

На правах рукописи

**Палкин Евгений Владимирович**

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ОКОРКИ  
С ЦЕПОВЫМИ РАБОЧИМИ ОРГАНАМИ**

05.21.01 – Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Екатеринбург 2022 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва» (ФГБОУ ВО СибГУ им. М.Ф. Решетнёва)

Научный  
руководитель

**Курицын Виктор Николаевич**  
кандидат технических наук, профессор

Официальные  
оппоненты

**Бирман Алексей Романович**  
доктор технических наук, профессор кафедры технологии лесозаготовительных производств, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова»

**Васильев Алексей Сергеевич**  
кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и организации лесного комплекса, ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет»

Ведущая  
организация

ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет»

Защита диссертации состоится 23 июня 2022 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.281.02 при ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» по адресу: 620100, г. Екатеринбург, ул. Сибирский тракт, 37, к. 401.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» <http://www.usfeu.ru>.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета,  
доктор технических наук, профессор

Шишкина Елена Евгеньевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Создание новых технических и технологических инноваций в сфере лесопромышленного производства является весьма актуальной задачей. Инновации, в первую очередь, должны быть направлены на оптимизацию процессов заготовки, обработки и глубокой переработки древесины в направлениях рационального использования древесного сырья, расширения ассортимента выпускаемой продукции, повышения её качества, а также повышения энергетической эффективности операций и технологических цепочек в целом. Одним из важнейших требований комплексной переработки древесины является обязательное использование окорки древесного сырья. Окорке должны подлежать все сортименты, кроме дров. Существующие окорочные станки предназначены для обработки древесных стволов, близких к правильной геометрической форме. Однако тенденции развития отрасли показывают, что доля таких стволов постепенно снижается, а доля тонкомерной древесины и горбыля в общем объеме лесопромышленного производства увеличивается. Большая часть этой древесины остается в отходах, что не способствует комплексной переработке и является препятствием развития лесной отрасли. Перспективной технологией обработки таких лесоматериалов является цеповая ударная окорка. В отечественных технологиях очистки древесины от коры отсутствует подобное оборудование. Окорка тонкомерной древесины и горбыля позволит вовлечь дополнительно в производство до 30 % объема заготавливаемой деловой древесины.

Таким образом, работы, направленные на создание технологий окорки горбыля и тонкомерных круглых лесоматериалов, позволяют решить важные технические, технологические, экологические проблемы и являются актуальными.

**Степень разработанности темы исследования.** Проблемами повышения эффективности окорочных технологий в разное время занимались такие ученые как Бойков С.П., Васильев С.Б. Газизов А.М., Гаспарян Г.Д., Григорьев И.В., Васильев А.С., Гумерова О.М., Пятякин В.И., Побединский В.В., Пигильдин Н.Ф., Куницкая О.А., Симонов М.Н., Югов В.Г. и другие.

Выполненные исследования позволили разработать, усовершенствовать различные способы и технические средства окорки лесоматериалов различного физического состояния.

Однако, вопросы описания перспективной технологии ударной цеповой окорки горбыля и тонкомерных круглых лесоматериалов в теоретических исследованиях не изучены и почти отсутствуют, на практике внедрение подобного оборудования отсутствует. Исследование цеповой окорки стимулирует создание инновационных многофункциональных лесозаготовительных комплексов.

**Цель работы.** Создание технологии окорки на основе оборудования с цеповыми рабочими органами для обработки горбыля и тонкомерных круглых лесоматериалов.

**Объект исследований.** Технологии окорки горбыля и тонкомерных круглых лесоматериалов.

**Предмет исследований.** Технологические, энергетические и конструктивные параметры окорки горбыля и тонкомерных круглых лесоматериалов цеповыми рабочими органами.

Для реализации поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать математические модели взаимодействия цепов и обрабатываемой поверхности для расчета технологических, конструктивных и энергетических параметров процесса цеповой окорки, предложить технические решения, позволяющие выполнять цеповую окорку горбыля и тонкомерных круглых лесоматериалов;

2. Разработать методику экспериментальных исследований и изготовить экспериментальную установку для цеповой окорки с целью исследования энергетических, технологических и конструктивных параметров;

3. На основе анализа результатов экспериментальных исследований определить рациональную скорость подачи при минимальных энергетических затратах и высоком качестве очистки лесоматериалов от коры;

4. Для обеспечения внедрения результатов исследований в практику разработать рекомендации для проектирования оборудования цеповой окорки горбыля и тонкомерных круглых лесоматериалов, дать сравнительный анализ энергозатрат цеповой окорки с другими технологиями и выполнить оценку экономического эффекта от использования результатов в производстве.

**Научной новизной обладают:**

1. Математические модели, описывающие механику процесса взаимодействия цепов и окоряемой поверхности, позволяющие определять режимы окорки с минимальными энергетическими затратами и высоким качеством обработки, которые вносят вклад в развитие теории механической окорки лесоматериалов.

2. Методика геометрического моделирования области контактного взаимодействия цепов с лесоматериалом в процессе окорки.

3. Регрессионные зависимости удельных затрат цеповой окорки от режимных параметров.

4. Новые экспериментальные данные о характере зависимости удельной работы цеповой окорки от режимных параметров и породы лесоматериалов.

**Теоретическая значимость работы** состоит в разработке математических моделей цеповой окорки лесоматериалов, представляющих основы теории расчетов цеповых окорочных технологий. Предлагаемые обоснованные конструктивные схемы окорочного оборудования с цеповыми рабочими органами и технические решения способствуют развитию отечественного лесного станкостроения. Результаты научных исследований предназначены для использования при проектировании и создании окорочного оборудования с цеповыми рабочими органами.

**Практическое значение** имеют:

Полученные в процессе исследований математические модели процесса цеповой окорки позволяют рассчитывать технологические, энергетические параметры режимов обработки лесоматериалов. Реализация полученных результатов в виде окорочного оборудования позволит дополнительно вовлечь в производство пиломатериалов, щепы, древесного угля и топливных гранул до 30% отходов древесины. Экспериментальная установка для цеповой окорки горбыльных лесоматериалов может использоваться в качестве прототипа для разработки технического задания серийного образца окорочного станка.

**Методология и методы исследования.** При проведении теоретических и экспериментальных исследований использованы основные законы механики, дифференциальное и интегральное исчисления, теория подобия и физического моделирования, методы математического анализа и статистики, методы натурального эксперимента.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Математические модели, позволяющие оценивать с учетом режимных, конструктивных параметров, характеристик лесоматериалов интегральный параметр процесса - удельную работу окорки лесоматериалов, при которой будут минимизированы потери энергии без снижения качества обработки.

2. Технические решения создания оборудования, позволяющего выполнять цеповую окорку и повысить эффективность лесообрабатывающего производства за счет снижения энергоемкости процесса и повышения объемов производства.

