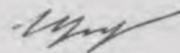


A
Щ, 59

Электронный архив УГЛТУ

На правах рукописи



Щепочкин Сергей Владимирович

**РЕЖИМЫ РЕЗАНИЯ ДРЕВЕСИНЫ В КРУГЛОПИЛЬНЫХ
СТАНКАХ ПО ТЕПЛОСТОЙКОСТИ МАТЕРИАЛА
ИНСТРУМЕНТА**

Специальность 05.21.05 – Древоисноведение, технология и оборудование
древопереработки

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Екатеринбург – 2012

Электронный архив УГЛТУ

Работа выполнена на кафедре станков и инструментов Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Уральский государственный лесотехнический университет».

- Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Пашков Валентин Кузьмич
- Официальные оппоненты: Комиссаров Анатолий Петрович
доктор технических наук, профессор
кафедры графики и деталей машин
ФГБОУ ВПО «Уральская государственная
сельскохозяйственная академия»
- Ганапольский Сергей Григорьевич
кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой машин и
технологии деревообработки
ФГБОУ ВПО «Вятский государственный
технический университет»
- Ведущая организация: ОАО «Уральский научно-исследовательский
институт переработки древесины»
(г. Екатеринбург)

Защита диссертации состоится «18» мая 2012 г. в 10-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.281.02 при ФГБОУ ВПО «Уральский государственный лесотехнический университет», 620100 г. Екатеринбург, Сибирский тракт 37, ауд. 401

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Уральский государственный лесотехнический университет».

Автореферат разослан «16» апреля 2012 года

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент



Н.В. Кузубина

Электронный архив УГЛТУ

Общая характеристика работы

Актуальность работы. ЦНИИМОДом и УГЛТУ были разработаны в 1988 г. руководящие технические материалы (РТМ) по определению режимов пиления древесины круглыми пилами. РТМ устанавливают порядок расчета режимов продольного и поперечного пиления древесины круглыми пилами. Допустимая скорость подачи ограничивается работоспособностью междузубовых впадин, шероховатостью пропила, мощностью механизма резания и динамической устойчивостью пилы. Вместе с тем в РТМ не учтен ещё один важный параметр процесса резания – температура зуба пилы (температура резания), которая является ещё одним ограничивающим фактором при расчете режимов резания. Установлено, что в процессе резания инструмент нагревается до температур, превышающих предел теплостойкости материала лезвия и могут привести к резкому снижению его твердости, прочности и, в конечном счёте к термомеханическому разрушению или термоабразивному износу. Стойкость лезвия зуба снижается, происходит так называемая тепловая посадка и отказ в работе пилы.

Это ограничение по допустимой температуре лезвия пилы в РТМ в своё время не было включено по целому ряду объективных обстоятельств. Отсутствовали сведения теоретического и экспериментального характера: по зависимости температуры лезвия от мощности резания, температурным полям зуба и характеру кривых распределения температуры зуба по его высоте; конвективной теплоотдаче зуба от нагрева и коэффициентам теплоотдачи от условий резания. По тепловому балансу в зоне резания, источникам и стокам тепла через стружку и заготовку также отсутствовали сведения, необходимые для расчетов режимов резания по параметру допустимого нагрева лезвия зуба.

Перечисленные обстоятельства явились основанием для проведения исследований по описанию основных закономерностей теплообмена режущей части пилы, разработке на их основе рекомендаций по зонам лезвий с наибольшими температурами, по ограничению режима по теплостойкости материала лезвия, законам изменения температуры и характера тепловых потоков, по управлению тепловыми явлениями, методике расчета режимов резания с ограничением по тепловой стойкости режущего инструмента.

Цель работы. Разработка метода расчета режимов резания древесины в круглопильных станках на основе температурной устойчивости инструмента.

Задачи работы:

1. Изучение теплового баланса в зоне резания круглыми пилами.
2. Исследования (теоретические и экспериментальные) закономерностей распределения температуры по высоте зуба пилы в зависимости от тепловой мощности резания.
3. Количественная оценка источников теплоты и стоков теплового баланса.
4. Экспериментальные исследования тепловых потоков, отводимых в стружку и заготовку при пилении.
5. Экспериментальные исследования коэффициентов теплоотдачи зубьев пил в зависимости от мощности теплового источника, скорости обтекаемого воздуха и толщины зуба.
6. Разработка режимов пиления древесины в круглопильных станках по тепловой устойчивости материала лезвий зубьев пил.
7. Разработка измерительных комплексов для измерения температур, мощности и др. параметров при экспериментальных исследованиях.

Научная библиотека
УГЛТУ
г. Екатеринбург

Электронный архив УГЛТУ

Объект исследования. Процесс распиловки древесины на круглопильных станках.

Предмет исследования. Тепловые явления, происходящие на режущей части круглых пил при распиловке древесины.

Научная новизна работы:

1. Режимы резания древесины в круглопильных станках по тепловой устойчивости материала лезвий инструмента.
2. Графоаналитический метод определения температуры резания в зависимости от тепловой мощности резания.
3. Методика расчета температур по высоте зуба с применением программного пакета Mathematica v. 4.2.
4. Значения коэффициентов теплоотдачи режущей части круглых пил.
5. Тепловой баланс источников и стоков тепла в процессах резания древесины круглыми пилами.

Положения, выносимые на защиту:

1. Режимы резания древесины в круглопильных станках по теплостойкости материала лезвий инструмента.
2. Математические модели тепловых полей зубьев пил.
3. Графоаналитический метод расчета температуры по высоте зуба.
4. Значения коэффициентов теплоотдачи режущей части круглых пил в зависимости от факторов – скорости воздушных потоков, толщины зуба, мощности теплового источника.
5. Расходная часть теплового баланса – количество теплоты, отводимой в стружку, заготовку и инструмент.
6. Математические модели температуры стружки, доли мощности резания, идущей на нагрев стружки в зависимости от технологических факторов – скорости подачи и высоты пропила.

