой древесины в регионе занимаются преимущественно небольшие лесозаготовительные фирмы, они часто стремятся к замене хлыстового метода заготовки экономически более выгодным сортиментным, который предполагает проведение первичной обработки хлыстов непосредственно на лесосеке. Причиной этого зачастую является низкий уровень технического оснащения лесозаготовительных предприятий, особенно средних и мелких, либо полное отсутствие лесоперерабатывающих терминалов [80]. Более крупные компании региона, занимающиеся заготовкой леса, применяют современные многофункциональные лесосечные машины, оснащенные технологическим оборудованием, но общее количество их не превышает 7-8% от общего парка машин [108].

Таким образом, местные лесозаготовители, как правило, вывозят с лесосек только деловую часть хлыстов: пиловочник, кряжи и балансы, а порубочные остатки, низкокачественную, неликвидную древесину в большинстве случаев оставляют на лесосеке. Количество таких отходов производства, оставленных на лесосеке, может достигать 40% и более, что приводит к значительному снижению эффективности использования лесных ресурсов. Порубочные остатки в виде вершин, сучьев, ветвей и пр. оставляют на местах рубок в виде валов для перегнивания, и для последующего сжигания в соответствии с установленными правилами очистки мест рубок [103].

Как уже говорилось ранее, данный вид ресурсов не востребован по ряду причин, одна из которых – отсутствие перерабатывающих мощностей. Предприятия где организованы специальные участки по переработке низкокачественной древесины, а также отходов лесозаготовок на щепу, с учетом возможности их реализации составляет примерно 5 % [83,115].

Проведенная оценка ресурсной базы региона позволяет сделать вывод, что его леса обладают внушительным сырьевым потенциалом, в том числе невостребованными ресурсами растительной биомассы. Имеющиеся запасы низкокачественной древесины и значительное образование отходов лесозаготовок является основой для развития биоэнергетической промышленности, способной решать задачу энергетической и экологической безопасности региона. Вовлечение в переработку низкокачественного, в том числе листового древесного сырья, также решит вопрос увеличения лесопользования и полного освоения расчетной лесосеки. Комплексная заготовка деловой древесины и древесной биомассы для производства

топливной щепы позволит снизить основные затраты на производство кубического метра лесопродукции [6, 26].

Главной заботой региона остается обеспечение бережного, рационального использования лесных запасов, переход от невозобновляемых источников энергии, к которым относятся газ и уголь, к возобновляемым и экологически чистым. Весь объем дополнительного сырья, при освоении отводимого в рубку лесфонда, может стать потенциальными ресурсами для производства топливно-энергетической продукции, что особенно актуально во времена, когда идут активные поиски альтернативных источников энергии.

По данным стратегии развития лесопромышленного комплекса Тюменской области [85], в среднесрочной перспективе на ее территории будут актуальны проекты по производству пеллет и строительство котельных на древесном топливе, с привязкой их к крупным заготовителям – переработчикам древесины.

В связи с этим целесообразно, применять разные виды рубительных машин: например, на лесосеке необходимо использовать мобильные рубительные машины, на нижнем терминале мобильные или стационарные, а на предприятиях – стационарные разной производительности [1].

1.3 Оценка перспектив использования отходов лесозаготовок в биоэнергетике

Рациональное использование древесных отходов является одной из основных задач общей проблемы улучшения использования древесного сырья, в связи, с чем широкое распространение получило понятие «безотходная технология», а по причине необходимости в использовании экологически безопасных источников тепловой и электрической энергии появилось понятие «биоэнергетика», основанное на преобразовании энергии биомассы и биоотходов.

Многие страны ведут поиск альтернативных источников энергии на фоне усиления необходимости замены ископаемых топливно-энергетических ресурсов возобновляемым сырьем. В настоящее время часть биомассы дерева, представляющая собой отходы лесозаготовительного производства, привлекательна для энергетического использования [32].

Активное развитие биоэнергетика получила после подписания Киотского протокола в 1998 г., который обязывает страны реализовать проекты атмосферноохранного характера для снижения выбросов парниковых газов. После данного события в мире для энергетических целей ежегодно стало заготавливаться порядка 60 % от общего объема заготавливаемой древесины [27,29].

В настоящее время вырабатываемая из биомассы энергия составляет около 14 % конечного потребления энергии в мире. Приблизительно 15 % из этого количества приходится на индустриальные страны, которые заинтересованы в инвестициях, способствующих сокращению выбросов парниковых газов [4, 31].

При проведении лесозаготовительных работ в развивающихся странах общий объем сырья, используемого в энергетике составляет 81 % от общей массы лесозаготовок. При этом страны с развитой экономикой производят лишь 33 %. Потребление энергии биомассы в индустриальных странах Европы, Северной Америки и России значительно меньше. Малые объемы энергетической древесины составляют в Бельгии, Германии и Англии, а такие страны, как Австрия, Швеция и Финляндия имеют более высокие показатели использования данного продукта [15,77].

Прогнозы ученых свидетельствуют о том, что доля ископаемого топлива в мировой энергетике сократится к 2050 г. – до 45 %, а к 2060 г. составит 30% [111,138,152]. В будущем ожидается дальнейший активный рост производства и потребления биотоплива в мире, в ряде таких стран, как Бразилия, США и Канада [136,141].

Отходы лесозаготовок могут использоваться как в виде топливной щепы, так и служить сырьем для производства топлива с улучшенными потребительскими свойствами. Твердое биотопливо уже сегодня широко продается в Европе и Северной Америке, а также и во многих других странах растет интерес к международной торговле древесным биотопливом, поскольку это может обеспечить доступ к более дешевому топливу.

В Финляндии, Швеции и других европейских странах с достаточным количеством лесов активно внедряются технологии сжигания биотоплива как в виде сырья (топливная щепа, дрова, опилки), так и в облагороженном виде (топливные брикеты, гранулы). Топливные брикеты позволяют людям покупать недорогое топливо для недорогих энергоносителей и обеспечивают примерно на 50% больше тепла на каждые полкилограмма, чем бревна [23,116].

Во многих регионах РФ успешно работают котельные на биотопливе, но их процент очень низок примерно 1 – 2% и о полном переходе в масштабах всей страны на источники энергии, которые возобновляются, речи в России пока нет [63]. Хотя в Российской Программе «БИО-2020» прогнозируется, что наша страна может стать одним из лидеров мирового рынка биоэнергетики за счет использования своих ресурсов. «В России образуется более 100 млн. тонн доступных для получения энергии отходов биомассы в год, энергетическая ценность которых составляет более 300 млн. МВт-ч, или более 40 млн. т. у. т. При этом утилизируется не более 10 % из них..» [36].

Использование древесного сырья для целей биоэнергетики позволяет повысить эффективность лесозаготовительного производства за счет увеличения использования нетоварной древесины в энергобалансе страны [133]. Однако не все реализуемые биоэнергетические проекты, направленные на замещение традиционных энергоносителей, оказываются успешными с коммерческой точки зрения, если учесть затраты на сбор отходов, погрузку, транспортировку на значительные расстояния, то это окажется не так выгодно.

Не смотря на имеющиеся слабые стороны данного направления, в России ведутся научно-технические исследования в области эффективных технологий и оборудования для переработки древесных отходов, а также разработка

универсального методического и информационного обеспечения выработки и принятия эффективных управленческих решений по выбору технологий биоэнергетики [3].

Исследования показали, что производство энергии собственными силами более дешевый процесс, чем потребление биоэнергии, выпущенной иными производителями, а применение современных технологий в биоэнергетике, по своей действенности могут быть следующими по рейтингу после применения продуктов газодобычи [22,47]. Ведь биотопливо может быть реализовано как для нужд сельских жителей и жителей отдаленных регионов, так и для ряда стран, не имеющих топливных и сельскохозяйственных ресурсов.

Отмечено, что эффективным решением задачи экологической и энергетической безопасности лесопромышленных регионов является использование древесных отходов в качестве сырья для газогенераторных установок, работающих по газожидкостному циклу, для получения электрической энергии. Экспериментальные исследования на опытной газогенераторной установке, позволяют разработать на базе широко распространенного дизеля Д12 промышленную газодизельную установку, работающую по газожидкостному циклу на древесном газе из отходов лесозаготовок, мощностью 180-220 кВт, что дает возможность совершенствовать технологический процесс лесозаготовок и повысить его эффективности на 10-15% [20].

Основным видом топлива в теплоэнергетическом комплексе Тюменской области является природный газ и уголь. На газе работают 1241 котельных, на угле – 188, на дровах - 31, на электроэнергии – 31, на жидком топливе – 17. Средний КПД котельных Тюменской области равен 84% (при 92-95% в странах Западной Европы) [34]. Использование древесных котельных вместо угольных и мазутных весьма актуально для Тюменской области. Большинство муниципальных котельных, в регионе, работающих на привозных видах топлива (угле или мазуте) – убыточны. Переводить их на газ также не везде выгодно, в связи с большими экономическими затратами на прокладывание газопроводов. В свою очередь, стоимость щепы и опила (при минимальных расстояниях транспортировки) может быть меньше цены природного газа и угля почти в 2 раза.

В Тюменской области разработан план перевода неэффективных котельных на древесное топливо (щепа, пеллеты) мощностью более 100 МВт в час. Специалисты департамента ЖКХ выделили 62 котельные, которые можно успешно заменить на более экономичные, работающие на древесном топливе. В регионе действует 3 производителя пеллет: ООО Свеза г. Тюмень, ООО «ЛП «Варвара» в Ярковском районе и ООО «Стройпрогресс» в Упоровском районе, также организовать производство пеллет планируется на новом производстве в Исетском районе. Успешно эксплуатируются модульные котельные полной заводской готовности в Заводоуковском городском округе. Эти котельные быстро и легко монтируются, дают возможность использовать влажную древесину (до 50 % влажности), а также отличаются высокой степенью

автоматизации. Подобные котельные планируется внедрить и в других районах юга Тюменской области (Викуловского, Яркового, Армизонского и Ялуторовского районов) [48, 52, 112].

В ХМАО – Югра также предпринимают активные мероприятия по увеличению объемов использования низкосортной древесины и отходов лесозаготовок в качестве топливного сырья, переводят старые и строятся новые котельные с использованием биотоплива и древесной щепы в муниципальных образованиях Сургутского, Советского и Кондинского районов.

Таким образом, перевод отечественной теплоэнергетики на древесную биомассу в настоящий момент целесообразен там, где: 1) имеется местное относительно недорогое производство древесного биотоплива; 2) тепло вырабатывают из угля, мазута, торфа или дизельного топлива [3].

На многих территориях РФ располагается огромный запас древесных ресурсов для производства тепловой энергии. В частности почти все районы Тюменской области, обладают потенциалом 81-100 % чтобы покрыть более половины тепловой нагрузки области, не только в целях ресурсосбережения, но и для обеспечения эколого-энергетической безопасности региона.

1.4 Анализ теплотворной способности различных видов топлива

К ресурсам лесного комплекса, которые могут быть использованы в энергетических целях, относятся: топливные дрова, топливная щепа и вторичные древесные отходы от лесозаготовок, отходы лесопиления и деревообработки [126].

Любой вид топлива в теплоэнергетике рассматривается с точки зрения его агрегатного состояния, исходя из этого состав вещества, по степени горючести, разделяется на две составляющие. К горючей части относятся такие химические элементы, как водород H и углерод C, представляющие в целом углеводородную смесь, а также сера S. В составе негорючей составляющей присутствуют вода, минеральные соли, кислород O и азот N [76].

Теплотворные качества и характер сгорания различных видов топлива зависят от соотношения содержащихся в них вышеуказанных элементов, а также от его балластных примесей – влажности и зольности. Чем выше удельная теплота сгорания топлива, тем меньше его расход. Поэтому теплотворная способность является одной из наиболее значимых характеристик топлива [124].

Анализ теплотворной способности самых распространенных видов топлива, которые используются в РФ, в том числе и Тюменской области, показал, что удельная теплота сгорания у продуктов нефтепереработки в среднем выше, чем у ископаемого твердого топлива, а теплотворность топлива из древесных отходов имеет схожие показатели с ископаемыми [13]. Например, в торфе содержится около 50% углерода и его удельная теплота сгорания составляет от 8 до 15 МДж/кг у древесины эти показатели равны 10-20 МДж/кг, в зависимости от вида древесного топлива. Поэтому по количеству выдаваемой

им теплоты сопоставимо с обычными дровами и топливными брикетами из древесных отходов [122].

У бурого угля содержание углерода составляет от 50-70%, что говорит о том, что теплотворная способность должна быть выше, чем у древесины или торфа, но повышенное содержание летучих веществ и воды снижает его теплотворную способность, которая составляет около 15 МДж/кг. К тому же при сжигании образуется большое количество золы до 40% к тому же он не вполне экологичный, так как включает в себя много серы. Если рассматривать древесные виды топлива, то максимальное содержание серы в них составляет примерно 0,05%. Надо отметить, то по теплотворной способности древесный уголь может соперничать с каменным углем. Удельная теплота сгорания древесного угля – 31 МДж/кг к тому же отопление древесным углём более экологично в сравнении с ископаемым топливом. Стоимость такого угля соизмерима с ценой на каменный уголь.

При сопоставлении древесного угля с дровами или древесными пеллетами, становится ясно, что дрова занимают третье место, имея удельную теплоту сгорания всего 10,2 МДж/кг. Весомый недостаток дров – высокая влажность, достигающая до 100%. Они являются самым невыгодным из древесных видов топлива для отечественной теплоэнергетики, т.к. затраты на выработку тепла из них достаточно высокие. Топливная способность пеллет составляет $\approx 17,5$ МДж/кг, при влажности примерно 8 – 9%. Причем это экологически чистый вид топлива, в котором нет никаких «химических» добавок». Технология их производства предусматривает сцепление древесных частиц при большом давлении за счёт содержащегося в стенках клеток древесины органического вещества – лигнина. При сгорании пеллет образуется примерно 1% золы. Для сравнения зольность каменного угля и торфа составляет 10 – 35% [100].

Фактически, пеллеты являются искусственным продуктом промышленного процесса, более сложным, чем производство например, топливной щепы, в результате пеллеты намного дороже щепы.

Древесная топливная щепа по теплотворным способностям имеет удельную теплоту сгорания, сравнимую с дровами ≈ 10 МДж/кг. Щепа размером до 50 мм и влажностью 50 % имеет удельную теплоту сгорания 2,8 – 3,0 тыс. ккал/кг, в то время как теплота сгорания используемого в области бокситогорского угля 4 – 4,5 тыс. ккал/кг, интинского 4,2 тыс. ккал/кг, кузбасского 4,5 – 6,15 тыс. ккал/кг при более высокой стоимости [7].

Для повышения теплотворной способности топливной щепы нужно производить высококачественные частицы, которые можно подавать в очень простые котлы или в те же котлы, которые предназначены для сжигания пеллет. Влажность и зольность могут быть уменьшены в приемлемых пределах путем длительного хранения и тщательного выбора сырья, соответственно [153].

Таблица 1.1 – Тепловые характеристики различных видов топлива [25,29,31,45]

Вид топлива	Средняя теплота сгорания, ккал/кг	Средний КПД котла, %	% серы	% золы	СО ₂ кт/ГДж	Влажность, %
Дрова	2500	50-70	0	1	0	50-55
Древесная щепа	2800	65-80	0	1	0	50-55
Пеллеты	4500	80-85	0,1	0,5-3	0	8-12
Торф	2900	40-70	0	20	70	88-96
Каменный уголь	7400	55-60	1-3	10-35	60	3-12
Природный газ	8000	90-98	0,01	-	50	-
Древесный уголь	7500	50-60	0	1	0	1-4

Из таблицы видно, что топливо на основе продуктов нефтепереработки и ископаемые органические топлива отличаются высокими показателями топливной способности по сравнению с древесными видами топлив, за исключением древесного угля, топливная способность которого практически не уступает каменному углю. Наряду с высокой теплотворной способностью они обладают высокой токсичностью, что увеличивает давление на экологию. При сжигании дизельного топлива, мазута и каменного угля выделяется огромное количество вредных для организма человека веществ, в том числе канцерогенов. К тому же они относятся к числу невозобновляемых источников. Запасы газа и нефти в России с каждым годом уменьшаются, а стоимость на внутреннем рынке ежегодно растет.

Древесные топлива являются энергетически стабильным безотходным и экологическим чистым видом биотоплива [47]. Экологические характеристики производства тепловой энергии из древесины, для разных ее видов примерно одинаковые и заметно превосходят аналогичные параметры для традиционного топлива. Очевидным преимуществом древесной биомассы перед ископаемым топливом является то, она практически не содержит серы, максимальное содержание серы в древесине составляет 0,05%. Выбросы углекислого газа, образующиеся при сжигании любого биотоплива, минимальны. Поэтому древесина относится к СО₂ – нейтральным видам энергоресурсов и не считается загрязнителем атмосферы [3].

Тепловые характеристики древесных топлив зависят от породы древесины, ее плотности и влажности, а также фракционного состава, доли мелких фракций, содержания золы.

Как известно, увеличение содержания С, Н и S повышает теплотворную способность, а увеличение содержания N, O и золы понижает. Например, содержание золы обычно составляет несколько процентов или доли процента

(0,3% в ели или березе без коры, 1,6% в березовой коре и 3,4% в еловой коре) [91]. Различные породы деревьев имеют различное содержание азота, которое составляет в среднем 0,75%. Например, щепа, полученная из древесины сосны обыкновенной произрастающей в лесостепи Центральной Сибири, содержит в 1,5 раза больше азота, чем щепа, полученная из древесины лиственницы или сосны обыкновенной, но произрастающей в другой климатической зоне [45].

Учеными [137,154,156] исследовавшими содержание азота в древесине, было выяснено, что, как правило, для стволовой древесины были обнаружены значения до 0,1%, в то время как для лесных остатков до 0,4%. Древесная кора также содержит больше азота, чем сама древесина.

Лиственная древесина, как правило, характеризуется более низким содержанием лигнина по сравнению с хвойной древесиной и содержит меньшие доли смол. Поскольку лигнин и смолы имеют более высокие значения теплотворной способности (приблизительно от 22 до 28 МДж/кг, и 35,0 МДж/кг, соответственно), чем, например, целлюлоза или гемицеллюлоза (приблизительно 17,3 и 16,2 МДж/кг) соответственно их отсутствие может снизить общую теплотворную способность лиственной древесной щепы [148].

Иностранскими учеными [135,139,149] были проанализированы топливные характеристики биомассы из 12 видов деревьев хвойных и лиственных пород, выращенных в режиме лесного хозяйства с коротким севооборотом. Более высокая теплотворная способность колебалась от 19,6–20,5 МДж/кг для древесины, 17,4–20,6 МДж/кг для коры и 19,5–24,1 МДж/кг для листьев, причем самые высокие значения для древесины и коры были получены из сосны (*Pinus radiata*).

Также их исследования показали, что значительную неоднородность состава топлива можно ожидать даже в высококачественных древесных топливных ассортиментах, таких как пеллеты, производимые в основном из опилок. В случае древесной щепы неоднородность в свойствах топлива может быть намного выше, поскольку эти виды топлива могут быть получены из множества различных сырьевых материалов через очень разнообразные технологические цепочки. Вторичные этапы обработки топлива, такие как просеивание и техническая сушка, могут быть подходящими решениями для снижения этой неоднородности и для обеспечения высокого и определенного качества древесной щепы.

Топливная щепа, нарубленная из лесосечных отходов имеет повышенное содержание коры – 12%, посторонних минеральных включений до 8%, много древесной зелени, повышенную влажность до 110-120% [45]. В древесном топливе, возможно, влиять на содержание указанных элементов путём выбора сырья и его подготовки [100,124]. Как правило, древесные отходы перед сжиганием проходят соответствующую подготовку, т.е. производится их измельчение до получения биомассы с равновеликими частицами, позволяющими использовать для промышленного употребления стандартные средства механизации, а также обеспечивающими эффективное сжигание частиц древесного топлива наиболее эффективным способом [126].

Высокое содержание в древесине кислорода (около 40%), низкое содержание углерода (около 50% сухого веса), высокая влажность (более 50%) снижает ее теплоту сгорания на единицу сухого веса. Для максимальной теплоэффективности использования древесины в виде топлива, необходимо соблюдать следующие условия – низкую влажность древесины, контроль минеральных примесей и фракционный состав и медленный процесс горения.

Следовательно, интенсивное внедрение древесных материалов в теплоэнергетику требует выполнения новых научных исследований и конструкторских разработок для улучшения технологии сжигания древесного топлива.

В частности, одной из главных задач является обезвоживание топливной щепы. Для снижения влажности топливной щепы можно использовать различные способы: сушка в камерах; обработка сухим паром 120—150°C [58,59].

Одним из российских ученых предложено снизить влажность щепы с высоких показателей 120% (абс.) или 60% (отн.) до показателей 30% (абс.) или 24% (отн.) центрифугированием. Его исследования показывают, что за 100-250 секунд можно удалить свободную влагу из щепы. При этом снижается масса щепы на 20–25%, что позволит сократить расходы на перевозку более легкой щепы и повысить ее теплотворную способность почти в два раза (\approx до 4500 ккал/м³) [45]. К тому же, по его мнению, этот способ наиболее приемлем в условиях лесосеки.

Большую засоренность щепы минеральными примесями от 8-10%, ухудшающими тепловые свойства, можно снизить до практически 1-2% сортированием щепы и удалением мелких фракций, содержащих основную массу минеральных примесей. Предлагаемая ученым [59] установка для производства топливной щепы с повышенными энергетическими показателями может работать на пунктах погрузки заготавливаемой древесины, на терминалах и других участках, где сосредотачиваются большие объемы лесосечных отходов.

Для повышения КПД производства топливной щепы автор работы [2] предлагает использовать модульную измельчающе-транспортную машину (ИТМ) с газогенераторным двигателем Стирлинга, работающим на древесном топливе и выполняющей операции измельчения древесного сырья, транспортировки щепы, сушки щепы тепловыми выбросами двигателя. Его исследования показали влияние начальной влажности древесного сырья, снижение которой с 47,5% до 37,5% приводит к повышению КПД на 7,34%; с 37,5% до 27,5% повышает КПД на 4,37%, с 27,5% до 17,5% приводит к повышению КПД на 2,47%.

Исследования ученого [100] показали, что повышение теплового потенциала древесного топлива, увеличения насыпной плотности и снижения технологической влажности можно добиться способом торрефикации, заключающимся в медленном нагреве (не более 50 °С/мин.) древесины в инертной среде при температуре 250-300 °С. В результате процесса

термического преобразования древесины, в том числе мягких древесных отходов, получается твердый однородный гидрофобный биологически стойкий продукт. По химическому составу, содержанию влаги торрефицированная древесина существенно отличается от необработанной древесины, и, следовательно, отличными будут и технологические режимы ее гранулирования – температура подогрева и технологическая влажность материала, усилие прессования, скорость передачи усилия.

Анализ теплотворных характеристик древесных видов топлива, показал, что древесина по теплотворной способности несколько уступает ископаемым видам топлива, но при этом имеет ряд серьезных преимуществ перед ними. Главными, из которых являются возобновляемость, меньший выброс диоксида углерода при сжигании, меньшее содержание вредных веществ в золе по сравнению с ископаемыми видами топлива, возможность выращивания и заготовки древесного сырья вблизи мест потребления, позволяющая сократить расходы на транспортировку готового продукта от места происхождения до места потребления [121].

Для использования древесных отходов в виде топлива необходимо совершенствование технологий переработки древесной биомассы; внедрение новых технологий по производству различных видов древесного топлива, поиск оптимальных композиционных составов топлива, что в конечном итоге позволит получить древесное топливо с заданными потребительскими свойствами.

1.5 Анализ основных технологий производства древесного топлива в условиях лесосеки

Для повышения эффективности использования лесосечного фонда, качественной и своевременной очистки лесосек от порубочных остатков, улучшения лесовозобновления, снижения пожарной опасности и возникновения очагов вредителей, а также повышения экономики лесопользования, необходимо включать в состав технологического процесса лесозаготовок операции по измельчению порубочных остатков на топливную щепу с помощью рубительных машин [50].

Производство топливной щепы на лесосеке зависит от технологического процесса заготовки древесины, принятой системы машин, природно-климатических условий, вида рубки и пр. [54,97].

Существует несколько традиционно сложившихся схем производства топливной щепы на лесозаготовках:

- непосредственно на лесосеке одновременно с лесосечными работами, при этом заготовка осуществляется деревьями, хлыстами и сортиментами с применением бензиномоторных пил или многооперационных машин;
- на верхнем складе (лесопогрузочном пункте) одновременно или по завершению лесосечных работ – заготовка деревьями или хлыстами с

применением бензиномоторных пил и трелевочных тракторов или на базе форвардера;

- на промежуточном лесном складе (лесопогрузочном пункте) – заготовка деревьями или хлыстами с применением бензиномоторных пил и трелевочных тракторов или на базе форвардера.

В первой схеме технология предусматривает разработку лесосек с помощью бензиномоторных пил либо с помощью многооперационных машин типа харвестор-форвардер. В случае применения и тех и других машин, образующиеся отходы – сучья, ветви, вершины, низкокачественная древесина складываются в кучи (валы) [38]. По мере их накопления, мобильная рубительная машина, перемещаясь по волоку, загружает древесную биомассу в рубительный модуль, либо с помощью форвардера отходы перемещаются к передвижной рубильной машине, где рубятся в щепу и отгружаются в щеповозы; производство щепы на вырубках осуществляется рубительной машиной на базе трактора МТЗ-80/82, маневрированием трактора рубительная машина устанавливается вблизи образовавшихся, после очистки лесосеки, куч лесосечных отходов, которые подаются в патрон рубительной машины гидроманипулятором или другим грузочным устройством, измельчает их и сыплет готовую щепу в прицепной контейнер. Данная схема имеет преимущество в отсутствии необходимости сбора и перевозки порубочных остатков на дальние расстояния с целью их дальнейшей переработки. Однако, для проезда прицепных или самоходных рубильных машин на лесосеку к порубочным остаткам, необходимо укреплять и содержать волоки в хорошем эксплуатационном состоянии.

Вторая и третья схемы предполагают отгрузку заготовленной древесины деревьями на временный погрузочный пункт с помощью трелевочных тракторов или форвардеров, где производится обрезка сучьев, ветвей, вершин с помощью бензиномоторных пил или сучкорезных машин. Далее их перемещают к рубительной машине для измельчения. Данные технологические схемы считаются более предпочтительными, в связи с тем, что скопление большого объема древесных отходов на специально подготовленных площадках, позволяет исключить частое перемещение машин с лесосеки на склад и обратно, что способствует повышению эффективности организации использования машин и оборудования. К тому же уменьшает расстояние перевозки готовой щепы к потребителю, снижая экономические затраты.

Анализ результатов многолетней практики выполнения лесозаготовительных работ позволяет подтвердить правильность принципов построения технологических схем, которые базируются на получении не только деловых сортиментов, но и дополнительного сырья для последующей переработки его в качестве биотоплива, что создает возможность организации безотходного производства и позволяет соблюсти все лесоводственные требования, а также обеспечивает повышение показателей эффективности труда рабочих и производительности техники с минимальными затратами.

1.6 Анализ конструкций технических средств для производства топливной щепы из отходов лесозаготовок

В соответствии с видом сырья, подвергаемого измельчению на щепу, разработаны различные рубильные машины, отличающиеся следующими признаками (рисунок 1.1):

- тип рабочего органа (дисковые, барабанные, роторные);
- вид и число используемого режущего инструмента (ножи, резцы, малоножевые, многоножевые)
- мобильность (стационарные, мобильные – прицепные, полуприцепные, смонтированные на раме базового трактора);
- способ и направление подачи древесного сырья (гравитационная, принудительная, самозатягиванием, с горизонтальным и наклонным расположением питающего патрона, комбинированная загрузка с двумя патронами);
- способ выгрузки щепы (с верхним выбросом, с нижним выбросом, прямоточная выгрузка по направлению подачи сырья в машину);
- вид энергии, используемой для привода рабочего органа;
- область практического использования (лесозаготовительное производство, лесопильные и деревообрабатывающие предприятия, переработка древесных отходов).

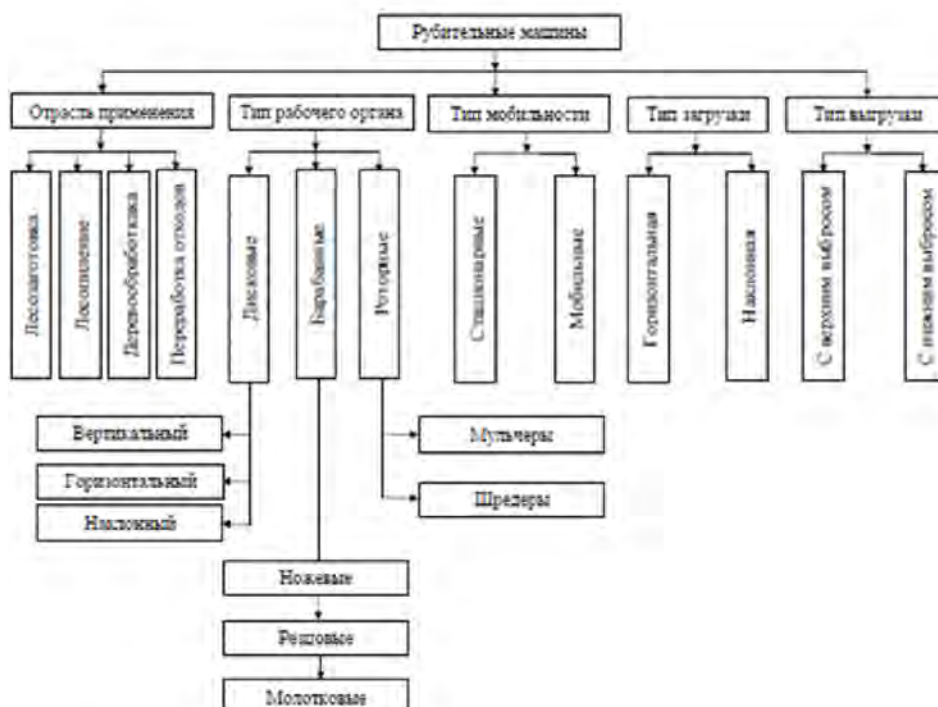


Рисунок 1.1 – Классификация конструкций рубильных машин

На основе анализа развития рубительной техники установлено, что в настоящее время преимущество имеют дисковые рубительные машины (53%), барабанные машины составляют 44%, другие типы машин – 3% [127].

При переработке отходов лесозаготовок для получения щепы наибольшее практическое использование получили дисковые и барабанные рубительные машины [50]. Необходимо отметить, что роторные рубительные устройства применяются исключительно для изготовления энергетической щепы [12,24].

Рубительные машины дискового типа (рисунок 1.2) используются для изготовления щепы из неликвидных лесоматериалов и отходов лесозаготовок. В зависимости от параметров измельчаемого сырья данный тип оборудования выпускается с вертикальным, горизонтальным или наклонным рабочим органом [99,102].



Рисунок 1.2 – Дисковая рубительная машина

Рабочий орган выполнен в виде вращающегося диска с расположенными на его фронтальной части режущими ножами и контрножом, зафиксированным на стенке загрузочного патрона. Ножевой диск может быть плоским или профилированным (геликоидальным) диаметром от 1000 мм до 2900 мм, в зависимости от производительности машины [51]. Ножи размещаются радиально или под углом к радиусу диска. В зависимости от количества ножей на диске, машины бывают малоножевыми – не более 4-х ножей, и многоножевыми количество ножей 10 и более. В теле диска, вдоль режущей кромки ножей, имеются сквозные подножевые отверстия для отвода щепы, через которые отрубаемая щепа проходит на приводную сторону диска (рисунок 1.3).

Измельчение сырья происходит под постоянным углом к волокнам древесины, благодаря чему щепа получается однородной по своим параметрам, а доля крупной и опилочной фракции не большая [16, 18]. Параметры щепы, произведенной данной машиной зависят от выступа рубительных ножей над поверхностью рубительного диска, и могут изменяться в незначительных границах [20,57].



Рисунок 1.3 – Общий вид рубительного диска

Сырье, предназначенное для измельчения, подается в загрузочный патрон горизонтальным транспортером, причем стационарные машины имеют собственный привод подачи [9,18]. Для короткомерных сортиментов, предусматривается наклонная подача, с помощью транспортера, помещенного над измельчающим диском [33]. В результате сырье поступает к измельчителю под действием сил гравитации.

В машинах дискового типа применяется два способа удаления (выброса) щепы – верхний и нижний, причем верхний способ удаления больше подходит для мобильных рубительных машин, а нижний для стационарных [110].

Нижнее направление удаления щепы производится на специальный конвейер, приемный патрубок пневмосистемы или движением вверх по транспортеру (в циклон или на площадку складирования щепы). Высокая скорость вращения диска позволяет транспортировать щепу на большое расстояние вследствие чего для оборудования с нижним выбросом щепы предусмотрен отвод воздуха [88].

Самоходные или передвижные рубительные машины оснащены механизмом для верхнего выброса щепы, и, как правило, применяются в условиях лесосеки. При верхнем выбросе щепа специальными лопатками, смонтированными на диске, направляется по щепопроводу в циклон или бункер. Данный способ выброса щепы позволяет производить погрузку в кузов транспортных средств высотой до 3-4 м без привлечения дополнительных механизмов [62,65].

Рубительные машины барабанного типа с рабочим органом в виде барабана, на поверхности которого размещены ножи или резцы. По типу рабочего органа различают машины с цельным (произведенная щепа удаляется через щепопровод) и полым барабаном (щепа перемещается в барабан через подножевые впадины) цилиндрической или конической формы (рисунок 1.4).