3. Методика, исследовательская установка и результаты экспериментальных исследований по определению энергетических параметров цеповой окорки ели и пихты при различных режимах работы.

4. Результаты анализа зависимости удельной работы от технологических параметров, полученные на основе математической и экспериментальной моделей.

**Степень достоверности и апробация результатов** обеспечивается обращением к известным экспериментальным данным, применением обоснованных современных методов исследования, непротиворечивостью с известными подобными исследованиями, проведением экспериментальных исследований процесса цеповой окорки и подтверждением адекватности полученных моделей сходимостью экспериментальных и теоретических данных.

**Апробация работы.** Результаты проведенных исследований докладывались, обсуждались и получили одобрение на Всероссийской научно-практической конференции «Химико-лесной комплекс - проблемы и решения» (СибГТУ, 2001, 2002, 2003, 2005), на Всероссийской научно-практической конференции «Лесной и химический комплексы - проблемы и решения» (СибГТУ, 2004, 2010), на Всероссийской научно-практической конференции студентов и молодых ученых «Молодые ученые в решении актуальных проблем науки» (СибГТУ, 2008), на Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Машиностроение: новые концепции и технологии» (СибГУ, 2019), на Всероссийской научно-

практической конференции «Лесозаготовка и комплексное использование древесины» (СибГУ, 2021), на семинарах кафедры технологии и оборудования лесозаготовок СибГТУ.

**Публикации.** По результатам диссертационных исследований автором опубликовано 13 работ, в том числе 2 статьи в изданиях рекомендованных ВАК.

**Личное участие соискателя в получении результатов, изложенных в диссертации** выражается в разработке методики исследования, составлении математических моделей, проведении экспериментальных исследований и обработке полученных данных, формулировании теоретических положений, практических рекомендаций и выводов.

**Объём и структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех разделов, общих выводов и рекомендаций, библиографического списка из 111 наименований и 7 приложений. Диссертация изложена на 180 страницах и содержит 73 рисунка и 32 таблицы.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, определены цель и задачи исследований, отмечена научная новизна и практическая ценность работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** рассмотрены: основные свойства древесной коры; виды, способы и технические средства окорки; проведен обзор литературных данных оборудования с цепными рабочими органами. Опубликованные показатели весьма расплывчаты. Теория цеповой ударной окорки не разработана. Существующее зарубежное оборудование предназначено для окорки круглых лесоматериалов, а для обработки горбыля отсутствует. Аналогичное отечественное оборудование отсутствует. Для оценки возможностей цеповой окорки необходимо изучить основные показатели процесса. Для этого следует провести теоретические и экспериментальные исследования. В связи с этим были сформулированы цель и основные задачи исследования.

**Во второй главе** даётся математическое описание процесса взаимодействия цепового рабочего органа (далее ЦРО) с древесной корой. Для обеспечения рабочих условий цеповой окорки (полное снятие коры при минимальном повреждении древесины) необходимо придать определенную скорость вращения приводному валу (барабану) с закрепленными на нем цепями. Окончив набор скорости вращения, цепи радиально выстраиваются в рабочее состояние. Условие приведения цепов в работоспособное состояние:

$$m \cdot \omega^2 \sum_{i=1}^{i=n} R_i > m \cdot n \cdot g, \quad (1)$$

где  $m$  - масса звена вращающегося цепы,  $\omega$  - угловая скорость вращения звена,  $R$  - радиус вращения звена цепы;  $n$  - число звеньев цепы;  $g$  - ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Минимальная угловая скорость, при которой ЦРО примет рабочее положение:

$$w \geq \sqrt{\frac{n \cdot g}{\sum R_i}}. \quad (2)$$

Кинематическое соотношение между скоростью подачи и скоростью окорки выражается зависимостью

$$\frac{U}{V} = \frac{e}{t_p}, \quad (3)$$

где  $U$  – скорость подачи,  $e$  – расстояние между двумя соседними ударами цепи (предлагаем в дальнейшем называть эту величину новым термином - подачей на один удар),  $V$  – линейная скорость цепи,  $t_p$  - шаг между рядами цепов.

При цеповой окорке кора разрушается в результате воздействия на нее в нормальном направлении ударной силы. Определяющим в этом случае является предел прочности коры на сжатие поперек волокон. Одной из главных характеристик процесса цеповой окорки является интегральный показатель - удельная работа окорки  $k$ , которая является частным от деления работы окорки  $A$  на объем снятой коры  $G$ , т.е.

$$k = \frac{A}{G} = \frac{N \cdot T}{G}, \quad (4)$$

где  $N$  – мощность, затрачиваемая на окорку;  $T$  – время, в течение которого проходил процесс. Размерность удельной работы окорки Дж/м<sup>3</sup>.

При рассмотрении схемы взаимодействия цепов с корой были сделаны следующие допущения: рассматривается случай продольной окорки лесоматериалов, движущихся в направлении, перпендикулярном оси окорочного вала; цеп представлен в виде набора точечных масс звеньев с шарнирной связью между ними; поверхность взаимодействия плоская.

Рассмотрим схему взаимодействия, когда движения подачи нет (рисунок 1). Цеп, вращаясь с  $\omega$  на расстоянии от центра вала до поверхности лесоматериала  $h$  подходит к обрабатываемой поверхности, и первое звено касается её с линейной скоростью  $V$ .

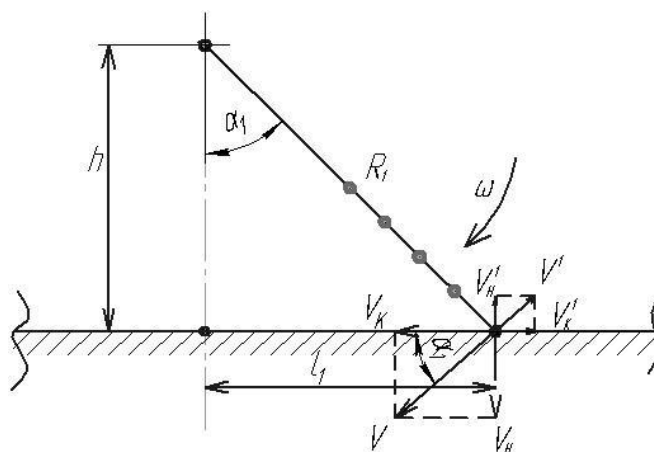


Рисунок 1 – Момент касания поверхности первым звеном

Происходит косо́й удар под углом  $\alpha_1$  к поверхности. Если бы масса первого звена  $m$  не находилась под действием центробежной силы и звено не было бы связано с остальными звеньями, то, согласно теории удара, произошел бы обыкновенный отскок (рикошет). Угол отскока не равен углу падения и определяется величиной коэффициента мгновенного трения, который зависит от состояния шероховатости поверхности и находится экспериментальным путем. При абсолютно гладкой поверхности угол отражения равен углу падения, а при шероховатой – меньше. Отскок произойдет по закону маятника, т.е. в обратном направлении по дуге качания. Скорость его  $V^1$  будет равна произведению линейной скорости в момент касания с поверхностью  $V$  на коэффициент упругого восстановления -  $k_\theta$ . Нормальные ( $V_H$  и  $V_H^1$ ) и касательные ( $V_K$  и  $V_K^1$ ) составляющие этих скоростей направлены в противоположные стороны.