Практическая значимость работы. Все результаты работы, имеющие научную новизну, имеют и практическую ценность. Результаты работ дополняют «Руководящие технические материалы по определению режимов пиления древесины круглыми пилами» (1988 г.) методическими рекомендациями по расчету режимов резания древесины по теплостойкости материала инструмента. Методические рекомендации предназначены для практического применения при разработке технологических режимов производства в лесопильной, деревообрабатывающей, мебельной промышленности, а также при решении вопросов оптимизации режимов резания, параметров станков и инструментов на предприятиях, в научно-исследовательских и проектно-конструкторских организациях.

Результаты исследований использованы в учебном процессе при изучении специальных дисциплин «Оборудование отрасли», «Резание древесины и древесных материалов», «Дереворежущие инструменты» специальности 250403 «Технология деревообработки», 250300 «Технология лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств и 151000 «Технологические машины и оборудование» УГЛТУ.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы доложены на научно-технических конференциях студентов и аспирантов Уральского государственного лесотехнического университета в 2003 – 2006 гг.; Международном евразийском симпозиуме «Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века» (УГЛТУ) в 2006, 2007, 2011 гг.; Международной научно-технической конферен-

Электронный архив УГЛТУ

ции: «Социально-экономические и экологические проблемы лесного комплекса» (УГЛТУ) в 2005 г.; Международной научно-технической интернет-конференции «Актуальные проблемы лесного комплекса» (БГИТА, г. Брянск) в 2005 – 2006 гг.; Всероссийской научно-практической конференции «Лесной и химический комплексы – проблемы и решения» (СибГТУ, г. Красноярск) в 2006 г.

Реализация работы. Результаты работы включены в «Методические рекомендации по расчету режимов резания древесины в круглопильных станках по теплоустойчивости материала инструмента», которые утверждены генеральным директором ОАО «Уральский научно-исследовательский институт переработки древесины».

Публикации. По теме диссертации опубликована 21 печатная работа, в том числе 4 в изданиях, рекомендованных ВАК.

Объём и структура диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, выводов, библиографического списка и приложений. Основное содержание работы изложено на 185 страницах машинописного текста, содержит 55 иллюстраций, 30 таблиц, 102 наименования использованных источников.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, определена её цель, сформулированы положения, выносимые на защиту, показаны научная новизна и практическая значимость работы.

1. Состояние вопроса. Рассмотрено состояние проблемы, осуществлен обзор публикаций и оценка состояния вопроса нагрева круглых плоских пил при пилении древесины, сформулированы задачи исследований. Наиболее полно влияние нагрева на работоспособное состояние инструмента на уровне требований к лезвию решено в работах А.Э. Грубе, А.В. Моисеева, Р.А. Лейхтлинга, Л.В. Двоскина и др.

Вопросы нагрева и влияние его на устойчивость дисков пил освещены в работах М.А. Дешевого, А.Э. Грубе, В.И. Санева, Г.С. Гуркина, Г.А. Жодзишского, Г.И. Юзefовича, Ю.М. Стахиева, М.М. Твердыниной, И. А. Грачева, В.К. Пашкова, В.Г. Бодалева, А.С. Красикова и др.; зарубежных ученых – Л. Глиера, Г.С. Калицина, Е. Барца, С.Д. Моута, Г. Палича и др. Вместе с тем анализ результатов выполненных работ показывает, что отдельные вопросы требуют обобщения и дальнейших исследований. Это касается оценки тепловых потоков в зубе и диске пилы, оценка которых проведена раздельно. Это позволило бы оценивать ожидаемые температуры нагрева лезвия по тепловому потоку диска пилы или температуре его периферии, для которой установлены математические зависимости от основных условий резания, используя температуру лезвия, как ограничение режима резания. Для получения общей картины тепловых потоков от лезвия зуба по радиусу пилы, включая тело зуба и диск, необходимы дополнительные теоретические и экспериментальные исследования со специальной целью оценки ожидаемых максимальных температур на лезвии и окружности впадины зубьев от мощности на резание.

Температурный перепад может быть использован для решения обратной задачи – определения температуры на поверхности контакта инструмента (зуб) – заготовка, а температура лезвия в качестве ограничения параметров режима резания по условию теплоустойчивости материала инструмента. Анализ состояния вопроса позволил сформулировать цель и задачи исследований, приведенные в общей характеристике работы.

2. Теоретические исследования температурных полей зубьев пил

Установлено, что тепло при резании в диск поступает через зубья осесимметрично. При известной температуре на окружности междузубовых впадин, последняя

Электронный архив УГЛТУ

нарастает по направлению к вершине зуба пропорционально длине хорды концентрической окружности на участке впадины. Графоаналитическое построение изменения относительной температуры зуба Z по его высоте показало, что её изменение на режущей кромке составляет

$$Z = \vartheta_1 / \vartheta_i, \quad (1)$$

где ϑ_1 – температура зуба пилы на окружности первой изотермы – на режущей кромке лезвия; ϑ_i – температура зуба на i -ой изотерме, т.е. $\vartheta_i = \vartheta_1 / Z$.

Температура на лезвии примерно в 20 раз выше, чем температура на окружности впадин зубьев ϑ_m , т.е. $\vartheta_1 = 20\vartheta_m$.

Эта задача решена нами теоретически. Для установления закона распределения температуры по высоте зуба пилы составлено дифференциальное уравнение теплопроводности на основе теплового баланса элементарного кольцевого слоя абсолютно острого лезвия (рисунок 1).