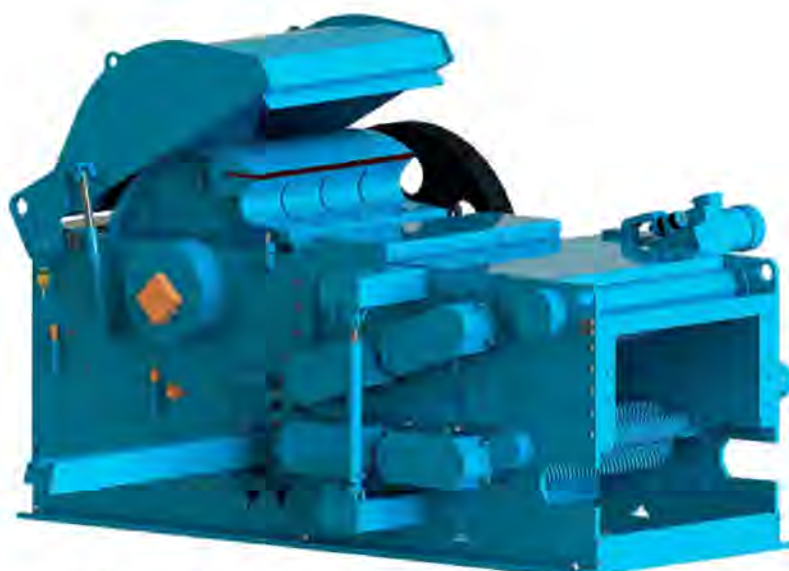


Рисунок 1.4 – Общий вид барабанной рубительной машины

Загрузка сырья в машину производится горизонтальным транспортером, а подача осуществляется вальцовым устройством с механическим или гидравлическим прижимом [55]. На практике, в производстве щепы, используют машины со свободной засыпкой сырья, который применяется для короткомерных материалов длиной до 1,5 м.

В цельных барабанах пазушного типа удаление щепы производится нижним способом. Щепка собирается в пазах, расположенных в теле барабана перед каждым режущим ножом и посредством маховых движений вращающегося барабана удаляется на специальный поддон, транспортер или приемный патрубок пневмосистемы.

В полых барабанах щепка через подножевые щели поступает в полость барабана и, затем удаляется вдоль оси вращения барабана через один из торцевых окон.

Барабанные машины конструктивно имеют проходное сечение большого размера – 1000 × 1600 мм, что обуславливает переработку крупных по толщине сортиментов (рисунок 1.5). При этом качество щепы хуже, чем в дисковых измельчителях [57]. Щепка имеет неоднородный фракционный состав и неодинаковое направление среза, так как измельчение происходит под разными углами. Следует отметить, что размеры элементов щепы увеличиваются с возрастанием скорости подачи и уменьшается при увеличении частоты вращения барабана и количества резцов. Для того, чтобы фракционный состав щепы был более однородным, на машину устанавливается перфорированный поддон (сито), размер отверстий которого соответствует назначению машины и требованиям к щепе [55,57].

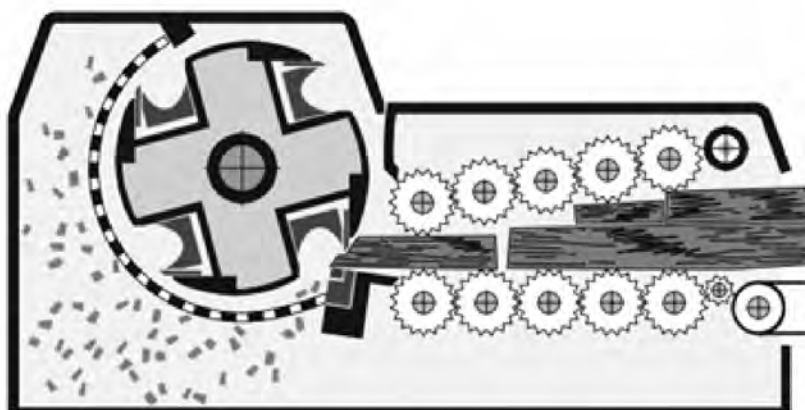


Рисунок 1.5 – Процесс переработки сырья барабанной рубительной машиной

Полученная с помощью барабанных машин щепа применяется в качестве микрощепа для коптильного производства или исходного сырья для производства пеллет и для изготовления длинной узкой стружки, применяемой при изготовлении плит OSB [35].

Рубительные машины роторного типа (шредеры, мульчеры) предназначены для измельчения древесных отходов и отходов лесопильно-перерабатывающего производства (рисунок 1.6). Так же роторные измельчители могут применяться для расчистки вырубок от древесных отходов, нежелательной растительности, они в таком случае, называются мульчерами (рисунок 1.7) [19]. Оборудование эффективно уменьшает объем, занимаемый отходами, а полученная при этом фракция пригодна для использования в качестве топливной щепы [57].



Рисунок 1.6 – Общий вид шредера для измельчения древесных отходов



Рисунок 1.7 – Общий вид самоходного мульчера

В зависимости от конструктивного устройства роторного измельчителя сырье перемещается в загрузочный бункер при помощи погрузчика или горизонтального ленточного транспортера [55,89].

Для повышения эффективности процесса рубки сырья шредеры оснащаются гидротолкателем, прижимающим материал к измельчающему устройству. Подача сырья к ротору осуществляется приводными вальцами, совершающими поступательное движение в направлении механизма резания. Шредеры имеют механизм подачи сырья аналогичный барабанным рубильным машинам [11].

В зависимости от мощности шредеры имеют роторы различного конструктивного исполнения (диаметром 250 – 1100 мм, а шириной – 5 м) (рисунки 1.8, 1.9). Получение щепы осуществляется путем размещения сырья между измельчающими ножами на роторе, имеющими встречное направление к материалу и контрножами, установленными на корпусе.



Рисунок 1.8 – Ротор шредера

Рабочие органы оборудования выполняются плоского или профильного вида, на которых размещаются зубья или сменные резцы. Режущие элементы различны по форме и типу крепления, а их число на валу колеблется от десятка до нескольких сотен [11,19].



Рисунок 1.9 – Общий вид измельчающего оборудования мульчера

Промышленностью выпускаются измельчители с двумя или более роторами (рисунок 1.10). При работы данного устройства сырье подается на движущиеся в противоположные стороны роторы с измельчающими зубьями на поверхности [39,43].



Рисунок 1.10 – Общий вид шредера, оснащенного двумя роторами

Они выполнены таким образом, чтобы измельчающий диск одного вала постоянно располагался между двумя дисками второго вала. Данная конструкция позволяет измельчать сырье в продольном и поперечном направлениях. Величина полученных частиц древесины определяется параметрами режущего диска и числом зубцов.

Угловая скорость ротора меньше, чем в барабанных или рубительных машинах (8–100 мин⁻¹). Для того, чтобы получить нужную фракцию щепы под ротором размещают калибровочный экран. Размер щепы на выходе из машины, оснащенной калибровочным ситом, определяется размером его ячеек. Количество произведенного материала данными измельчителями зависят от вида отходов и размеров ячеек калибратора.

Проведенный анализ конструкций технических средств применяемых для измельчения древесины и качества получаемой при помощи их щепы указывает на то, что при измельчении отходов лесозаготовок на топливную щепу в условиях лесосеки наиболее целесообразно использовать мобильные дисковые рубительные машины. Их отличает неприхотливость при измельчении древесного сырья (порубочные остатки, тонкомерная древесина и пр.), так как они имеют специальную вальцовую подачу сырья, а также узкий диапазон величин фракций изготовленной щепы. Имеется целый ряд отечественных и импортных мобильных дисковых рубильных машин, имеющих в своем составе, как рубильный модуль, так и контейнер для щепы, смонтированный на тракторе.

Разнообразие типов дисковых измельчающих устройств позволяет создавать из них машино-тракторные агрегаты (МТА) с различными показателями мощности, что определяет в дальнейшем условия его эксплуатации.

1.7 Анализ применяемых способов выброса щепы из дисковых рубительных машин

Удаление измельченной щепы из кожуха рубительного диска представляет собой последний этап рабочего процесса измельчения отходов лесозаготовок, определяет качество и объем получаемой продукции [56]. На рисунке 1.11 представлена классификационная схема способов выброса измельченного сырья из кожуха рубительных машин.

На сегодняшний день, основными способами выброса щепы из дисковых рубительных машин являются ударный и безударный. К ударному виду выброса щепы относят машины с верхним и нижним типом выброса щепы (рисунки 1.13, 1.14) [14, 18, 110].

Для осуществления выброса щепы в верхнем направлении в кожухе рубительного диска имеется патрубок, к которому подсоединяется щепопровод. Работа по перемещению измельченных древесных частиц по щепопроводу производится потоком воздуха, создаваемым лопатками, размещенными на приводной поверхности рубительного диска. Причем, щепопровод может быть развернут в любую сторону. Некоторые модели оборудуют приводом для дистанционного поворота и наклона отводящего щепопровода (рисунок 1.12) [110, 125].

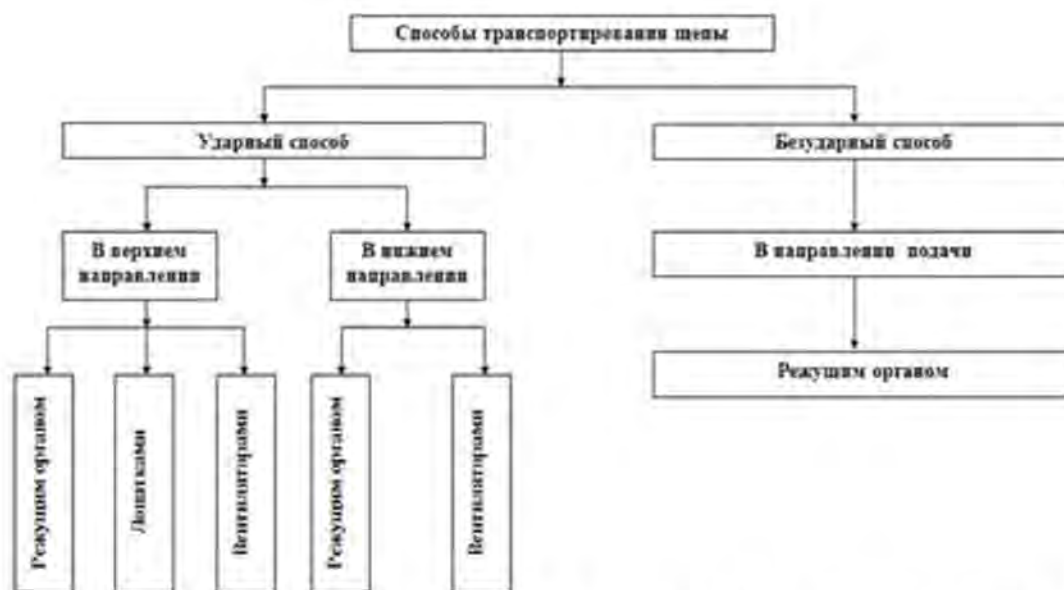
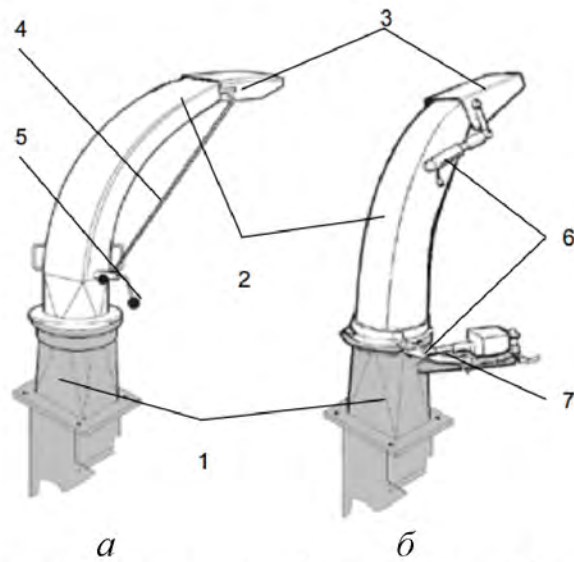


Рисунок 1.11 – Классификационная схема видов выброса щепы из кожуха рубительного диска

При измельчении древесного сырья такими машинами возможно удаление из транспортного потока частиц с неотделившимися волокнами, что сказывается на качестве щепы, они позволяют устанавливать на них калибровочное оборудование вследствие чего, возможно отделение объема мелкой фракции [122].

В машинах, имеющих нижний выброс, удаление щепы от рубительного диска, осуществляется под воздействием составляющей силы резания и силы тяжести собственного веса, при этом щепка беспрепятственно падает наотводящий конвейер или в бункер [18], при этом обод диска не снабжен вентиляционными лопатками. Считается, что щепка при этом способе выброса подвергается меньшим механическим воздействиям и разрушению.

Основным недостатком рубительных машин с нижним выбросом является затрудненный сбор щепы, вследствие расположения выходного окна щепопровода на уровне основания машины вследствие этого необходимы дополнительные конструктивные элементы для отвода щепы. Поэтому данную конструктивную компоновку выброса щепы целесообразно применять в стационарных рубительных машинах [5], что невозможно при производстве щепы прямо на лесосеке.



а – вручную; б – гидравлически; 1 – основание; 2 – щепопровод; 3 – заслонка; 4 – тяга; 5 – рычаг; 6 – гидроцилиндр; 7 – рычаг и поворачивающаяся рукоять

Рисунок 1.12 – Вращающийся щепопровод с регулируемой заслонкой выброса щепы



Рисунок 1.13 – Конструктивное исполнение рубительной машины с верхним выбросом щепы



Рисунок 1.14 – Конструктивное исполнение рубительной машины с нижним выбросом щепы

При безударном способе выброса щепы, ее удаление осуществляется без ударов по касательной к рубительному диску и направляется в патрубок по направлению подачи сырья в машину. Этот способ еще называют «прямоточным». Безударный выброс щепы используется при измельчении древесного сырья на пониженных скоростях [18]. Благодаря ориентированному расположению осей подающего патрона и щепоотводящего патрубка, кинетическая энергия, сообщенная частицам щепы режущими ножами в процессе рубки, используется для ее транспортировки в транспортную емкость [18,21]. Этот способ позволяет существенно снизить повреждаемость щепы. Но так, же как и машины с нижним выбросом, его целесообразно использовать в стационарных машинах в условиях предприятия (цеха).

Анализируя вышесказанное можно отметить тот факт, что ударное воздействие диска на элементы щепы способствует их дальнейшему взаимодействию со стенками кожуха, что образует расслоение щепы. Это является причиной возрастания в общем объеме полученной щепы части мелкой фракции, а безударная эвакуация щепы из кожуха рубительного диска увеличивает выход крупной фракции на 5-6 % [22,42,44].

Исследуя различные способы выброса щепы, полученной из отходов лесозаготовок можно свидетельствовать, что при ее производстве целесообразнее и выгоднее применять мобильные рубительные машины дискового типа, осуществляющие верхний выброс, так как технические решения в их конструкции позволяют упрощать сбор и вывоз щепы потребителям [120].

Уменьшение величины кондиционной щепы в машинах с верхним выбросом в сравнении с измельчителями, выбрасывающими щепу в нижнем направлении, не является критериальным, потому что параметры топливной щепы не ограничены техническими условиями. Практическое использование щепы из отходов лесозаготовок для целей биоэнергетики, показывает, что в

общий объем произведенной щепы мобильными измельчителями, не должно входить значительное количество щепы мелкой фракции. Для решения данной задачи необходимо проведение дополнительных научных исследований конструкций рубительных машин.

1.8 Анализ исследований рабочего процесса выброса щепы из дисковых рубительных машин с верхним выбросом

Путь, который щепка проходит от момента своего образования до выхода из рубительной машины, зависит, в основном, от конструкции машины [94,119].

Способ выброса щепы и рабочий процесс удаления из кожуха рубительной машины оказывает большое влияние на качество получаемой щепы и количество потерь, возникающих при ее производстве.

Рабочий процесс удаления щепы с верхним выбросом у всех дисковых рубительных машин, практически, одинаков: от ножей вращающегося диска образующаяся щепка через подножевые отверстия диска выбрасывается в кожух. В кожухе, щепка лопатками диска захватывается и выбрасывается в щепопровод, расположенный, как правило, сверху кожуха под некоторым углом [42, 46, 56,67].

Исследованиям выброса щепы из измельчающих устройств посвятили свои работы Аликин Г.П., Лаунтер Э.М., Вальщиков Н.М., Житков А.В., Рубцов В.М., Рушнов Н.П., Толпыго В.А. Гусаров А.А., Фридман М.Л. и др.

Известно, что на процесс удаления щепы из кожуха рубительной машины влияет конструкция диска (наличие подножевых щелей), ширина и диаметр кожуха, размер и конструкция щепопровода, количество и размер вентиляционных лопаток, а также технологические параметры такие как скорость резания, скорость движения щепы и др.

Исследования Сюнёва В.С.[92] показывают, что ширину лопаток и ширину кожуха необходимо рассчитывать, исходя из размеров сечения патрона, который обеспечивает загрузку материала большого диаметра.

Радиальную длину лопаток автор предлагает определять по формуле:

$$l_l = \frac{D_n + D_c}{2i}; \quad (1.1)$$

Количество лопаток зависит от количества ножей на диске, но их должно быть не менее 6-8. Для малоножевых машин на каждый нож по две лопатки. Автор отмечает, что сечение щепопровода может иметь квадратную, круглую или прямоугольную форму. Необходимо, чтобы ширина (диаметр) щепопровода равнялась ширине кожуха машины так, как данный фактне позволяет создавать дополнительных сопротивлений при входе продукта в устройство выброса материала [92].

Кожух рубительной машины должен позволять размещать в нем ножевой диск, а с приводной стороны оставаться пространство для прохода щепы, образующейся в процессе отруба. Параметры щепопровода находятся в

зависимости от технических особенностей рубительной машины, высоты кузова щеповоза. Автором предлагается рассчитывать высоту щепопровода по формуле:

$$h_{щ} = (0,65 \dots 0,75) \times B_k \quad (1.2)$$

В трудах Санникова А.А. отмечено, что многоножевые рубительные диски должны обладать числом лопаток соответствующих количеству режущих ножей для того, чтобы щепы, отделяемая при одном отрубке сырья, сразу же своевременно удалялась из кожуха машины [86]. Автором отмечено, что влияние числа лопаток механизма на выброс менее значительно и, что наибольшее влияние, среди конструктивных факторов, оказывает выходной угол лопаток.

Параметры прямоугольной формы щепопровода должны соответствовать следующим пропорциям: ширина больше высоты в 1,3 - 1,5 раза [86].

Основным недостатком рубительных машин с верхним выбросом, включающей кожух с ножевым диском, лопатками и щеповыводящий патрубок, является значительное снижение качества щепы ввиду ее ударов о кожух ножевого диска при ее выходе из под ножей, а также интенсивный износ стенки кожуха. И то и другое обусловлено тем, что щепы, отделенная ножом с большой силой и значительной скоростью, ударяется о стенку кожуха и только затем подхватывается лопатками.

Производительность, энергоэффективность и качество щепы могут быть улучшены путем правильной настройки рабочих параметров рубительной машины, особенно системы выгрузки щепы. Регулировка системы эвакуации может повысить целостность щепы на 20% [84].

Ряд ученых проводили исследования конструкций оборудования и рабочего процесса эвакуации щепы из рубительной машины. Пытаясь устранить те недостатки, которые указывались ранее.

Одним из ученых было предложено, заднюю стенку кожуха выполнить наклонно к торцевой плоскости ножевого диска под углом $15-30^\circ$ и покрывать ее изнутри упругим покрытием с износостойким материалом [64], автор считает, что это позволило бы снизить энергию удара щепы с задней стенкой кожуха на 30%.

Автором [66] рекомендуется, заднюю стенку кожуха, в зоне выхода потока щепы из подножевого отверстия, выполнить с выпуклостью. Выпуклость выполнить таким образом, что ее образующие будут иметь форму спиральных кривых, сужающихся к верхней стенке кожуха, в зону встречи потока щепы с лопаткой. Такое исполнение задней стенки кожуха, по мнению автора, позволит изменить траекторию полета (косого удара) щепы и подачу сфокусированного потока на лопатку с последующим безударным выходом в патрубок щепопровода. Недостатком указанной рубительной машины является относительно высокая интенсивность изнашивания задней стенки кожуха, относительно высокий процент щепы низкого качества и высокий уровень

шума. Поскольку, данная конструкция не снижает энергию удара щепы о стенку кожуха.

Предохранить щепу от деформаций и снизить качество шума, предлагают устранить авторы [68], для этого он рекомендует окно для выхода щепы, из-под ножей диска, выполнить в задней стенке кожуха, на которой смонтирован приемный бункер для сбора щепы. Машина с так называемым «безударным» удалением щепы (прямоточного типа). Для выравнивания давления внутри приемного бункера с атмосферным, в бункере предлагается установить дыхательную трубку с дефлектором. В исследованиях этих же авторов описывается рубительная машина, в которой снижение потерь щепы достигается устройством щепоотводящего патрубка, который установлен на корпусе напротив загрузочного патрона и пространственного воздухопровода, выполненного в виде пространственной спирали. Они считают что, благодаря спиральной форме воздухопровода, скоростное поле воздушного потока выравнивается, тем самым обеспечивается эффективное пневмо транспортирование и исключаются удары щепы о конструктивные элементы, щепы из щепоотводящего патрубка, а также снижает рабочий шум.

С целью обеспечения поточного движения измельченной древесины и снижения уровня шума при эксплуатации рубительной машины, профессор Лаутнер Э.М. [73] предложил расположить продольные оси загрузочного патрона и щепопровода в горизонтальной и вертикальной плоскостях под углами от 1° до 30° . Исследования автора доказали, что в данной конструктивной схеме измельчителя щепы не соударяется со стенками кожуха и щепопровода, что способствует полному устранению нагрузки на элементы щепы и позволяет использовать энергию, накопленную при получении щепы на выброс с уменьшением объема некондиционной мелкой фракции.

Кроме того, Лаутнером Э.М. были проведены исследования в области движения образовавшейся щепы и влияние на это движение различных факторов. Автор установил, что из исследуемых факторов наибольшее влияние на скорость полета щепы оказывает угол встречи φ с неподвижными элементами, меньшее влажность древесины W , а величина зазора Δ между ножом и контрножом практически не влияет. В зависимости от количества лопаток и угла их наклона относительно оси вращения диска происходит регулировка дальности транспортировки щепы после ее эвакуации из рубительной машины. Автор, делает вывод, что при соответствующем подборе углов расположения прорезей к плоскости вращения диска, щепы будут контактировать с задней стенкой прорези, которая в данном случае, превратится в направляющую щепы.

Интересно, что рассчитанные значения критических углов встречи с щепоотводящим патрубком, показали, что при скорости полета 30-40 м/с (скорость вылета щепы из дисковой рубильной машины и при пневмотранспорте) предпочтительным считается угол встречи с поверхностью в пределах $20...30^\circ$ [42, 73]. При этом, автор отмечает, что угол встречи с неподвижным элементом имеет наибольшее влияние на скорость полета щепы,

а на измельчаемость щепы большее влияние имеет влажность древесины, чем угол встречи.

На основании всех своих теоретических и экспериментальных исследований, автор, предлагает, вентиляционные лопатки, установить под углом к оси вращения ножевого диска $\alpha=1-170^\circ$ это, по мнению автора, поможет устранить удар о лопатки.

Принципиально отличается от выше изложенных техническое решение, в котором автор работы [69], предлагает установить внутри кожуха, с приводной стороны диска, устройство, имеющее кольцеобразный спрыск для подачи жидкости и со свободно установленной на валу крыльчаткой, с винтообразными лопастями, которые расположены над кольцеобразным спрыском. Распыляемые струи, увеличивают сопротивление потоку щепы, снижая при этом, коэффициент трения частиц щепы при ударах о стенки кожуха и при трении частиц щепы друг о друга. Винтообразные лопасти увеличивают смачиваемость щепы и позволяют уменьшить скорость движения щепы, что, по мнению автора, уменьшает повреждаемость щепы при ее ударах о стенки разгрузочного патрона и друг о друга. Недостатком данного способа, можно считать повышение влажности получаемого материала, что не желательно для производства топливной щепы.

Известно несколько работ, где ученые изменяли конструкцию щепоотводящего патрубка для улучшения эффективности удаления щепы. В результате, появилась разработка дисковой рубительной машины, Грошева В.С. и др. [65] в которой авторы работы предположили, что если щепоотводящий патрубок сориентировать таким образом, что его ось будет совпадать с осью условного усеченного конуса и будет перпендикулярна к плоскости ножевого диска, а угол при вершине конуса будет равен 40° , то направление движения щепы, после отруба, будет перпендикулярно плоскости резания, отклоняясь при этом не более чем 20° . В результате, будет обеспечиваться безударный отвод щепы из кожуха. Ранее этими же учеными предлагалась рубительная машина для измельчения целых деревьев, у которой внутри кожуха смонтирована кольцевая перегородка и со стороны загрузочного патрона на ножевом диске закреплены дополнительные лопатки [64]. Причем, кольцевая перегородка играет роль сортировочного устройства, а дополнительные лопатки, по мнению ученого, обеспечивают эффективное удаление щепы.

Известно техническое решение, разработанное Дин Вильямсом Шиилдсом, включающее вращающийся диск с ножами, а вместо лопаток на диске, установлена крыльчатка на одном валу с диском [70]. Однако, от подобного устройства вряд ли можно ожидать устойчивого удаления щепы из кожуха, поскольку роль крыльчатки ограничена только созданием воздушного потока, который будет недостаточным для эффекта пневмотранспортировки.

Для повышения эффективности процесса выброса щепы через щепопровод, автором [74] предложена модель машины с ножевым диском, на котором установлены четыре прямолинейные лопатки длиной, равной радиусу

измельчителя, на торцовой поверхности которого имеются выступы прямоугольной формы, совмещенные с лопатками. Конструкция устройства, повысит эффективность процесса выброса щепы через щепопровод, путем создания повышенного давления в его кожухе с возможностью механической транспортировки щепы из всего объема кожуха щепопровода.

Известна и запатентована рубительная машина в которой для транспортирования щепы из подножевых отверстий, на задней поверхности ножевого диска установлена накладная пластина. Для создания вентиляции в кожухе, преимущественно в пространстве между задней поверхностью диска и внутренней поверхностью задней стенки кожуха, поверхность пластины может быть выполнена изогнутой по направлению подножевого отверстия по профилю. Авторы предполагают, что данная конструкция позволяет снизить износ задней стенки кожуха и уменьшить повреждаемость щепы, а также снизить уровень шума [71].

Для более полной картины удаления щепы, а также для того чтобы установить на каких именно этапах транспортирования действуют наибольшие ударные (нагрузки) силы, оказывающие влияние на качество щепы и устранения этих отрицательных факторов, учеными изучались, происходящие при транспортировании щепы, процессы внутри кожуха и отводящем щепопроводе.

Итак, многие авторы [14, 18, 42, 46, 66, 71, 72, 74] исследовали влияние скорости резания на скорость перемещения образующейся щепы. В момент внедрения ножа скорость щепы равна скорости резания. Когда образовавшаяся щепка освобождается от нагрузки в виде перехода потенциальной энергии упругой деформации резания-рубки и переходит в кинетическую энергию движения, скорость щепы увеличивается. Теоретические исследования, а также скоростная киносъемка процесса измельчения показали, что скорость движения щепы при эвакуации из зоны резания в зависимости от различных условий колеблется от 25 до 120 м/с [18]. Большие параметры скорости приводят к снижению качества щепы после ее соприкосновения стенками кожуха и с лопатками. Авторами выяснено, что удар частиц щепы происходит примерно под углом около 45° , что соответствует теории о том, что щепка движется по направлению подачи лесоматериалов в зону рубки. Это приводит к расслоению щепы и образованию мелкой фракции.

Факт снижения количества мелочи и опилок в щепе пропорционально снижению скорости рубки подтвердили исследования многих зарубежных ученых [134,140,142,143, 144,145,146,148, 150,151,155].

Профессор Вальщиков Н.М. [14] исследовал пневматический способ эвакуации щепы. Он проводил оценку вентиляционной способности рубительных машин (параметры воздушного потока в щепопроводе) и показатели механического воздействия лопаток на щепу.

Его исследования показали что, создаваемый рубительным диском с лопатками воздушный поток не способен обеспечивать надежного транспортирования щепы из кожуха машины. И что наряду с созданием

воздушного потока, лопасти на диске создают дополнительное механическое воздействие на выброс щепы.

При механическом выбросе щепы из кожуха измельчителя значительные затраты энергии связаны с подъемом щепы в верхнюю часть кожуха рубительного диска и на создание кинетической энергии при сходе частиц с лопаток. Автором отмечено, что создаваемый поток воздуха выполняет лишь второстепенные функции, и способствует выбрасыванию только мелких частиц.

Причем, механическое перемещение значительно влияет на скорость элементов щепы при первоначальном периоде движения, в течение 0,5-1,0 с. Предполагалось, что в коротком щепопроводе длиной не более 6-8 м, данного промежутка времени будет достаточно, чтобы щепка попала в циклон. На основе анализа, существующих конструкций рубительных машин, автором были даны рекомендации по выбору параметров щепопровода [14]. Однако, автор отмечает приближенный характер своих исследований и указывает, что вопрос движения щепы в щепопроводе и соударений частиц требует дополнительного изучения.

При изучении механического выбрасывания, автор предлагает обратить внимание на радиальные размеры лопаток и на их окружную скорость. Так как при больших окружных скоростях лопаток диска щепка сильно дробится.

В этой связи, ЦНИИМЭ было рекомендовано окружную скорость лопаток иметь не более 40-45 м/с. Однако, исследования Вальщикова Н.М. показывают, что у некоторых типов машин окружные скорости на ободке лопаток достигают 50-53 м/с. Поэтому в этом вопросе нет определенной ясности и требуется дополнительное исследование.

Установлено, что траектория движения щепы при таких значениях скорости лопаток зависит от скорости измельчения сырья, физических параметров древесины и коэффициента трения щепы при ее перемещении по поверхности режущего ножа.

Наиболее распространенным является положение о том, перемещение измельченной щепы происходит под действием упругих сил, вызванных внедрением ножа и под действием центробежных сил по направлению подачи лесоматериалов [18,28,42,66,73,104]. Образующаяся щепка перемещается по передней грани ножа в подножевую щель. Направление дальнейшего движения определяется ее расположением относительно стенок подножевой прорези [46]. При этом транспортирование щепы основано на использовании энергии вращающихся лопаток, от которых частицы щепы, получая определенный ее запас, направляются в потоке смеси с воздухом по трубопроводу в транспортную ёмкость [14].

Движение частиц щепы в трубопроводе происходит в стесненных условиях и сопровождается их ударами между собой, ударами некоторой их части о стенки трубы; наконец, все они воспринимают сопротивление воздушного потока, так как скорости схода этих частиц с лопаток значительно больше скорости воздушного потока [14, 28,42, 71, 72, 74].

Теоретические и экспериментальные исследования процесса выброса щепы, проведенные Аликиным Г.П. [69] подтвердили мнение о том, что лучшее качество щепы достигается при упорядоченном выбросе частиц в патрубок щепопровода при скорости, не превышающей 30 м/с и условии направленного выброса.

Автором отмечено, что наибольшее влияние оказывает выходной угол лопаток. Для создания условий направленного выброса необходимо обеспечить определенные параметры лопатки. Исследования параметров лопаток механизма выброса показали, что безударный вход частиц щепы в щепопровод может быть обеспечен условием параллельности вектора скорости схода частиц с лопатки и стенок щепопровода. При этом наилучшими значениями выходного угла лопаток будет угол, равный 80-85°, что обеспечит минимальный угол встречи щепы с неподвижным элементом т.е. с щепопроводом. Так же автор утверждает, что влияние числа лопаток и стесненность в кожухе и трубопроводе менее значительно.

Авторы работы [46, 73] провели теоретическое исследование движения щепы и происходящих при этом физических явлений. Ими было определено, что максимальную нагрузку приходится на щепу при первом соприкосновении с кожухом машины. Они рассмотрели взаимодействие одиночной щепки с задней поверхностью кожуха.

В результате расчетов был получен коэффициент η , который связывает скорость кромки рубительного ножа со скоростью перемещения полученной щепы:

$$v_{щ} = \eta \times v_p; \quad (1.3)$$

где v_p – скорость полета щепы, η – коэффициент упругости, который зависит от свойств древесного сырья, направления сжатия волокон и величины скорости резания.

Рассматриваемый метод оценивает воздействие только единичного элемента щепы на заднюю стенку кожуха, что недостаточно точно, так как по результатам исследований щепка имеет групповое перемещение. Установлено, что с кожухом взаимодействует щепка, двигающаяся в авангарде группы, а оставшаяся часть не имеет непосредственного контакта со стенками кожуха.

Проведенными исследованиями Симоновой И.В. [88, 93] установлено, что в диапазоне скоростей резания от 17 до 38 м/с сила влияния скорости резания на долю образующихся потерь составляет 0,928. Полученные автором результаты свидетельствуют о том, что при геликоидальной форме диска и скорости резания, равной 17 м/с, обеспечивается наименьшая доля потерь в щепе, при этом доля в щепе мелкой и крупной фракции также меньше на 1,3 % по сравнению с плоской наладкой. Таким образом, исследования автора выявили значимость влияния скорости резания и формы диска, но не установили какой будет скорость щепы при данной скорости резания, какая траектория полета и будут ли значительными удары частиц щепы о кожух и диск.

Научные результаты, приведенные Фокиным С.В., свидетельствуют о том, что произведенная щепка перемещается по передней грани рубительного ножа в подножевую щель, а направление ее дальнейшего перемещения зависит от расположения щепки относительно стенок подножевой прорези [109]. С уменьшением угла расположения стенки прорези к плоскости вращения диска время контакта щепки с верхней стенкой сокращается до 0 т.е., постепенно уменьшает влияние этой стенки на направление полета щепки, что приводит к изменению направления движения щепки.