Кинетическая энергия удара массы  $m$  со скоростью  $V_H$  в нормальном направлении равна

$$E_y^H = \frac{m \cdot V_H^2}{2} = \frac{m \cdot V^2 \sin^2 \alpha_1}{2}. \quad (5)$$

Энергия упругого восстановления

$$E_\theta^H = \frac{m \cdot (V_H^1)^2}{2} = \frac{m \cdot V^2 \cdot k_\theta^2 \sin^2 \alpha_1}{2}. \quad (6)$$

Соответственно энергия разрушения поверхности первым звеном

$$E_1^P = E_y^H - E_\theta^H = \frac{m \cdot V^2 \sin^2 \alpha_1}{2} - \frac{m \cdot V^2 k_\theta^2 \sin^2 \alpha_1}{2} = \frac{m \cdot V^2 \sin^2 \alpha_1}{2} \cdot (1 - k_\theta^2). \quad (7)$$

Эта энергия полностью пойдет на деформирование коры в нормальном направлении, т.е. на сжатие её поперек волокон.

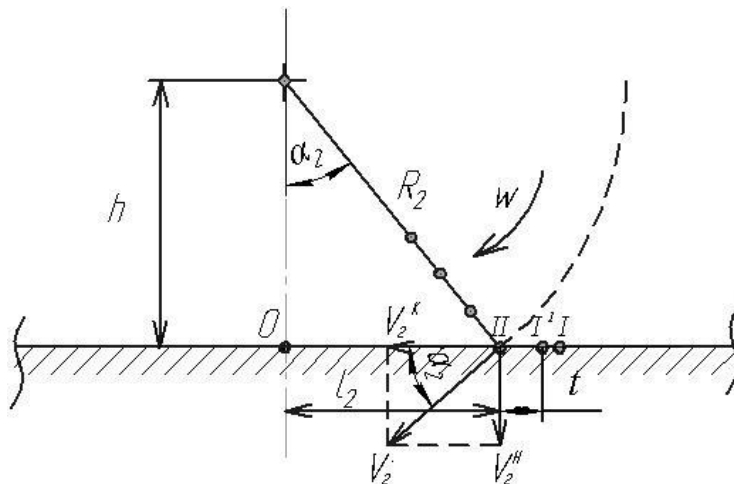


Рисунок 2 – Момент касания второго звена



В момент касания второго звена (рисунок 2), точка контакта первого звена с поверхностью (I) находится на расстоянии  $l_1 = R_1 \sin \alpha_1$  от вертикали, проходящей через центр вала. Аналогично, точка касания второго звена (II) будет находиться на расстоянии  $l_2 = R_2 \sin \alpha_2$ . Масса первого звена за этот промежуток времени переместится по поверхности объекта из точки (I) в точку (I<sup>1</sup>) на расстояние  $l_1 - l_2 - t$  (т.е.  $R_1 \sin \alpha_1 - R_2 \sin \alpha_2 - t$ ), совершая работу трения.

Кинетическая энергия разрушения вторым звеном будет:

$$E_2^P = \frac{m}{2} (\omega R_2 \sin \alpha_2)^2 (1 - k_{\theta}^2),$$

или

$$E_2^P = \frac{m \cdot V_2^2 \sin^2 \alpha_2}{2} \cdot (1 - k_{\theta}^2). \quad (8)$$

Эта величина меньше, чем  $E_1^P$ , так как  $R_2 < R_1$  и  $\alpha_2 < \alpha_1$ .

Таким образом, за один оборот вала цепи будет нанесен ряд ударов уменьшающейся силы от максимума в точке (I) до нуля в точке под осью вала. Общая энергия разрушения в нормальном направлении:

$$E_H^P = \frac{m \omega^2}{2} (1 - k_{\theta}^2) Z \sum_{i=1}^{i=n_3} (R_i \cdot \sin \alpha_i)^2,$$

или

$$E_H^P = \frac{m}{2} (1 - k_{\theta}^2) Z \sum_{i=1}^{i=n_3} (V_i \cdot \sin \alpha_i)^2. \quad (9)$$

где  $n_3$  – количество звеньев, участвующих в контакте (в целых числах),  $Z$  – число рядов цепов на окорочном валу.

$$n_3 = \frac{R_i - h}{t}. \quad (10)$$

Расстояние между точками ударов также уменьшается. Если  $l_1^2 = R_1^2 - h^2$ , а  $l_2^2 = (R_1 - t)^2 - h^2$ , то  $l_1^2 - l_2^2 = 2Rt - t^2$ ;  $l_2^2 - l_3^2 = 2Rt - 3t^2$ ;  $l_3^2 - l_4^2 = 2Rt - 5t^2$  и так далее.

Касательная составляющая линейной скорости первого звена в точке (I)  $V_K = \omega R_1 \cdot \cos \alpha_1$ , а в точке  $O$ , находящейся под осью вращения  $V_K^0 = \omega h$ . Если учесть, что  $h = R_1 \cdot \cos \alpha_1$ , то получится, что эти скорости равны. Отсюда следует вывод, что все звенья цепи, вступающие в контакт с обрабатываемой поверхностью, двигаются по ней с одинаковой скоростью  $V_K$  равной  $\omega h$ .

В отсутствии скорости надвигания при следующем обороте звенья цепи ударят по тем же самым местам. При наличии скорости подачи (надвигания)  $U$

удар будет происходить с некоторым сдвигом, шагом удара  $e$  относительно предыдущих точек. Величину этого шага можно определить из основного кинематического соотношения

$$\frac{U}{V_K} = \frac{e \cdot Z}{2\pi R}, \quad (11)$$

откуда

$$e = \frac{2\pi R \cdot U}{Z \cdot V_K}. \quad (12)$$

Разрушение коры от ударов звеньев цепи в нормальном направлении происходит только в первой половине общей зоны контакта от точки (I) до точки O (рисунок 3).