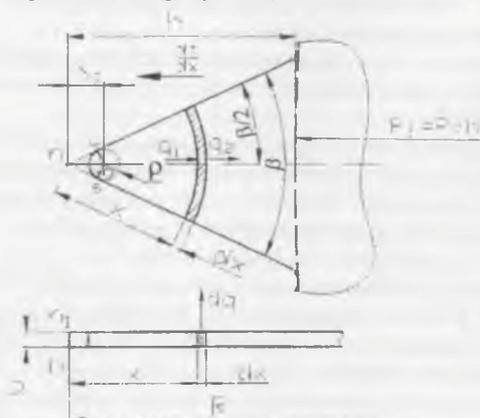


Рисунок 1 – Схема тепловых потоков элементарного участка зуба пилы

На рисунке 1 показано: $\frac{dt}{dx}$ – градиент температуры зуба по высоте; q_1 и q_2 – количество подводимого и отводимого тепла к элементарному участку путем теплопроводности по высоте зуба соответственно, Вт; dq – количество тепла, отводимого путем конвективного теплообмена от элементарного участка через переднюю, заднюю и боковые грани, Вт; β – угол заострения зуба, град; h – высота зуба, м; b – толщина зуба, м; R – радиус пилы, м; R_1 – радиус окружности впадин зубьев, м; x_0 – расстояние от начала координат (точка n) до центра дуги ab (точка o). На схеме на профиль абсолютно острого лезвия наложен профиль физического лезвия с радиусом закругления ρ , м, режущей кромкой в форме дуги ab с центром o .

Поскольку в установившемся режиме резания теплосодержание элементарного участка остаётся постоянным, тепловой поток dq , рассеиваемый конвективным путём боковыми поверхностями и поверхностями передней и задней грани этого участка определяется разницей тепловых потоков q_1 и q_2 , проходящих через внешнюю и внутреннюю цилиндрические поверхности путем теплопроводности $dq = q_1 - q_2$. По закону Фурье и закону Ньютона-Рихмана дифференциальное уравнение теплопроводности примет вид

$$\frac{d^2 t}{dx^2} + \frac{1}{x} \frac{dt}{dx} - \frac{2\alpha}{\lambda b} t \left(1 + \frac{180b}{x\pi\beta} \right) = 0. \quad (2)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м^{°C});

α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²°C);

Для решения уравнения (2) необходимо ввести новые обозначения:

Электронный архив УГЛТУ

$$\frac{2\alpha}{\lambda b} = m^2, \quad mx = z; \quad \frac{180b}{\pi\beta} m = \nu; \quad \frac{1}{x} = \frac{m}{z}; \quad \frac{dt}{dx} = m \frac{dt}{dz}; \quad \frac{d^2t}{dx^2} = m^2 \frac{d^2t}{dz^2},$$

с учетом которых уравнение (2) можно записать в виде

$$\frac{d^2t}{dz^2} + \frac{1}{z} \frac{dt}{dz} - \left(1 + \frac{\nu}{z}\right)t = 0. \quad (3)$$

Решение дифференциального уравнения с применением программного пакета Mathematica v.4.2 с учетом значений постоянных коэффициентов C_1 и C_2 , определяемых из граничных условий первого рода составит

$$t = t_0 \frac{e^{-mx} U(0,5(1+\nu); 1; 2mx)}{e^{-\frac{m\rho}{\sin \beta/2} U\left(0,5(1+\nu); 1; \frac{2m\rho}{\sin \beta/2}\right)}, \quad (4)$$

где e – основание натурального логарифма, $e = 2,718$;

$U(0,5(1+\nu); 1; 2z)$ – конфлюэнтная (вырожденная) гипергеометрическая функция первого рода, порядка $(1+\nu)$, аргумента $2z$;

Значение конфлюэнтной (вырожденной) гипергеометрической функции определяются по математическому справочнику специальных функций.

По результатам расчета построен график распределения температуры по высоте зуба (рисунок 2). Как видно из формулы (4), характер распределения температуры не зависит от абсолютного значения температуры на лезвии зуба, поэтому на графике (рисунок 2) по оси ординат приведено значение относительной температуры.

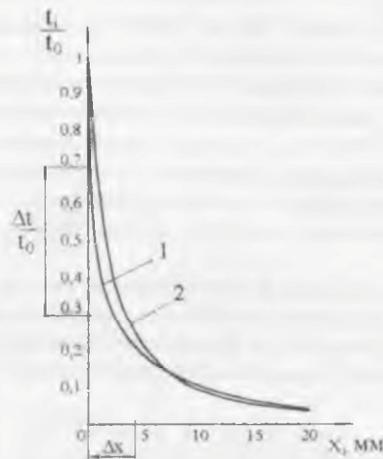


Рисунок 2 – График распределения относительной температуры по высоте зуба: 1 – кривая, построенная по формуле (4); 2 – кривая, построенная графоаналитическим методом: t_i – температура на расстоянии x от вершины зуба, t_0 – температура на контактных поверхностях инструмента при резании при установившемся теплообмене

Установленная аналитическая зависимость температуры (4) по высоте зуба круглой пилы позволяет оценить влияние конструктивных и технологических параметров λ , ρ , α , β , b в пределах их возможных изменений на характер распределения температуры по высоте зуба режущей части пилы. Результаты расчета показывают, что температура на периферии диска увеличивается (при прочих равных условиях) с увеличением коэффициента теплопроводности λ материала лезвия, радиуса затупления лезвия ρ , толщины зуба b и уменьшается с увеличением коэффициента теплоотдачи α . При изменении угла заточки β от 30° до 70° температура на периферии диска остаётся постоянной. С точки зрения снижения температуры лезвия нужно работать с большими значениями b , α , λ , периферии диска – большими значениями α и меньшими значениями λ .

Электронный архив УГЛТУ

По установленному закону распределения температуры по высоте зуба, температура t_0 резания может быть определена по формуле

$$t_0 = \frac{\beta_n N_{рез} K_1}{z \alpha_z + K_2 \alpha_p} \quad (5)$$

где β_n – коэффициент, учитывающий периодизацию процесса резания;
 $N_{рез}$ – мощность резания, Вт;
 K_1 – коэффициент доли мощности на резание, идущей на нагрев инструмента;
 z – число зубьев пилы;
 α_z – среднеинтегральный коэффициент теплоотдачи зуба пилы, Вт/°С;
 α_p – среднеинтегральный коэффициент теплоотдачи диска, Вт/°С;
 K_2 – коэффициент, равный отношению температуры на периферии диска к температуре резания, ($K_2 = 0,025 \dots 0,1$).