В работе Лоя В.Н. утверждается, что перемещение щепки основывается на использовании энергии вращающихся лопаток, взаимодействуя с которыми элементы щепки, получают дополнительный импульс и направляются в потоке воздушной смеси по щепопроводу в транспортную ёмкость [44].

Ученые [72] исследовавшие движение щепки в щепопроводе, пришли к выводу, что изменив конструкцию щепопровода, можно снизить энергию удара щепки. Образующаяся в процессе резания, щепка удаляется за счет вентиляционного эффекта и механического выбрасывания через прямолинейный участок трубопровода в криволинейный участок. При этом в криволинейном участке, необходимо обеспечить дополнительный воздушный поток за счет специальных щелей, расположенных на рабочей стенке трубопровода. Наличие отверстий создаст воздушную завесу, способствующую прижиму потока щепки к рабочей стенке. Дополнительный воздушный поток, а также за счет расширения криволинейного участка трубопровода, происходит аэродинамическое торможение потока щепки, при этой слой щепки по мере движения уменьшает свою толщину. Таким образом, происходит полное рассредоточение наружных слоев потока по рабочей стенке и обеспечивается направленное движение щепки.

Обзор результатов научных трудов Вальщикова Н.М., Лаутнера Э.М. Аликикна Г.П., Фокина С.В., Санникова А.А., Лоя В.Н. и др. посвященных исследованиям рабочего процесса удаления щепки из рубительных машин, свидетельствуют о том, что перемещение элементов щепки в щепопроводе происходит в пределах малого объема, вызывая их взаимодействие между собой и стенками кожуха, что вызывает разрушение щепки. При этом на величину энергии удара оказывает линейная скорость щепки и ее траектория, а также конструктивное исполнение лопаток и щепопровода. Однако, вопрос движения щепки в щепопроводе и соударений частиц требует дополнительного изучения [95]. Поэтому необходимо продолжить исследования рабочего процесса выброса щепки из дисковых рубительных машин и конструктивных элементов механизма с целью их дальнейшего совершенствования.

Выводы

1. Анализ лесосырьевой базы Тюменской области показал, что имеющиеся значительные запасы мягколиственной низкокачественной древесины и отходов лесозаготовок могут стать базой для развития биоэнергетической отрасли региона, тем самым способствуя увеличению объемов лесопользования и более полного освоения расчетной лесосеки, а также позволяя решить проблему утилизации отходов и вопросы рационального использования древесного сырья.

2. Оптимальной технологией использования отходов лесозаготовок и низкокачественного древесного сырья является получение из них топливной щепы с применением мобильных рубительных машин дискового типа, которые обеспечивают удаление щепы на расстояния, позволяющие обеспечить наиболее удобный сбор и транспортировку потребителю.

3. Проведенный анализ теплотворной способности древесного топлива показал, что при дополнительной очистке от минеральных примесей, обезвоживании и др., можно получить вид биотоплива с повышенными теплотворными способностями, практически неуступающими традиционному. При этом не требуется серьезных модификаций оборудования для сжигания топлива, а вредные выбросы резко снижаются по сравнению с ископаемыми углеводородными топливами, что обеспечит экологическую безопасность региона.

4. Процесс выброса щепы из рубительной машины зависит конструктивных элементов механизма. Основными конструктивными элементами являются рубительный диск с установленными на нем лопатками и щепоотводящий патрубок. Качество и объем полученной щепы обеспечивается в процессе удаления щепы из кожуха дисковой рубительной машины, который является заключительной стадией производства.

5. Щепка подвергается ударам и дополнительному дроблению при движении внутри кожуха машины и по щепопроводу, а основным фактором, влияющим на величину энергии удара является линейная скорость движения, траектория щепы и конструктивное строение лопаток и щепопровода.

ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ВЫБРОСА ЩЕПЫ ИЗ ДИСКОВОЙ РУБИТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ ДЛЯ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ОТХОДОВ ЛЕСОЗАГОТОВОК

2.1 Общие положения модели рабочего процесса выброса щепы из дисковой рубительной машины для измельчения отходов лесозаготовок

Несмотря на то, что в литературе можно найти экспериментальные и качественные теоретические оценки механизмов выброса щепы, отсутствуют комплексные теоретические подходы, позволяющие с высокой физической адекватностью и «из первых принципов» моделировать работу механизма выброса щепы [21,30,107].

Такое физико-математическое моделирование позволило бы обоснованно проектировать и оптимизировать параметры механизма выброса щепы. Поэтому цель данного раздела заключалась в разработке физико-математической модели механизма выброса щепы, обладающей высокой физической адекватностью и удобством исследования, позволяющей количественно оценить эффективность механизма при его различных конструктивных параметрах, найти оптимальные диапазоны параметров [37,51,75,107].

С точки зрения физики процесса, движение потока щепы в механизме является чрезвычайно сложным объектом для моделирования. До появления компьютерной техники для аналогичных задач использовались аналитические методы (обычно в приближении сплошной среды), которые не позволяли достаточно адекватно представить вихревые процессы движения среды.

В настоящее время для описания движения потоков высокую эффективность показывают различные модификации метода динамики частиц [17,21,37,49]. Поэтому один из вариантов метода динамики частиц и был использован в данной работе. В рамках данного метода поток щепы разбивается на отдельные элементы шарообразной формы (рисунок 2.1). Элементы обладают физическими свойствами древесины, описываются плотностью, коэффициентами упругости и вязкого трения. В отличие от приближения сплошной среды, в методе динамики частиц элементы могут двигаться в пространстве, как отдельные физические тела, подчиняясь законам классической динамики. При этом элементы могут взаимодействовать между собой и с рабочими поверхностями механизма выброса щепы (рисунок 2.2).

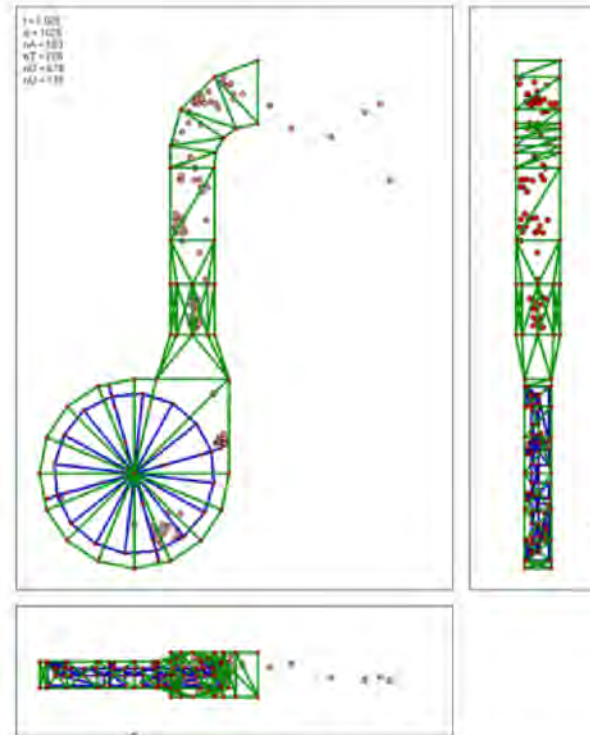


Рисунок 2.1 – Представление в модели механизма выброса щепы (три декартовы проекции)

Такое разбиение среды на отдельные элементы позволяет воспроизводить сложные явления в движущемся потоке: перераспределение кинетической энергии, вихревое и турбулентное движение, смешивание потоков с различными кинетическими параметрами [10,17, 30, 75,79].

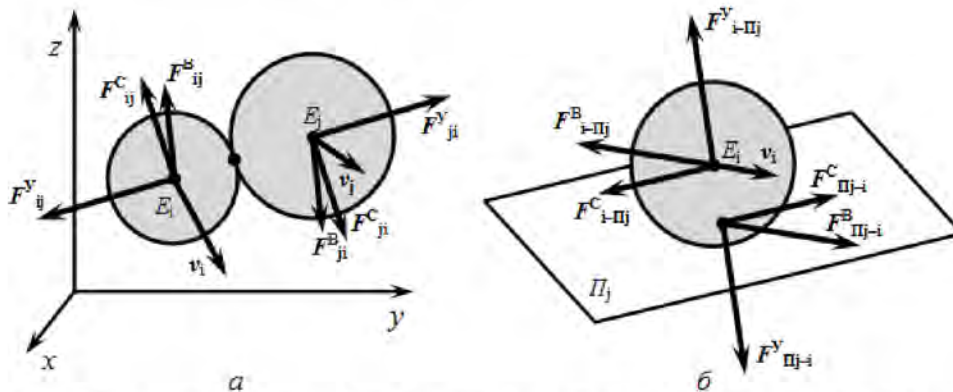


Рисунок 2.2 – Графическое отображение усилий, создаваемых при соударении элементов щепы (а) с поверхностью кожуха (б):

F^y – упругие усилия; F^c и F^b – усилия сухого и вязкого трения

Каждый i -й элемент-щепы в модели задается шестью переменными:

- расположение в пространстве задается декартовыми координатами x_i , y_i , z_i ;

- скорость движения задается компонентами v_{xi} , v_{yi} , v_{zi} ;

Механическое движение элементов как отдельных тел описывается с помощью второго закона Ньютона:

$$\begin{aligned}
& \left. \begin{aligned}
& i=1..N_{\mathcal{O}}; \\
& m_i \frac{d^2 x_i}{dt^2} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N_{\mathcal{O}}} \left\{ c_{ij} \left(\frac{d_i + d_j}{2} - r_{ij} \right) \frac{(x_i - x_j)}{r_{ij}} + \left(k_{ij}^C \frac{v_{xi} - v_{xj}}{|\vec{v}_i - \vec{v}_j|} + k_{ij}^B (v_{xi} - v_{xj}) \right) c_{ij} \left(r_{ij} - \alpha_0 \frac{d_i + d_j}{2} \right), r_{ij} < \alpha_0 \frac{d_i + d_j}{2}; \right. \\
& \left. 0, r_{ij} \geq \alpha_0 \frac{d_i + d_j}{2}; \right\} + \\
& + \sum_{j=1}^{N_{\Pi}} \left\{ c_{i-\Pi j} \left(\frac{d_i}{2} - r_{i-\Pi j} \right) \frac{(x_i - x_{i-\Pi j})}{r_{i-\Pi j}} + \left(k_{ij}^C \frac{v_{xi} - v_{x\Pi j}}{|\vec{v}_i - \vec{v}_{\Pi j}|} + k_{ij}^B (v_{xi} - v_{x\Pi j}) \right) c_{ij} \left(r_{i-\Pi j} - \alpha_0 \frac{d_i}{2} \right), r_{i-\Pi j} < \alpha_0 \frac{d_i}{2}; \right. \\
& \left. 0, r_{i-\Pi j} \geq \alpha_0 \frac{d_i}{2}; \right\}; \\
& m_i \frac{d^2 y_i}{dt^2} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N_{\mathcal{O}}} \left\{ c_{ij} \left(\frac{d_i + d_j}{2} - r_{ij} \right) \frac{(y_i - y_j)}{r_{ij}} + \left(k_{ij}^C \frac{v_{yi} - v_{yj}}{|\vec{v}_i - \vec{v}_j|} + k_{ij}^B (v_{yi} - v_{yj}) \right) c_{ij} \left(r_{ij} - \alpha_0 \frac{d_i + d_j}{2} \right), r_{ij} < \alpha_0 \frac{d_i + d_j}{2}; \right. \\
& \left. 0, r_{ij} \geq \alpha_0 \frac{d_i + d_j}{2}; \right\} + \\
& + \sum_{j=1}^{N_{\Pi}} \left\{ c_{i-\Pi j} \left(\frac{d_i}{2} - r_{i-\Pi j} \right) \frac{(y_i - y_{i-\Pi j})}{r_{i-\Pi j}} + \left(k_{ij}^C \frac{v_{yi} - v_{y\Pi j}}{|\vec{v}_i - \vec{v}_{\Pi j}|} + k_{ij}^B (v_{yi} - v_{y\Pi j}) \right) c_{ij} \left(r_{i-\Pi j} - \alpha_0 \frac{d_i}{2} \right), r_{i-\Pi j} < \alpha_0 \frac{d_i}{2}; \right. \\
& \left. 0, r_{i-\Pi j} \geq \alpha_0 \frac{d_i}{2}; \right\}; \\
& m_i \frac{d^2 z_i}{dt^2} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N_{\mathcal{O}}} \left\{ c_{ij} \left(\frac{d_i + d_j}{2} - r_{ij} \right) \frac{(z_i - z_j)}{r_{ij}} + \left(k_{ij}^C \frac{v_{zi} - v_{zj}}{|\vec{v}_i - \vec{v}_j|} + k_{ij}^B (v_{zi} - v_{zj}) \right) c_{ij} \left(r_{ij} - \alpha_0 \frac{d_i + d_j}{2} \right), r_{ij} < \alpha_0 \frac{d_i + d_j}{2}; \right. \\
& \left. 0, r_{ij} \geq \alpha_0 \frac{d_i + d_j}{2}; \right\} + \\
& + \sum_{j=1}^{N_{\Pi}} \left\{ c_{i-\Pi j} \left(\frac{d_i}{2} - r_{i-\Pi j} \right) \frac{(z_i - z_{i-\Pi j})}{r_{i-\Pi j}} + \left(k_{ij}^C \frac{v_{zi} - v_{z\Pi j}}{|\vec{v}_i - \vec{v}_{\Pi j}|} + k_{ij}^B (v_{zi} - v_{z\Pi j}) \right) c_{ij} \left(r_{i-\Pi j} - \alpha_0 \frac{d_i}{2} \right), r_{i-\Pi j} < \alpha_0 \frac{d_i}{2}; \right. \\
& \left. 0, r_{i-\Pi j} \geq \alpha_0 \frac{d_i}{2}; \right\} - m_i g,
\end{aligned} \right. \quad (2.1)
\end{aligned}$$

где i – номер элемента-щепы; $N_{\mathcal{O}}$ – количество элементов; m_i – масса элемента; t – время; j – номер элемента, возможно контактирующего с i -м элементом; c_{ij} – коэффициент жесткости взаимодействия элементов i и j (рассчитывается через объемный модуль упругости древесины) k_{ij}^C и k_{ij}^B – коэффициенты сухого трения элементов i и j друг о друга; d_i – диаметр i -го элемента; r_{ij} – расстояние между центрами элементов i и j ; α_0 – коэффициент ограничения взаимодействия между элементами (находится в диапазоне 1,0...1,1); N_{Π} – количество элементарных поверхностей механизма выброса щепы; $c_{i-\Pi j}$, $k_{Ci-\Pi j}$ и $k_{Bi-\Pi j}$ – коэффициенты жесткости, сухого и вязкого трения при взаимодействии элемента i с поверхностью j ; $r_{i-\Pi j}$ – расстояние от центра i -го элемента до j -й поверхности; $x_{i-\Pi j}$, $y_{i-\Pi j}$, $z_{i-\Pi j}$ – декартовы координаты точки-проекции центра элемента i на поверхность j ; $v_{x\Pi j}$, $v_{y\Pi j}$, $v_{z\Pi j}$ – компоненты скорости центра j -й элементарной поверхности; $|\dots|$ – модуль вектора; g – ускорение свободного падения.

Расстояние r_{ij} между осями симметрии частиц материала вычисляется путем определения положения центров по постулату, определяющему связь параметров сторон прямоугольного треугольника:

$$r_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2}.$$

Результатами вычислений будут зависимости $x_i(t)$, $y_i(t)$, $z_i(t)$, указывающие на траекторию перемещения частиц материала в механизме выброса щепы из кожуха и дают возможность сравнить параметры эффективности устройства [105].

Элементарные поверхности механизма выброса щепы задаются аналитическими уравнениями, с помощью которых определяется расстояние r_{ij} между центром элемента i и элементарной поверхностью j .

Выражения (2.1) являются дифференциальными уравнениями второго порядка и вычисляются в процессе моделирования рабочего процесса методом Рунге-Кутты [17, 18, 21, 131]:

$$\begin{aligned} x_i^{\tau+1} &= x_i^{\tau} + v_{xi}^{\tau} \cdot \Delta t + a_{xi}^{\tau} \cdot (\Delta t)^2 / 2; \quad v_{xi}^{\tau+1} = v_{xi}^{\tau} + a_{xi}^{\tau} \cdot \Delta t; \\ y_i^{\tau+1} &= y_i^{\tau} + v_{yi}^{\tau} \cdot \Delta t + a_{yi}^{\tau} \cdot (\Delta t)^2 / 2; \quad v_{yi}^{\tau+1} = v_{yi}^{\tau} + a_{yi}^{\tau} \cdot \Delta t; \\ z_i^{\tau+1} &= z_i^{\tau} + v_{zi}^{\tau} \cdot \Delta t + a_{zi}^{\tau} \cdot (\Delta t)^2 / 2; \quad v_{zi}^{\tau+1} = v_{zi}^{\tau} + a_{zi}^{\tau} \cdot \Delta t, \end{aligned} \quad (2.2)$$

где i – порядковый номер элементащепы, τ и $\tau+1$ – индексы /интервала; Δt – интервалсопряжения по длительности; (x_i, y_i, z_i) , (v_{xi}, v_{yi}, v_{zi}) и (a_{xi}, a_{yi}, a_{zi}) – координаты элемнте, его скорость и ускорение.

2.2 Представление в модели рабочих поверхностей механизма выброса щепы

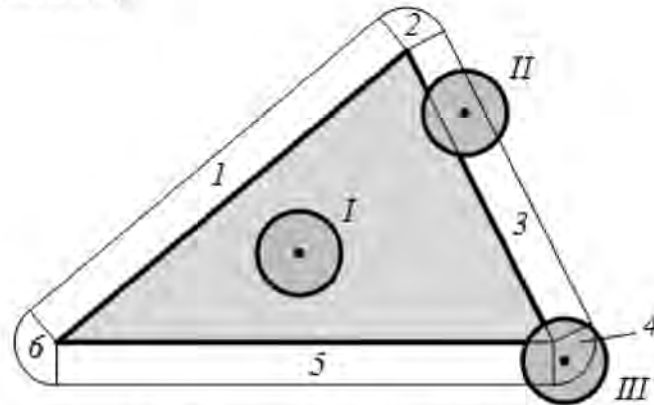
Рабочие поверхности механизма выброса щепы в модели представлены совокупностью фрагментов плоскостей, состыкованных друг с другом [53, 106, 129]. Элементарные поверхности кожуха и щепопровода неподвижны в процессе моделирования, элементарные поверхности рубительного диска совершают в пространстве вращательное движение вокруг оси диска с заданной угловой скоростью.

Многообразная конфигурация рубительного диска, кожуха, щепопровода представлена совокупностью из 146 элементарных треугольников, соединенных между собой (рисунок 2.1).

При контакте элементарной поверхности механизма выброса в форме треугольника $П_с$ элементом-щепой i , в соответствии с выражением 2.1 возникают факторы отталкивания или притяжения, а в случае изучения загрязненной древесины, используется коэффициентом α_0 . Нагрузки, действующие на элемент-щепу, изменяют траекторию его движения [17,147].

Для расчета величин нагрузок необходимо сформировать математический инструмент, позволяющий находить вероятность взаимодействия элемента щепы с элементарной поверхностью механизма выброса щепы, а приих контакте рассчитать его местоположение на поверхности: в центральной части (вариант I на рисунке 2.3), ребре (вариант II на рисунке 2.3) или угловой части

(вариант III на рисунке 2.3).



I – поверхность; *II* – сторона,

III – вершина. Попадание центральной части частиц материала в области 1, 3, 5 она взаимодействует со стороной треугольной поверхности, при расположении частиц в областях 2, 4, 6 – с вершиной треугольника

Рисунок 2.3 – Типы контакта частиц материала с простейшей треугольной поверхностью

Полученный параметр промежутка $r_{i-Пj}$ от частицы материала до поверхности, позволяет найти значение силы отталкивания, а так же вектор перемещения действия усилия в границах $E_i - E_{инт}$, где E_i и $E_{инт}$ – положение оси симметрии частицы материала и его отображения на частях треугольной поверхности.

Исследование результатов контактов частиц материала i с частями треугольной поверхности $П_j$ (случай I) позволило установить порядок расчетов. Первоначально находится расположение центральной части элемента (x_i, y_i, z_i) на треугольной плоскости, а затем выявляют место нахождения проекции частицы материала внутри рассматриваемой области.

Расположение центральной части элемента (x_i, y_i, z_i) на треугольной плоскости определяется путем формирования уравнения области, ограниченной вершинами фигуры T_{j1}, T_{j2}, T_{j3} :

$$\begin{vmatrix} x - x_{j1} & y - y_{j1} & z - z_{j1} \\ x_{j2} - x_{j1} & y_{j2} - y_{j1} & z_{j2} - z_{j1} \\ x_{j3} - x_{j1} & y_{j3} - y_{j1} & z_{j3} - z_{j1} \end{vmatrix} = 0, \quad (2.9)$$

где x, y, z – положение точки на треугольной области; x_{j1}, y_{j1}, z_{j1} – расположение вершины T_{j1} ; x_{j2}, y_{j2}, z_{j2} – вершины T_{j2} ; x_{j3}, y_{j3}, z_{j3} – вершины T_{j3} .

Преобразование определителя позволяет получить выражение вида:

$$Ax + By + Cz + D = 0, \quad (2.10)$$

где A, B, C, D – коэффициенты уравнения плоскости.

В дальнейшем полученное выражение плоскости нормируется путем деления его коэффициентов на расстояние нормального к области вектора

$\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}$, что позволяет получить выражение вида:

$$\frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}x + \frac{B}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}y + \frac{C}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}z + \frac{D}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} = 0. \quad (2.11)$$

Нормированные коэффициенты обозначаются через показатель "н" и выражение области становится вида:

$$A_n x + B_n y + C_n z + D_n = 0. \quad (2.12)$$

Значение расстояния $r_{i-Пj}$ от центра элемента (x_i, y_i, z_i) до области определяется следующим выражением:

$$r_{i-Пj} = |A_n x_i + B_n y_i + C_n z_i + D_n|. \quad (2.13)$$

Учитывая, что в течение некоторого временного промежутка большая часть частиц материала не соударяется с поверхностью и происходит выброс частиц материала, не соответствующих требованию $r_{i-Пj} > d_i/2$.

Определение области контакта частиц материала с внутренней частью треугольной поверхности, производится путем нахождения отображения центральной части элемента материала на поверхность треугольника [114,118]. При известных координатах орта A_n, B_n и C_n и параметрах промежутка $r_{i-Пj}$ от зоны контакта до плоскости, то положение проекции $E_{imp}(x_{imp}, y_{imp}, z_{imp})$ находится по ее движению соответствующего траектории нормального градиента:

$$\begin{aligned} x_{imp} &= x_i - A_n \cdot r_{i-Пj}; \\ y_{imp} &= y_i - B_n \cdot r_{i-Пj}; \\ z_{imp} &= z_i - C_n \cdot r_{i-Пj}. \end{aligned} \quad (2.14)$$

При вычислении положения точки E_{imp} в треугольнике T_j , применен анализ по площадям треугольной фигуры. Поэтому итог сложения площадей нескольких фигур в вершинных частях треугольной плоскости и точке E_{imp} аналогична площади области T_j :

$$S(\Delta T_{j1} T_{j2} T_{j3}) = S(\Delta E_{imp} T_{j2} T_{j3}) + S(\Delta T_{j1} E_{imp} T_{j3}) + S(\Delta T_{j1} T_{j2} E_{imp}). \quad (2.15)$$

Когда совокупная площадь треугольных поверхностей $\Delta E_{imp} T_{j2} T_{j3}$, $\Delta T_{j1} E_{imp} T_{j3}$ и $\Delta T_{j1} T_{j2} E_{imp}$ больше площади области $S(\Delta T_{j1} T_{j2} T_{j3})$, точка E_{imp} не лежит внутри треугольника T_j , а частица материала не будет взаимодействовать с поверхностью или же контактировать только с внешними сторонами фигуры.

При соударении частицы материала с треугольной поверхностью, необходимо определить упругое усилие, сухое и вязкое трение между частицей щепы и поверхностью механизма эвакуации по уравнению 2.1.

Для представления в модели геометрической конфигурации механизма выброса щепы производилась индексация базовых точек следующим образом. Рубительный диск в модели состоит из 16 треугольных призм (рисунок 2.4). Центр диска расположен в точке C с координатами x_C, y_C, z_C , координаты точек

1 и 2 на оси диска задаются формулами:

$$\begin{aligned} x_1 &= x_C; & y_1 &= y_C - B_d / 2; & z_1 &= z_C; \\ x_2 &= x_C; & y_2 &= y_C + B_d / 2; & z_2 &= z_C, \end{aligned} \quad (2.16)$$

где B_d – толщина измельчителя.

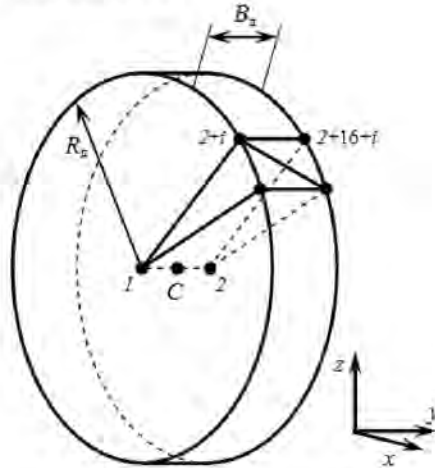


Рисунок 2.4 – Схема измельчителя, используемая при создании модели

Боковая поверхность цилиндра рубительного диска состоит из 16 прямоугольников.

Точки, образующие прямоугольники, распределяются следующим образом:

$$\begin{aligned} x_{2+i} &= x_C + R_d \cos(2\pi i/16); & y_1 &= y_C - B_d / 2; & z_1 &= z_C + R_d \cos(2\pi i/16); \\ x_{2+16+i} &= x_C + R_d \cos(2\pi i/16); & y_1 &= y_C + B_d / 2; & z_1 &= z_C + R_d \cos(2\pi i/16), \end{aligned} \quad (2.17)$$

где i – номер прямоугольника; R_d – радиус рубительного диска.

Каждый прямоугольник периферической поверхности рубительного диска представляется двумя элементарными треугольниками: $P_{2+i}P_{2+i+1}P_{18+i}$ и $P_{2+i+1}P_{18+i}P_{18+i+1}$, общее количество треугольников, представляющих периферическую поверхность рубительного диска составляет 32. Каждое основание цилиндра, представляющего рубительный диск состоит из 16 треугольников, индексация точек в которых производится следующим образом: $P_1P_{2+i}P_{2+i+1}$ и $P_2P_{18+i}P_{18+i+1}$. Для упрощения изложения здесь и далее не выписаны формулы для случаев замыкания окружности, при которых в формулах вместо индексов последовательных точек i и $i+1$ необходимо подставить первую и последнюю точки в данном представлении окружности 1 и n .

Для воспроизведения в модели лопаток рубительного диска необходимо задать одну лопатку, затем транслировать симметрично оси рубительного диска заданное количество лопаток. Одна лопатка состоит из шести треугольников (рисунок 2.5).

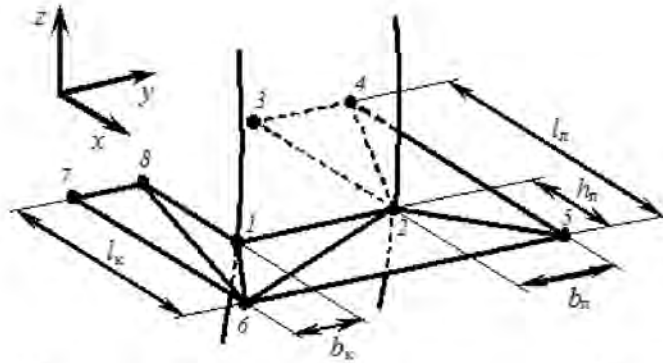


Рисунок 2.5 – Представление в модели лопатки рубительного диска

Первая лопатка размещается в плоскости $z = z_C$:

$$\begin{aligned}
 x_1 &= x_C + R_d; & y_1 &= y_C - B_d / 2; & z_1 &= z_C; \\
 x_2 &= x_C + R_d; & y_2 &= y_C + B_d / 2; & z_2 &= z_C; \\
 x_3 &= x_C + R_d - l_l; & y_3 &= y_C + B_d / 2; & z_3 &= z_C; \\
 x_4 &= x_C + R_d - l_l; & y_4 &= y_C + B_d / 2 + b_l; & z_4 &= z_C; \\
 x_5 &= x_C + R_d + h_l; & y_5 &= y_C + B_d / 2 + b_l; & z_5 &= z_C; \\
 x_6 &= x_C + R_d + h_l; & y_6 &= y_C - B_d / 2 - b_k; & z_6 &= z_C; \\
 x_7 &= x_C + R_d - l_k; & y_7 &= y_C - B_d / 2 - b_k; & z_7 &= z_C; \\
 x_8 &= x_C + R_d - l_k; & y_8 &= y_C - B_d / 2; & z_8 &= z_C,
 \end{aligned} \tag{2.18}$$

где l_l, b_l, h_l, b_k, l_k – геометрические параметры составных частей лопатки в соответствии с рисунком 2.5. Для большей ясности для каждого рассматриваемого элемента механизма нумерация начинается с 1, однако при программной реализации модели используется сквозная нумерация точек.

Шесть треугольников, задающих лопатку строятся на следующих точках: $P_1P_2P_6, P_2P_5P_6, P_2P_3P_4, P_2P_4P_5, P_1P_6P_8, P_6P_7P_8$.

Для получения остальных лопаток и доведения количества лопаток до заданного N_d производится трансляция восьми базовых точек и построенных на них треугольников с помощью преобразования поворота относительно оси рубительного диска (x_C, z_C) :

$$\begin{aligned}
 x_{i+8k} &= x_C + (x_i - x_C) \cos(2\pi \cdot k / N_d) - (z_i - z_C) \sin(2\pi \cdot k / N_d); \\
 y_{i+8k} &= y_i; \\
 z_{i+8k} &= z_C + (x_i - x_C) \sin(2\pi \cdot k / N_d) + (z_i - z_C) \cos(2\pi \cdot k / N_d),
 \end{aligned} \tag{2.19}$$

где k – номер лопатки ($k = 0 \dots N_d - 1$).

Кожух рубительного диска представлен в модели аналогично рубительному диску в виде поверхности цилиндра, однако отличие заключается в изменении верхней правой четверти цилиндра (рисунок 2.6), которая должна плавно перейти в щепопровод. Поэтому кожух представлен 32

точками, из которых 13 с одной стороны и 13 с другой стороны размещены по окружности путем трансляции с равным угловым шагом. В точках 16, 17, 31, 32 кожух стыкуется с щепопроводом. Таким образом, кожух содержит 58 треугольников: по 15 треугольников со стороны одного и другого основания цилиндра и 28 треугольников на 14 прямоугольных гранях периферической поверхности (боковая поверхность цилиндра):

- $P_1P_iP_{i+1}$, $i = 3 \dots 16$;
- $P_1P_3P_{17}$;
- $P_2P_iP_{i+1}$, $i = 18 \dots 31$;
- $P_2P_{18}P_{32}$;
- $P_iP_{i+1}P_{i+15+1}$, $P_iP_{i+15}P_{i+15+1}$, $i = 3 \dots 15$;
- $P_3P_{17}P_{18}$, $P_{17}P_{18}P_{32}$.

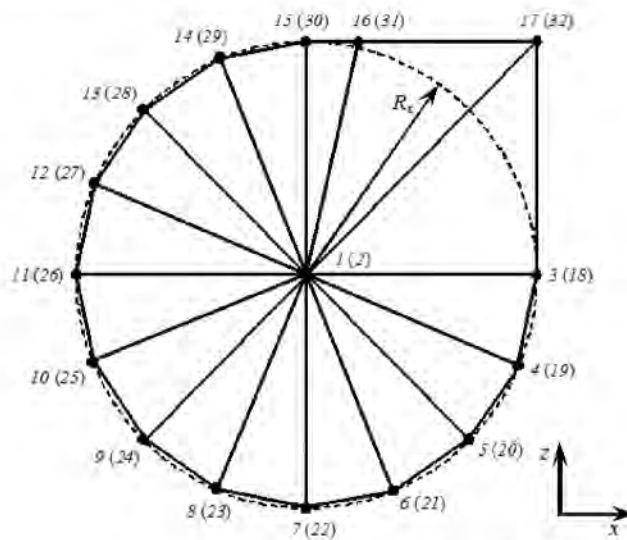


Рисунок 2.6 – Представление в модели кожуха рубительного диска. В скобках указаны индексы невидимых точек задней части кожуха.

Щепопровод в модели состоит из пяти участков:

- трапециевидальной части стыковки кожуха и щепопровода;
- участка круглого сечения;
- участка перехода от круглого к прямоугольному сечению;
- участка прямоугольного сечения;
- выходного участка логарифмической формы.

Для каждой из перечисленных участков щепопровода используются отдельная индексация и специфические геометрические принципы размещения базовых точек рабочей поверхности, учитывающие геометрические особенности участка. На рисунках 2.7 и 2.8 представлены расчетные схемы, иллюстрирующие принципы индексации и размещения точек в пространстве. Для сокращения изложения ниже не приведены формулы для задания координат базовых точек (приложение А), а рассмотрены только индексация базовых точек и структура соединений для образования элементарных треугольных поверхностей.

Трапециевидальный участок щепопровода построен между прямоугольным

выходным отверстием кожуха (точки $P_{69}, P_{70}, P_{85}, P_{84}$) и отверстием части щепопровода круглого сечения в форме правильного восьмиугольника (точки $P_{99} \dots P_{106}$), параллельного горизонтальной плоскости (рисунок 2.7, внизу). Поверхность данного участка щепопровода состоит из 12 треугольников: $P_{99}P_{69}P_{84}, P_{99}P_{106}P_{69}, P_{105}P_{106}P_{69}, P_{105}P_{69}P_{70}, P_{104}P_{105}P_{70}, P_{103}P_{104}P_{70}, P_{103}P_{70}P_{85}, P_{102}P_{103}P_{85}, P_{101}P_{102}P_{85}, P_{101}P_{84}P_{85}, P_{100}P_{101}P_{84}, P_{99}P_{100}P_{84}$.