Составляющая линейной скорости  $V_K$  дает энергию разрушения в касательной плоскости первым звеном (рисунок 2)

$$E_K^P = \frac{m \cdot V^2 \cos^2 \alpha_1}{2} \cdot \left(1 - k_{\mathcal{E}}^2\right). \quad (13)$$

Если энергия в нормальном направлении полностью поглотится деформацией коры (вплоть до прессования), то энергия в касательном направлении будет востребована лишь частично. Она затратится на скалывание вдоль волокон, перемещение массы  $m$  по поверхности (контакт массы с поверхностью может и не потеряться за счет прижима центробежной силой, а если и потеряется, то через несколько мгновений после отскока восстановится и цеп будет волочиться), истирание не сколотых остатков коры и т.п. Все эти составляющие значительно меньше деформативной. Наиболее существенное из них – волочение цепи по поверхности обработки.

Сила трения при перемещении звена массой  $m$  равна  $mg\mu$ , где  $\mu$  – коэффициент трения металла звена по древесине или коре. Энергия на горизонтальное перемещение первого звена равна  $mg\mu \cdot 2l_1$ , второго звена –  $mg\mu \cdot 2l_2$  и так далее. Общая энергия на перемещение цепи по обрабатываемой поверхности за один оборот вала

$$E^{\Pi} = 2mg\mu \sum_{i=1}^{i=n} l_i \cdot Z. \quad (14)$$

По абсолютной величине эта энергия значительно меньше, чем  $E^P$ . Остаток энергии в касательном направлении, очевидно, будет тратиться на движение цепи и к процессу непосредственно окорки никакого отношения иметь не будет.

Общая энергия создаваемая первым звеном, определится как сумма (8) и (14)

$$E_p = \frac{m \cdot V^2 \left(1 - k_{\mathcal{E}}^2\right)}{2}. \quad (15)$$

Рассматривая последовательно работу звеньев в касательной плоскости и суммируя её с энергией в нормальной плоскости, приходим к выводу, что общая энергия разрушения, которую способен отдать цеп за один оборот

$$E = \frac{m(1-k_g^2)Z}{2} \cdot \sum_{i=1}^{i=n} V_i^2, \text{ или } E = \frac{mw^2(1-k_g^2)Z}{2} \cdot \sum_{i=1}^{i=n} R_i^2 \quad (16)$$

Этого количества энергии может быть как недостаточно для окорки, так и быть излишним. Всё зависит от конкретных условий. Идеальный случай, это когда создаваемой цепом энергии хватит для 100 % окорки. Решить такой случай можно было бы аппаратом оптимизации, но для этого нужно знать свойства коры не только на сдвиг или скалывание вдоль волокон (что более или менее изучено), а и на смятие поперек волокон и удар – (что совершенно не изучено).

Поэтому попробуем ориентировочно предсказать основные закономерности. Выдвинем условие, что за один проход цеп полностью производит окорку без лишних затрат энергии. Тогда удельная работа окорки  $k$  выразится как общая энергия разрушения цепом отнесенная к объему снятой коры  $G$  (Дж/м<sup>3</sup>). За один оборот этот объем равен

$$G = e \cdot F \cdot Z, \quad (17)$$

где  $F$  – площадь поперечного сечения участка удаляемой коры.

Из кинематического соотношения  $e = \frac{2\pi R_1 U}{V_K \cdot Z}$ . В этой формуле берется  $V_K$ ,

а не  $V$  потому, что оно совпадает с  $U$  по направлению. Удельная работа окорки

$$k = \frac{E}{e \cdot F \cdot Z} = \frac{EV_K}{2\pi R_1 U F}. \quad (18)$$

Итак, с учетом ранее сказанного, непосредственно на окорку затрачивается работа (9) и (14). Удельная работа окорки

$$k = \frac{mZ(1-k_g^2)V_K}{4\pi R_1 U F} \cdot \sum_{i=1}^{i=n} V_i^2 \sin^2 \alpha_i + \frac{2mg\mu_3 Z V_K}{2\pi R_1 U F} \cdot \sum_{i=1}^{i=n} l_i,$$

или

$$k = \frac{mZV_K}{\pi R_1 U F} \cdot \left[ \frac{1-k_g^2}{4} \cdot \sum_{i=1}^{i=n} V_i^2 \sin^2 \alpha_i + g\mu_3 \cdot \sum_{i=1}^{i=n} l_i \right]. \quad (19)$$

На основе литературных и патентных поисков, подготовки и проведения двух серий экспериментов разработаны технические решения по конструкциям цеповых окорочных станков для обработки горбыля и тонкомерных бревен.

Для очистки горбыля от коры предлагается конструкция ударной цеповой окорочной установки на базе тарного станка ЦА–2 для промышленного применения (рисунок 3). Усовершенствование ЦА–2 выразилось в следующем. Для регулировки шага удара ЦРО, цеповой вал предлагается сделать

подвижным в вертикальной плоскости, за счет шарнирного крепления к опоре, с механизмом изменения высоты оси относительно горизонтальной плоскости станины станка. Это позволит управлять процессом окорки в области эффективных кинематических параметров. Двигатель отнесен назад, к краю станка и клиноременной передачей связан с окорочным цеповым валом. За счет изменения диаметров валов (шайб) можем изменять скорости вращения при использовании двигателя с неизменяемой скоростью вращения.

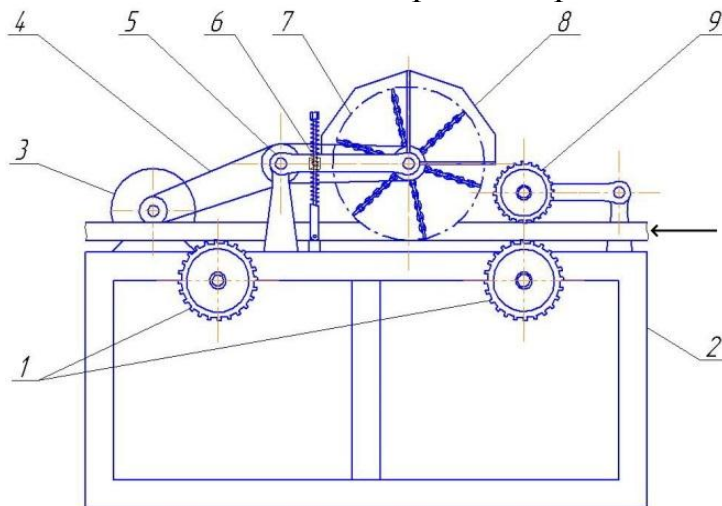


Рисунок 3 - Вид с боку окорочного станка с ЦРО для обработки горбыльных досок: 1 – нижние приводные вальцы системы подачи; 2 – рама станка ЦА - 2; 3- приводной электрический двигатель; 4 – клиноременная передача; 5 – опора с маятниковым механизмом цепового вала; 6 – механизм регулировки высоты окорочного вала; 7- траектория движения звена ЦРО; 8 – защитный экран; 9 – верхний прижимной валец

Таким образом, станок ЦА–2 с минимальной технической доработкой можно рекомендовать в качестве прототипа к серийному выпуску в качестве станка для цеповой окорки горбыля.