3. Теоретические исследования тепловых стоков с режущей части и диска круглой пилы

Для определения теплоты, передающейся в окружающую среду режущей частью (зубьями) пилы $Q_{окр}$ условно зуб пилы разбивается на кольцевые участки радиусом x , и шириной Δx (рисунок 3).

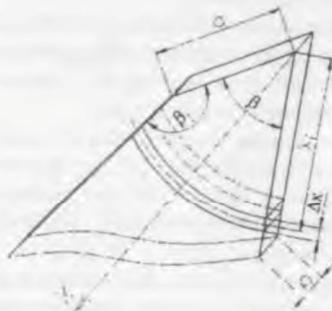


Рисунок 3 – Схема разбивки зуба по высоте на участки

На каждом из них теплоотдача в окружающую среду определяется по закону Ньютона-Рихмана.

$$Q_{окр} = z \alpha_{cp} \sum_{i=1}^n F_i \Delta t_{cp_i} \quad (6)$$

где z – число зубьев пилы; F_i – площадь поверхности теплоотдачи участка, м²; α_{cp} – средний коэффициент теплоотдачи поверхности рассматриваемого участка воздуха, Вт/(м² · °С); Δt_{cp_i} – температурный перепад поверхности рассматриваемого участка относительно температуры окружающей среды, °С; n – количество участков, 1, 2 ... п.

Имея достоверную информацию о распределении температуры по высоте зуба, приведенной во второй главе (формула 4), и произведя необходимые математические подстановки и преобразования, получим выражение для определения теплоты, передающейся в окружающую среду режущей частью конвективным теплообменом.

$$Q_{окр} = z t_0 \left[\frac{2 \Delta x \alpha_{cp}}{e^{-\frac{m \rho}{2}} U \left(0,5(1 + \nu); 1; \frac{2 m \rho}{\sin \frac{\beta}{2}} \right)} \sum_{i=1}^n e^{-m x_i} U \left(0,5(1 + \nu); 1; 2 m x_i \right) \left(\frac{\pi x_i \left(\beta - \left[180 - \beta - \arcsin \left(\frac{a \sin \beta}{x_i} \right) \right] \right)}{180} + b \right) \right] \quad (7)$$

Величина в квадратных скобках α_z называется **среднеинтегральным коэффициентом теплоотдачи зуба пилы**. Она численно равна количеству теплоты, передаваемой зубом пилы в окружающую среду при повышении температуры резания на 1°С в установившемся тепловом режиме.

Электронный архив УГЛТУ

Для значений параметров α_{cp} , β , h , b , β_1 и a , влияющих на величину среднеинтегрального коэффициента теплоотдачи зуба пилы α_z , её аналитическая зависимость из формулы (формула 7) аппроксимирована. Зависимость α_z от высоты зуба h аппроксимирована полиномом 3-ей степени, а влияние остальных параметров α_{cp} , β , b , β_1 и a аппроксимировано степенной функцией

$$\alpha_z = 10^{-8} b^{0,7257} \beta^{0,5063} \alpha_{cp}^{0,6385} \beta_1^{0,0715} a^{0,0755} (0,014h^3 - 1,82h^2 + 82,79h + 20,05). \quad (8)$$

где h – высота зуба в направлении биссектрисы угла заострения β , мм.

Аналогичным способом разработана методика определения конвективного теплообмена диска пилы. Для чего также введено понятие **среднеинтегрального коэффициента теплоотдачи диска пилы**, который численно равен количеству теплоты, расходуемой на нагревание диска пилы на 1°C в установившемся тепловом режиме. Для его определения разработана аппроксимирующая зависимость

$$\alpha_p = 1,88 \cdot 10^{-3} \cdot D^{0,96} \sqrt{0,426 b^{0,471}}. \quad (9)$$

4. Экспериментальные исследования количества тепла, отводимого в стружку и заготовку

Для оценки количества тепла, отводимого в стружку поставлен полный факторный эксперимент ПФЭ 2^K . В качестве переменных факторов в эксперименте были приняты: высота пропила $27 \leq h \leq 49$ мм и скорость подачи $15 \leq V_s \leq 30$ м/мин. Постоянные факторы: влажность древесины $W = 10 \pm 2\%$, порода – сосна, температура окружающей среды $t_{окр} = 19,9^\circ\text{C}$, геометрические и угловые параметры пил – стальной круглой плоской по ГОСТ 980-80 и дисковой с твердосплавными пластинами по ГОСТ 9769-79, частота вращения пилы – 2940 мин^{-1} .

Цели исследования: температура стружки $\theta_c \cong y_1$, $^\circ\text{C}$; температура окружности межзубовых впадин (периферии диска) пилы $\theta_d \cong y_2$, $^\circ\text{C}$; мощность на резание $N_{рез} \cong y_3$, Вт. Блок схема экспериментальной установки приведена на рисунке 4, а результаты экспериментов приведены в таблице 1.

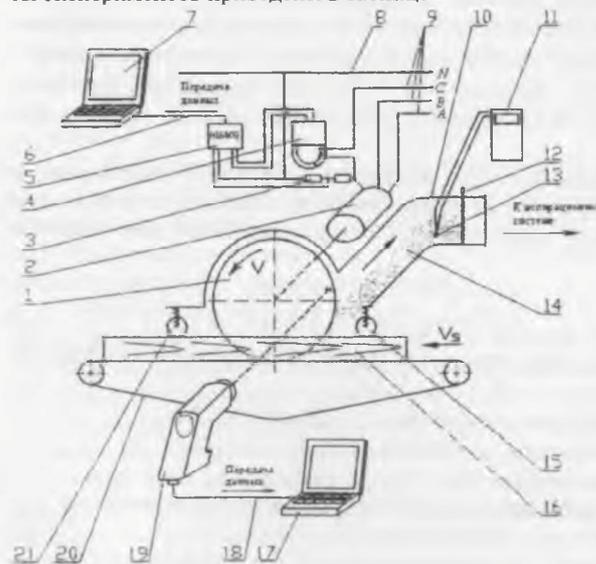


Рисунок 4 – Схема экспериментальной установки: 1 – пила круглая; 2 – электродвигатель механизма резания; 3 – резистивный делитель; 4 – клещи токовые измерительные модели АТА-2502 (датчик Холла); 5 – цифровой осциллограф многоканальный National Instruments 6008; 6, 18 – соединительный кабель; 7, 17 – персональный компьютер; 8 – нейтральный провод; 9 – фазные провода; 10 – патрубок; 11 – измеритель температуры CENTER 308; 12 – заслонка; 13 – термопара хромель-алюмелевая; 14 – стружка; 15, 21 – прижимные вальцы; 16 – заготовка; 19 – инфракрасный пирометр Mikron- M120 cf; 20 – гусеница механизма подачи