Круглый участок щепопровода заключен между правильными восьмиугольниками $P_{99} \dots P_{106}$ и $P_{107} \dots P_{114}$ (рисунок 2.7, в центре). Поверхность данного участка состоит из 16 треугольников (по два на каждую из восьми прямоугольных граней):

- $P_{99+i}P_{100+i}P_{107+i}, P_{100+i}P_{107+i}P_{108+i}, i = 0 \dots 6;$
- $P_{106}P_{114}P_{107}, P_{107}P_{106}P_{99}.$

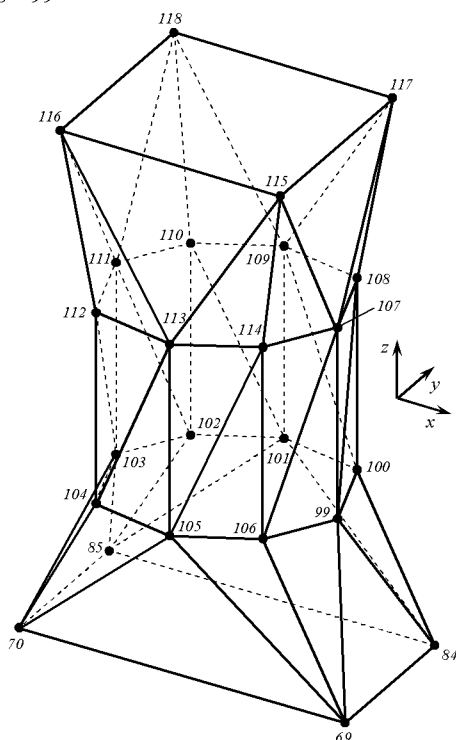


Рисунок 2.7 – Представление в модели участков щепопровода: трапецидального (внизу), круглого сечения (в центре) и перехода от круглого к прямоугольному сечению (вверху)

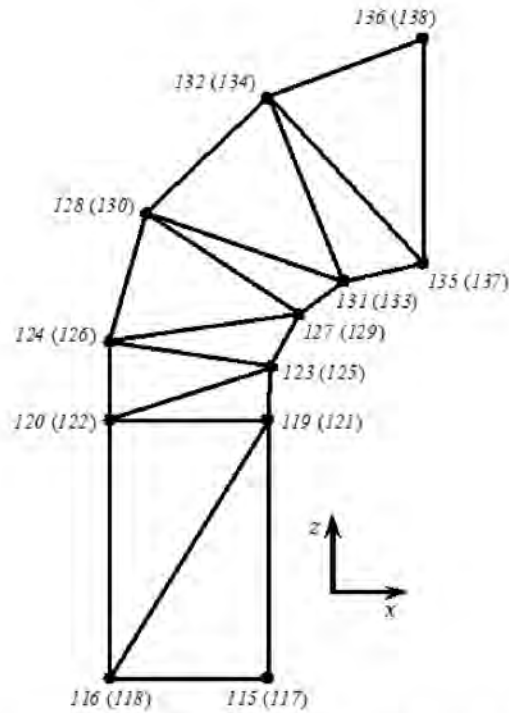


Рисунок 2.8 – Представление в модели участков щепопровода: прямоугольного сечения (внизу), выходного участка логарифмической формы (вверху). В скобках указаны индексы невидимых точек задней части щепопровода

Участок перехода от круглого к прямоугольному сечению построен между правильным восьмиугольником $P_{107}..P_{114}$ и прямоугольником $P_{115}P_{116}P_{118}P_{117}$, представляющим собой сечение участка прямоугольной формы (рисунок 2.7, вверху). Боковая поверхность данного участка щепопровода состоит из 12 треугольников: $P_{107}P_{115}P_{117}$, $P_{107}P_{114}P_{115}$, $P_{113}P_{114}P_{115}$, $P_{113}P_{115}P_{116}$, $P_{112}P_{113}P_{116}$, $P_{111}P_{112}P_{116}$, $P_{111}P_{116}P_{118}$, $P_{110}P_{111}P_{118}$, $P_{109}P_{110}P_{118}$, $P_{109}P_{117}P_{118}$, $P_{108}P_{109}P_{117}$, $P_{107}P_{108}P_{117}$.

Для оставшихся двух участков щепопровода (прямоугольного сечения и выходного участка логарифмической формы) индексация базовых точек и разбиение на треугольники производятся однотипно (рисунок 2.8). Модельная поверхность щепопровода заключена между прямоугольниками $P_{115+4k}P_{116+4k}P_{118+4k}P_{117+4k}$, где $k = 0..4$, расположенными все выше и со все большим углом наклона (рисунок 2.8). Каждый из пяти фрагментов боковой поверхности состоит из восьми треугольников: $P_kP_{k+4}P_{k+6}$, $P_kP_{k+2}P_{k+6}$, $P_kP_{k+1}P_{k+4}$, $P_{k+1}P_{k+4}P_{k+5}$, $P_{k+1}P_{k+3}P_{k+7}$, $P_{k+1}P_{k+5}P_{k+7}$, $P_{k+2}P_{k+3}P_{k+6}$, $P_{k+3}P_{k+7}P_{k+6}$, где k принимает значения 115, 119, 123, 127, 131.

Таким образом, рабочие поверхности механизма, контактирующие с щепой, представлены в модели универсальным образом в виде слияния элементарных треугольников. Несмотря на определенное закругление формы (правильные восьми- и шестнадцатиугольники вместо окружностей и т.п.) такое представление рабочей поверхности позволяет обеспечить достаточно высокую адекватность модели и удобство изменения геометрических параметров механизма в процессе исследования модели.

2.3 Расчет показателей эффективности механизма выброса щепы

В изложенном ниже теоретическом исследовании анализируются следующие факторы эффективности механизма выброса щепы. Первым фактором, который определяет динамические характеристики механизма транспортирования, является скорость выброса элементов древесины на выходе щепопровода v_b . Указанный параметр вычисляется с помощью усреднения горизонтальных скоростей элементов щепы на выходе из щепопровода $P_{135}P_{136}P_{138}P_{137}$:

$$v_e = \frac{\sum_{i=1}^{N_s} \left\{ v_{xi}, \begin{cases} |x_i - x_{P135}| < 0,01; \\ y_{P135} < y_i < y_{P137}; \\ z_{P135} < z_i < z_{P136}; \end{cases} \right.}{\sum_{i=1}^{N_s} \left\{ 1, \begin{cases} |x_i - x_{P135}| < 0,01; \\ y_{P135} < y_i < y_{P137}; \\ z_{P135} < z_i < z_{P136}; \end{cases} \right.} \quad (2.20)$$

0, в противном случае;

Вторым фактором, определяющим качество увлечения и метания щеп рубильным диском, является вероятность выброса щепы с первого оборота рубильного диска p_1 , который определяется с помощью следующего выражения.

$$p_1 = \frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} \left\{ \begin{array}{l} 1, (x_i^\tau > x_C)_{\exists\tau}; \\ 0, (x_i^\tau \leq x_C)_{\forall\tau}, \end{array} \right. \quad (2.21)$$

где квантор \exists («each») означает, что элемент i считается выброшенным в начале вращения рубильного диска, если при каждом шаге интегрирования τ значение координаты x_i элемента больше координаты x_C оси измельчающего диска. Квантор \forall («any») обуславливает достаточность того, что при сопряжении величины координаты элемента x_i быть меньше или равной координате оси рубильного диска x_C .

Третьим показателем эффективности процесса выброса, указывающим на потери энергии, является мощность N_b , затрачиваемая на эвакуацию сырья после его измельчения. Фактор определится из выражения:

$$N_e = \sum_{i=1}^{N_s} \sum_{j=1}^{N_{\Pi}} \left[F_{xi-\Pi j} \cdot (v_{xi} - v_{x\Pi j}) + F_{yi-\Pi j} \cdot (v_{yi} - v_{y\Pi j}) + F_{zi-\Pi j} \cdot (v_{zi} - v_{z\Pi j}) \right] \quad (2.22)$$

где N_{Π} – количество элементарных треугольных поверхностей; $F_{xi-\Pi j}$, $F_{yi-\Pi j}$, $F_{zi-\Pi j}$ – декартовы компоненты силы контакта элемента i и элементарной поверхности j ; $v_{x\Pi j}$, $v_{y\Pi j}$, $v_{z\Pi j}$ – декартовы составляющие скорости центра элементарной треугольной поверхности.

2.4 Начальные и граничные условия, допущения модели рабочего процесса выброса щепы

На начальном этапе элементы-щепы в модели отсутствуют. В процессе компьютерного эксперимента регулярно появляется порция щеп в области пространства, соответствующей расположению месту взаимодействия лезвий рубительного диска с порубочными остатками, и в те моменты времени, когда одно из четырех лезвий диска проходит данное место измельчения порубочных остатков. Добавляемым в модель элементам-щепы сообщается скорость в касательном (тангенциальном) направлении к рубительному диску, пропорциональная расстоянию от оси диска.

При контакте элементов-щепы с границами модельного пространства в форме параллелепипеда элементы испытывают упругое отталкивание и возвращаются в определенный объем.

При создании математической модели принимались допущения вида:

- один элемент щепы принимается за сплошную среду;
- элементы-щепы перемещаются в соответствии с динамическими законами, контактируя друг с другом и поверхностями механизма выброса щепы;
- элемент щепы определяется как однородный и изотропный, а его объемная плотность и физические свойства идентичны в пределах элемента и не зависят от направления движения;
- механический контакт элементов имеет линейное упруго-вязкое свойство;
- физико-механические параметры элементов щепы зависят от: диаметра, массы, коэффициента жесткости, вязкости, коэффициента ограничения взаимодействия.

2.5. Компьютерная программа для моделирования механизма выброса щепы из дисковой рубительной машины

Для проведения дальнейших теоретических исследований разработана программа для ЭВМ «Программа для моделирования механизма выброса щепы из дисковой рубительной машины» на языке ObjectPascal в среде разработки Delphi 7 [84].

Программа используется при проведении компьютерных экспериментов по определению движения щепы из порубочных остатков в кожухе и щепопроводе, а так же для изучения влияния конструктивных параметров механизма выброса на его эффективность. В программном коде могут быть заданы или изменены основные геометрические параметры потока щепы, рубительного диска, кожуха, щепопровода.

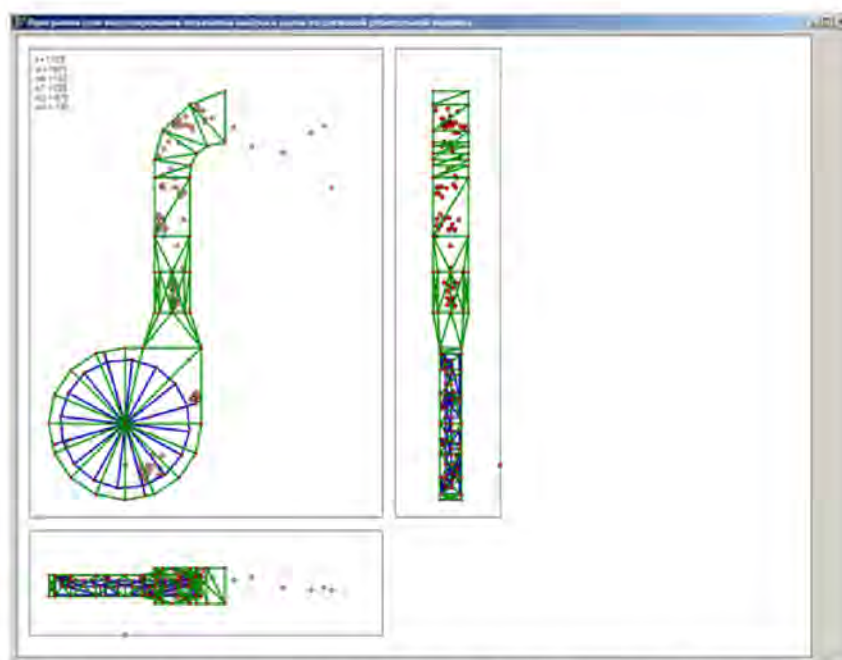


Рисунок 2.9 – Визуализация итогов моделирования в созданной программе (представлены проекции механизма выброса и потока щепы)

В процессе имитационного моделирования программа выводит на экран три проекции механизма выброса щепы, текущие значения параметров процесса (рисунок 2.9). Программа может быть использована в значительных диапазонах геометрических параметров щепопровода и параметров потока щепы.

Функционально для эксплуатации программного продукта необходима ЭВМ с процессором, имеющим частоту 2,3 ГГц и оперативную память величиной 2048 Мбайт.

2.6 Особенности проведения компьютерного эксперимента по обоснованию конструктивно-технологических параметров механизма выброса щепы из дисковой рубительной машины

Дальнейшее теоретическое исследование по расчету параметров механизма выброса щепы из рубительной машины основано на многократном проведении компьютерных экспериментов с полученной теоретической моделью.

С точки зрения теории планирования эксперимента исследование проведено по «звездообразной» схеме. Центр «звезды» представляет базовый компьютерный эксперимент, с типичным набором параметров, заранее представляющим наиболее логичным. Затем проводились шесть серий экспериментов, в каждой из которых изменяли только один параметр при неизменных значениях остальных параметров [101]. Таким образом, формировались «лучи звезды» в многомерном пространстве параметров механизма выброса щепы.

2.6.1 Стратегия теоретического исследования

Благодаря высокой универсальности разработанная модель позволяет исследовать влияние большого количества конструктивных и технологических параметров на показатели эффективности механизма. Входные параметры и выходные показатели математической модели представлены графически на рисунке 2.10.

Входные параметры разделены на несколько групп.

К 1 группе относятся технологические факторы:

n_d – частота вращения рубительного диска;

P_0 – интенсивность (поток) поступления сырья из зоны резания в зону выброса щепы.

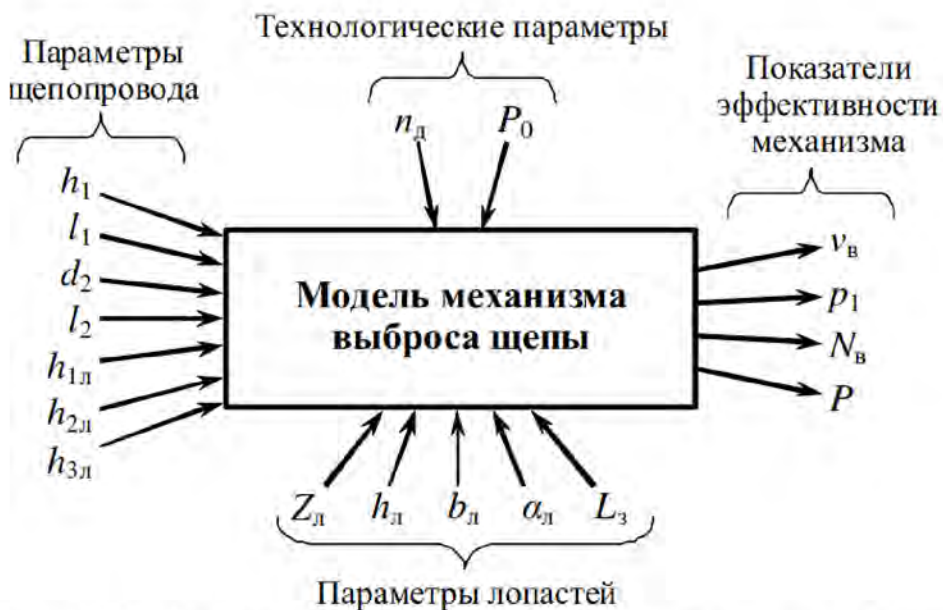


Рисунок 2.10 – Основные доступные к изменению конструктивные и технологические параметры модели механизма выброса щепы и показатели его эффективности

Ко 2 группе относятся параметры щепопровода:

h_1 – ширина его трапециевидальной части;

l_1 – высота трапециевидальной части;

d_2 – диаметр круглой зоны щепопровода, определяющий эффективную проводимость щепопровода. При смене значений параметра d_2 согласованно изменялись геометрические размеры его входной и выходной частей;

l_2 – высота круглой части;

$h_{1л}$ – начальная ширина логарифмической направляющей;

$h_{2л}$ – ширина в средней части логарифмической направляющей;

$h_{3л}$ – конечная ширина логарифмической направляющей.

К 3 группе отнесены параметры лопастей:

$Z_{л}$ – количество лопастей;

$h_{л}$ – размеры выступа лопасти над торцом рубительного диска;

b_d – ширина направляющей плоскости;

α_d – угол направляющей плоскости;

L_3 – расстояние между боковой поверхностью цилиндрической части кожуха и выступающими лопастями рубительного диска (зазор).

В качестве показателей эффективности механизма выбраны:

- v_b – скорость выброса щеп на выходе щепопровода;

- p_1 – вероятность выброса щепы с первого оборота рубительного диска (определенная доля щеп, неблагоприятно ударяясь о стенки, не выбрасывается с первого оборота рубительного диска, оседает под действием силы тяжести, и увлекается позже лопастями со дна кожуха);

- N_B – потери механической мощности на выброс щепы после измельчения порубочных остатков ножами;

- P – производительность механизма.

При проведении компьютерных экспериментов необходимо определить такие диапазоны изменения входных параметров модели, в которых максимальными будут значения скорости выброса щепы v_b , вероятность выброса щепы с первого оборота рубительного диска p_1 , производительность механизма P , и будет минимальной составляющая мощности N_B , расходуемая на выброс щепы.

2.7 Влияние конструктивных и технологических параметров на эффективность механизма выброса щепы из дисковой рубительной машины

2.7.1 Влияние частоты вращения рубительного диска

Частота вращения рубительного диска оказывает влияние на следующие конструктивно-технологические показатели машины: скорость резания, на динамику движения древесной массы, ограничивает производительность машины, влияет на потребляемую машиной мощность. Для изучения зависимости эффективности выброса щепы от частоты вращения диска n_d проведены компьютерные эксперименты, при их проведении которых значения n_d изменяли от 5 до 30 $1/c$ с шагом 5 $1/c$.

Каждый компьютерный эксперимент проводили с пятикратной повторностью (как и в последующих сериях компьютерных экспериментов), после чего усредняли полученные результаты для каждой экспериментальной точки.

При изменении значений n_d остальные параметры механизма имели базовые значения, в частности:

- число лопастей рубительного диска $Z_d = 4$;

- расстояние между лопастями и кожухом $L_3 = 10$ мм;

- размер круглой зоны щепопровода $d_2 = 250$ мм;

- высота круглой зоны щепопровода $l_2 = 300$ мм;

- высота выходного отверстия щепопровода $h_{3d} = 400$ мм.

При малых оборотах рубительного диска ($5 \dots 10 \text{ }^1/\text{с}$) выброс щеп происходит неэффективно. Щепы обладают малой кинетической энергией, которая не только преобразуется в потенциальную энергию за счет выброса щепы вверх на высоту выходного отверстия щепопровода, но преимущественно рассеивается при соударениях с направляющими поверхностями щепопровода (рисунок 2.11, *а, б*). Поэтому скорость выброса щепы из щепопровода мала и равна $0,1 \dots 0,7 \text{ м/с}$, вероятность выброса щепы с первого оборота рубительного диска также мала и определена значениями $0,1 \dots 0,4$. При этом затраты мощности на выброс щепы составляют $400 \dots 750 \text{ Вт}$ из-за того, что рубительный диск вовлекает в неэффективное движение большой объем щепы.

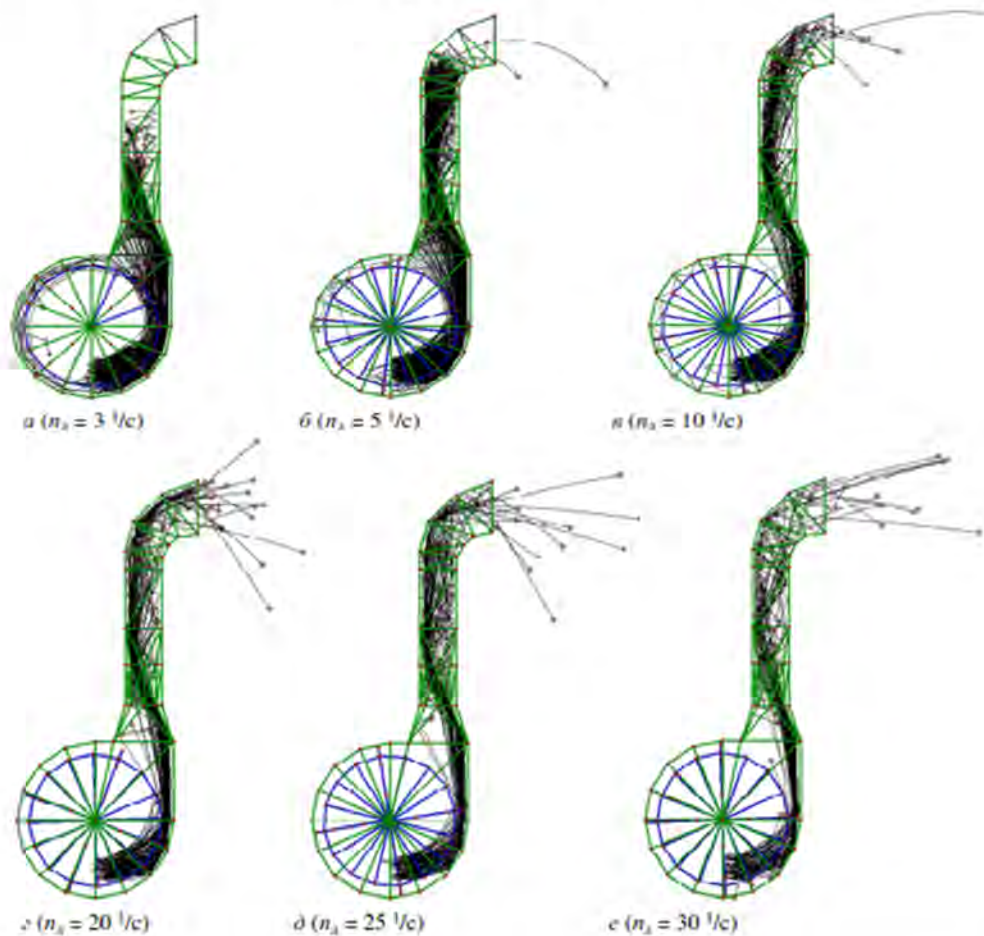


Рисунок 2.11 – Закономерность перемещения щепы при изменении частоты вращения рубительного диска n_d

При высокой частоте вращения рубительного диска ($25 \dots 30 \text{ }^1/\text{с}$) выброс щепы производится с большой скоростью (рисунок 2.11, *д, е*, рисунок 2.12, *а*) и большой вероятностью выброса с первого оборота рубительного диска (рисунок 2.12, *б*).

Однако при возрастании частоты вращения рубительного диска потребляемая мощность растет приблизительно квадратично: как для процесса измельчения порубочных остатков (установлено ранее), так и для процесса увлечения и метания щепы (рисунок 2.12, *в*).

Поэтому увеличение частоты вращения рубительного диска более 20 1/с не целесообразно, так как скорость движения щепы и вероятности выброса с первого оборота рубительного диска, но приводит к существенному росту потребляемой мощности.

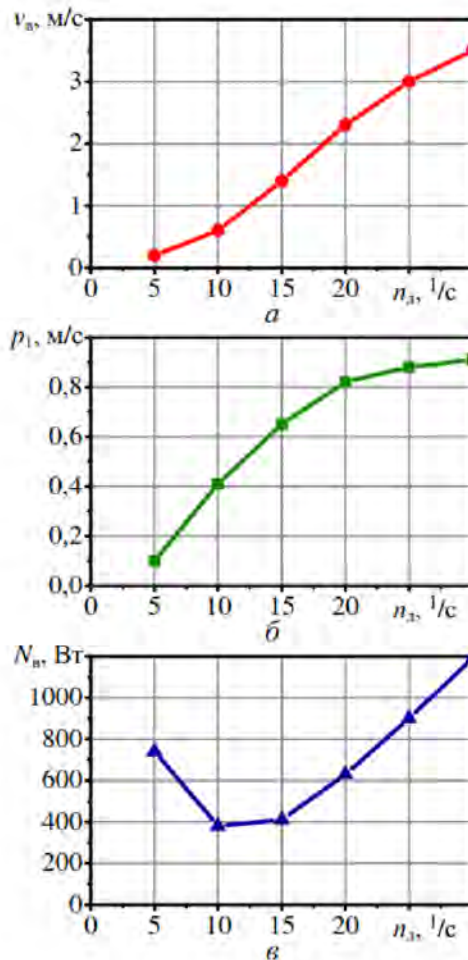


Рисунок 2.12 – Взаимосвязь частоты вращения рубительного диска n_d со скоростью выброса щепы v_b из щепопровода, вероятностью выброса щепы с первого оборота p_1 и потерями мощности на выброс щепы N_b .

Следовательно, наилучшее значение частоты вращения рубительного диска составляет порядка 20 1/с , так как обеспечивается скоростью выброса щепы из щепопровода в пределах $2,3 \text{ м/с}$, а вероятность выброса щепы с первого оборота рубительного диска составляет $0,82$ при величине потребляемой мощности 630 Вт .

2.7.2 Влияние количества лопастей на эффективность рабочего процесса выброса щепы из дисковой рубительной машины

Количество лопастей на рубительном диске влияет на порцию щепы, увлекаемых одной лопастью и метаемых в щепопровод. Для определения зависимости влияния количества лопастей Z_d на эффективность рабочего процесса выброса щепы из дисковой рубительной машины была выполнена серия экспериментов на ЭВМ, в которых значения Z_d изменялись с 2 до 6 с

шагом 1.

С увеличением количества лопастей снижается скорость выброса щеп (рисунок 2.13, *а*), что связано с тем, что уменьшается выбрасываемая порция щепы. Из-за уменьшенной массы и большей хаотичности движения малой порции больше рассеивается энергии при соударениях с внутренней поверхностью щепопровода.

С увеличением количества лопастей незначительно увеличивается вероятность выброса щепы за первый оборот рубительного диска (рисунок 2.13, *б*).

Вероятная причина заключается в том, что если не произойдет метание щепы лопастью, расположенной непосредственно в месте образования щепы, то метание осуществляют последующие лопасти, и с увеличением количества лопастей на рубительном диске увеличивается вероятность сообщить скорость щепе за первый оборот.

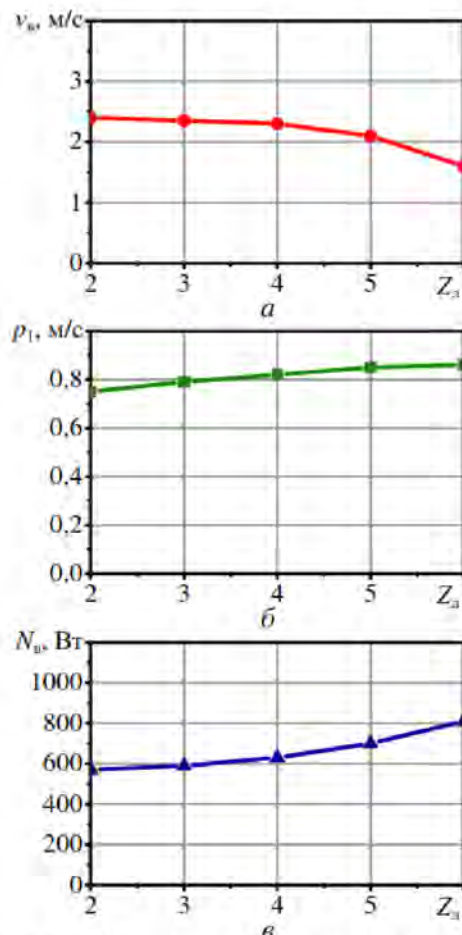


Рисунок 2.13 – Взаимосвязь количества лопастей рубительного диска Z_d со скоростью выброса щепы v_w из щепопровода, вероятностью выброса щепы с первого оборота рубительного диска p_1 и потерями мощности на выброс щепы N_B

Также, с увеличением количества лопастей увеличивается потребляемая мощность, так как оказывается энергетически невыгодным уменьшать размер порции щеп и увеличивать частоту метания порций (рисунок 2.13, *в*).

Сопоставляя полученные графики, можно сделать вывод, что

оптимальным количество лопастей составляет от 3 до 4. При этом скорость выброса щепы из щепопровода будет равна 2,3...2,4 м/с, а вероятность выброса щепы с первого оборота рубительного диска составит 0,79 ... 0,82 при потребляемой мощности на выброс щепы 595 ... 530 Вт.

2.7.3 Влияние зазора между лопастями и кожухом на эффективность рабочего процесса выброса щепы из дисковой рубительной машины

Зазор между боковой поверхностью цилиндрической части кожуха и выступающими лопастями рубительного диска определяет характер движения щепы в контактом взаимодействии с боковой стенкой кожуха непосредственно перед метанием в щепопровод, определяет размер «мертвой зоны», в нижней части кожуха, в которой скапливаются щепы, определяет энергетические затраты на вовлечение щеп в сложное движение между рубительным диском и кожухом. Для определения влияния на показатели эффективности механизма выброса щепы зазора L_3 проводились компьютерные эксперименты, в которых значения L_3 изменялись от 0 до 20 мм с шагом 5 мм.

Обнаружено, что уменьшение зазора скорость выброса и вероятность выброса щепы за один оборот рубительного диска практически не увеличиваются (рисунок 2.14, *а*, *б*), в то время как резко растет потребляемая на выброс мощность (рисунок 2.14, *в*), по-видимому, из-за вовлечения щепы в сложное движение между рубительным диском и кожухом.

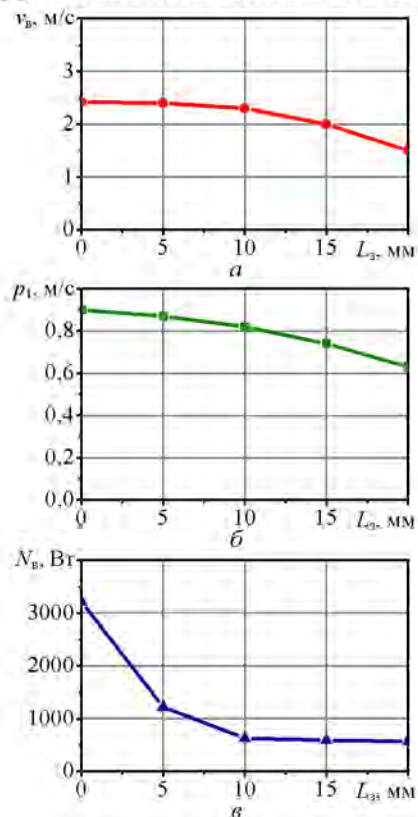


Рисунок 2.14 – Влияние зазора между лопастями и кожухом L_3 на скорость выброса щепы v_b из щепопровода, вероятность выброса щепы с первого оборота рубительного диска p_1 и потери мощности на выброс щепы N_v

При увеличении зазора более 10 мм существенно снижается эффективность выброса щепы: уменьшаются скорость выброса и вероятность выброса щепы за один оборот рубительного диска (рисунок 2.14, а, б). При этом выигрыш в потребляемой мощности оказывается несущественным.

Сравнительный анализ зависимостей $v_B(L_3)$, $p_1(L_3)$, $N_B(L_3)$ позволил установить, что оптимальная величина зазора между краем лопасти и боковой стенкой кожуха составляет около 10 мм. При этом скорость выброса щепы составляет около 2,3 м/с, вероятность выброса щепы с первого оборота рубительного диска составляет 0,82, потребляемая на выброс мощность составляет 630 Вт. Оптимальная величина зазора между краем лопасти и боковой стенки кожуха составляет около 10 мм.

2.7.4 Влияние диаметра круглой зоны щепопровода на эффективность рабочего процесса выброса щепы из дисковой рубительной машины

Диаметр круглой зоны d_2 является основным параметром, определяющим проводимость щепопровода. Для изучения влияния на эффективность механизма выброса щепы диаметра d_2 проводилось несколько экспериментов на ЭВМ, в которых значения d_2 изменяли со 100 до 400 мм с шагом 75 мм (рисунок 2.15). Графики $v_B(d_2)$, $p_1(d_2)$, $N_B(d_2)$ имеют явно выраженные оптимумы в приблизительно совпадающем для трех графиков диапазоне $d_2 = 220 \dots 300$ мм (рисунок 2.16). При уменьшении диаметра щепопровода менее 200 мм уменьшается вероятность щепы попасть в щепопровод, увеличиваются потери на трение при более скученном движении щеп в узком щепопроводе, поэтому снижается эффективность выброса по всем трем анализируемым показателям (рисунок 2.15, а).

При увеличении диаметра щепопровода более 320 мм снижается фокусирующее действие щепопровода: возникает существенная дисперсия по углам векторов скорости в потоке щепы (рисунок 2.15, в). Вследствие этого снижаются показатели эффективности механизма выброса щепы.