Обработка тонкомерных сортиментов ЦРО рациональна с четырех взаимно перпендикулярных сторон в областях зон эффективной окорки. Поэтому предлагается следующая конструктивная схема (рисунок 4). Лесоматериал движется на подающем конвейере, перемещается на приемные ролики системы подачи установки. Затем сортимент 5 позиционируется по отношению к обрабатывающим цеповым валам. При достижении бревна первой, вертикальной пары цеповых валов происходит очистка от коры контактных зон эффективной окорки. Далее подающим механизмом сортимент перемещается под вторую, горизонтальную пару цеповых валов, выполняется очистка коры оставшейся на поверхности, после чего лесоматериал попадает в удерживающие вальцы и выносится из станка. Для обработки бревен различных диаметров цеповые валы могут быть исполнены с возможностью передвижения в соответствующих рабочих плоскостях, подстраиваясь под обрабатываемые сортименты.

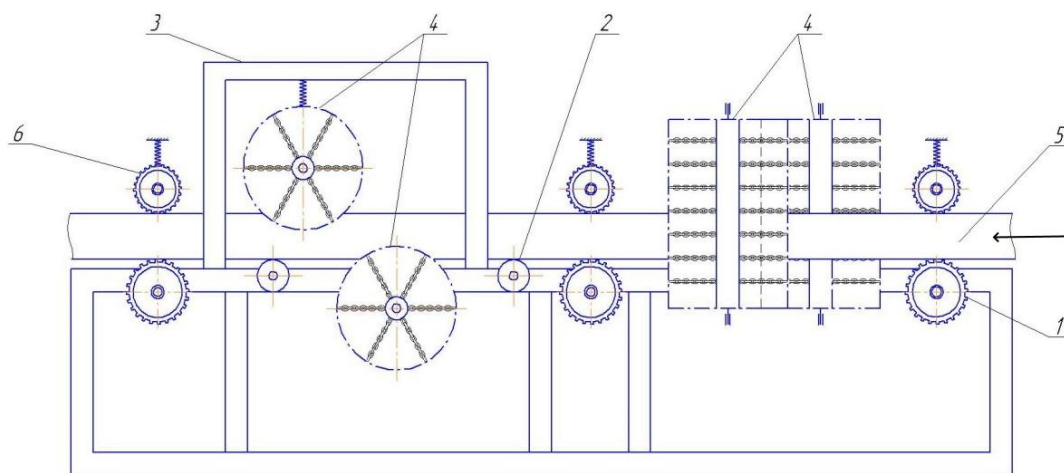


Рисунок 4 - Вид с боку окорочного станка с ЦРО для обработки тонкомерных лесоматериалов: 1 – нижний приводной валец системы подачи; 2 – поддерживающий ролик; 3 - рама; 4 – горизонтальные и вертикальные пары цеповых валов; 5 – обрабатываемый ствол дерева; 6 – верхний прижимной валец

Предлагаемые конструкции окорочных станков характеризуются относительно небольшой энерго- и металлоемкостью, просты в эксплуатации, могут быть изготовлены на любом машиностроительном предприятии.

**В третьей главе** изложена программа и методика экспериментальных исследований. Для проведения сравнительного анализа различных способов окорки необходимо иметь критерии, которые объективно характеризуют все способы окорки лесоматериалов. В качестве приоритетного критерия нами был избран энергетический параметр – удельная работа окорки. За основу первой экспериментальной установки был принят универсальный фрезерный станок СФ 676. Был использован классический эксперимент, где влияние факторов подвергается исследованию поочередно: сначала варьируется один из них, при этом уровни всех остальных факторов стабилизируются, затем аналогичным образом варьируется только второй и т.д.

Приняты следующие значения факторов: масса звена 0,012 кг.; радиус вращения ЦРО – 0,15 м; в качестве цепов была использована круглозвенная цепь калибром  $d = 6$  мм, шаг цепи  $t = 19$  мм, ширина звена  $B = 21$  мм; количество прямых рядов ЦРО на валу, шт. –  $n_p = 4$ , количество ЦРО в одном ряду, шт. –  $m_p = 4$ ; линейная скорость конечного звена  $v = 13,2, 16,6$  и  $20,7$  м/с. Скорости подачи  $u = 0,0043, 0,0053$  и  $0,0066$  м/с; длина заготовки – 1 м; влажность коры образцов –  $W=93\div 95\%$ ; температура коры в диапазоне – 15-17°C. Толщина коры на заготовках в среднем составляла 4 мм. Обязательным условием принята однократная обработка.

Изменялись следующие показатели: направление  $u, v$ , порода заготовок. Окорка производилась на свежесрубленных еловых и пихтовых пластинах. Удельная работа окорки рассчитывалась, как произведение длительности процесса (сек) на разницу показаний рабочего и холостого ходов (Вт), отнесенное к объему снятой коры (м<sup>3</sup>). Опытные значения удельной работы получились слишком велики (малые скорости подачи, что вело к лишней

затрате энергии и сильному измельчению коры), была создана вторая экспериментальная установка на базе круглопильного тарного станка ЦА-2. При проведении аналогичных опытов изменялись следующие показатели:  $u = (0,48; 0,68; 0,88 \text{ м/с})$ ,  $v = (37,7; 42,4 \text{ и } 47,1 \text{ м/с})$ .

**В четвертой главе** приведены результаты экспериментальных исследований цеповой окорки. По результатам первой группы экспериментов получены зависимости удельной работы окорки ели от скорости подачи и от линейной скорости конечного звена элемента цепи. Значения  $k$  ели и пихты имеют разброс величин от 46 до 247 МДж/м<sup>3</sup>. Полученные значения удельной работы в 5-40 раз больше соответствующих значений других способов окорки. Это объясняется малой величиной подачи, при которой происходят лишние затраты энергии на трение по окорённой поверхности и сильное излишнее измельчение коры.