Электронный архив УГЛТУ

Таблица 1 – Результаты экспериментальных исследований температуры стружки и мощности на резание

№ опыта	Натуральные значения факторов		Кодированные значения факторов		Температура стружки ϑ_c , °C	Температура на окружности межзубовых впадин пилы ϑ_d , °C	Мощность на резание, $N_{рез}$, Вт
	$h \equiv x_1$, мм	$V_s \equiv x_2$, м/мин	x_1	x_2			
Пиление круглой плоской пилой по ГОСТ 980-80 с разведенным зубом							
1	27	15	-1	-1	38,1	28,5	2250
2	49	15	+1	-1	51,4	31,2	4930
3	27	30	-1	+1	38,1	29,0	3423
4	49	30	+1	+1	48,0	35,9	8032
Пиление дисковой пилой с твердосплавными пластинами по ГОСТ 9769-79							
1	27	15	-1	-1	36,4	28,4	1800
2	49	15	+1	-1	47,1	33,5	4443
3	27	30	-1	+1	36,7	32,8	3136
4	49	30	+1	+1	45,6	33,7	7145

Зависимость температуры стружки от изучаемых факторов h и V_s в кодированном виде приведена уравнениями регрессии для пил круглой плоской с разведенным зубом и твердосплавной соответственно

$$\hat{y} = 43,9 + 5,8x_1 - 0,85x_2 - 0,85x_1x_2; \quad (10)$$

$$\hat{y} = 41,45 + 4,9x_1 - 0,3x_2 - 0,45x_1x_2. \quad (11)$$

Как видно из уравнений (10) и (11), наибольшее влияние на выходную величину (температуру стружки при пилении) оказывает высота пропила (фактор x_1), имеющая наибольшее значение коэффициента. При увеличении высоты пропила (x_1) значение температуры стружки увеличивается. При увеличении скорости подачи (фактор x_2) температура стружки убывает, значение коэффициента при данном факторе отрицательное. Эффективность полученной регрессионной модели проверена вычислением отношения $F_u = s_e^2 / s_{um}^2$. Регрессионная модель считается эффективной если $F_u > (3...5)$. Фактические значения коэффициента $F_u = 16,2$ для плоской круглой пилы с разведенным зубом и $F_u = 40$ – твердосплавной, следовательно регрессионные модели эффективны.

В натуральных значениях факторов температура стружки в зависимости от значений факторов h и V_s определяется выражениями при пилении пилой круглой плоской с разведенным зубом и пилой дисковой с твердосплавными пластинами соответственно

$$\vartheta_c = 17,8 + 0,75h + 0,28V_s - 0,01hV_s; \quad (12)$$

$$\vartheta_c = 20,9 + 0,56h + 0,17V_s - 0,005hV_s. \quad (13)$$

Количество теплоты Q_c , кДж/с, отводимой стружкой, определяется по формуле

$$Q_c = C_p \rho V_c \Delta \vartheta_c \quad (14)$$

где C_p – теплоёмкость сухой древесины сосны, $C_p = 2,0$ кДж/(кг °C);

ρ – плотность древесины сосны, $\rho = 500$ кг/м³;

$\Delta \vartheta_c = (\vartheta_c - t_{окр})$ – нагрев стружки, °C;

V_c – секундный объём срезаемых стружек, м³/с, определяется по формуле

$$V_c = V_s b h / 60, \quad (15)$$

где V_s – скорость подачи, м/мин; b – ширина пропила, м; h – толщина заготовки, м.

Электронный архив УГЛТУ

Математическая модель доли мощности резания, идущей на нагрев стружки k в кодированном обозначении факторов описывается выражениями:

$$\text{для пилы с разведенным зубом } \hat{y} = 0,283 + 0,037x_1 + 0,024x_2, \quad (16)$$

$$\text{для твердосплавной пилы } \hat{y} = 0,277 + 0,028x_1 + 0,022x_2. \quad (17)$$

Анализируя уравнения (16) и (17), можно сделать вывод о том, что наибольшее влияние на выходную величину (долю мощности резания, идущей на нагрев стружки k) оказывает высота пропила (фактор x_1), имеющая наибольшее значение коэффициента. При увеличении высоты пропила (x_1) значение доли мощности резания, идущей на нагрев стружки k , увеличивается. При увеличении скорости подачи (фактор x_2) значение выходной величины также увеличивается, значение коэффициентов при обоих факторах положительное.

Регрессионные модели эффективны: для пилы с разведенным зубом $F_u = 7,6$, твердосплавной $F_u = 66,3$, что больше нормативного значения отношения $F_u > (3...5)$.

Зависимость коэффициента k от натуральных значений факторов описывается выражениями:

$$\text{для пилы с разведенным зубом } k = 0,084 + 3,33 \cdot 10^{-3} h + 3,2 \cdot 10^{-3} V_c, \quad (18)$$

$$\text{для твердосплавной пилы } k = 0,115 + 2,52 \cdot 10^{-3} h + 2,93 \cdot 10^{-3} V_c. \quad (19)$$

Мощность, затрачиваемая на нагрев заготовок при пилении, в абсолютном выражении составляет от 22 до 138 Вт в заданном диапазоне варьирования переменных факторов или 1,1 – 1,8 % от всей мощности на резание. С увеличением высоты пропила и скорости подачи количество теплоты, отводимой заготовкой, и доля мощности резания, идущая на нагрев заготовок, увеличиваются.