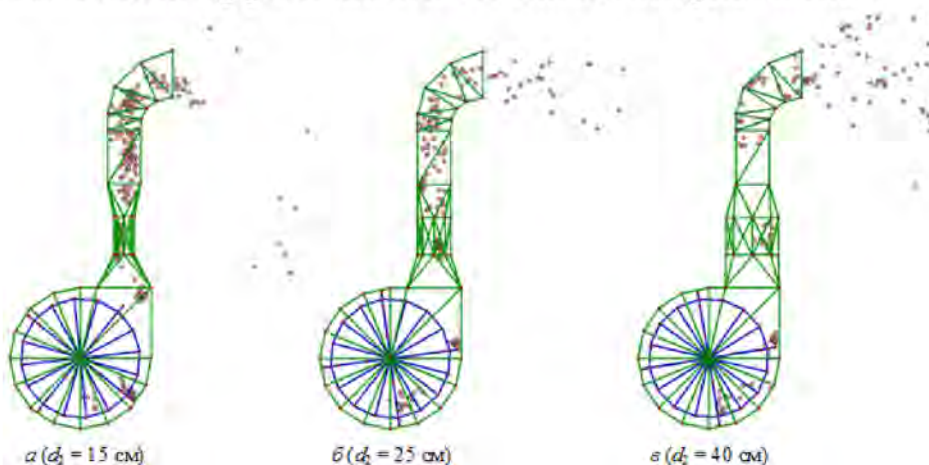


Рисунок 2.15 – Исследование вариантов механизма выброса щепы с различным диаметром d_2 цилиндрической части щепопровода

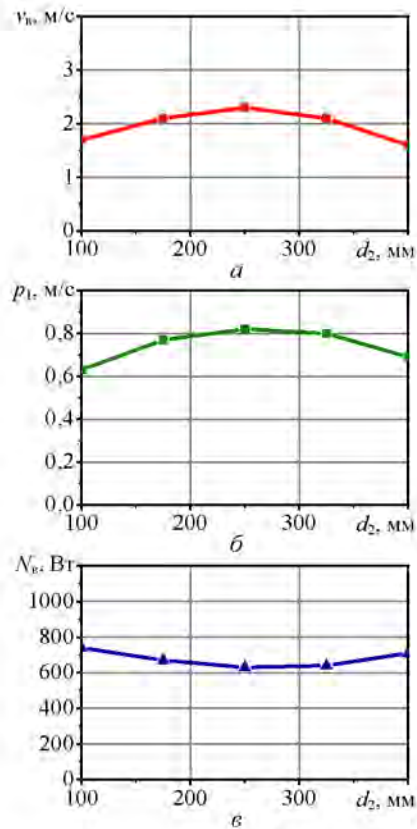


Рисунок 2.16 – Влияние диаметра круглой зоны щепопровода d_2 на скорость выброса щепы v_B из щепопровода, вероятность выброса с первого оборота рубительного диска p_1 и потери мощности на выброс щепы N_B

Таким образом, оптимальный диаметр круглой части щепопровода составляет 220 ... 300 мм. При этом скорость выброса превышает 2,2 м/с, вероятность выброса за один оборот рубительного диска превышает 0,80, потребляемая мощность на выброс щепы составляет менее 620 Вт.

2.7.5 Влияние высоты круглой зоны щепопровода на эффективность рабочего процесса выброса щепы из дисковой рубительной машины

Протяженность круглой зоны щепопровода в высоту l_2 определяет фокусирующую способность щепопровода и влияет на сопротивление движению щепы. Для изучения воздействия на эффективность процесса выброса щепы из кожуха машины высоты круглой зоны щепопровода l_2 проведено несколько компьютерных экспериментов с изменением величины l_2 от 0 до 500 мм с шагом 100 мм.

С увеличением протяженности цилиндрической зоны щепопровода ухудшаются рассматриваемые показатели эффективности механизма выброса щеп (рисунок 2.17). Анализ траекторий движения элементов-щеп позволил установить, что с удлинением цилиндрической части увеличивается количество

соударений щепы со стенками щепопровода, из-за чего снижается кинетическая энергия потока щепы, хотя и поток щепы становится более сфокусированным (уменьшается разброс векторов скорости по углам).

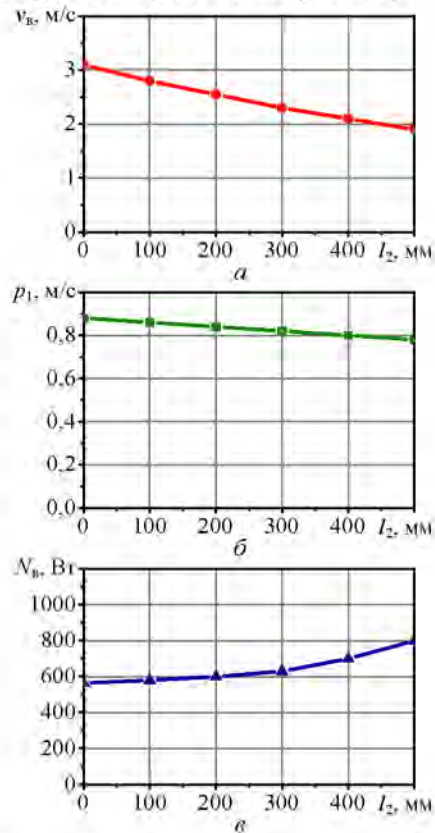


Рисунок 2.17 – Влияние высоты круглой зоны щепопровода h_2 на скорость выброса щепы $v_{в}$ из щепопровода, вероятность выброса с первого оборота рубительного диска p_1 и потери мощности на выброс щепы $N_{в}$

Поэтому увеличение протяженности цилиндрической части целесообразно, если необходимо получить узкий поток щепы с небольшой скоростью выброса (до 2 м/с), или если дополнительным критерием является поднятие окна выброса щепы на как можно большую высоту.

Ориентируясь на интенсивный рост потребляемой мощности при протяженности l_2 более 300 мм, можно сделать вывод, что протяженность не должна превышать 300 мм.

Таким образом, оптимальная протяженность цилиндрической части щепопровода составляет около 300 мм, и позволяет обеспечить достаточно узкий поток щепы со скоростью выброса более 2 м/с при достаточно высоком расположении окна выброса щепы (более 2 м от оси рубительного диска), с вероятностью выброса щепы за один оборот рубительного диска более 0,8 и потребляемой на выброс щепы мощностью менее 650 Вт.

2.7.6 Влияние размеров выходного окна щепопровода на эффективность рабочего процесса выброса щепы из дисковой рубительной машины

Выходная часть щепопровода имеет логарифмическую форму: образующие ближней и дальней относительно оси рубительного диска стенок щепопровода близка к графику логарифмической функции. Основным параметром, задающим форму щепопровода на данном участке, является высота $h_{3л}$ выходного окна. С целью изучения воздействия на эффективность процесса выброса щепы из кожуха машины, высоты $h_{3л}$ выходного окна проводилась серия компьютерных экспериментов в диапазоне величин $h_{3л}$ от 200 до 600 мм и шагом 100 мм.

Компьютерные эксперименты позволили установить, что начиная с высоты выходного окна около 400 мм эффективность выброса щепы практически не зависит от размера окна, так как поток щепы контактирует преимущественно только со стенкой щепопровода прямоугольного сечения, расположенной ближе к оси рубительного диска (рисунок 2.18).

Однако при уменьшении высоты выходного окна, и особенно при его высоте менее диаметра цилиндрической зоны щепопровода, показатели эффективности выброса щепы ухудшаются, хотя и не так сильно, как казалось бы уменьшение диаметра цилиндрической зоны щепопровода.

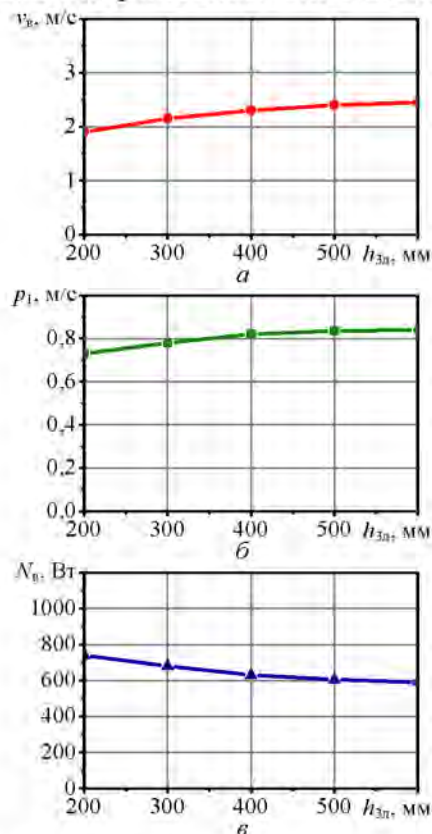


Рисунок 2.18 – Влияние размера $h_{3л}$ выходного окна щепопровода на скорость выброса щепы $v_{в}$ из щепопровода, вероятность выброса щепы с первого оборота рубительного диска p_1 и потери мощности на выброс щепы $N_{в}$

Таким образом, высота выходного окна щепопровода должна быть около 350 ... 400 мм – чуть более диаметра щепопровода в цилиндрической части. Дальнейшее увеличение высоты окна нецелесообразно, так как практически не приводит к повышению эффективности выброса щепы, но увеличивает габаритные размеры механизма.

2.8 Зависимость производительности дисковой рубительной машины от ее конструктивно-технологических параметров

Производительность механизма измельчения порубочных остатков и, соответственно, системы выброса щепы является наиболее значимым показателем эффективности, определяющим класс устройства, позволяющим прогнозировать и планировать работу оборудования.

Производительность механизма выброса щепы P связана с производительностью механизма измельчения порубочных остатков P_0 . Если производительность измельчения порубочных остатков является промежуточной характеристикой (при неэффективной системе выброса измельченные порубочные остатки могут накапливаться внутри устройства), то производительность выброса щепы является более корректной характеристикой всего устройства.

При этом реализуется случая $P < P_0$, и оптимизацией параметров механизма выброса щепы необходимо добиться случая $P = P_0$. Кроме того, при оптимально организованном потоке щепы в щепопровode может возникать дополнительный поток воздуха из бункера с порубочными остатками, увеличивающий исходную производительность измельчения P_0 , то есть $P = P_{02} > P_{01}$, где P_{01} и P_{02} – производительность на этапе измельчения порубочных остатков без и с механизмом выброса щепы.

Разработанная модель позволила изучить, как производительность механизма выброса щепы P в зависимости от его параметров.

2.8.1 Влияние частоты вращения рубительного диска и числа лопастей на производительность механизма

При возрастании значений частоты вращения рубительного диска n_d производительность механизма P сначала возрастает с 34 до 84 кг/мин, потом убывает с 84 до 42 кг/мин (рисунок 2.19, а). При небольших значениях частоты вращения рубительного диска ($0 \dots 10 \text{ }^1/\text{с}$) поток подаваемых ветвей сдерживается и производительность машины имеет незначительные величины.

При этом механизм выброса щепы работает неэффективно из-за низкой скорости движения щеп, и в кожухе постепенно накапливается древесная масса порубочных остатков. При увеличении частоты вращения рубительного диска ($25 \dots 30 \text{ }^1/\text{с}$) рубительный нож передает измельчаемым ветвям значительный импульс, который приводит к приданию движения ветви случайной траектории.

Из-за хаотизации движения щеп в щепопроводе ухудшается согласованность потока в щепопроводе, и производительность выброса щеп снижается. Таким образом, производительность механизма достигает максимального значения 81...84 кг/мин при числе оборотов рубительного диска 15 ... 20^{1/с}.

С увеличением количества лопастей $Z_{л}$ на рубительном диске с 2 до 6 производительность P незначительно увеличивается с 76 до 87 кг/мин. (рисунок 2.19, б). По-видимому, при большем количестве лопастей несколько улучшается очистка нижних частей кожуха от щепы, и производительность выброса приближается к исходной производительности процесса резания. Так как с увеличением $Z_{л}$ зависимость $P(Z_{л})$ постепенно выходит на насыщение, оптимальное количество лопастей должно составлять не менее 4, при этом механизм обеспечивает производительность не менее 84 кг/мин.

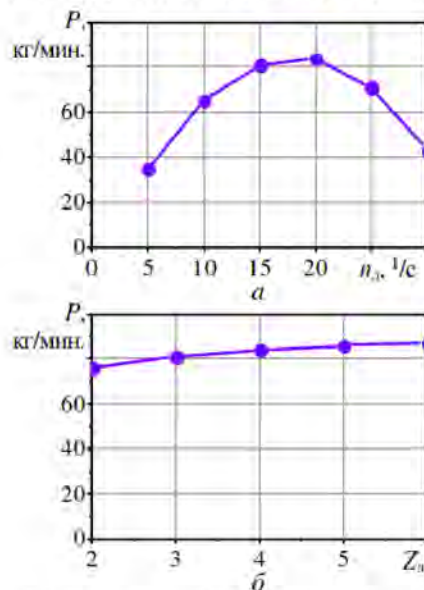


Рисунок 2.19 – Зависимость производительности механизма P от частоты вращения рубительного диска n_d (а), количества лопастей рубительного диска Z_l (б)

2.8.2 Влияние величины зазора между краем лопасти и боковой стенкой кожуха на производительность механизма

С увеличением зазора L_3 между краем лопасти и боковой стенкой кожуха ухудшается захват щепы, поэтому зависимость $P(L_3)$ является убывающей (рисунок 2.20, а).

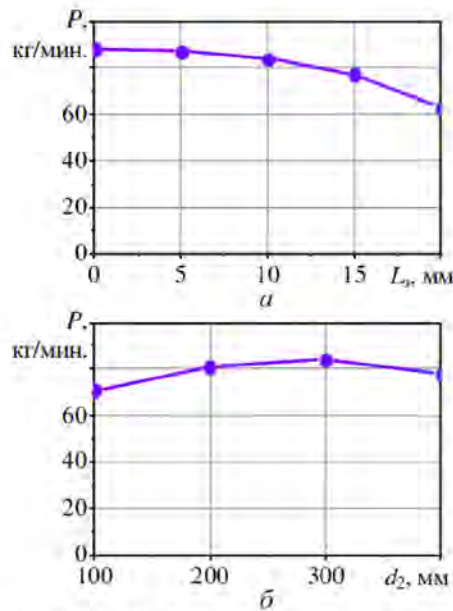


Рисунок 2.20 – Зависимость производительности механизма P от зазора между лопастями и кожухом L_3 (а), диаметра круглой зоны щепопровода d_2 (б)

При величине зазора не более 10 мм производительность снижается незначительно: с 88 до 84 кг/мин., тогда как при дальнейшем увеличении зазора с 10 до 20 мм производительность снижается существенно: с 84 до 63 кг/мин. Таким образом, величина зазора между краем лопасти и боковой стенкой кожуха не должна превышать 10 мм.

2.8.3 Влияние параметров щепопровода на производительность дисковой рубительной машины

Зависимость производительности от диаметра круглой зоны щепопровода. Максимальные значения производительности 81 ... 84 кг/мин достигаются при диаметре d_2 круглой зоны щепопровода 200 ... 300 мм (рисунок 2.20, б). При меньшем диаметре щепопровод оказывает существенное сопротивление движению потока щеп, щепы накапливаются в нижней части механизма, и производительность механизма в целом снижается. При слишком большом диаметре щепопровод не формирует устойчивый поток щепы, что так же осложняет вывод щеп из механизма и приводит к снижению производительности.

Зависимость производительности от высоты круглой зоны щепопровода. С увеличением высоты цилиндрической зоны щепопровода от 0 до 500 мм увеличивается сопротивление движению щеп, поэтому снижается производительность механизма с 88 до 77 кг/мин (рисунок 2.21, а). При высоте менее 200 ... 300 мм снижение производительности происходит не значительно, поэтому при совместном анализе показателей эффективности механизма, диапазон l_2 от 0 до 300 мм можно рассматривать, как оптимальный.

Зависимость производительности от высоты выходного окна щепопровода. С увеличением высоты $h_{3л}$ выходного окна щепопровода

облегчается выход потока щепы, поэтому производительность механизма выброса щепы увеличивается (рисунок 2.21, б). Особенно повышение производительности с 75 до 84 кг/мин выражено при увеличении высоты $h_{3л}$ с 200 до 400 мм. При дальнейшем увеличении $h_{3л}$ с 400 до 600 мм производительность увеличивается незначительно: с 84 до 87 кг/мин.

Поэтому рекомендуется оптимальная высота выходного окна щепопровода не менее 400 мм.

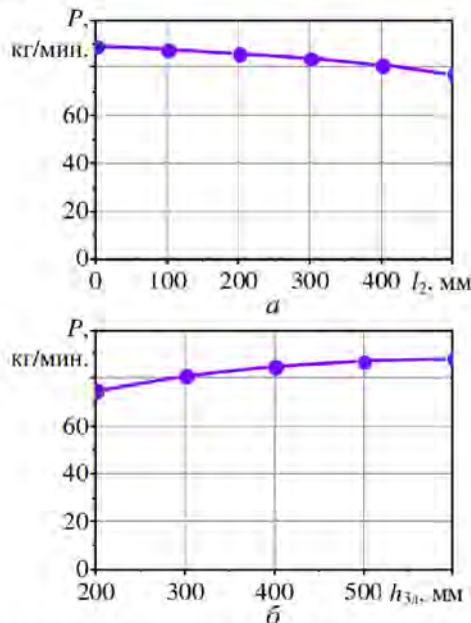


Рисунок 2.21 – Зависимость производительности механизма P от высоты круглой зоны щепопровода l_2 (а), высоты выходного окна щепопровода $h_{3л}$ (б)

2.9 Влияние отверстий в кожухе рубительного диска на показатели эффективности выброса щепы

Так как измельченные порубочные остатки имеют малую объемную плотность при большой площади, окружающая воздушная среда может оказывать существенное влияние на их движение в пространстве. В изложенной в подразделе 2.1 методике моделирования используется предположение о пренебрежимо малом сопротивлении воздушной среды движению щеп. Для того, чтобы учесть в модели воздействие воздушной среды и одновременное воздействие щепы на воздушную среду дополним модель следующим математическим аппаратом.

При движении щепы относительно окружающего воздуха с относительной скоростью $v_{щ-в}$ на щепу действует сила сопротивления. В приближении сферической формы щепы и ламинарного характера обтекания воздухом выражение для силы сопротивления F_i^B можно записать на основе закона Стокса:

$$F_{i\xi}^B = 6\pi\eta R_{щ} v_{i-v\xi}(x_i, y_i, z_i), \quad (2.23)$$

где i – номер щепы (частицы в рамках используемого метода динамики частиц); ξ – индекс декартовой оси (x , y или z);

η – динамическая вязкость; скорость $v_{i-в\zeta}$ является в общем случае функцией координат щепы (x_i, y_i, z_i) .

Дополнительная сила сопротивления со стороны воздушной среды добавляется в уравнения движения частиц к их правой части (2.1).

В процессе измельчения порубочных остатков, движение щеп в щепопроводе увлекает за собой окружающий воздух. В результате этого в щепопроводе формируется поток воздуха, движущийся в первом приближении с постоянной вертикальной скоростью v_B . Упрощенная модель движения воздушной среды должна учитывать воздействие множества движущихся щеп, сопротивление на входе воздуха через отверстия в боковой поверхности кожуха рубительного диска и сопротивление движению воздуха со стороны стенок щепопровода.

$$v_B = n_{щ} \frac{\pi d_q^2}{4} k_y - \frac{k_c}{\frac{n_o \pi d_{отв}^2}{4} + S_{доп}} - \frac{F_c}{\alpha} \quad (2.24)$$

где $n_{щ}$ – среднее количество щеп, одновременно двигающихся в щепопроводе; d_q – средний диаметр щеп (частиц в рамках используемого метода динамики частиц); k_y – коэффициент увлечения окружающего воздуха одной щепой; k_c – коэффициент обратного сопротивления входу воздуха во входные щели кожуха рубительного диска; n_o и $d_{отв}$ – количество и диаметр отверстий в боковой стенке кожуха рубительного диска; $S_{доп}$ – эффективная площадь других щелей, дополнительно к отверстиям, через которые воздух, окружающий машина для измельчения древесных остатков, может поступать внутрь кожуха рубительного диска; F_c – общая сила сопротивления движению воздуха через щепопровод; α – коэффициент сопротивления движению воздуха через щепопровод в ламинарном приближении.

В начале компьютерных экспериментов скорость v_B равна нулю, а относительная скорость $v_{i-в}$ движению щеп в щепопроводе максимальна. По мере формирования потока щеп в щепопроводе скорость v_B увеличивается и становится сопоставимой с вертикальной скоростью движения щеп; при этом относительная скорость $v_{i-в}$ существенно уменьшается. Таким образом, формулы (2.23) и (2.24) дополняют изложенную ранее математическую модель движения щеп в щепопроводе и описывают взаимное воздействие сбалансированного воздушного потока и потока щепы.

Целесообразно рассмотреть два конструктивных параметра, влияющие на формирование потока воздуха внутри щепопровода: диаметр зоны с отверстиями на кожухе рубительного диска $d_{зоны\ отв.}$ и диаметр одного отверстия $d_{отв.}$

В рамках разработанной модели движение воздуха не рассматривается с высокой пространственной детализацией, как движение щеп, и движение воздуха внутри щепопровода характеризуется одним усредненным параметром – средней вертикальной скоростью v_B . Поэтому форма и геометрические параметры зоны с отверстиями для поступления воздуха в кожух рубительного диска не могут быть непосредственно заданы в разработанной модели, и диаметр зоны с отверстиями не рассматривается.

В то же время, для формирования потока воздуха внутри щепопровода важным является общая площадь отверстий и щелей, через которые поступает воздух. Поэтому основным параметром, характеризующим систему ввода воздуха в щепопровод, являлся диаметр отверстий.

С помощью разработанной модели произведена проверка, как различные диаметры отверстий ввода воздуха в кожух рубительного диска $d_{отв}$ влияет на показатели эффективности механизма выброса щепы. Проведена серия из четырех компьютерных экспериментов, в которой диаметру $d_{отв}$ придавали значения 0, 10, 20, 30 мм. Общее количество отверстий было постоянным и составляло 200.

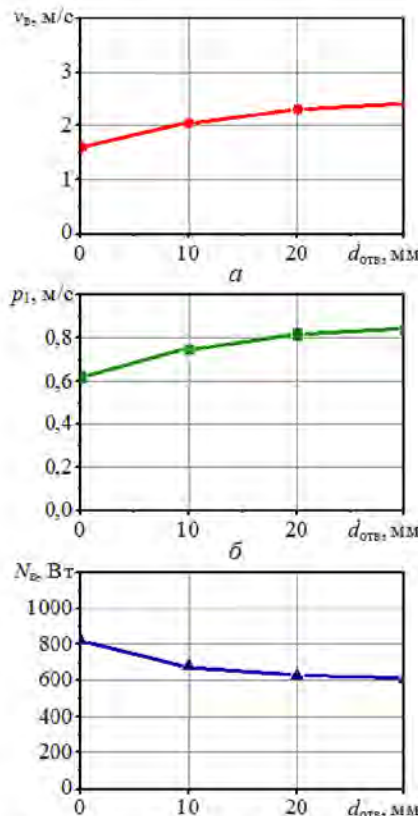


Рисунок 2.22 – Влияние диаметра отверстий ввода воздуха в кожух $d_{отв}$ на скорость движения щепы $v_в$ из щепопровода, вероятность выхода щепы с первого оборота рубительного диска p_1 и потери мощности на выброс щепы $N_в$.

Увеличение диаметра отверстий благоприятно сказывается на показателях эффективности механизма. В случае отсутствия отверстий ($d_{отв} = 0$) показатели эффективности хуже на 15...25 % по сравнению со случаем с широкими отверстиями ($d_{отв} = 30$ мм) (рисунки 2.22, 2.23). Графики зависимостей рассматриваемых показателей эффективности $v_в$, p_1 , $N_в$, P близки к экспоненциальным зависимостям, выходящим на насыщение.

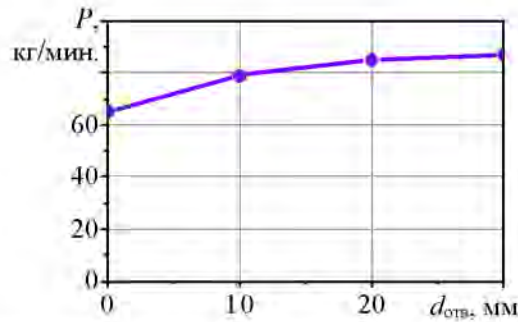


Рисунок 2.23 – Зависимость производительности механизма P от диаметра отверстий ввода воздуха в кожух рубительного диска $d_{отв}$.

Поэтому увеличение диаметра отверстий более 20...25 мм не целесообразно, так как практически не приводит к улучшению показателей эффективности, но усложняет производство механизма и увеличивает вероятность выхода щепы через боковую стенку кожуха рубительного диска. Таким образом, оптимальная система ввода воздуха в кожух рубительного диска представляет собой совокупность 200 отверстий диаметром 20 ...25 мм.

2.10 Оптимизация конструктивных параметров механизма выброса щепы из дисковой рубительной машины

Выше рассмотрено влияние отдельных конструктивных и технологических параметров на показатели эффективности механизма выброса щепы. На следующем уровне исследования необходимо установить одновременное влияние нескольких параметров на показатели эффективности. Для этого выполнена двухфакторная оптимизация конструкции механизма выброса щепы.

Из большого количества конструктивных параметров механизма выброса щепы выбраны два параметра существенно влияющие на эффективность механизма выброса, как было установлено в ходе описанного выше исследования.

К этим параметрам относятся:

- зазор L_3 – расстояние между боковой поверхностью цилиндрической части кожуха и выступающими лопастями рубительного диска;
- диаметр d_2 круглой зоны щепопровода, определяющий эффективную проводимость щепопровода. При изменении диаметра d_2 изменяли согласованно геометрические параметры входной и выходной частей щепопровода, влияющие на проводимость щепы.

В качестве критериев оптимизации выбраны:

- v_B – скорость выброса щеп на выходе щепопровода;
- p_n – вероятность выброса щепы с первого оборота рубительного диска (доля щепы, которая ударяясь о стенки, не выбрасывается с первого оборота рубительного диска, а остается под действием силы тяжести в кожухе машины, и позже эвакуируется из него при помощи лопастей);
- N_B – потери механической мощности на выброс щепы после

измельчения порубочных остатков ножами.

В предложенных обозначениях задачу оптимизации конструктивных параметров можно записать аналитически следующим образом:

$$\begin{cases} v_B(L_3, d_2) \rightarrow \max; \\ p_1(L_3, d_2) \rightarrow \max; \Rightarrow L_3^{opt}, d_2^{opt}. \\ N_B(L_3, d_2) \rightarrow \min; \end{cases} \quad (2.23)$$

Решение данной задачи основано на поиске областей изменения параметров L_3 и d_2 , имеющих максимальные значения скорости выброса щепы v_B и вероятности выброса щепы с первого оборота рубительного диска p_1 , и будет минимальной составляющей мощности N_B , расходуемая на выброс щепы.

Для решения двухфакторной задачи оптимизации провели девять компьютерных экспериментов, в которых изменяли L_3 на уровнях 5, 10, 15 мм при одновременном изменении d_2 на уровнях 100, 250, 400 мм (таблица 2.1).

Полученные в результате проведения оптимизационных компьютерных экспериментов получены данные, которые позволили получить выражения для определения значений функций $v_B(L_3, d_2)$, $p_1(L_3, d_2)$ и $N_B(L_3, d_2)$. Данные формулы имеют высокую практическую ценность на этапе конструирования механизма выброса щепы: позволяют оценить показатели эффективности выброса, не используя компьютерным расчетам.

Функции $v_B(L_3, d_2)$, $p_1(L_3, d_2)$ и $N_B(L_3, d_2)$ аппроксимировали полиномами второго порядка в виде:

$$K(L_3, d_2) = k_1 L_3^2 + k_2 d_2^2 + k_3 L_3 \cdot d_2 + k_4 L_3 + k_5 d_2 + k_6, \quad (2.24)$$

где K – критерий оптимизации (v_B , p_1 или N_B); $k_1 \dots k_6$ – параметры многочлена.

Таблица 2.1 – Результаты компьютерных экспериментов для оптимизации конструктивных параметров механизма выброса щепы

№	Параметры механизма выброса щепы		Показатели эффективности механизма выброса щепы		
	L_3 , мм	d_2 , мм	v_B , м/с	p_1	N_B , Вт
1	5	100	1,8	0,63	1450
2	5	250	2,4	0,87	1220
3	5	400	1,7	0,73	1360
4	10	100	1,7	0,57	740
5	10	250	2,3	0,82	630
6	10	400	1,6	0,69	710
7	15	100	1,5	0,52	640
8	15	250	2,0	0,74	590
9	15	400	1,2	0,56	620

Значения многочленов определялись с помощью метода наименьших квадратов (МНК) [86,87], который позволяет уменьшить суммарное значение квадратов отклонений теоретических показателей от вычислений, полученных

при проведении компьютерных экспериментов:

$$\sum_{i=1}^{N_{КЭ}} (K_{\text{аналит.}}(L_3^i, d_2^i) - K_{КЭ}^i(L_3^i, d_2^i))^2 \rightarrow \min, \quad (2.25)$$

где i и $N_{КЭ}$ – порядковый номер и число осуществленных экспериментов на ЭВМ; $K_{\text{аналит.}}$ – аналитическое значение критерия K , которое зависит от значений L_3 и d_2 ; $K_{КЭ}^i$ – величина критерия K , рассчитанные в i -м компьютерном исследовании с параметрами L_3^i и d_2^i .

Для аппроксимация методом МНК произведены вычисления в прикладной программе MathCAD 14 (рисунок 2.24).

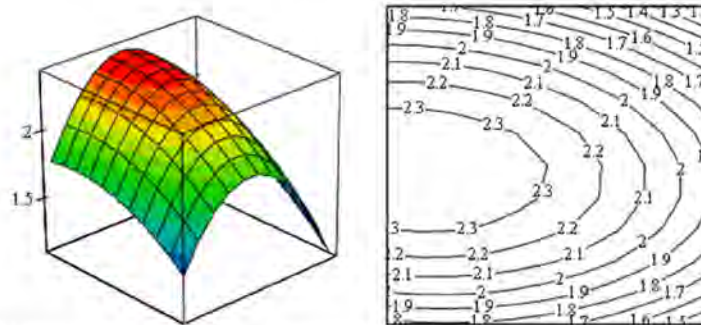


Рисунок 2.24 – Картограммы оптимизации параметров механизма выброса щепы в математической программе Mathcad 14

В итоге определены формулы для показателей эффективности механизма выброса щепы:

$$v_B(L_3, d_2) = -4,001 \cdot 10^{-3} L_3^2 - 2,889 \cdot 10^{-5} d_2^2 - 6,667 \cdot 10^{-5} L_3 \cdot d_2 + 0,057 L_3 + 0,015 d_2 + 0,467; \quad (2.26)$$

$$p_1(L_3, d_2) = -7,333 \cdot 10^{-4} L_3^2 - 8,593 \cdot 10^{-6} d_2^2 - 2,001 \cdot 10^{-5} L_3 \cdot d_2 + 0,006 L_3 + 4,785 \cdot 10^{-3} d_2 + 0,226; \quad (2.27)$$

$$N_B(L_3, d_2) = 11,47 L_3^2 + 4,741 \cdot 10^{-3} d_2^2 + 0,023 L_3 \cdot d_2 - 307,8 L_3 - 2,759 d_2 + 2889, \quad (2.28)$$

где L_3 и d_2 измеряются в миллиметрах, v_B – в метрах в секунду, p_1 – безразмерная, N_B – в Ваттах.

Для дальнейшего анализа функции $v_B(L_3, d_2)$, $p_1(L_3, d_2)$ и $N_B(L_3, d_2)$ представлены в виде графиков (рисунок 2.25) и картограмм (рисунок 2.26).

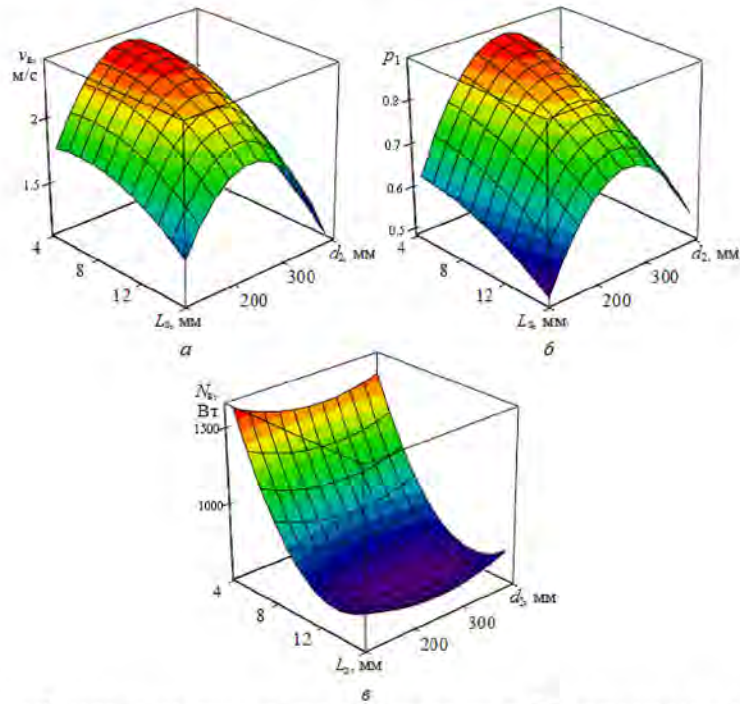


Рисунок 2.25 – Графики влияния зазора между рубительным диском и кожухом L_3 и диаметра цилиндрической части щепопровода d_2 на скорость выброса щепы v_B , вероятность выброса с первого оборота рубительного диска p_1 и затраты мощности на выброс N_B

Данные выражения могут быть применены для оперативной оценки (без проведения экспериментов) показателей эффективности механизма выброса щепы.

Графические зависимости визуально отражают характер влияния зазора и диаметра щепопровода на скорость выброса щепы, вероятность выброса щепы с первого оборота и затраты мощности механизмом выброса. Из-за необходимости визуального анализа по проекциям графики позволяют понять закономерности только на качественном уровне. Для количественного анализа графики перестроены в картограммы (рисунок 2.26).