Результаты экспериментов второй группы опытов по окорке ели (рисунки 8 и 9):

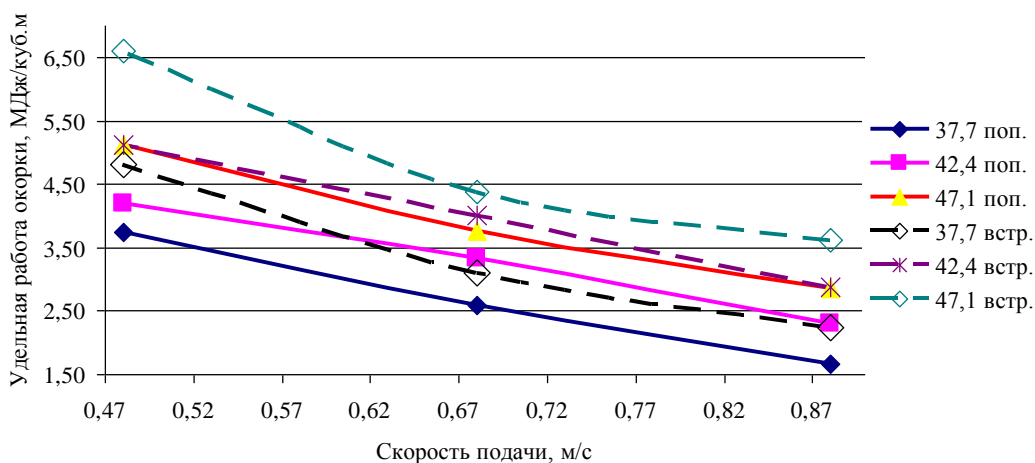


Рисунок 8 - Зависимость удельной работы окорки ели от скорости подачи

С целью проверки математической модели (19) проведена обработка расчетных и экспериментальных данных значений удельной работы окорки ели при попутной подаче. Результаты обработки представлены зависимостями (рисунки 10 и 11). Сравнение полученных данных показало, что расхождение результатов не превышает в среднем 7%. Тем самым подтверждена корректность принятых допущений и самой математической модели.

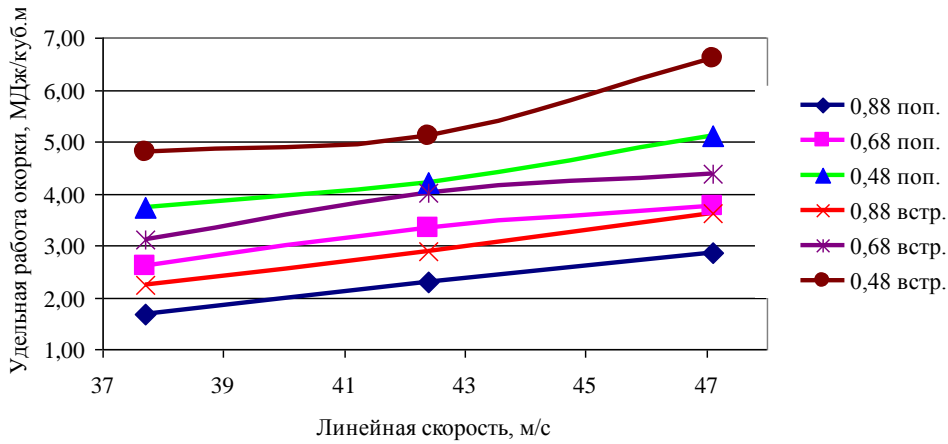


Рисунок 9 - Зависимость удельной работы окорки ели от линейной скорости цепи

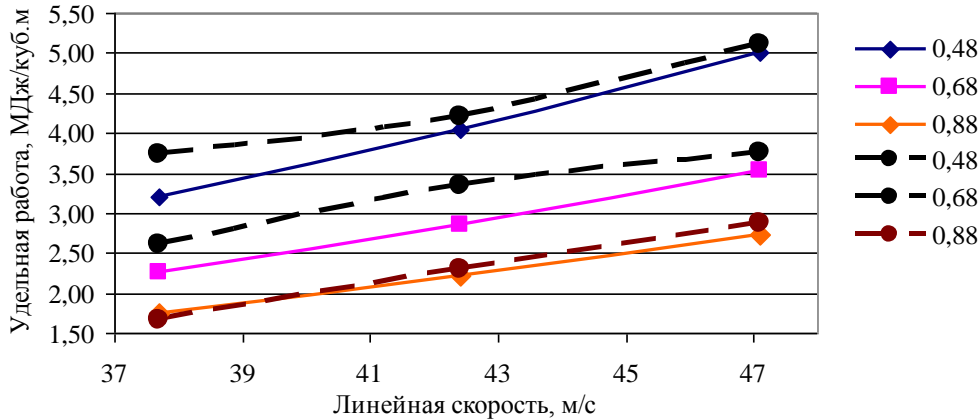


Рисунок 10 - Сопоставление экспериментальных и теоретических зависимостей удельной работы окорки ели при попутной подаче от линейной скорости цепи: - - - - - экспериментальные; ——— - расчетные

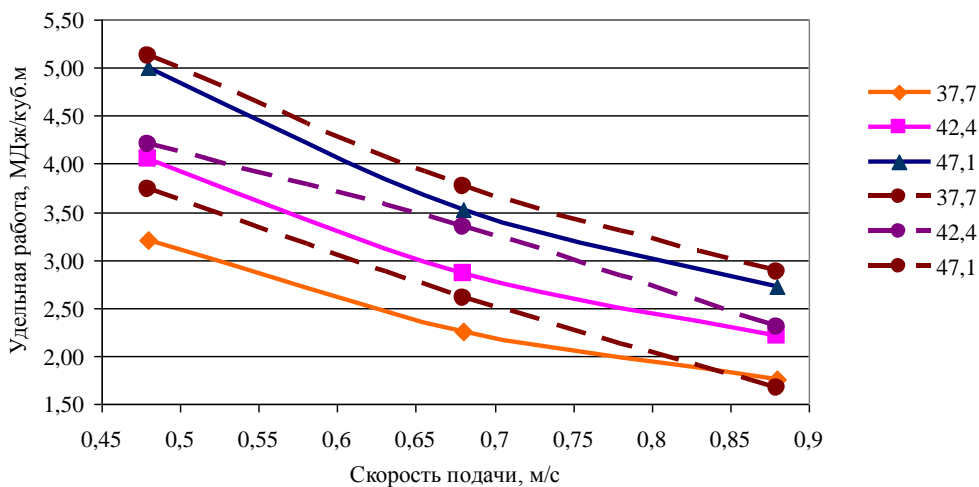


Рисунок 11 - Сопоставление экспериментальных и теоретических зависимостей удельной работы окорки ели при попутной подаче от скорости подачи: - - - - - экспериментальные; ——— - расчетные

Для использования результатов экспериментов в технологических расчетах методом наименьших квадратов получены регрессионные уравнения удельной работы окорки пихты:

- при попутной подаче:

$$k_{II}^{\text{Поп}} = -14,77 + 9,31 \cdot V_{\text{лин}} - 4,33 \cdot U_{\text{под}} - 0,78 \cdot V_{\text{лин}}^2 + 5,3 \cdot U_{\text{под}}^2 - 2,18 \cdot V_{\text{лин}} \cdot U_{\text{под}}, \quad (21)$$

- при встречной подаче:

$$k_{II}^{\text{Встр}} = -6,72 + 6,42 \cdot V_{\text{лин}} - 9,42 \cdot U_{\text{под}} - 0,24 \cdot V_{\text{лин}}^2 + 14,44 \cdot U_{\text{под}}^2 - 4,22 \cdot V_{\text{лин}} \cdot U_{\text{под}}. \quad (22)$$

Коэффициент детерминации  $R^2 = 0,988$  – при попутной подаче и  $0,993$  – при встречной подаче.