Таким образом, сток теплоты из зоны резания в стружку $q_1 = Q_c = 0,41...2,69$ кВт или от 21,2 % до 33,5 от всей мощности на резание. Сток теплоты в инструмент для прогрева лезвия зуба и корпуса инструмента $q_2 = Q_{pc} + Q_d$. На прогрев инструмента требуется 1...2 мин, эта часть теплоты имеет постоянное значение в установившемся тепловом режиме q_2 до 45%. Причем 80 % этой теплоты, поступающей в инструмент отводится через режущую часть, а 20 % – отводится диском. Таким образом, до 36% от теплоты эквивалентно выделяемой в зоне резания отводится режущей частью, и до 9% диском пилы. Сток теплоты в окружающую среду для установившегося теплового режима q_4 составляет от 20 до 30%.

5. Экспериментальные исследования теплоотдачи зубьев пил

Численные значения средних коэффициентов теплоотдачи зубьев пил α_{cp} определены экспериментально в зависимости от толщины зуба, скорости охлаждающего воздуха, мощности теплового источника. Исследования α_{cp} , Вт/(°С м²) проводились на экспериментальной установке (рисунок 5).

Как показано на схеме (рисунок 5) зубья 9 и 10 соприкасаются в вершинных частях. вторичная цепь трансформатора 16 оказывается замкнутой и по ней потечет ток. В месте соприкосновения зубьев электрическое сопротивление цепи максимально, и именно в этом месте происходит местный нагрев. Регулирование напряжения трансформатора, и как следствие температура нагрева, достигается изменением напряжения в его первичной обмотке ЛАТРОм 17. Измерение величины электрического тока осуществляется токовыми измерительными клещами 15 модели АТА-2502 (датчик Холла), в которых наводится ЭДС, пропорциональная величине электрического тока, поступающего на зубья пилы. Далее с токовых клещей ЭДС фиксируется вольт-

Электронный архив УГЛТУ

метром 18. Напряжение определяется также вольтметром 18. Мощность теплового источника определялась как произведение электрического тока и напряжения.

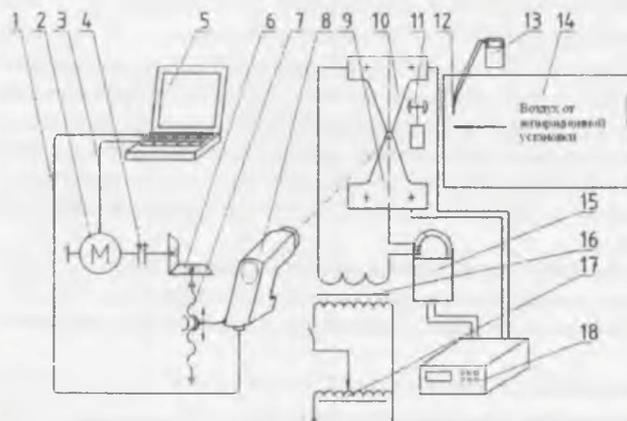


Рисунок 5 – Схема экспериментальной установки по определению среднего коэффициента теплоотдачи зубьев пил: 1, 3 – соединительный кабель; 2 – шаговый электродвигатель; 4 – жесткая муфта; 5 – персональный компьютер; 6 – коническая передача; 7 – винтовая передача; 8 – инфракрасный пирометр Mikron M120; 9, 10 – исследуемые зубья пилы (модели), верхний

и нижний соответственно; 11 – анемометр крыльчатый; 12 – термопара хромель-алюмелевая; 13 – измеритель температуры CENTER 308; 14 – патрубок от установки охлаждения; 15 – клещи токовые измерительные модели АТА-2502 (датчик Холла); 16 – трансформатор; 17 – лабораторный автотрансформатор (ЛАТР); 18 – вольтметр В7-65/2

Измерение температуры по высоте зуба в направлении биссектрисы угла заострения осуществлялось инфракрасным пирометром 8, который устанавливался в начальный момент времени у основания верхнего зуба 10. Шаговый двигатель 2 через жесткую муфту 4, коническую передачу 6 передает движение на винтовую передачу 7. Пирометр 8 перемещается на 1 шаг, и измерение температуры возобновляется.

Получение данных от пирометра 8, их сохранение в памяти ПК 5 и управление шаговым двигателем 2 осуществляется с помощью программы, составленной в системе программирования Delphi. Измерение температуры по высоте зубьев (температурное поле) осуществлялось при перемещении пирометра вертикально вниз от основания верхнего зуба 10 до основания нижнего 9. Температура охлаждающего воздуха регистрировалась при помощи термоэлектрического преобразователя 12 (хромель-алюмелевая термопара), который подключен к измерителю температуры 13 модели Center-308. Скорость охлаждающего воздуха контролировалась анемометром 11.

Все измерения осуществлялись в установившемся тепловом режиме, который определялся окончанием роста температуры в зоне контакта зубьев. По закону Ньютона–Рихмана количество теплоты, передаваемой конвективным теплообменом определялось из выражения

$$Q = 2\alpha_{cp} \sum_{i=0}^n F_i \Delta t_{cpi}, \quad (20)$$

где 2 – количество зубьев; α_{cp} – средний коэффициент теплоотдачи зуба пилы, Вт/(°С м²); F_i – площадь поверхности теплообмена рассматриваемого участка, м²; $\Delta t_{cpi} = (t_i - t_{окр})$ – средний температурный напор рассматриваемого i -ого участка, °С; $i = 0, 1 \dots n$ – порядковый номер участка; n – количество участков (рисунок 6).

Средний коэффициент теплоотдачи зуба α_{cp} определяется из формулы (20). Типовой график распределения температуры по высоте зуба приведен на рисунке 7. Кривые распределения температур по верхнему и нижнему зубу совпадают.