Образец применения картограмм представлен на рисунке 2.26, *a*. Если зазор между рубительным диском и кожухом составляет 12 мм (точка *A*) и диаметр щепопровода составляет 200 мм (точка *B*), то соответствующая точка факторного пространства *C* находится между линиями уровня 2,1 и 2,2 м/с и ближе к линии уровня 2,2 м/с. Поэтому скорость выброса щепы v_B будет равна 2,16 м/с. Аналогичным графо-аналитическим способом можно определить другие показатели эффективности соответствующим картограммам.

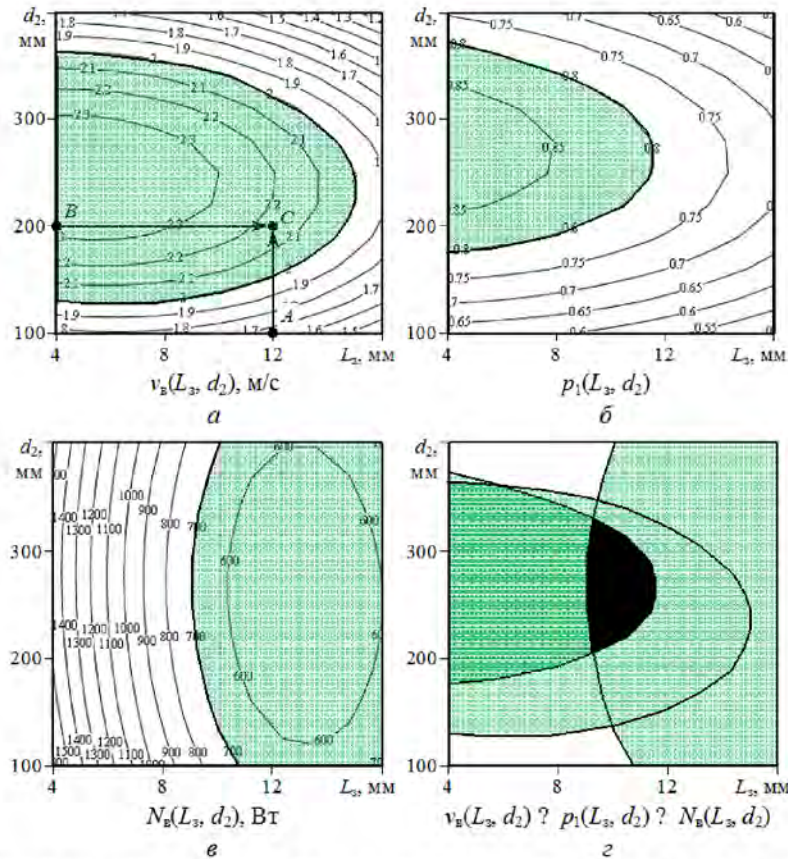


Рисунок 2.26 – Оптимизационные картограммы параметров механизма выброса щепы. Благоприятные области факторного пространства затемнены

На картограммах затемнены области благоприятного значения показателей: высоких значений скорости выброса и вероятности выброса за первый оборот рубительного диска, а также низких значений затрат мощности на выброс.

Предельные величины разделения на благоприятную и неблагоприятную области определены следующими значениями: $v_B = 2,0$ м/с (рисунок 2.26, а) и $p_1 = 0,80$ (рисунок 2.26, б) и $N_B = 700$ Вт (рисунок 2.26, в). Предельные величины благоприятной области получены из того принципа, что она займет большую часть факторного пространства и включит в себя максимальные или минимальные величины критерия, а линия зоны определяется границей уровня на графике.

Область перекрытия благоприятных зон (рисунок 2.26, г) определяет лучшую область, в пределах которой находятся значения по каждому из трех показателей эффективности одновременно.

Положение благоприятной зоны в факторном пространстве (рисунок 2.26, г) предопределяет, что оптимальные величины конструктивно-технологических параметров механизма выброса щепы следующие: зазор между лопастями рубительного диска и боковой поверхностью цилиндрической части кожуха составляет 9 ... 11 мм, диаметр щепопровода равен 230 ... 300 мм, скорость выброса щепы – не менее 2,0 м/с, доля щепы, выброшенной с первого оборота

рубительного диска составит 80 %, затраты мощности на выброс не превысят 700 Вт.

Таким образом, двухфакторная трехкритериальная оптимизация позволила определить оптимальную взаимосвязь конструктивно-технологических параметров механизма выброса щепы из кожуха машины.

2.11 Конструктивно-технологическая схема дисковой рубительной машины, оснащенная новым механизмом выброса щепы

На рисунке 2.27 показана машина для измельчения древесного сырья в виде порубочных остатков, а на рисунке 2.28 отображены кожух с отверстиями, и диск с лопатками с установленными на нем ребрами.

Машина для измельчения древесного сырья в виде порубочных остатков включает в себя загрузочный патрон 1, щепопровод 2, диск 3 с лопатками 4 с установленными ребрами 5 и выступами прямоугольной формы 6, кожух 7 с отверстиями 8, клиновые ремни 9, вал привода 10, узел подачи сырья 11, состоящий из крестообразного подающего узла 12 и валцов с зубьями 13, загрузочное оборудование 14, включающее нижнюю 17 и верхнюю 19 части, гидроцилиндр 15, трубопровод 16, бак 17, пластины 18, шкивы 20, понизитель оборотов 21, вал 22, ремень 23.

Устройство для измельчения порубочных остатков, оснащенное новым механизмом выброса щепы функционирует следующим образом: машина размещается таким образом, чтобы загрузочное оборудование 14, установленное на внешней части загрузочного патрона 1, своей нижней частью захватывало некоторый объем порубочных остатков.

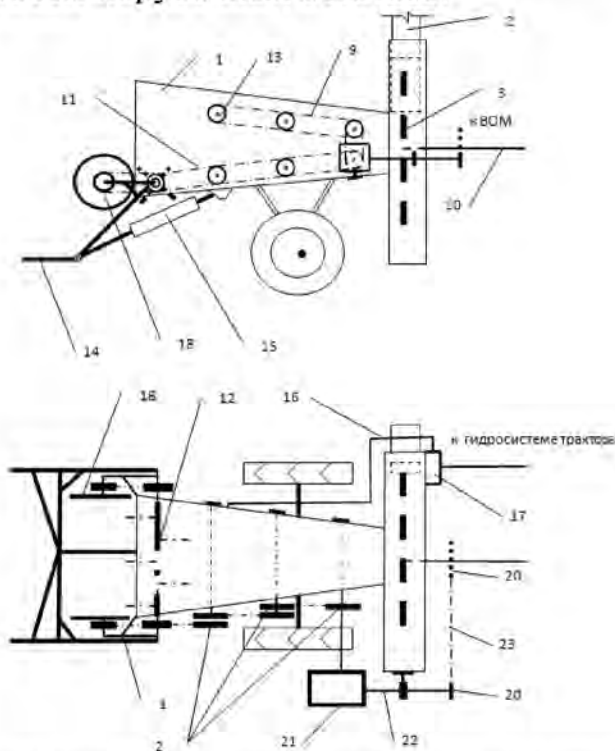


Рисунок 2.27 – Устройство для измельчения порубочных остатков, оснащенное новым механизмом выброса щепы

Затем с помощью трубопровода 16 в гидроцилиндре 15 создается избыточное давление, и его шток начинает передавать усилие раме загрузочного оборудования 14, которая является многосвязной. Перемещение штока в горизонтальном направлении способствует вертикальному движению нижней 17 и верхней 19 частей загрузочного оборудования 14.

Таким образом, некоторый объем древесного сырья размещается во входном отверстии загрузочного патрона 1, который имеет форму призмы, прикрепленной меньшим основанием соединенной с кожухом измельчителя 3. Пластины 18 создают упорядоченное перемещение древесного сырья через входное окно загрузочного патрона 1.

Вальцы 13 с зубьями, являющиеся конструктивным элементом узла подачи сырья 11 и закрепленные в два ряда на внутренних стенках загрузочного патрона 1, создают непрерывную подачу сырья к измельчителю 3.

Движение сырья с помощью крестообразного подающего узла 12 и вальцов с зубьями 13, обеспечивается клиновыми ремнями 9 и шкивами 20, которые через понизитель оборотов 21, вал 22, ремень 23 и вал привода 10 присоединены к валу отбора мощности трактора.

После прохождения через измельчитель 3 элементы древесного сырья оказываются в кожухе 7 с отверстиями 8 и под давлением струй воздушного потока, создаваемых лопатками 4 и отверстиями 8, а так же под механическим воздействием лопаток 4 с ребрами 5 и прямоугольными выступами 6 эвакуируются из кожуха щепопровода 2 в приемную тару (рисунок 2.28).

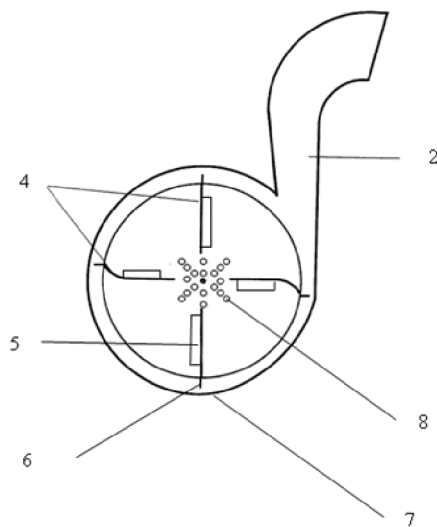


Рисунок 2.28 – Общий вид рубительного диска и кожуха с отверстиями

Постоянное измельчение древесного сырья создается при помощи движения машинно-тракторного агрегата по лесосеке с пониженной скоростью. Конструктивная схема дисковой рубительной машины позволяет увеличить эффективность процесса выброса щепы через щепопровод путем создания восходящих потоков воздуха в ее кожухе.

Выводы

1. Разработана физико-математическая модель движения и выброса щепы из дисковой рубительной машины для измельчения порубочных остатков, позволяющая учесть влияние конструктивных параметров механизма на показатели эффективности выброса щепы.

2. Создана компьютерная программа, реализующая модель механизма выброса щепы, для теоретического исследования эффективности различных вариантов механизма с различными конструктивными параметрами и определения оптимальных параметров механизма.

3. Оптимальная частота вращения рубительного диска составляет около 20 $1/c$. При этом механизм обеспечивает выброс щепы из щепопровода с горизонтальной скоростью 2,3 м/с, вероятность увлечения щепы на первом обороте рубительного диска составляет 0,82, потребляемая на увлечение и выброс щепы мощность составляет 630 Вт.

4. Оптимальное количество лопастей рубительного диска составляет 3 ... 4. При этом скорость выброса щепы из щепопровода составляет 2,3...2,4 м/с, вероятность выброса щепы из щепопровода на первом обороте рубительного диска составляет 0,79 ... 0,82, потребляемая на выброс щепы мощность составляет 595 ... 530 Вт.

5. Оптимальная величина зазора между краем лопасти и боковой стенкой кожуха составляет около 10 мм. При меньшем зазоре существенно увеличиваются энергетические затраты на вовлечение щеп в сложное движение между рубительным диском и кожухом, при большем зазоре снижается эффективность выброса щепы: уменьшаются скорость выброса и вероятность выброса за один оборот рубительного диска.

6. Оптимальный диаметр круглой части щепопровода составляет 220...300 мм. При этом скорость выброса превышает 2,2 м/с, вероятность выброса за один оборот рубительного диска превышает 0,80, потребляемая мощность на выброс щепы составляет менее 620 Вт.

7. Оптимальная протяженность цилиндрической части щепопровода составляет около 300 мм, и позволяет обеспечить достаточно узкий поток щепы со скоростью выброса более 2 м/с при достаточно высоком расположении окна выброса щепы (более 2 м от оси рубительного диска), с вероятностью выброса щепы за один оборот рубительного диска более 0,8 и потребляемой на выброс щепы мощностью менее 650 Вт.

8. Высота выходного окна щепопровода должна быть около 350 ... 400 мм, то есть на 15 ... 25 % больше диаметра щепопровода в цилиндрической части. Дальнейшее увеличение высоты окна нецелесообразно, так как практически не приводит к повышению эффективности выброса щепы, но увеличивает габаритные размеры механизма.

9. Двухфакторная оптимизация позволила получить оптимальную величину зазора между лопастями рубительного диска и боковой поверхностью цилиндрической части кожуха 9 ... 11 мм, оптимальный диаметр щепопровода

230 ... 300 мм. При этом скорость выброса щепы составит не менее 2,0 м/с, доля щеп, выброшенных с первого оборота рубительного диска, составит не менее 80 %, затраты мощности на выброс не превысят 700 Вт.

10. Максимальная производительность механизма выброса щепы 81 ... 84 кг/мин достигается при числе оборотов диска 15 ... 20 ¹/с, количестве лопастей рубительного диска не менее 4, величине зазора между краем лопасти и боковой стенкой кожуха не более 10 мм, диаметре круглой зоны щепопровода 200...300 мм, высоте цилиндрической зоны щепопровода не более 300 мм, высоте выходного окна щепопровода не менее 400 мм.

11. Дополнена математическая модель движения щеп в щепопроводе для описания взаимного воздействия сбалансированного воздушного потока и потока щеп. Оптимальная система ввода воздуха в кожух рубительного диска представляет собой совокупность 200 отверстий диаметром 20 ...25 мм.

ГЛАВА 3. ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ВЫБРОСА ЩЕПЫ ИЗ ДИСКОВОЙ РУБИТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ

Программа и методика экспериментальных исследований процесса измельчения древесного сырья предусматривала:

- исследование закономерностей влияния частоты вращения рубительного диска на эффективность механизма выброса щепы из дисковой рубительной машины;

- исследование фракционного состава щепы, получаемой при измельчении отходов лесозаготовок дисковой рубительной машиной, оснащенной новым механизмом выброса щепы, при различной частоте вращения рубительного диска.

3.1. Описание лабораторной установки и методики проведения исследований

При определении закономерностей влияния на эффективность механизма выброса щепы из дисковой рубительной машины частоты вращения рубительного диска, количества отверстий в кожухе и скорости выброса щепы, принимается схема проведения экспериментальных исследований (рисунки 3.1).

Рубительный диск вращается вокруг своей оси, а образцы древесины приобретают с помощью механизма подачи поступательное движение внутри корпуса загрузочного патрона. После измельчения рубительным диском, поступившего сырья, образовавшаяся масса щепы, размещается в кожухе рубительного диска, а затем при помощи нового механизма выброса выбрасывается в приемный блок.

Теоретическими исследованиями установлено, что наибольшее влияние на показатели эффективности рубительной машины оказывает частота вращения рубительного диска, лопасти с прямоугольными выступами и ребрами на них, количество отверстий в кожухе и скорость выброса щепы.

Следовательно, методика исследований предопределяла исследование влияния частоты вращения рубительного диска, количества отверстий в кожухе и скорости выброса щепы на эффективность механизма выброса щепы из дисковой рубительной машины и получаемый при этом фракционный состав щепы.

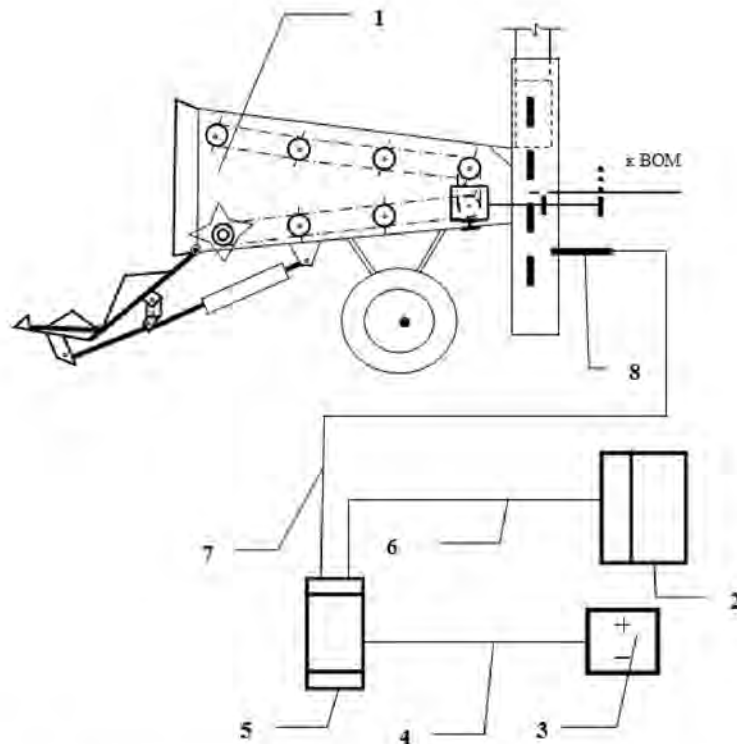


Рисунок 3.1 – Схема комплекса для исследования закономерностей влияния конструктивно-технологических параметров на эффективность механизма выброса щепы

Изучение закономерности влияния частоты вращения рубительного диска, количества отверстий в кожухе и скорости выброса щепы на эффективность механизма выброса проводилось с помощью ПО тензостанции ZET017-T8 и оптического датчика BC 401 по распространенным правилам проведения исследований (рисунок 3.2).

Получение разнообразных значений частоты вращения рубительного диска проводилось изменением передаточного числа шкивов, расположенных в загрузочном патроне по плану проведения лабораторных исследований с трехкратной последовательностью [49, 61,101, 130,132]. Полученные результаты обрабатывались при помощи компьютерного комплекса «Тахометр» и программы Statistica7,0. [8,75,82].

Для определения скорости выброса щепы измерялась скорость движения воздушного потока, создаваемого рубительным диском, оснащенным лопатками без присутствия щепы при помощи анемометра ручного электронного.

Геометрические размеры щепы исследовались исходя из ее качественного состава на ситах анализатора. Использовались измельченные элементы древесного сырья, произведенные рубительным диском с прямыми ножами (рисунок 3.3).



Рисунок 3.2 – Положение датчика частоты оборотов на корпусе лабораторной установки

При использовании соответствующих методик и технических условий геометрические параметры произведенной щепы исследовались путем стратификации навески образцов, после чего определяли кондиционную, мелкую и крупную фракции щепы [130,131].



Рисунок 3.3 – Общий вид измельчителя с прямыми ножами

При исследованиях фракционного состава щепы были применены:

- анализатор с ячейками на решетках: 50, 30, 20,10, 5 мм;
- тара;
- прибор для определения веса с погрешностью измерений не более 1 г.

От каждой партии произведенной щепы отбирали десять точечных проб, которые представляли контрольную пробу общей массой 10 ± 1 кг. Точечные

пробы массой не менее 1 кг отбирали из приемного блока на глубине не менее 20 см от верхнего уровня. Точечную пробу отбирали через равные промежутки времени. Составленную контрольную пробу тщательно перемешивали и методом двухкратного квартования сокращали до навески массой 0,4-0,5 кг и просеивали на решетках анализатора в течение 10 мин.

Остатки щепы после проведения просеивания взвешивали с помощью прибора для определения веса.

Кондиционная фракция включает элементы измельченной древесины, оставшиеся на ячейках решета с параметрами 50, 30 и 20 мм и оставшиеся на решете с величиной ячеек 10 мм.

Крупная фракция включает элементы измельченной древесины, оставшиеся на ячейках решета с параметрами 50 и 30 мм.

Мелкая фракция включает элементы измельченной древесины, оставшиеся на ячейках решета с параметрами 10 мм и оставшиеся на решете с величиной ячеек 5 мм.

Отилки и иголки включает элементы измельченной древесины, прошедшими через ячейки решета величиной 5 мм.

Результаты изучения геометрических значений щепы заносились в испытательную ведомость.

3.2 Подготовка и выполнение лабораторных исследований

Лабораторные исследования осуществлялись с использованием опытного варианта рубительной машины с новым механизмом выброса щепы, который используется в лабораторных и полевых экспериментах.

Для подготовки эксперимента измерительная аппаратура собиралась в соответствующую электрическую схему путем присоединения чувствительного элемента ВС-401 к электрической схеме, подключенной к ЭВМ. После проводилось проверочное испытание измерительного прибора, и устанавливалась способность приборов функционировать в необходимых пределах.

Исследование воздействия частоты вращения рубительного диска, количества отверстий в кожухе и скорости выброса щепы на эффективность механизма выброса щепы из дисковой рубительной машины проводилось в следующей последовательности.

Для осуществления запланированных исследований производился сбор в кучи порубочных остатков. Тензометрическая станция 6 соединялась с источником питания 3. Затем производилось включение персонального компьютера 2 и осуществлялась настройка прикладного ПО «Тахометр».

Датчик оборотов 8 устанавливался в кожух измельчающего диска напротив маркированной лопасти и проводилась настройка частоты вращения рубительного диска.

Определение скорости воздушного потока осуществлялось в пределах значений, предусмотренных планом исследований и соответствующих

техническим возможностям базового трактора, а ее параметры менялись с помощью управляющих органов машины. Количество отверстий на кожухе рубительной машины изменялось при помощи клейкой ленты.

Далее определялась масса древесного сырья, используемая для измельчения и размещаемая на подъемном устройстве. Далее подъемное устройство, устанавливало отходы лесозаготовок у входного окна загрузочного патрона, которые с помощью подающих захватов и вальцов с зубьями передвигались в направлении рубительного диска.

Продолжительность рубки порции сырья учитывалась с момента выхода щепы из машины до окончания измельчения порции лесосечных отходов. После чего осуществлялся сбор произведенной щепы и проводилось взвешивание.

3.3 Методика многофакторного планирования лабораторных исследований

Результаты теоретических исследований процесса измельчения отходов лесозаготовок, позволили установить наиболее важные параметры, воздействующие на процесс измельчения древесного сырья, оказывающие наибольшее влияние на производительность и фракционный состав произведенной щепы. Таким образом, при проведении лабораторных исследований во внимание брались следующие показатели:

- частота вращения рубительного диска, $1/с - n_d$;
- скорость выброса щепы, $1/с - v_b$;
- вероятность выброса щепы с первого оборота рубительного диска – p_1 ;
- потери мощности на выброс щепы, Вт – N_b ;
- количество отверстий в кожухе рубительного диска, шт. – m ;
- производительность машины, кг/с – P .

Конструктивно-технологические значения машины такие, как: диаметр рубительного диска, число ножей, число лопаток, закрепленных на рубительном диске, размер отверстий на кожухе, геометрические параметры кожуха рубительного диска и щепопровода не изменялись [61,101,132].

Начальные значения факторов, определяющих функционирование опытного варианта рубительной машины, брались на основании матрицы эксперимента. Критерием оптимизации являлась производительность дисковой рубительной машины. Проведенные математические эксперименты свидетельствуют о том, что такие факторы, как частота вращения рубительного диска, скорость выброса щепы являются наиболее влиятельными показателями эффективности работы машины.

Значения данных показателей определяли исходя из условия максимального объема измельченного древесного сырья за единицу времени. Величины факторов имеют следующие границы:

- частота вращения рубительного диска, $1/с - n_d$ (15-20);

- количество отверстий в кожухе рубительного диска, шт. – m (150-240);
- скорость выброса щепы, м/с – v_b (2,3-2,4).

Параметры рубительной машины при проведении лабораторных испытаний изменялись согласно технических условий эксплуатации клиноременного вариатора с пределом изменения скоростей 4 и условиями рубки отходов лесозаготовки.

Программы «StatgraphicsplusforWindows» использовалась для создания матрицы и многофакторного плана эксперимента. При создании матрицы и многофакторного плана эксперимента применено ротатабельное планирование с дисперсией отклика постоянной во всех его точках, равномерно расположенных от центральной части. Результаты исследований просчитывались с помощью прикладных программ, работа которых основана на методах математической статистики [8,49,60,75].

3.4 Методика обработки результатов лабораторных исследований

Для получения модели зависимости частоты вращения рубительного диска, количества отверстий в кожухе и скорости выброса щепы на эффективность механизма выброса щепы из дисковой рубительной машины и определение фракции щепы определялись значения, наиболее адекватно отражающие процесс выброса щепы.

При получении регрессионных уравнений учитывались следующие требования [49,60,75, 82,130,131]:

1. Коэффициент корреляции, определяющий величину связи между параметрами, должен находиться в пределах значений от 0,7 до 0,9. В случае обладания показателей значений больше указанных величин, то это говорит о плотной и очень плотной связи параметров [49]. Значения коэффициента корреляции меньше 0,3 свидетельствует о слабой близости, а пределы значений от 0,3 до 0,5 определяются как умеренная связь. Предел значений от 0,51 до 0,7 указывает на значительную близость факторов.

2. Адекватность регрессионных выражений определяется описанием не менее 70 % значений зависимой переменной: $R^2 \geq 0,7$;

3. Размер стандартной ошибки должен быть не > 5 % величины зависимой переменной;

4. Рассчитанные коэффициенты регрессионного уравнения и его свободный член имеют значимый 5 % уровень;

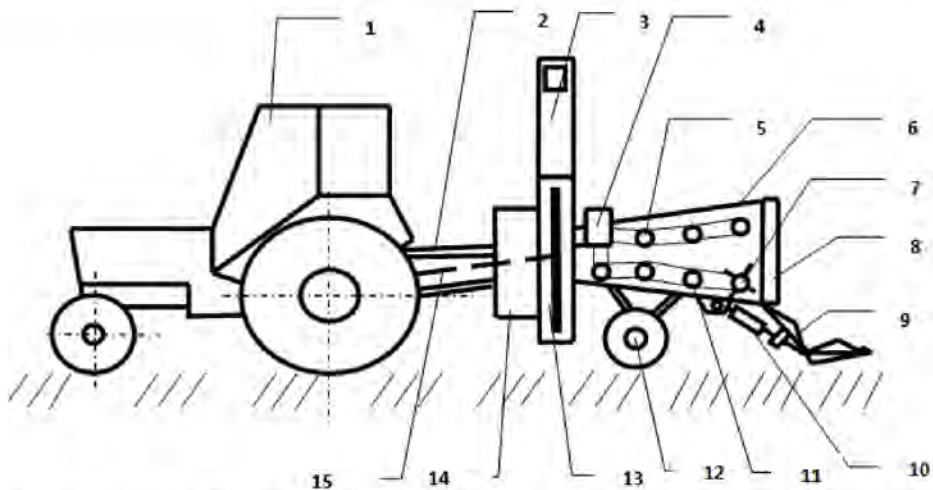
5. Параметры остатков от регрессии не должны обладать показателями автокорреляции ($r < 0,30$). Так же они должны быть нормально распределены. Так при меньшем значении суммы квадратов остатков, получается стандартная ошибка с небольшими величинами [49,60,75, 82,130].

6. Анализ регрессионного выражения по критерию Фишера и p -уровню проводится по его мере создания.

3.5 Описание конструкции и принципа действия опытного образца дисковой рубительной машины, оснащенной новой конструкцией механизма выброса щепы

Испытание опытного варианта проходило в производственных условиях. Конструктивная схема машины представлена на рисунках 5.1, 5.2. Опытной образец включает колесный трактор МТЗ 80/82 и прицепной вариант машины с новым механизмом выброса щепы.

Получение щепы проходило следующим образом. Загрузочное устройство располагалось около основания кучи древесного сырья. Затем с помощью гидравлического оборудования машины его переводили из транспортного в рабочее положение, вследствие чего отходы лесозаготовок в виде сучьев, ветвей и вершинок размещался в окне загрузочного патрона. Направляющие козырьки способствовали передвижению в загрузочный патрон сырья, расположенного вне зоны приемного окна.



- 1 – трактор; 2 – тяги; 3 – щепопровод; 4 – понижитель оборотов;
 5 – шкивы; 6 – загрузочный патрон; 7 – узел для подачи сырья;
 8 – направляющие козырьки; 9 – механизм загрузки сырья;
 10 – гидроцилиндр; 11 – клиновые ремни; 12 – шасси; 13 – измельчающий диск; 14 – тормозное устройство; 15 – телескопический вал.

Рисунок 5.1 – Конструктивная схема опытного варианта машины



Рисунок 5.2 – Общий вид опытного варианта машины

Узел подачи перемещает сырье, находящееся в зоне приемного окна внутрь загрузочного патрона, которые вальцами с зубьями перемещаются в зону рубки. Измельченное древесное сырье из кожуха измельчителя под действием струй воздуха, создаваемых лопатками и отверстиями в кожухе, перемещаются из шепопровода в приемную тару.

Эффективность работы машины (Π) определяется количеством полученной в единицу времени T (минуту, час, смену) щепы, изготовленной при проведении полевых исследований. Численные значения производительности находятся во взаимосвязи с условиями выполнения работ и их последовательностью [61].

Для измельчения отходов лесозаготовок и удаление щепы из кожуха рубительной машины (рисунки 5.3) необходимо время $t_{ц}$, состоящее из времени необходимого для: рубки сырья (t_p), холостых ходов (t_x) и вспомогательных операций (t_e). Численные значения производительности опытного образца определялось следующим выражением, определяющим время цикла работы машины:

$$\Pi = \frac{T}{t_{ц}} = \frac{T}{t_p + t_x + t_e}, \quad (5.1)$$



Рисунок 5.3 – Выброс щепы из кожуха рубительной машины

Часовая производительность измерялась в пределах 1 часа работы функционирования экспериментального образца дисковой рубительной машины с помощью хронометра. Итоги записывались в специальный журнал наблюдений.

Породы деревьев на лесосеке изучались визуально. Весовые параметры древесного сырья определялся путем обмера валов рулонной линейкой с дальнейшим пересчетом объемных значений в весовые параметры.

Получение значений часовой производительности дисковой рубительной машины осуществлялось на территории лесохозяйственного предприятия. Рельеф территории рубок спокойный без явных превышений. Сформированные на вырубке валы имели следующие геометрические размеры: длина – 78 м; ширина – 1,5 м; расстояние между валами – 5,8 м.

При проведении полевых исследований первоначально определялся объем отходов лесозаготовок находящихся на вырубке. Его значения составили 43,2 пл.м³.

При проведении полевых опытов параметры машины имели следующие значения:

- число оборотов диска, 1/с – 12,0;
- количество рубительных ножей, шт. – 4;
- количество лопаток, шт. – 4;
- количество отверстий в кожухе, шт. – 200;
- диаметр кожуха рубительного диска, мм – 1600;
- размер выходного окна щепопровода, мм – 400.



Рисунок 5.4 – Опытный образец рубительной машины (со стороны передней стенки кожуха)

Древесное сырье, предназначенное для измельчения, представлено на рисунке 5.5.



Рисунок 5.5 – Вид древесного сырья, предназначенного для измельчения

Конечный продукт в виде топливной щепы отображен на рисунке 5.6.



Рисунок 5.6 – Измельченные порубочные остатки

Проведение полевых экспериментов показало, что в течение 1 часа представленный образец дисковой рубительной машины способен перерабатывать $36,1 \text{ пл.м}^3/\text{ч}$ древесного сырья [6, 130, 133]. Для сравнения, опытный образец машины в стандартном исполнении имел значение производительности $28 \text{ пл.м}^3/\text{ч}$.

ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ВЫБРОСА ЩЕПЫ ИЗ ДИСКОВОЙ РУБИТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ

4.1 Результаты исследования закономерностей влияния частоты вращения рубительного диска, количества отверстий в кожухе и скорости выброса щепы на эффективность механизма выброса щепы из дисковой рубительной машины

Для создания математической модели влияния числа оборотов рубительного диска, количества отверстий в кожухе и скорости выброса щепы на эффективность механизма выброса щепы из дисковой рубительной машины использован факторный эксперимент 2^3 . Уровни и интервалы варьирования исследуемых факторов, представлены в главе 3 данного исследования [8, 60,75,82,130,131].

В соответствии с методикой лабораторных исследований, составлялись сводка и план многофакторного эксперимента.

При реализации плана многофакторного эксперимента определены значения массы измельченного древесного сырья и содержание его фракционного состава.

Проведенный регрессионный анализ дал возможность вычислить зависимость, которая оценивает степень влияния технологических параметров рубительной машины на ее производительность. Итоги вычислений обработаны компьютерными программами MSExcel, Statistica. Результаты расчетов представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Итоговые значения воздействия технологических параметров на количество измельченного сырья опытным вариантом рубительной машины

Regression Summary for Dependent Variable: P_КГ_МИН (new.sta)						
R= ,88109297 RI= ,77632482 Adjusted RI= ,76107424						
F(3,44)=50,905 p<,00000 Std.Error of estimate: 2,4438						
	BETA	St. Err. of BETA	B	St. Err. of B	t(44)	p-level
Intercpt			7,643201	18,2477	0,418858	0,677357
Частота вращения рубительного диска n, $1/c$	0,857102	0,071299	1,836695	0,152787	12,02126	1,7E-15
Количество отверстий в кожухе m, шт.	0,171238	0,071299	0,036695	0,015279	2,401693	0,020609
Скорость выброса щепы v, м/с	0,111259	0,071299	11,8548	7,596971	1,560465	0,125815

Математическая обработка результатов исследований свидетельствует о том, что влияние параметров машины на эффективность ее работы выражается регрессионным уравнением:

$$P = 7,64 + 1,83n + 0,03m + 11,85v. \quad (4.1)$$

(13,0 < n, 1/c < 23,0; 130,0 < m < 220,0; 2,26 < v, M/c < 2,46)

Анализ коэффициентов уравнения, указанного в таблице 4.1 показывает на то, что изучаемые факторы имеют близкую связь ($R > 0,88$). Выражение описывает > 84 % значений ($R^2 > 0,84$). Анализ коэффициентов модели по t -критерию показал значимость на 5 % факторов количества оборотов диска (n) и числа отверстий в кожухе (m). Проведенная проверка коэффициентов уравнения (таблица 4.2) свидетельствует об их существенности по F -критерию и p -уровню.