Также получены регрессионные уравнения удельной работы окорки ели:

- при попутной подаче:

$$k_E^{\text{Поп}} = 1,37 + 0,138 \cdot V_{\text{лин}} - 6,21 \cdot U_{\text{II}} + 0,0002 \cdot V_{\text{лин}}^2 + 1,96 \cdot U_{\text{под}}^2 - 0,038 \cdot V_{\text{лин}} \cdot U_{\text{под}}, \quad (23)$$

- при встречной подаче:

$$k_E^{\text{Встр}} = 12,97 - 0,232 \cdot V_{\text{лин}} - 15,96 \cdot U_{\text{II}} + 0,0053 \cdot V_{\text{лин}}^2 + 9,5 \cdot U_{\text{под}}^2 - 0,085 \cdot V_{\text{лин}} \cdot U_{\text{под}}. \quad (24)$$

Коэффициент детерминации  $R^2 = 0,994$  – при попутной подаче и  $0,993$  – при встречной подаче. Полученные уравнения описывают взаимодействие ЦРО с корой лесоматериалов и позволяют определить затраты энергии на обработку.

По результатам анализа экспериментальных исследований окорки второй группы опытов, можно сделать следующие выводы:

1) Полученные значения удельной работы окорки  $k$  значительно меньше, чем в первой группе опытов. Они находятся в диапазоне от  $1,54$  до  $7,64 \text{ МДж/м}^3$ . Это объясняется увеличенной скоростью подачи, при которой происходят процессы с минимальными затратами энергии.

2) При аналогичных условиях окорки эти значения у ели меньше, чем у пихты в среднем на  $16\%$ .

3) В одинаковых условиях удельная работа попутной окорки в среднем на  $21\%$  меньше, чем у встречной. Это полностью подтверждает выводы, сделанные в теоретической части и говорит о правильности предложенной математической модели.

4) С увеличением скорости подачи  $k$  уменьшается в среднем в  $2$  раза. Причем при попутной подаче уменьшение до  $10\%$  больше, по сравнению со встречной подачей.

5) При увеличении линейной скорости цепа  $k$  увеличивается в среднем в  $1,5$  раза. Причем при попутной подаче увеличение в среднем на  $19\%$  больше, по сравнению с встречной подачей.

6) Частицы отделенной коры как пихты, так и ели гораздо крупнее по сравнению с первой группой опытов. Основной объем частиц коры составляют элементы с размерами  $5-10$  мм. Самые крупные единичные частицы коры имели вид полосы с размерами до  $50 \times 10$  мм и встречаются редко.

Математическая обработка экспериментальных данных, произведенная в Excel и аппроксимация динамического ряда показателя удельной работы окорки позволила определить минимумы функций. Они составили  $0,88$ ;  $0,98$  и  $0,91$  м/с. Значение удельной работы окорки изменяется по убывающей, а после



значения скорости в среднем равной 0,92 м/с идет по возрастающей ветви параболы. Минимум значения удельной работы окорочного инструмента будет в точке экстремума параболы. Таким образом, рекомендуем для наших условий скорость подачи - 0,92 м/с, как наиболее рациональную, обеспечивающую минимальные затраты энергии на процесс окорки со значениями удельной работы окорки от 2,1 до 3,6 МДж/м<sup>3</sup>.

Произведен сравнительный расчет энергетической эффективности технологий окорки представленный в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты сравнительного расчета энергетической эффективности технологий окорки

Способ окорки	Вид окорочной технологии	Удельная работа, МДж/м <sup>3</sup>	Уд. расход эл. энергии, кВт·ч/м <sup>3</sup>	Затраты на окорку 1 тыс. м <sup>3</sup> древесины		Соотношение затрат по сравнению с цеповой окоркой, %
				Энергия, МДж	Эл. энергия, кВт·час	
Режущий	Ножевая	10,9	3,0	10900	3027,8	165
	Дисковая	15,0	4,2	15000	4166,7	227
Фрикционный	Роторная	8,4	2,3	8400	2333,3	127
	Барabanная	11,1	3,1	11100	3083,3	168
Ударный	Цеповая	6,6	1,8	6600	1833,3	100

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

В процессе исследований получены следующие основные выводы и рекомендации:

1. Для проведения операции очистки от коры тонкомерных сортиментов и горбыльных досок перспективно применение окорочной технологии с цеповыми рабочими органами.

2. Разработанные математические модели взаимодействия цепов и коры обрабатываемой поверхности лесоматериала позволяют рассчитывать: кинематические соотношения взаимодействия; энергию удара цепов; энергоемкость процесса; объем разрушенной и удаленной коры, что позволяет определять энергосберегающие режимы окорки и параметры цеповых рабочих органов.

3. Представлены обоснованные конструктивные схемы окорочного оборудования с цеповыми рабочими органами, учитывающие геометрические особенности формы горбыльных досок и тонкомерных сортиментов.

4. Экспериментально определены ранее неизвестные величины, характеризующие энергетические затраты цеповой окорки. Значения удельной работы цеповой окорки  $k$  оказались в диапазоне от 1,54 до 7,64 МДж/м<sup>3</sup>, что

меньше чем у альтернативных технологий очистки от коры. Для сравнения значения  $k$  других технологий окорки составляют: у ножевой окорки - 10-12; продольном фрезеровании - 15-17; дисковом фрезеровании – 11,2 – 22,5; роторной окорке - 6,5-7,2 МДж/м<sup>3</sup>. Это говорит о том, что цеповая окорка является самой экономичной с точки зрения затрат энергии. Выполненный сравнительный расчет энергетической эффективности способов окорки позволяет сделать вывод о целесообразности внедрения цеповой окорки, поскольку она обеспечивает снижение энергоёмкости процесса в 2-5 раз по сравнению с другими способами окорки. Кроме того, цеповые окорочные станки имеют более простую конструктивную схему, высокую производительность, не требуют дополнительной подготовки рабочих органов.

5. Экспериментальные исследования показали, что математическое описание процесса цеповой окорки лесоматериалов достоверно отражает затраты энергии, возникающие при выполнении операции, расхождение результатов экспериментальных значений удельной окорки от значений полученных по математической модели превышает 7 %. Это позволяет сделать вывод об адекватности математической модели и достоверности полученных результатов.