Электронный архив УГЛТУ

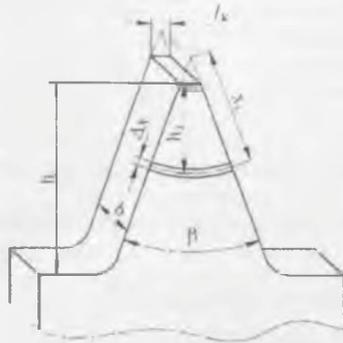


Рисунок 6 – Схема разбивки зуба на кольцевые участки

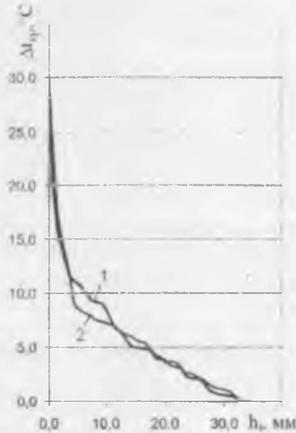


Рисунок 7 – График распределения температуры по высоте зуба: 1 – верхний зуб; 2 – нижний зуб (Опыт №1: $b = 2,2$ мм, $V = 25$ м/с, $Q = 10$ Вт)

По результатам эксперимента составлено уравнение регрессии, определены коэффициенты регрессии, проведена оценка значимости этих коэффициентов с помощью t-критерия Стьюдента. Они имеют вид

$$\bar{y} = 1143 + 27,1x_1 + 164x_2. \quad (21)$$

Наибольшее влияние на значение коэффициента теплоотдачи α_{cp} оказывает скорость охлаждающего воздуха V , имеющая наибольшее значение коэффициента при данном факторе. Мощность теплового источника Q (фактор x_3) в пределах изменения фактора (от 10 до 15 Вт) существенного влияния на выходную величину (коэффициент теплоотдачи α_{cp}) не оказывает. Коэффициент при данном факторе не является значимым. Проверка адекватности математической модели (уравнения регрессии) осуществляется с помощью F-критерия Фишера при принятом уровне значимости $q = 0,05$. Полученное уравнение регрессии адекватно результатам эксперимента, и может быть использовано. После перевода регрессионного уравнения из кодированного вида в натуральный получим уравнение

$$\alpha_{cp} = 538,7 + 38,7b + 13,1V. \quad (22)$$

6. Разработка режимов резания древесины в круглопильных станках по теплостойкости зубьев пил

Разработана методика определения скорости подачи при распиловке древесины в круглопильных станках на основе учета температурной устойчивости материала лезвий инструмента при продольном пилении с толщиной стружки $a_c \geq 0,1$ мм и $a_c < 0,1$ мм соответственно

$$V_{S(t)} = \frac{60(t_0)(z\alpha_c + K_2\alpha_p)}{a_n a_x a_b HK_1 \beta_n} \frac{a_p p b_1 z n}{10^3 \sin \theta_{cp}}; \quad V_{S(m)} = \frac{60(t_0)(z\alpha_c + K_2\alpha_p)}{a_n a_x a_b HK_1 \beta_n} \frac{(a_p - 0,8) p b_1 z n}{k_p b + \alpha, H}; \quad (23)$$

$$\text{при поперечном пилении } V_{S(t)} = \frac{2,6(t_0)(z\alpha_c + K_2\alpha_p)^{1,792}}{(a_n a_x a_b a_p HK_1 \beta_n)^{1,792} b^{0,39} (zn)^{0,116}}. \quad (24)$$

где $[t_0]$ – допускаемая температура нагрева лезвий (теплостойкость), °C (табл. 2);

Электронный архив УГЛТУ

a_n, a_w, a_b – коэффициенты, учитывающие породу древесины, влажность древесины и вид пиления соответственно;

$a_p, a_{b, \varphi}$ – коэффициенты, учитывающие влияние затупления и влияние угла резания и угла боковой заточки на силу резания при поперечном пилении соответственно;

p – удельная касательная сила резания по задней грани, Н/мм;

b, b_1 – ширина пропила и ширина стружки соответственно, мм;

H – высота пропила, мм;

θ_{cp} – средний кинематический угол встречи, град.;

k, k_μ – касательное давление на стружку, Н/мм² (для толщины стружки $a_c \geq 0,1$ мм и для толщины стружки $a_c < 0,1$ мм соответственно);

α_T – коэффициент интенсивности трения стружки о стенки пропила и прессования её во впадине зуба, Н/мм².

Таблица 2 – Теплостойкость инструментальных материалов, °С

Стали		Твердые сплавы			Эльбор	Алмаз
углеродистые и легированные	быстрорежущие	вольфрамкобальтовые	безвольфрамовые	минералокерамические		
160 – 400	550 – 700	800 – 1000	800 – 1000	1200	1400	700 – 800

Технико-экономический эффект от внедрения новых режимов пиления круглыми пилами по теплостойкости материала лезвий инструмента достигается за счет: уменьшения аварийного расхода круглых пил; от повышения производительности за счет оптимизации режимов пиления, сокращения времени на переустановку инструмента, уменьшения внеплановых простоев круглопильных станков; снижения затрат на подготовку инструмента.

Основные результаты и выводы исследования:

1. Разработан графоаналитический метод расчета температуры резания и распределения температур по высоте зуба. Распределение относительных температур по высоте зуба не зависит от абсолютных значений этих температур.

2. На основе решения дифференциального уравнения теплопроводности зуба круглой пилы, с применением программного пакета Mathematica v. 4.2., установлен закон распределения температуры по его высоте при известной температуре резания, а также аналитическая зависимость для определения температуры резания. Характер изменения относительной температуры по высоте зуба, полученный аналитическим расчетом и построенный по результатам графоаналитического метода хорошо согласуются.

3. Рассмотрено распределение относительной температуры от конструктивных и технологических параметров $\lambda, \rho, \alpha, \beta$ и b в пределах их возможных изменений. Для снижения температуры лезвия нужно работать с большими значениями b, λ , периферии диска – большими значениями α и меньшими значениями λ .