Таблица 4.2 – Результаты оценки коэффициентов регрессионного выражения, указанного в табл. 4.1

Analysis of Variance; DV: P_КГ_МИН (new.sta)					
	Sums of Squares	df	Mean Squares	F	p-level
Regress.	912,0549	3	304,0183	50,90461	2,35E-14
Residual	262,7818	44	5,972314		
Total	1174,837				

Проанализировав поверхность отклика, построенного по уравнению 4.1, описывающего закономерность влияния частоты вращения диска ($n, 1/c$), количества отверстий в кожухе (m , шт) и скорости выброса щепы ($v, M/c$) на производительность машины (P , кг/мин) (рисунок 4.1) можно отметить тот факт, что с повышением значений частоты вращения рубительного диска с 12 до 22 $1/c$ количество щепы составляет 66 кг/мин.



Рисунок 4.1 – Закономерность влияния частоты вращения рубительного диска ($n, 1/c$), количества отверстий в кожухе (m , шт) и скорости выброса щепы ($v, M/c$) на производительность дисковой рубительной машины (P , кг/мин)

При этом происходит увеличение скорости выброса щепы с 2,29 м/с до 2,44 м/с. Следует отметить, что в данном диапазоне частоты вращения диска,

количество отверстий в кожухе практически не влияет на эффективность измельчающего устройства.

Лишь при увеличении частоты вращения свыше 22 $1/c$, количество отверстий в кожухе от 200 шт. и более позволяет повысить производительность рубительной машины с 66 до 83 кг/мин (25 %).

Результаты исследования влияния закономерности частоты вращения рубительного диска ($n, 1/c$) и количества отверстий в кожухе (m , шт) на производительность дисковой рубительной машины (P , кг/мин) показали, что взаимосвязь указанных факторов имеет математическое отображение следующего вида:

$$P = 35,49 + 1,83n + 0,036m \quad (4.2)$$

(13,0 < $n, 1/c$ < 23,0; 130,0 < m , шт. < 220,0)

Анализ коэффициентов выражений, указанных в таблице 4.4 указывает на то, что коэффициенты уравнения имеют тесную связь ($R > 0,87$). Модель отражает > 76 % значений ($R^2 > 0,76$). Анализ коэффициентов по t-критерию свидетельствовал о значимости на 5 % уровне факторов числа оборотов диска (n) и количества отверстий в кожухе (m). Проведенная проверка коэффициентов уравнения (таблица 4.3) свидетельствует об их существенности по F-критерию и p - уровню.

Таблица 4.3 – Оценка коэффициентов регрессионной модели из табл.4.4

Analysis of Variance; DV: proisv. (Spreadsheet1.sta)					
	Sums of Squares	df	Mean Squares	F	p-level
Regress.	897,512	2	448,7560	72,81725	0,000000
Residual	277,325	45	6,1628		
Total	1174,837				

Таблица 4.4 – Результаты исследования влияния закономерности частоты вращения рубительного диска ($n, 1/c$) и количества отверстий в кожухе (m , шт) на производительность дисковой рубительной машины (P , кг/мин)

Regression Summary for Dependent Variable: proisv. (Spreadsheet1.sta)						
R= ,87404014 R ² = ,76394618 Adjusted R ² = ,75345489						
F(2,45)=72,817 p<,00000 Std.Error of estimate: 2,4825						
	BETA	St. Err. of BETA	B	St. Err. of B	t(45)	p-level
Intercept			35,49458	3,857787	9,20076	0,000000
Число оборотов диска $n, 1/c$	0,857102	0,072427	1,83669	0,155204	11,83404	0,000000
Число отверстий в кожухе m, шт.	0,171238	0,072427	0,03669	0,015520	2,36429	0,022440

Рассмотрев поверхность отклика, построенного по уравнению 4.2, описывающего закономерность влияния частоты вращения измельчителя ($n, 1/c$) и количества отверстий в кожухе (m , шт) на эффективность работы

оборудования (P , кг/мин) (рисунок 4.2) можно сказать, что при возрастании частоты вращения диска с 12 до 24 $^1/c$ и изменением числа отверстий в кожухе машины со 120 до 180 шт. эффективность рабочего процесса получения щепы увеличивается с 66 до 83 кг/мин (25 %). При возрастании частоты движения диска с 12 до 24 $^1/c$ и изменением числа отверстий в кожухе со 180 до 240 шт. эффективность рабочего процесса получения щепы увеличивается с 83 до 86 кг/мин (3%). Данный показатель свидетельствует о правильности проведенных теоретических исследований и подтверждает тот факт, что количество отверстий в кожухе рубительной машины должно быть порядка 200 шт.

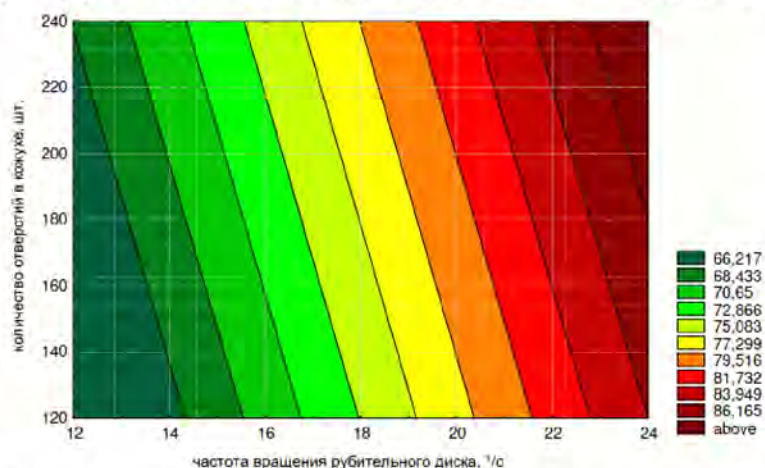


Рисунок 4.2 – Закономерность воздействия частоты вращения рубительного диска ($n, ^1/c$) и числа отверстий в кожухе (m , шт) на производительность дисковой рубительной машины (P , кг/мин)

Результаты исследования влияния закономерности частоты вращения диска ($n, ^1/c$) и скорости выброса щепы (v , м/с) на производительность дисковой рубительной машины (P , кг/мин) показали, что взаимосвязь указанных факторов имеет математическое отображение следующего вида:

$$P = 14,06 + 1,83 n + 11,85 v \quad (4.3)$$

(13,0 < $n, ^1/c$ < 23,0; 2,26 < v , м/с < 2,46)

Анализ коэффициентов выражений, указанных в таблице 4.5 указывает на то, что коэффициенты уравнения имеют тесную близость ($R > 0,86$). Данная модель отражает > 74 % значений ($RI > 0,74$).

Анализ коэффициентов по t-критерию указал значимость на 5 % фактора числа оборотов диска (n). Проведенная проверка коэффициентов уравнения свидетельствует об их существенности по F-критерию и p -уровню.

Исследование поверхности отклика, построенного по уравнению 4.3, описывающего закономерность воздействия частоты вращения диска ($n, ^1/c$) и скорости выброса щепы из щепопровода машины (v , м/с) на эффективность работы рубительной машины (P , кг/мин) (рисунок 4.3) свидетельствует о том, что с возрастанием частоты вращения диска с 12 до 24 $^1/c$ и скорости выброса щепы из кожуха машины с 2,24 до 2,30 м/с эффективность работы рубительной

машины увеличивается с 66 до 83 кг/мин (25 %). При возрастании частоты вращения диска с 12 до 24 $^1/c$ и скорости выброса щепы из кожуха машины с 2,30 до 2,48 м/с эффективность работы рубительной машины увеличивается с 83 до 86 кг/мин (3%).

Таблица 4.5 – Результаты исследования влияния закономерности частоты вращения рубительного диска ($n, ^1/c$) и скорости выброса щепы из щепопровода ($v, м/с$) на производительность дисковой рубительной машины ($P, кг/мин$)

Regression Summary for Dependent Variable: P_КГ_МИН (new.sta)						
R= ,86429299 RI= ,74700237 Adjusted RI= ,73575803						
F(2,45)=66,434 p<,00000 Std.Error of estimate: 2,5700						
	BETA	St. Err. of BETA	B	St. Err. of B	t(45)	P-level
Intercept			14,064 79	18,982 99	0,7409 16	0,4625 93
Число оборотов диска $n, ^1/c$	0,8571 02	0,074981	1,8366 95	0,1606 78	11,430 9	6,7E- 15
Скорость движения конечного продукта, м/с	0,1112 59	0,074981	11,854 8	7,9893 21	1,4838 31	0,1448 25

Таблица 4.6 – Оценка коэффициентов регрессионной модели из табл.4.5

Analysis of Variance; DV: P_КГ_МИН (new.sta)					
	Sums of Squares	df	Mean Squares	F	p-level
Regress.	877,6058	2	438,8029	66,43364	3,72E-14
Residual	297,2309	45	6,605131		
Total	1174,837				

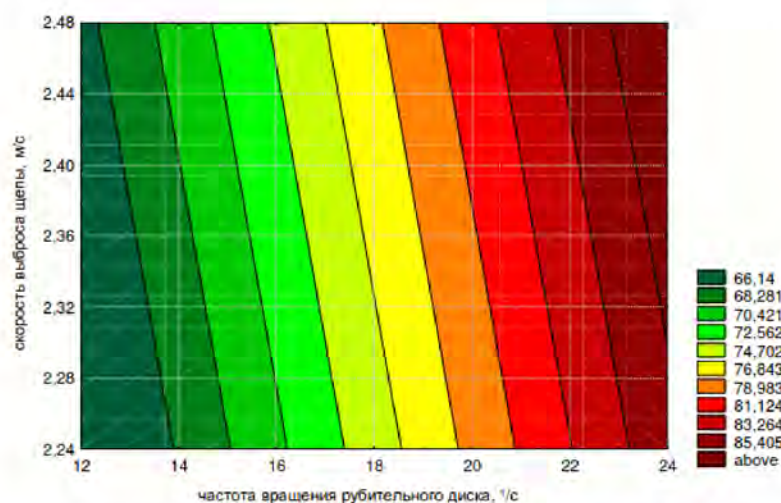


Рисунок 4.3 – Закономерность влияния частоты вращения рубительного диска ($n, ^1/c$) и скорости выброса щепы щепопровода ($v, м/с$) на производительность дисковой рубительной машины ($P, кг/мин$)

Результаты исследования влияния закономерности скорости выброса щепы из щепопровода ($v, м/с$) и количества отверстий в кожухе ($m, шт$) на

производительность дисковой рубительной машины (P , кг/мин) показали, что данные показатели не имеют связи между собой (коэффициент корреляции $R > 0,21$), что свидетельствует о том, что фактор, характеризующий скорость выброса щепы из дисковой рубительной машины (v , м/с) является следствием совместного влияния на производительность дисковой рубительной машины (P , кг/мин) таких факторов как, частота вращения рубительного диска (n , $1/c$) и количество отверстий в кожухе (m , шт).

4.2 Результаты исследования фракционного состава щепы в зависимости от конструктивно-технологических параметров механизма выброса щепы из дисковой рубительной машины

Результаты исследований фракционного состава щепы в зависимости от конструктивно-технологических параметров механизма выброса дисковой рубительной машины и их исследование с использованием положений математической статистики находятся в таблице 4.7 и рисунке 4.4.

Таблица 4.7 – Статистическая обработка итогов исследования геометрических размеров щепы, полученного при рубке древесного сырья

Descriptive Statistics (new 1.sta)											
	Valid N	Mean	Confid. -95,0%	Confid. +95,0%	Median	Sum	Min.	Max.	Variance	Std.Dev.	Standard Error
0, мм	15	3,93	2,44	5,42	3	59	1	9	7,20	2,68	0,69
5, мм	15	6	4,97	7,02	7	90	3	8	3,42	1,85	0,47
10, мм	15	42,73	32,20	53,26	41	641	19	68	361,35	19,00	4,90
20, мм	15	41,8	32,54	51,05	45	627	19	64	279,02	16,70	4,31
30, мм	15	5,8	3,867	7,73	6	87	1	11	12,17	3,48	0,90
50, мм	15	2,06	1,53	2,59	2	31	1	4	0,92	0,96	0,24

Исследование результатов в таблице 4.7 свидетельствует о том, что с возрастанием частоты вращения рубительного диска (n , $1/c$) и изменением количества отверстий в кожухе рубительной машины (m , шт), средние значения качественного состава элементов щепы имеют следующий вид: менее 5 – 3%; 5 – 7%; 10 – 41,0 %; 20 – 45,0 %; 30 – 6,0 %; 50 – 2%.

Оценка значений диаграммы размаха, отображенных на рисунке 4.4 указала, что с возрастанием частоты вращения рубительного диска (n , $1/c$) в общем объеме выбрасываемой щепы увеличивается объем щепы с мелкими (10 мм) и средними (20 мм) размерами.

При этом следует отметить, что элементы щепы размером 10, 20 мм преобладают в общем объеме. При этом отмечено, что на показатели фракционного состава выброшенной щепы основное влияние оказывает частота вращения рубительного диска (n , $1/c$), а изменение количества отверстий в

кожухе рубительной машины (m , шт.) на качественный состав щепы влияния не оказывает.

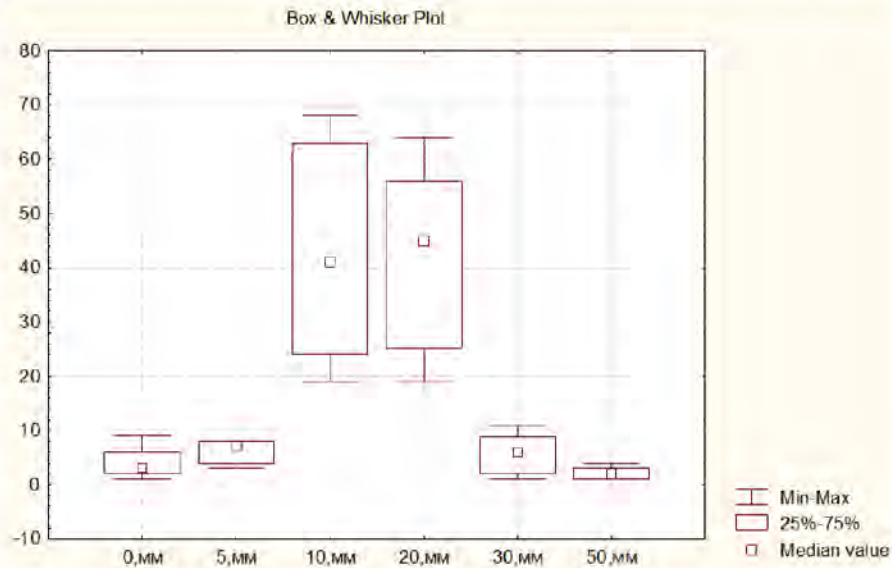


Рисунок 4.4 – Диаграмма размаха геометрических размеров щепы, полученной при измельчении отходов лесозаготовок опытной моделью рубительной машины

Исходя из данного вывода, нами проведены исследования зависимости образования фракций щепы (0, 5, 10 мм) от частоты вращения диска (n , $1/c$). Исследования позволили установить, что указанная взаимосвязь выражена следующим образом:

$$n = 11,39 + 0,06(0, мм) - 0,14(5, мм) + 0,15(10, мм) \quad (4.4)$$

Анализ коэффициентов выражений в таблице 4.8 устанавливает то, что коэффициенты уравнения имеют тесную связь ($R > 0,96$). Модель отображает $> 92\%$ значений ($R^2 > 0,92$).

Изучение коэффициентов по t-критерию установило главенство на уровне 5 % размера щепы равного 10 мм. Проведенная проверка коэффициентов уравнения (таблица 4.10) свидетельствует об их существенности по F-критерию и p - уровню.

Рассмотрев поверхность отклика, полученного с помощью выражения 4.4, отображающего в математической форме взаимосвязь получения фракций щепы размером меньше 5, 5, 10 мм от частоты вращения рубительного диска (n , $1/c$) (рисунок 4.5) можно утверждать, что с возрастанием частоты вращения рубительного диска от 13 до 20 $1/c$ в общем объеме полученной щепы имеется небольшое количество щепы размером меньше 5, 5, 10 мм.

Таблица 4.8 – Итоги влияния частоты вращения рубительного диска на геометрические размеры щепы, полученной при измельчении отходов лесозаготовок опытной моделью рубительной машины

Regression Summary for Dependent Variable: ЧАСТОТА						
R= ,96314829 RI= ,92765462 Adjusted RI= ,90792406						
F(3,11)=47,016 p<,00000 Std.Error of estimate: ,97094						
	BETA	St. Err. of BETA	B	St. Err. of B	t(11)	p-level
Intercept			11,39822	1,091379	10,44388	4,78E-07
0,мм	0,057717	0,210308	0,068782	0,250624	0,274441	0,788831
5,мм	-0,08474	0,087077	-0,14644	0,150475	-0,97319	0,351372
10,мм	0,932812	0,206194	0,157018	0,034708	4,523955	0,000866

Таблица 4.9 – Оценка коэффициентов регрессионной модели из табл. 4.8

Analysis of Variance; DV: ЧАСТОТА (new 1.sta)					
	Sums of Squares	df	Mean Squares	F	p-level
Regress.	132,97	3	44,32334	47,01614	1,46E-06
Residual	10,36999	11	0,942726		
Total	143,34				

При возрастании частоты вращения рубительного диска от 14 до 20 ¹/с в составе полученной щепы наблюдается резкий рост содержания фракции 10 мм. Последующее повышение значений частоты вращения содержание фракции 10 мм в общем объеме полученной щепы практически не изменяется.

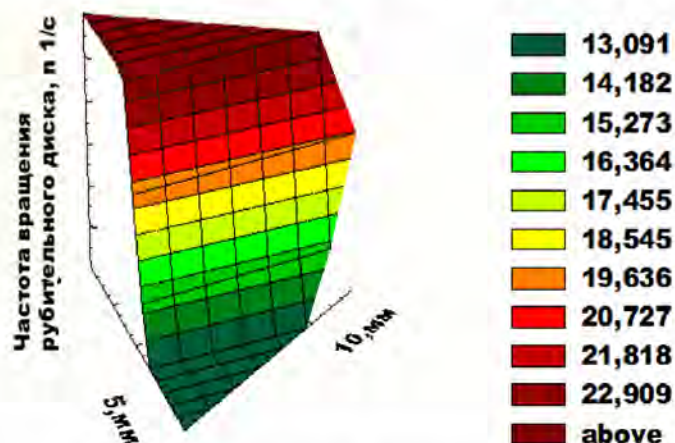


Рисунок 4.5 – Закономерность образования фракций щепы (менее 5, 5, 10 мм) от частоты вращения рубительного диска ($n, 1/c$)

Исходя из полученных результатов можно сделать вывод о том, что наилучшим параметром частоты вращения рубительного диска ($n, 1/c$) является ее величина, равная 20 ¹/с.

Выводы

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Влияние технологических параметров на эффективность работы машины описывается выражением вида:

$$P = 7,64 + 1,83n + 0,03m + 11,85v.$$

Установлена значимость на 5 % параметров частоты вращения рубительного диска (n) и количества отверстий в кожухе (m).

2. Исследования показали, что при возрастании частоты вращения рубительного диска с 12 до 24 $^1/c$ и изменением числа отверстий в кожухе машины со 120 до 180 шт. эффективность рабочего процесса получения щепы увеличивается с 66 до 83 кг/мин (25 %). При возрастании частоты вращения рубительного диска с 12 до 24 $^1/c$ и изменением числа отверстий в кожухе со 180 до 240 шт. эффективность рабочего процесса получения щепы увеличивается с 83 до 86 кг/мин (3%). Данный показатель свидетельствует о правильности проведенных теоретических исследований и подтверждает тот факт, что количество отверстий в кожухе рубительной машины должно быть порядка 200 шт.

3. Закономерность частоты вращения рубительного диска ($n, ^1/c$) и скорости выброса щепы из кожуха машины ($v, м/с$) на производительность дисковой рубительной машины ($P, кг/мин$) показали, что она описывается регрессионным уравнением вида:

$$P = 14,06 + 1,83n + 11,85v.$$

Частота вращения рубительного диска ($n, ^1/c$) является значимым фактором на 5 % уровне.

4. Исследования показали, что с возрастанием частоты вращения рубительного диска с 12 до 24 $^1/c$ и скорости выброса щепы из кожуха машины с 2,24 до 2,30 м/с эффективность работы рубительной машины увеличивается с 66 до 83 кг/мин (25 %). При возрастании частоты вращения рубительного диска с 12 до 24 $^1/c$ и скорости выброса щепы из кожуха машины с 2,30 до 2,48 м/с эффективность работы рубительной машины увеличивается с 83 до 86 кг/мин (3%).

5. Результаты исследования влияния закономерности скорости выброса щепы из дисковой рубительной машины ($v, м/с$) и количества отверстий в кожухе ($m, шт.$) на производительность дисковой рубительной машины ($P, кг/мин$) показали, что данные показатели не имеют связи между собой (коэффициент корреляции $R > 0,21$), что свидетельствует о том, что фактор, характеризующий скорость выброса щепы из дисковой рубительной машины ($v, м/с$) является следствием совместного влияния на производительность дисковой рубительной машины ($P, кг/мин$) таких факторов как, частота вращения рубительного диска ($n, ^1/c$) и число отверстий в кожухе машины ($m, шт.$).

6. Изучение качественного состава щепы, изготовленной опытным вариантом рубительной машины позволяет сделать вывод о том, что с возрастанием частоты вращения рубительного диска ($n, 1/c$) и изменением количества отверстий в кожухе рубительной машины (m , шт), средние значения качественного состава элементов щепы имеют следующий вид: менее 5 – 3%; 5 – 7%; 10 – 41,0 %; 20 – 45,0 %; 30 – 6,0 %; 50 – 2%.

7. Анализ рассмотрения геометрического состава щепы показал, что с возрастанием частоты вращения рубительного диска ($n, 1/c$) в общей массе выбрасываемой щепы происходит увеличение доли мелкой фракций (10 мм) и средней фракции (20 мм). При фракции 10, 20 мм являются основными в составе полученной щепы.

8. Установлено, что на показатели фракционного состава выброшенной щепы, основное влияние оказывает частота вращения рубительного диска ($n, 1/c$), а изменение количества отверстий в кожухе рубительной машины (m , шт.) на фракционный состав влияния не оказывает.

9. Исследования показали, что зависимость получения щепы с размерами менее 5, 5, 10 мм от частоты вращения рубительного диска ($n, 1/c$) показало, что она описывается регрессионным уравнением вида:

$$n = 11,39 + 0,06(0,мм) - 0,14(5,мм) + 0,15(10,мм.)$$

Рассмотрение коэффициентов выражения по t-критерию установило значимость на 5 % фактора размера щепы 10 мм.

10. Изучение закономерности образования фракций щепы (менее 5, 5, 10 мм) от частоты вращения рубительного диска ($n, 1/c$) показало, что с возрастанием частоты вращения рубительного диска с 13 до 20 $1/c$, в составе полученной щепы наблюдается малое содержание фракций менее 5, 5, 10 мм.

11. Установлено, что с возрастанием частоты вращения рубительного диска с 14 до 20 $1/c$, в составе полученной щепы наблюдается резкий рост содержания фракции 10 мм. Последующее увеличение частоты вращения, содержание фракции 10 мм, в общем объеме полученной щепы практически не изменяется. Поэтому наилучшее численное значение частоты вращения рубительного диска ($n, 1/c$) равно 20 $1/c$.

12. Проведенные полевые исследования определили производительность за 1 час работы машины в пределах 36,1 п.м³/ч. Применение разработанной конструкции машины для измельчения отходов лесозаготовок в условиях вырубок отвечает показателям эффективности, так как ее практическое использование повышает производительность рабочего процесса на 22,4%.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Проведенные исследования конструкции и режимов работы механизма выброса щепы позволяют сделать следующие выводы:

1. Для повышения эффективности рабочего процесса выброса щепы из дисковой рубительной машины необходимо совершенствование конструкции механизма выброса и щепопровода, обеспечивающих более полный объем удаления конечного продукта в виде топливной щепы из кожуха рубительной машины и улучшение ее характеристик.

2. Создана физико-математическая модель движения и выброса щепы в механизме выброса щепы из дисковой рубительной машины для измельчения порубочных остатков, позволяющая учесть влияние конструктивных параметров механизма на показатели эффективности выброса щепы.

3. В результате компьютерного эксперимента получены теоретические зависимости влияния конструктивных параметров нового механизма выброса щепы на показатели эффективности рабочего процесса. Двухфакторная оптимизация позволила получить оптимальную величину зазора между лопастями рубительного диска и боковой поверхностью цилиндрической части кожуха 9 – 11 мм, оптимальный диаметр щепопровода 230 – 300 мм. При этом скорость выброса щепы составит не менее 2,0 м/с, доля щепы, выброшенной с первого оборота рубительного диска, составит не менее 80 %, а затраты мощности на выброс не превысят 700 Вт.

4. Влияние технологических параметров разработанной машины на производительность рабочего процесса отражается выражением вида:

$$P = 7,64 + 1,83 n + 0,03 m + 11,85 v .$$

Исследованиями установлена значимость на 5 % параметров частоты вращения рубительного диска ($n, 1/c$) и количества отверстий в кожухе ($m, шт$). Результаты проведения экспериментов показали, что с возрастанием частоты вращения рубительного диска от 12 до 24 $1/c$ и изменением количества отверстий в кожухе со 120 до 180 шт. количество полученной щепы ($P, кг/мин$) изменяется с 66 до 83 кг/мин (на 25 % объема). Изменение частоты вращения рубительного диска с 12 до 24 $1/c$ и увеличение числа отверстий в кожухе со 180 до 240 шт. количество произведенной щепы возрастает с 83 до 86 кг/мин (3%). Данный показатель свидетельствует о правильности проведенных теоретических исследований и подтверждает тот факт, что количество отверстий в кожухе рубительной машины должно быть порядка 200 шт.

5. Влияние частоты вращения рубительного диска ($n, 1/c$) и скорости выброса из машины ($v, м/с$) на количество, произведенной щепы ($P, кг/мин$) показали, что она описывается регрессионным уравнением вида:

$$P = 14,06 + 1,83 n + 11,85 v .$$

Исследованиями установлена значимость на 5 % значения фракции щепы, равной 10 мм. Изучение закономерности образования фракций щепы (менее 5, 5, 10 мм) от частоты вращения рубительного диска ($n, 1/c$) показало, что с возрастанием частоты вращения рубительного диска с 13 до 20 $1/c$ в составе

полученной щепы наблюдается малое содержание фракций не более 5, 5, 10 мм. Установлено, что с возрастанием частоты вращения рубительного диска с 14 до 20 $^1/c$ в составе щепы наблюдается резкий рост фракции 10 мм. Последующее увеличение данного параметра не приводит к изменению в общем объеме продукции фракции 10 мм. Поэтому наилучшим значением частоты вращения рубительного диска ($n, ^1/c$) является величина, равная 20 $^1/c$.

6. Проведенные полевые исследования определили производительность за 1 час работы дисковой рубительной машины, оснащенной новым механизмом выброса щепы, в пределах 36,1 п.м³/ч. Применение разработанной конструкции машины для измельчения отходов лесозаготовок в условиях вырубок отвечает показателям эффективности, так как ее практическое использование повышает производительность рабочего процесса на 22,4%.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Андреев, А. А. Анализ технологических операций получения древесной щепы / А. А. Андреев, Н. А. Доспехова, В. С. Копарев. – Научный журнал КубГАУ, №81(07), 2012. – 1-16 с.
- 2 Анисимов, П.Н. Обоснование параметров конструкции и режима работы машины для заготовки щепы на лесосеке: автореферат дис. кандидата технических наук: 05.21.01 / П.Н. Анисимов// Поволж. гос. технол. ун-т. – Йошкар-Ола, 2017. – 18 с.
- 3 Астафуров, А.О. Управление замещением традиционной углеводородной энергетики эколого-ориентированной биоэнергетикой: автореферат дис. кандидата экономических наук: 08.00.05 – Экономика и управление народным хозяйством/ А.О. Астафуров// ФГБОУ ВПО «Государственный университет управления». – Москва, 2012. – 28 с.
- 4 Баклагин, В.Н. Обоснование технологических решений, повышающих эффективность производства щепы энергетического назначения на лесосеке: специальность 05.21.01 «Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / В.Н. Баклагин; Петрозаводский государственный университет. – Петрозаводск, 2011. – 181 с. – Текст : непосредственный.
- 5 Беленький, Ю.И. Совершенствование лесозаготовительного производства путем оптимизации технологических процессов на лесосеке: автореферат дис. доктора технических наук: 05.21.01 / Ю.И. Беленький // Сев. (Арктический) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова. – Архангельск, 2012. – 41 с.
- 6 Березников, С.В. Техничко-экономические показатели работы новой конструкции дисковой рубительной машины/ С.В. Березников, С.В. Фокин // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2014. – Т. 2. № 3-2 (8-2). – 270-272 с.
- 7 Бенин, А.А. Рациональное использование ресурсов на основе производственных комплексов по переработке твердых горючих отходов добывающих отраслей Северо-Западного региона: Специальность 05.02.22 «Организация производства»: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук /А.А. Бенин; Санкт-Петербургский государственный горный институт имени Г.В.Плеханова. – Санкт-Петербург, 2003 – 44 с. – Библиогр.: С. 37-44. – Текст : непосредственный.
- 8 Боровиков, В.П. Statistical искусство анализа данных на компьютере / В.П. Боровиков. – СПб.: Питер, 2001. – 656 с. – Текст : непосредственный.
- 9 Бурлаков, А.С. Об определении конструктивно-технологических параметров механизма подачи дисковой рубительной машины/ А.С. Бурлаков, С.В. Фокин // Современные проблемы науки и образования. – 2013. № 5. – 129 с.
- 10 Бекарева, Н. Д. Теория вероятностей: учебное пособие / Н. Д. Бекарева. – Новосибирск : НГТУ, 2017. – 176 с.

11 Булатасов, Э.О. Машины для измельчения кусковых отходов древесины/ Э.О. Булатасов, В.П. Попов, В.Г. Коротков, В.П. Ханин, С.В. Антимонов// Оренбургский государственный университет, г. Оренбург. 2014. С – 1156-1164. <http://elib.osu.ru/handle/123456789/652>

12 Беленький, Ю. И. Повышение энергетической и экономической эффективности лесозаготовительного производства: монография / Ю. И. Беленький, О. А. Куницкая. – Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2012. – 164 с.

13 Безруких, П. П. Справочник ресурсов возобновляемых источников энергии России и местных видов топлива. Показатели по территориям / П. П. Безруких. – Москва : Энергия, Институт энергетической стратегии, 2007. – 272 с. – ISBN 978-5-98420-016-5. – Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. – URL: <https://www.iprbookshop.ru/3686.html>

14 Вальщиков, Н.М. Рубительные машины: монография/ Н.М. Вальщиков, Э.П. Лицман // М.: Лесная промышленность. – 1980. – 96 с.

15 Васильев, С.Б. Обоснование технологии и оборудования производства щепы при неистощительном лесопользовании: 05.21.01 «Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства»: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / С. Б. Васильев; Петрозаводский государственный университет. – Петрозаводск, 2002. – 342 с. – Текст : непосредственный.

16 Васильев, С.Б. Влияние изменения длины баланса измельчаемого в дисковой рубительной машине на размеры частиц древесной щепы. – Научный журнал КубГАУ, №81(07), 2012. – 10-19 с.

17 Валькова, Т.А. Теоретическая механика: учебное пособие / Т. А. Валькова, О. И. Рабецкая, А. Е. Митяев [и др.]. – Красноярск : СФУ, 2019. – 272 с.

18 Вихарёв, С.Н. Рубительные машины. Теория. Конструкция. Расчет/ С.Н. Вихарёв, Е.Н. Степанова/ Уральский государственный лесотехнический университет». Екатеринбург. – 2015. – 38 с.

19 Гриднев, А. Н. Средства малой механизации в садово-парковом хозяйстве и ландшафтном строительстве: учебное пособие / А. Н. Гриднев, Н. В. Гриднева. – Уссурийск: Приморский ГАУ, 2013. – 134 с.

20 Глядяев, С.О. Повышение эффективности использования древесных отходов лесозаготовок путем производства из них топлива для газогенераторных установок/ Глядяев, С.О. // специальность 05.21.01. «Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства» автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Архангельск, 2009. – 20 с.

21 Германович, А.О. Моделирование работы рубильной машины на мобильном шасси / А.О. Германович // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. – 2014.– № 2.– 83-87 с.

22 Гомонай, М.В. Ресурсосберегающие технологии измельчения древесины на щепу в рубильных машинах с многолезцовыми и ножевыми рабочими органами / Гомонай М. В. // 05.21.01 - Технология и машины

лесозаготовок и лесного хозяйства автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. – Воронеж, 2003. – 413 с.

23 Гончаренко, Л.П. Применение инновационных технологий производства на предприятиях деревообрабатывающей промышленности России/ Л.П. Гончаренко, Т.А. Воронова, С.А.Сыбачин, Е.Р. Шарко // Теоретическая и прикладная экономика. – 2018. – № 3. – 70-87 с.

24 Гудков, А.Ю. Использование мобильных рубительных машин для производства биотоплива/ А.Ю. Гудков, В.Г. Свиридов, Н.Н. Полетаев//Материалы «АННИ XXI века» № 4 ч. 2 с. Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова. 2015. – 184-187 с.

25 ГОСТ 33103. 1 – 2014 (EN 14961-1:2010) Биотопливо твердое издание официальное утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 23 апреля 2015 г. № 289-ст: дата введения 2016-04-01/ разработан Федеральным государственным унитарным предприятием «Всероссийский научно-исследовательский центр стандартизации, информации и сертификации сырья, материалов и веществ» (ФГУП «ВНИЦСМВ»). – Москва : Стандартинформ, 2015. – 49 с. – Текст : непосредственный.

26 Добрачев, А.А., Ефимов Ю.В. Заготовка и рациональное использование топливной древесины: учебно-методическое пособие. УГЛТУ: Екатеринбург, 2019. – 45 с.