6. На основе статистической обработки экспериментальных данных по окорке свежесрубленных пихтовых и еловых лесоматериалов были определены регрессионные модели функциональной зависимости между энергоёмкостью и режимными параметрами цеповой окорки при попутной и встречной подачах и получены: графики экспериментальных и расчетных значений зависимости удельной работы от скорости подачи при попутном и встречном направлении, показавшие сходимость результатов, что говорит об адекватности расчетов и полученных результатов; линии равного уровня зависимости удельной работы от линейной скорости вращения, скорости и направления подачи, позволяющие проектировать режимные параметры окорочных станков.

7. Выполненные исследования дали возможность установить статистические закономерности между режимными параметрами  $V_{лин}$  и  $U_{под}$ , которые позволяют получить зависимость изменения удельной работы в зависимости от скорости подачи и линейной скорости вращения цепов. Данные исследования позволяют решать прикладные задачи обоснования параметров и режимов работы при разработке цеповых окорочных технологий.

8. В результате теоретических и экспериментальных исследований обоснованы энергосберегающие режимы цеповой окорки и параметры рабочих органов:

- а) попутная подача менее энергоёмка (в среднем на 20%) и имеет минимальное воздействие на обработанную поверхность древесины;
- б) скорость подачи (надвигания) 0,9 – 1,5 м/с;
- в) линейная скорость конечного звена цепи 38 м/с;

г) число рядов цепов на приводном валу – 4 шт., с размещением со смещением на радиус цепи по отношению к соседнему ряду (в шахматном порядке);

д) длина ряда цепов равняется максимальному значению обрабатываемой ширины (диаметра) лесоматериала;

е) производить окорку сортиментов только в области эффективных зон с четырех сторон при помощи четырех окорочных валов: двух вертикальных и двух горизонтальных;

ё) для обработки стволов различных диаметров и кривизны должна предусматриваться возможность изменения расстояния между осями валов, т.е. они должны иметь возможность перемещения в рабочих плоскостях.

9. Эксперименты показали, что применение цепового рабочего органа позволило получить степень окорки (97-99%) пластин свежесрубленных ели и пихты с минимальными потерями и повреждениями древесины. При этом отделенная в процессе обработки лесоматериала кора имеет измельченный вид и может использоваться как сырьё без дополнительной подготовки.

10. Материалы диссертационной работы могут быть использованы для создания и совершенствования конструкций окорочного оборудования с цеповыми рабочими органами, обеспечивающих выполнение требований к глубокой переработке древесины по энергосберегающим, безотходным технологиям.

## **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **В изданиях, рекомендованных ВАК:**

1. **Палкин Е. В.** Описание процесса окорки круглых лесоматериалов и горбылей / Е. В. Палкин, Т. С. Розанова // Системы. Методы. Технологии. 2018. № 4 (40). С. 141-147.

2. **Палкин Е.В.** Результаты экспериментов по окорке лесоматериалов гибкими цепными рабочими органами / Е. В. Палкин // Хвойные бореальной зоны. 2018. Т.36. № 6. С.554-558.

### **Прочие публикации:**

3. **Палкин, Е.В.** Анализ способов окорки тонкомерной некондиционной древесины / Е.В. Палкин, Ю.П. Грязнов // Химико-лесной комплекс - проблемы и решения: науч.-практ. конф. : сб. тез. докл. студентов и молодых ученых. - Красноярск. 2001. Т.1. - С. 248-250.

4. **Палкин Е.В.** Исследование толщины коры пихты и ели / Е.В. Палкин, Ю.П. Грязнов // Химико-лесной комплекс - проблемы и решения: всерос. науч.-практ. конф. (г. Красноярск, 11-12 апр. 2002 г.) : сб. ст. - Красноярск. СибГТУ, 2002. - С. 203-206.

5. **Палкин Е.В.** Применение энергетического метода при определении силовых параметров окорки цеповыми рабочими органами / Е.В. Палкин, В.Н. Курицын // Лесной и химический комплексы - проблемы и решения (экологические аспекты): Научно-практическая конференция. Сборник статей студентов и аспирантов. - Красноярск: СибГТУ, Часть 2, 2004 г. - С. 111-112.

6. Курицын В.Н. Определение мощности при цеповой окорке с малыми скоростями подачи / В.Н. Курицын, **Е.В. Палкин** // Лесозэксплуатация. межвузовский сборник научных трудов. - Красноярск: СибГТУ, 2004. - С. 173-177.

7. **Палкин Е.В.** Установка для исследования цеповой окорки с промышленными скоростями подачи / Е.В. Палкин, В.Н. Курицын // Химико-лесной комплекс - проблемы и решения: науч.-практ. конф. : сб. тез. докл. студентов и молодых ученых. - Красноярск: СибГТУ, 2005. - С. 149-151.

8. **Палкин Е.В.** Определение рациональной скорости подачи лесоматериалов при окорке цеповыми рабочими органами. / Е.В. Палкин, В.Н. Курицын, Н.Л. Ронжин // Лесной и химический комплексы - проблемы и решения. Сборник статей по материалам Всероссийской научно-практической конференции посвященной 80 – летию СибГУ. Том 1 - Красноярск: СибГТУ, 2010 г. С. 121-125.

9. **Палкин Е.В.** Результаты исследования цеповой окорки с промышленными скоростями подачи / Е.В. Палкин, В.Н. Курицын // Вестник КрасГАУ, Выпуск 10: сб. ст. – Красноярск: КрасГАУ, 2010. – с. 152-155.

10. **Палкин Е.В.** Анализ энергетических затрат в процессе цеповой окорки древесины / Е.В. Палкин, В.Н. Курицын // Вестник КрасГАУ, Выпуск 7: сб. ст. – Красноярск: КрасГАУ, 2013. – с. 229-234.

11. **Палкин Е.В.** Математические модели удельных энергетических затрат в процессе цеповой окорки лесоматериалов / Е.В. Палкин, Ушанов С.В., Розанова Т.С., Гришин К.М. // Фундаментальные исследования. 2014. № 8 (часть 2). С. 317-321.

12. Ушанов С.В. Математическая обработка результатов экспериментов по цеповой окорке сегментных лесоматериалов ели / С.В. Ушанов, **Палкин Е.В.** // Вестник КрасГАУ, Выпуск 10: сб. ст. – Красноярск: КрасГАУ, 2016. – с. 113-120.

13. **Палкин Е.В.** Обработка результатов экспериментов по исследованию цеповой окорки сегментных лесоматериалов / Е.В. Палкин, С.В. Ушанов, Т.С. Розанова // Вестник Иркутского государственного технического университета, Выпуск 12: Т. 20: сб. ст. – Иркутск: ИрГТУ, 2016. – с. 72-79.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения, просим направлять по адресу: 620100, г. Екатеринбург, ул. Сибирский тракт, 37, УГЛТУ, Ученому секретарю диссертационного совета Д.212.281.02, e-mail: d21228102@yandex.ru