27 Доспехова, Н.А. Рациональное использование древесного сырья: некоторые новые технические и технологические решения / Н.А. Доспехова, М.И. Зайцева, Ю.В. Никонова // Современные научные исследования и инновации. – 2015. – № 1. [Текст: электронный] – URL: <http://web.snauka.ru/issues/2015/01/45494>.

28 Донская, С.А Оценка удара летящей щепы о неподвижную поверхность/ Э.М.Лаутнер, М.С.Сергеев, С.А.Донская, Б.К. Ильенко // Станки, №4, 1993. – 76-81с.

29 Древесное топливо – альтернатива традиционным источникам энергии// Научно-техническая информация в лесном хозяйстве. Выпуск № 5 Минск. 2008. – С.60. [Текст: электронный] – <https://studylib.ru/doc/2099297/drevesnoe-toplivo>

30 Зариковская, Н. В. Математическое моделирование систем : учебное пособие / Н. В. Зариковская. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2014. – 168 с.

31 Иванов, И. С. Развитие инновационных экотехнологий, базирующихся на использовании древесных отходов / И. С. Иванов // Экономика и управление : Российский научный журнал / гл. ред. В. А. Гневко. – 2009.– N12 (50). – С.64-69. [Текст: электронный] – <https://naukarus.com/razvitie-innovatsionnyh-ekotehnologiy-baziruyuschih-sya-na-ispolzovanii-drevesnyh-othodov>

32 Клоков, Д.В. Энергетическое использование древесной биомассы/ Д.В. Клоков. – Минск: БГТУ, 2014. – 97 с.

33 Кондратюк, Д.В. Технологические решения переработки лиственных короткомерных сортиментов/ Д.В.Кондратюк, Е.В. Кравцов// Лесной вестник. ГОУ ВПО МГУЛ. 2012. №8(91). – 38-40 с.

34 Комплексная программа «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности в Тюменской области» на 2010–2020 годы: Приложение к распоряжению Правительства Тюменской области от 13 мая 2013 г. № 709-рп. – 69 с.

35 Карпачев, С.П. Заготовка щепы на лесосеке с использованием мягких контейнеров/ С.П. Карпачев, Е.Н. Щербаков, Д.В. Шмырев // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2014. – Т. 2. – № 3-4 (8-4). – 217-222 с.

36 Комплексная программа развития биотехнологий в Российской Федерации на период до 2020 года. Утверждена Председателем Правительства РФ от 24.04.2012 г. № 1853п - П8.

37 Компьютерное моделирование. Физика: учебное пособие / З. А. Кононова, С. О. Алтухова, Г. А. Воробьев, Г. И. Белозерова. — Липецк : Липецкий ГПУ, [б. г.]. – Часть 1 – 2016. – 143 с.

38 Куницкая, О.А. Переработка низкотоварной древесины на технологическую щепу / О.А. Куницкая, Б.М. Локштанов, И.В. Григорьев // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2014. – Т. 2. № 3-2 (8-2). – 379-382с.

39 Кислицына С.Н. Способы переработки отходов деревообрабатывающей промышленности / С.Н. Кислицына, А.П. Самошин. – Пенза: ПГУАС, 2016. – 104 с.

40 Лесной план Тюменской области: издание официальное утвержден и введен в действие постановлением губернатора Тюменской области от 27.05.2019 № 69: действует с 27.05.2019 до 27.05.2029/ разработан Департаментом лесного комплекса Тюменской области. – Тюмень, 2019. – 540 с.

41 Лесной план Ханты-Мансийского автономного округа – Югры: издание официальное утвержден и введен в действие постановлением Ханты-Мансийского автономного округа – Югры от 25.01.2019 № 2: действует с 2019 – 2028 гг. / разработан Департаментом недропользования и природных ресурсов Ханты-Мансийского автономного округа – Югры. – Ханты-Мансийск, 2019. – 247с.

42 Лаутнер, Э. М. Основы теории получения технологической щепы и разработка нового поколения дисковых рубильных машин: автореферат дис. доктора технических наук: 05.21.03 / Э. М. Лаутнер // Санкт-Петербургский гос. технологич. ун-т растительных полимеров. - Санкт-Петербург, 1995. – 52 с.

43 Ледницкий, А.В. Сравнительный анализ систем машин для производства топливной щепы/ А.В. Ледницкий, // Лесной вестник Московского государственного университета леса. – 2013. –№ 1 (93). – 94-98 с.

44 Лой, В.Н. Влияние различных характеристик древесного сырья на энергонасыщенность рубильной машины/ В.Н. Лой, А.О. Германович // Труды

БГТУ Лесная и деревообрабатывающая промышленность. Лесопромышленный комплекс. Транспортно-технологические вопросы: научный журнал. – 2012. – № 2 – 21-24 с.

45 Локштанов, Б.М. Топливная щепка и ее свойства/ Б.М. Локштанов, И.В. Бачериков// Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика/ Издательство: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова. Воронеж. Том: 3. № 8. 2015. – 274-278с.

46 Лаутнер, Э.М. Оценка удара летящей щепки о неподвижную поверхность Э.М.Лаутнер, М.С.Сергеев, С.А.Донская, Б.К. Ильенко // Станки и инструменты деревообрабатывающих производств: Сб. научн. тр., вып. 10. Л.: ЛТА, 1993. – 76-81с.

47 Михайличенко, Т.А. Оценка возможности замены ископаемого топлива на пеллеты из древесных отходов (биотопливо) в условиях Кемеровской области/ Т.А.Михайличенко, С.Д. Алшынбаев // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2019. – № 3 (29). – 25-28 с.

48 Моисеев, Н. А. Экономика лесного хозяйства: учебное пособие / Н. А. Моисеев. – 2-е изд. – Москва : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – 399 с.

49 Мокрова, Н. В. Численные методы в инженерных расчетах : учебное пособие / Н. В. Мокрова, Л. Е. Суркова. – Саратов : Ай Пи Эр Медиа, 2018. – 91 с.

50 Мохирев, А. П. Современные технологии и машины лесного комплекса. Заготовка и переработка древесной биомассы: учебное пособие / А. П. Мохирев. – Красноярск: СибГУ им. академика М. Ф. Решетнёва, 2018. – 88 с.

51 Малюков, С. В. Анализ конструкций и режимов работы дисковых рубительных машин / С. В. Малюков, А. А. Аксенов, М. А. Малюкова // Лесотехнический журнал. – 2021. – Т. 11. – № 4 (44). – С. 139–149. – Библиогр.: с. 147–149 (14 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.4/12>

52 Мюллер, О.Д. Перспективы использования древесных отходов в муниципальной энергетике/ О.Д. Мюллер, В.И.Малыгин, В.Т.Харитоненко // Лесн. регион. 2011. № 6 (92). 20-21 с.

53 Маковкин, Г. А. Применение МКЭ к решению задач механики деформируемого твердого тела. Часть 1 : учебное пособие / Г. А. Маковкин, С. Ю. Лихачева. – Нижний Новгород : Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, ЭБС АСВ, 2012. – 71 с. – Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/16043.html>

54 Михайлов, К.Л. Организация сбора и переработки лесосечных отходов и дров на лесосеке/ К.Л. Михайлов, В.А. Гушин, А.М. Тараканов// [Текст электронный]: ИВУЗ. «Лесной журнал». 2016. № 6. С. – 98-109.

55 Мохов, С.П. Анализ конструктивных особенностей рубильных машин/ С.П. Мохов, А.О. Германович //Труды БГТУ. Лесная и деревообрабатывающая промышленность. 2011. № 2. с.40-44.

56 Невзорова Л.Г. Теоретическое исследование движения щепки в трубопроводе при боковом ее удалении из дисковой рубительной

машины/Л.Г.Невзорова, Э.М. Лаутнер// Лесной журнал, 1985, №2. – 54-59 с.

57 Никишов, В.Д. О качестве технологической щепы или оценка технологической щепы, или к вопросу оценки качества щепы по стандарту/ В.Д. Никишов, М.В. Гомонай // Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник. – 2001. – № 5. –130-133 с.

58 Орлов, В.В. Повышение эксплуатационных свойств топливной щепы из лесосечных отходов путем ее обезвоживания: автореферат дис. кандидата технических наук: 05.21.01 / С.-Петербург. гос. лесотехн. акад. им. С.М. Кирова. - Санкт-Петербург, 2016. – 19 с.

59 Орлов, В.В. Снижение влажности щепы из лесосечных отходов/ И.В. Бачериков, В.В.Орлов // Леса России в XXI веке. Материалы IX межд. научно-практич. интернет-конференции. СПбГЛГУ. Санкт-Петербург, 2012. – 87-89с.

60 Прикладная математическая статистика: учебное пособие / составители А. А. Мицель. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2016. – 113 с. – Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. – URL: <https://www.iprbookshop.ru/72166.html>

61 Полоус, Г. П. Основные элементы методики полевого опыта: учебное пособие / Г. П. Полоус, А. И. Войсковой. – Ставрополь: Ставропольский государственный аграрный университет, АГРУС, 2013. – 116 с.

62 Полежаев, К.В. Повышение эффективности производства щепы энергетического назначения мобильными машинами для территориально распределенных потребителей // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.21.01/К.В. Полежаев. – Петрозаводский государственный университет. Петрозаводск, 2009. – 165 с.

63 Полянская, О.А. Эффективность создания безотходного производства на предприятии производства пеллет/ О.А. Полянская, В.В. Беспалова // Журнал прикладных исследований. ООО «Университет дополнительного профессионального образования». – 2021. – № 3. – 46-51 с.

64 Патент 918102 (СССР) МКИ В L 11/02 Рубительная машина для измельчения целых деревьев: №3000243/29-15: заявл 04.11.80: опубл. 07.04.82/ Грошев В.С., Толпыго В.А., Степанов В.П. Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт целлюлозного машиностроения. – 3с. – Текст : непосредственный.

65 Патент 1207769 (СССР) МКИ В L 11/02 Рубительная машина: №3711193/29-15: заявл 13.01.84: опубл. 30.01.86/ Грошев В.С., Толпыго В.А., Туулас П.А., Балдин Н.Т., Васильев С.Б. Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт целлюлозного машиностроения. – 2 с. – Текст : непосредственный.

66 Патент 670438 (СССР) МКИ В 27 L 11/02 Рубительная машина для изготовления технологической щепы: № 2523925/29-15: заявл 05.07.77: опубл. 30.06.79./ Аликин Г.П. Центральный научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт механизации и энергетики лесной промышленности. – 2 с. – Текст : непосредственный.

67 Патент 1114554 (СССР) МКИ В 27 L 11/00 Щепопровод рубительной машины: №3593195/29-15: заявл. 18.05.83: опубл. 23.09.84/ Гомонай М.В., Смирнов Н.С., Гомонай В.В. Центральный научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт механизации и энергетики лесной промышленности – 3 с. – Текст : непосредственный.

68 Патент 449808 (СССР) МКИ В 27 L 11/02 Д 21 b 1/04. Рубительная машина: № 1812643/29-33: заявл 21.07.72: опубл. 15.11.74/ Гусаров А.А., Житков А.В., Калоев В.С. Всесоюзное научно-производственное объединение целлюлозно-бумажной промышленности. – 3 с. – Текст : непосредственный.

69 Патент 670438 (СССР) МКИ В 27 L 11/02 Рубительная машина для изготовления технологической щепы: № 2523925/29-15: заявл. 05.07.77: опубл. 30.06.79/ Аликин Г.П. Центральный научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт механизации и энергетики лесной промышленности. – 2 с. – Текст : непосредственный.

70 Патент 283085 (СССР) МПК В 27 L 11/00. Дробилка для щепы и древесных отходов: №1181584/29-33: заявл. 14.08.67: опубл. 28.09.70/ Дин Вильямс Шиилдс. Бейлот Корпорейшн. – 3 с.

71 Патент 2179922 (СССР) МКИ В 27 L 011/00. Рубительная машина для изготовления технологической щепы: №2000112992/13: заявл. 24.05.2000: опубл. 27.02.2002/ Мокрицкий Б.Я., Рубцов Ю.В., Соловьев В.А. Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет. – 3 с. – Текст : непосредственный.

72 Патент 1505604 (СССР) МКИ В 07 В 7/06, В 27 L 11/00. Щепопровод рубительной машины: №4353337/29-03: заявл 31.12.87: опубл. 07.09.89/ Матвейко А.П., Тимошенко А.В., Романовская Н.Л., Колодий П.В. Белорусский технологический институт им. С.М. Кирова. – 5 с. – Текст : непосредственный.

73 Патент 941184 (СССР) МКИ В 27 L 11/02. Рубительная машина: № 2588313/29-15: заявл. 13.03.78: опубл. 07.07.82/ Лаунтер Э.М. Ленинградская лесотехническая академия. – 2 с. – Текст : непосредственный.

74 Патент 163568, (RU) МПК В 27 L 11/00 Устройство для измельчения порубочных остатков: №2015138892/13: заявл. 14.09.2015; опубл. 27.07.2016/ Фокин С.В., Рыбалкин Д.А. ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ». – 5 с. – Текст : непосредственный.

75 Рябов, В. А. Принципы статистической физики и численное моделирование: учебное пособие / В. А. Рябов. – Долгопрудный : Издательский Дом «Интеллект», 2014. – 135 с.

76 Резанов, В.К. Исследование условий эффективного использования древесных отходов для выработки тепловой энергии/ В.К. Резанов, А.Ю. Грушина // Власть и управление на Востоке России. 2013. № 3 (64). – 55-62 с.

77 Рубцов, Ю.В. Технология переработки низкокачественной древесины на щепу рубительными машинами в США и России / Ю.В. Рубцов, Г.В. Коннова, С.В. Рудько // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2011. – Т. 1. – № 8. – 108-114 с.

78 Рукомойников, К.П. Развитие инфраструктуры поквартального освоения участков лесного фонда / К.П. Рукомойников // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2008. – № 2. – 7с.

79 Солохин, Н. Н. Аналитическая геометрия: учебное пособие / Н. Н. Солохин. – Ростов-на-Дону: Донской ГТУ, 2017. – 160 с. – ISBN 978-5-7890-1206-2. – Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/238136>

80 Сергеевичев, В. В. Механизмы и детали оборудования и машин в технологии лесозаготовок и лесного хозяйства: учебное пособие / В. В. Сергеевичев, А. С. Кривоногова. – Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2017. – 48 с.

81 Сафин, Р. Г. Актуальные проблемы технологических процессов лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств: учебное пособие / Р. Г. Сафин, В. Г. Иванова. – Казань : КНИТУ, 2016. – 408 с.

82 Статистическая обработка экспериментальных данных. Регрессионный анализ в языке R : учебное пособие / В. Ю. Потапова, А. С. Тарасов, Е. С. Геращенко, М. Б. Никифоров. – Рязань : РГРТУ, 2018. – 52 с. – ISBN 978-5-6041320-7-4. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/168238>

83 Саввин, Е.В. О проблемах измельчения порубочных остатков на лесосеке / Е. В. Саввин, С. В. Фокин // Лесотехнический журнал. – 2011. – № 2. – 30-31с.

84 Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2020660063: Программа для моделирования механизма выброса щепы из дисковой рубительной машины: № 2020615028: заявл. 20.05.2020; зарег.: 27.08.2020/ С.В. Фокин, О.А. Фомина; заявитель Саратовский ГАУ. – Текст : непосредственный.

85 Стратегия развития лесного комплекса Российской Федерации на период до 2030 года: издание официальное утверждено и введен в действие распоряжением правительства РФ от 11.02.2021 г. № 312-р). - [Текст: электронный]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573658653>

86 Санников, А.А. Надежность машин. Трибология и триботехника в оборудовании лесного комплекса: Учебное пособие /А.А. Санников, Н.В. Куцубина, А.М. Витвинин. Урал.гос. лесотехн. ун-т.: УГЛТУ. – Екатеринбург, 2006. – 145 с.

87 Санников, А.А. Вибрация и шум технологических машин и оборудования отраслей лесного комплекса: монография / А.А. Санников и др.; под ред. А.А. Санникова; Урал. гос. лесотехн. ун-т.: УГЛТУ. – Екатеринбург, 2006. – 484 с.

88 Симонова, И.В. Теоретическое исследование процесса взаимодействия древесного сырья с рабочим органом дисковой рубительной машины/ И.В. Симонова, С.Б. Васильев // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Серия: Естественные и технические науки. – 2009. – № 99.– 102-106 с.

89 Системы машин для производства топливной щепы из древесной биомассы по технологии заготовки деревьями/ Суханов Ю.В., Селиверстов А.А., Сюнев В.С., Герасимов Ю.Ю. // Тракторы и сельхозмашины. – 2012. – № 1. – 7-13 с.

90 Соколов, С.Н. Оценка лесных ресурсов Ханты-Мансийского автономного округа – Югры/ С.Н. Соколов // Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии. 2018. – Т. 27, № 3. – 25-31с.

91 Судачкова, Н.Е. Белки и свободные аминокислоты в древесине Сосны обыкновенной, Лиственницы сибирской и Лиственницы гмелина в Центральной Сибири/ Н.Е.Судачкова, И.Л.Милютин, Г.П. Семенова// Химия растительного сырья. 2000. - №1. – 69-76 с.

92 Сюнев, В. С. Лесосечные машины в фокусе биоэнергетики: конструкции, проектирование, расчет: Учеб. пособие / В. С. Сюнев, А.А. Селиверстов, Ю. Ю. Герасимов, А. П. Соколов. - Йоэнсуу: НИИ леса Финляндии METLA, 2011. – 143 с.

93 Симонова, И.В. Экспериментальная оценка влияния формы поверхности диска и ножей рубительной машины на качество фракционного состава щепы/ Труды лесоинженерного факультета ПетрГУ. – 2008. – 106-108 с.

94 Симонова, И.В. Обоснование геометрических параметров формы рабочей поверхности диска и ножей рубительной машины: диссертация кандидата технических наук: 05.21.01 /Петрозавод. гос. ун-т. - Петрозаводск, 2007. – 117 с.

95 Сиваков, В.В. К вопросу о совершенствовании рубительных машин / В.В.Сиваков, Лупорева И.А.// Актуальные проблемы лесного комплекса. Изд.: Брянская государственная инженерно-технологическая академия. Брянск. №40. – 2014. – 124-126 с.

96 Справочно-нормативные лесотаксационные таблицы / сост. И.В. Толкач, О.А. Севко. – Мн. : БГТУ, 2005. – 36 с.

97 Тихонов, И.И. Заготовка и переработка низкотоварной древесины на щепу в условиях лесосеки / И.И. Тихонов, И.В. Григорьев, А.И. Никифорова // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2014. – Т. 2. № 5-4. – 337-341 с.

98 Турлов, А.Г. Лесоводственно-экологические особенности березовых лесов лесостепного Зауралья и обоснование способов их обновления и переформирования : специальность 06.03.03 «Агроресомелиорация и защитное лесоразведение, озеленение населенных пунктов, лесные пожары и борьба с ними»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата сельскохозяйственных наук /А.Г. Турлов; Урал. государственный лесотехнический университет. – Екатеринбург, 2005. - 22 с. – Текст : непосредственный.

99 Технологическое оборудование ЦБП [Электронный ресурс] : учебное пособие : самост. учеб. электрон. изд. / Т. П. Щербакова, Н. Ф. Пестова ; Сыкт. лесн. ин-т. – Электрон. дан. – Сыктывкар: СЛИ, 2013. – Режим доступа: <http://lib.sfi.komi.com>

100 Тюрикова, Т.В. Совершенствование технологий торрефикации и гранулирования фракционированной древесины: специальность 05.21.05 «Древесиноведение, технология и оборудование деревопереработки»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук/ Т.В. Тюрикова; Сев. (Арктический) федеральный университет. – Архангельск, 2015. – 142 с. – Текст : непосредственный.

101 Фокичева, Е. А. Планирование эксперимента и обработка результатов исследований: учебное пособие / Е. А. Фокичева, М. И. Алексеев. – Вологда: ВоГУ, 2014. – 72 с.

102 Федоренчик, А.С. Технология и оборудование комплексного использования древесины/ А.С.Федоренчик, С.П. Мохов, Д.В. Клоков// Мн.: БГТУ, 2003. – 132 с., табл. 50, ил. 19.

103 Фетяев, А.Н. Об использовании отходов лесосечных работ / А.Н. Фетяев // Проблемы природоохранной организации ландшафтов: материалы межд. науч.-практ. конф., / Ред. кол.: Н. А. Иванова (отв.ред.) и др.; НИМИ ДГАУ. – Новочеркасск: Лик, 2015. – 255- 260 с.

104 Фокин, С.В. Совершенствование технологического оборудования для заготовки энергетической древесины при расчистке вырубок: специальность 05.21.01. «Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства»: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук/ С.В. Фокин; Саратовский гос. аграрный университет им. Н.И. Вавилова. – Саратов, 2013. – 38 с.

105 Фокин, С.В. Об иммитационной модели процесса измельчения порубочных остатков / А.Н. Фетяев, С.В. Фокин // Научно-технический вестник Поволжья, В.2/ издательство «Научно-технический вестник Поволжья». Казань, 2012. – 291-295 с.

106 Фокин, С.В. О применении метода конечных элементов при проектировании рабочих элементов рубительных машин / С.В.Фокин, О.А.Фомина // Научная жизнь , 2017, № 12.- С.66-68.

107 Фомина, О.А. Обоснование параметров механизма выброса рубительной машины для производства энергетической древесины на вырубках: специальность 05.21.01. «Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / О.А. Фомина; Саратовский гос. аграрный университет им. Н.И. Вавилова. – Воронеж, 2022. – 163 с.

108 Фомина, О.А. Проблемы и возможности развития деревообрабатывающей промышленности юга Тюменской области / О.А. Фомина, Т.Р. Сайтмуродов // в сборнике материалов международной студенческой научно-практической конференции «Актуальные вопросы науки и хозяйства: новые вызовы и решения», Тюмень, 2017. – 186-188 с.

109 Фокин, С.В. Об иммитационной модели процесса измельчения порубочных остатков / А.Н. Фетяев, С.В. Фокин // Научно-технический вестник Поволжья, В.2/ издательство «Научно-технический вестник Поволжья». – Казань, 2012. – 291-295 с.

110 Фокин, С.В. Способы транспортирования щепы из рубительных машин / С.В.Фокин, О.А.Фомина // Научная жизнь. – 2018, №2. – 10-15 с.

111 Фокин, С.В. Об основных видах энергетической древесины /С.В.Фокин, О.А.Фомина // «Forest engineering»: в сборнике материалов научно-практической конференции с международным участием. Якутск, 2018. – 273-277 с.

112 Фокин, С.В. Перспективы развития переработки низкокачественной древесины и отходов лесозаготовок на вырубках лесостепной зоны Западной Сибири /С.В.Фокин, О.А.Фомина // в сборнике материалов XVII международной научно-практической конференции «Современные тенденции сельскохозяйственного производства в мировой экономике». Кемерово, 2018 . – 281-286 с.

113 Фокин, С.В. Современное состояние лесного и лесоперерабатывающего комплекса Западной Сибири Современные научно-практические решения в АПК/ С.В.Фокин, О.А.Фомина //в сборнике материалов II всероссийской научно-практической конференции. Тюмень, 2018. – 149-152 с.

114 Фокин, С.В. Об использовании математических методов моделирования рубительных машин /С.В.Фокин, О.А.Фомина // в сборнике материалов 17-ой Международной молодежной научно-практической конференции «Фундаментальные исследования, методы и алгоритмы прикладной математики в технике, медицине и экономике». Новочеркасск, 2018. – 158-159 с.

115 Фомина, О.А. Техника и технологии лесозаготовок России: исторические факты / С.М. Мешалкин, О.А. Фомина //в сборнике материалов международной студенческой научно-практической конференции «Актуальные вопросы науки и хозяйства: новые вызовы и решения». Тюмень, 2019. – 584-589 с.

116 Фомина, О.А. Структура собственности на лесной фонд между странами: Россия, Швеция, Финляндия / М.К. Вахрушева, О.А. Фомина //в сборнике материалов международной студенческой научно-практической конференции «Актуальные вопросы науки и хозяйства: новые вызовы и решения». Тюмень, 2019. – 590-595 с.

117 Фомина, О.А. Лиственные породы юга Тюменской области: основные пороки, хозяйственная деятельность и способы повышения выхода из них деловой древесины /Д.А. Кашин, О.А.Фомина // в сборнике материалов международной студенческой научно-практической конференции «Актуальные вопросы науки и хозяйства: новые вызовы и решения». Тюмень, 2019. – 596-601 с.

118 Фокин, С.В. О постановке задач теоретического исследования рабочего процесса выброса щепы из дисковой рубительной машины /С.В. Фокин, О.А.Фомина //Центральный научный вестник, №11 (76), 2019. – 18 с.

119 Фокин, С.В. Анализ исследований вентиляционной способности и процесса механического выбрасывания щепы из кожуха дисковой рубительной машины / С.В. Фокин, О.А. Фомина // в сборнике материалов трудов II Международной научно-практической студенческой конференции-конкурса «Современные проблемы и перспективы развития агропромышленного комплекса». 2019. – 94-97 с.

120 Фокин, С.В. О конструктивных усовершенствованиях механизма выброса щепы из дисковых рубительных машин / С.В. Фокин, О.А. Фомина // В сборнике материалов трудов Всероссийской научно-практической конференции «Сквозные технологии промышленных производств и экономическая безопасность». Петрозаводск, 2019. – 42-43 с.

121 Фокин, С.В. О важности развития биоэнергетики в связи с необходимостью применения для производственных и коммунальных целей возобновляемых природных ресурсов / С.В. Фокин, О.А. Фомина // Мир Инноваций. Тюмень, № 4, 2019. – 23-27 с.

122 Фокин, С.В. К вопросу производства энергетической древесины дисковыми рубительными машинами с различными способами выброса щепы / С.В. Фокин, О.А. Фомина // «Лесной вестник / Forestry Bulletin», 2020. – т. 24, № 2. – 68-73 с.

123 Фокин, С.В. О конструктивных особенностях дисковой рубительной машины для измельчения порубочных остатков / С.В. Фокин, О.А. Фомина // В сборнике материалов VII Международной научно-практической конференции «Инновации в природообустройстве и защите в чрезвычайных ситуациях». Саратов, 2020. – 390-392 с.

124 Фомина О.А. Анализ теплотворной способности различных видов топлива и способы ее повышения / О.А. Фомина // В сборнике материалов студенческой научно-практической конференции «Актуальные вопросы науки и хозяйства: новые вызовы и решения». Тюмень, 2020. – 169-179 с.

125 Фокин, С.В. К обоснованию конструктивно- технологических параметров механизма выброса щепы из дисковой рубительной машины / С.В. Фокин, О.А. Фомина // «Лесной вестник / Forestry Bulletin». 2021, т. 25, № 2. – 99-107 с.

126 Фокин, С.В. Совершенствование технических средств переработки отходов лесосечных работ на топливную щепу в условиях вырубки: монография / С.В. Фокин. – М.: ИНФА-М, 2018. – 187 с.

127 Цыгарова, М. В. Комплексное использование древесины [Текст]: метод. указания / М.В. Цыгарова. – Ухта: УГТУ, 2006. – 50 с.

128 Чижов, Б.Е. Особенности семенного возобновления берез повислой *Betula verrucosa* Ehrh. и пушистой *Betula pubescens* Ehrh. в условиях подтайги и лесостепи Западной Сибири / Б.Е. Чижов, Р.И. Иванова, В.А. Штоль, О.А. Кулясова // Сибирский лесной журнал. 2016. № 6. – 49-59 с.

129 Чепурненко, А. С. Метод конечных элементов в механике деформируемого твердого тела и строительной механике: учебное пособие / А. С. Чепурненко, Б. М. Языев. – Ростов-на-Дону: Донской ГТУ, 2021. – 93 с.

130 Шклярова, Е. И. Обработка результатов многократных измерений. Критерии исключения грубых погрешностей: методические рекомендации / Е.И.Шклярова. – Москва: Московская государственная академия водного транспорта, 2011. – 17 с.

131 Шегельман, И.Р. Функционально-технологический анализ: метод формирования инновационных решений для лесной промышленности // И.Р. Шегельман. – Петрозаводск, 2012. – 97 с.

132 Щурин, К. В. Методика и практика планирования и организации эксперимента: практикум/ К.В. Щурин, Д.А.Косых; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2012 – 185 с.

133 Экономическая эффективность технических решений: учебное пособие / С. Г. Баранчикова, Т. Е. Дашкова, И. В. Ершова [и др.]; под редакцией И. В. Ершова. – Екатеринбург : Уральский федеральный университет, ЭБС АСВ, 2016. – 140 с.

134 Abdallah R., S. Auchet, P. Meausoone Experimental study about the effects of disc chipper settings on the distribution of wood chip size Biomass Bioenergy, 35 (2011), pp. 843-852.

135 Baker S.A. Fuels characteristics of woods-run whole tree southern pine chips / S.A. Baker, W.D.Greene, A.Wilson // Biomass and Bioenergy 37, 2012.- pp. 67-72.

136 Baroth R. Literature review of the latest development of wood debarking/ R Baroth– University of Oulu, Control Engineering Laboratory, 2005. – 29 p.

137 Dahl O. Effect of raw wood supply system on the wood paying capability of a kraft pulp mill using Scots pine/ O.Dahl,P. Jylhä, J.Laitila, K.Kärhä //Finbio, Julkaisu. 2005. 44.- pp 371–379.

138 Esteban B. Environmental assessment of small-scale production of wood chips as a fuel for residential heating boilers /B.Esteban, J. R.Riba, G.Baquero, R.Puig, A .Rius // Renewable Energy. – 2014. T. 62,- pp. 106-115.

139 Eisele E. L. UmweltfreundlicheForstmaschinen/ / E. L. Eisele // Allgemeine Forestzeitschrift. – 1994. – №. 4. – pp. 59–62.

140 Fomina O. On technical means of obtaining wood chips, as a way to increase soil fertility / S. Fokin , D. Eskov, P. Medvedeva, O. Shportko, O. Fomina // 2021 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 723 042025

141 Hammond H. Ecosystem-based planning : principles & process / H. Hammond // The Silva Forest Foundation. – 2002. – January.- pp. 14-16

142 Hafner J. Atomic-Scale Computation Materials Science / J.Hafner // Acta Mater. – 2000. – Vol. 48. – pp. 71-92.

143 Hernandez R. Effect of the rotation speed on the size distribution of black spruce pulp chips produced by chipper-canter / R. Hernandez, B. Jacques // For Prod , J, 47 (4) (1997).-pp. 43-49

144 Hellström L.M. On the wood chipping process – a study on basic mechanisms in order to optimize chip properties for pulping // Thesis for the degree of Doctor of Technology, Sundsvall.- pp.21 -23

145 Isokangas A. Analysis and management of wood room / A.Isokangas // University of Oulu, Oulu 2010. - 115 pp. <http://jultika.oulu.fi/Record/isbn978-951-42-6261-6>

146 Kahata M. Logging in Finland Conditions and Methods/M. Kahata //Forest machine news. – 1995. – 10 p.

147 Kärhä K.Integrated procurement of pulpwood and energy wood from early thinnings using whole-tree bundling / K.Kärhä, P.Jylhä, J.Laitila // Biomass and Bioenergy. – 2011. – T. 35. – №. 8. – pp. 3389-3396.

148 Kuptz, D., Schreiber, K., Schulmeyer, F., Nelles, M., Hartmann, H. Evaluation of combined screening and drying steps for the improvement of the fuel quality of forest residue wood chips—results from six case studies Biomass Conversion and Biorefinery 9(1), 2019. pp. 83-98.

149 Lusth H.A theoretical model for the prediction of energy consumption during the chipper canter process /H.Lusth, P.Gradin, L.Hellström //- Nordic Pulp & Paper Research Journal, 28(2)-pp.211-215.

150. Premoze S. Particle Based Simulation of Fluids/ S.Premoze, T.Tasdizen, J.Bigler et al. // Eurographics, 2003. – Vol. 22. – N 3. – pp. 103–113.

151 Reczulski M. Analysis of the construction and operation of system wood chipping and transfer chips / M. Reczulski // Wood Research 60(4) 2015. - pp. 671-678.

152 Reczulski M. The system wood chipping in disc chipper / M. Reczulski // Problems of uniformity of chips length Wood Research 61(3), 2016. - pp. 433-442.

153 Spinelli, R., Cavallo, E., Facello, A. A new comminution device for high-quality chip production Fuel Processing Technology 99, 2012. pp. 69-74.

154 Spinelli R, N. Magagnotti The effect of raw material, cut length and chip discharge on the performance of an industrial chipper For. Prod. J., 62 (2013), pp. 584-589.

155 Spinelli, R., Eliasson, L., Magagnotti, N. Increasing wood fuel processing efficiency by fine-tuning chipper settings Fuel Processing Technology 151, 2016. pp. 126-130.

156 Schön, C., Kuptz, D., Mack, R., Loewen, A., Hartmann, H. Influence of wood chip quality on emission behaviour in small-scale wood chip boilers Biomass Conversion and Biorefinery 9(1), 2019. pp. 71-82.

Размещается в сети Internet на сайте ФГБОУ ВО ГАУ Северного Зауралья
<https://www.gausz.ru/nauka/setevye-izdaniya/2023/fomina-fokin.pdf>,
в научной электронной библиотеке eLIBRARY, ИТАР-ТАСС, РГБ,
доступ свободный

Издательство электронного ресурса
Редакционно-издательский отдел ФГБОУ ВО ГАУ Северного Зауралья.
Заказ № 1195 от 08.12.2023; авторская редакция.
Почтовый адрес: 625003, Тюменская область, г. Тюмень, ул. Республики, 7.
Тел.: 8 (3452) 290-111, e-mail: rio2121@bk.ru

ISBN 978-5-98346-152-9



9 785983 461529