4. Установлено, что тепло, поступающее в инструмент при резании, распределяется следующим образом: 80 % тепла отводится через режущую часть, 20 % – отводится диском. Таким образом, количество теплоты, отводимой из зоны резания через инструмент в 5 раз превышает количество теплоты, расходуемой на нагрев диска. При известных значениях коэффициента количества тепла, расходуемого на нагрев диска $K = 0,01 \dots 0,09$, доля теплоты, отводимая из зоны резания через инструмент составит $K_1 = 0,05 \dots 0,45$ от теплоты эквивалентно выделяемой в зоне резания.

5. Экспериментально определено количество теплоты, отводимой стружкой при продольной распиловке древесины круглыми пилами. Её количество в зависимости технологических условий и конструктивных параметров инструмента колеблется

Электронный архив УГЛТУ

от 21,2 % до 33,5 % от общего количества теплоты, выделяемой в процессе резания. В проводимых экспериментах мощность, затрачиваемая на нагрев стружки при пилении, в абсолютном выражении составляет от 0,41 до 2,69 кВт.

6. Получено уравнение теплового баланса процесса пиления древесины круглыми пилами с учетом научно обоснованных исследований по стокам тепла: сток теплоты из зоны резания в стружку $q_1 = 21,2 \dots 33,5\%$ от теплоты, выделяемой в зоне резания; сток теплоты в инструмент для прогрева лезвия зуба и корпуса инструмента q_2 до 45 %; сток теплоты в обрабатываемую заготовку $q_3 = 1,1 \dots 1,8\%$ в заданном диапазоне варьирования переменных факторов.

7. Экспериментально определены значения коэффициентов теплоотдачи зубьев пил, и в пределах исследованных факторов они изменяются от 914 до 1384 Вт/(°С м²). Коэффициенты теплоотдачи режущей части пилы на порядок выше, чем коэффициенты теплоотдачи дисков пил на спокойном воздухе (от 80 до 360 Вт/(°С м²)).

8. Разработаны «Методические рекомендации по расчету режимов резания древесины в круглопильных станках по теплостойкости материала инструмента», которые утверждены ОАО «Уральский научно-исследовательский институт переработки древесины». Максимально допустимая скорость подачи выбирается как наименьшая из рассчитанных по 5-ти ограничениям: по заполнению впадин зубьев; по шероховатости поверхности распиловки; по мощности привода механизма резания; по динамической устойчивости пилы; по теплостойкости материала зубьев пил. Критерий теплостойкости, при расчете скорости подачи, становится ограничивающим при увеличении высоты пропила, и уменьшении числа зубьев.

9. Расчеты технико-экономической эффективности в рассматриваемых примерах, подтверждают целесообразность внедрения предложенных режимов, где в качестве ограничивающего критерия используется теплостойкость материала лезвий пилы. Годовой экономический эффект от внедрения предлагаемых мероприятий может составить на 1 станок – 534 тыс. руб.

Основное содержание диссертации изложено в следующих публикациях: статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Щепочкин С.В. К оценке тепловых потоков и средних температур зуба круглой пилы / В.К. Пашков, С.В. Щепочкин // Изв. вузов. Лесной журнал. 2006. – №1. С. 58 – 61.
2. Щепочкин С.В. Температурное поле зуба круглой пилы / В.К. Пашков, С.В. Щепочкин // Изв. вузов Лесной журнал. 2008. №3. С. 75 – 81.
3. Щепочкин С.В. Вопросы совершенствования структуры маркировки круглых пил / В.К. Пашков, С.В. Щепочкин // Деревообрабатывающая пром-сть. 2009. №1. С.18 – 20.
4. Щепочкин С.В. О тепловом балансе процесса резания древесины круглыми пилами / В.К. Пашков, С.В. Щепочкин // Изв. вузов Лесной журнал. 2009. №3. С. 101 – 107.

публикации в других изданиях

5. Щепочкин С.В. Графоаналитический метод расчета температурных полей дисков круглых плоских пил / С.В. Щепочкин, В.К. Пашков // Материалы научно-технической конференции студентов и аспирантов. Екатеринбург: УГЛТУ, 2002. С. 108 – 109.
6. Щепочкин С.В. Аналитический метод расчета температурного поля зуба круглой пилы / В.К. Пашков, С.В. Щепочкин // Сборник материалов международной научно-технической конференции «Социально-экономические и экологические проблемы лесного комплекса» – Екатеринбург: УГЛТУ, 2003. С. 128-131.
7. Щепочкин С.В. Исследование тепловых полей зубьев круглых пил / В.К. Пашков, С.В. Щепочкин // Технические науки: Сборник аннотаций научно-исследовательских работ студентов вузов. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2004. С. 15.
8. Щепочкин С.В. О количестве поступающего тепла по зонам диска круглой пилы / А.Ю. Катков, С.В. Щепочкин, В.К. Пашков // Материалы научно-технической конференции студентов и аспирантов. Екатеринбург: УГЛТУ, 2004. С. 49-50.

A - 1705

Электронный архив УГЛТУ

9. Щепочкин С.В. Расчет среднеинтегральных коэффициентов теплоотдачи для дисков круглых пил / С.В. Щепочкин, В.К. Пашков // Материалы научно-технической конференции студентов и аспирантов. – Екатеринбург: УГЛТУ, 2004. С. 67.
10. Щепочкин С.В. Теоретическая оценка эмпирических выражений распределения температуры / В.К. Пашков, С.В. Щепочкин // Научные труды: Сб. Вып. 3 / УГЛТУ – Екатеринбург, 2004. С. 36 – 39.
11. Щепочкин С.В. К вопросу о тепловых полях по зонам диска круглой пилы / С.В. Щепочкин // Социально-экономические и экологические проблемы лесного комплекса: Тез. докл. международ. науч.-техн. конф. / Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2005. С. 140.
12. Щепочкин С.В. К оценке средних температур по высоте зуба круглой пилы / В.К. Пашков, С.В. Щепочкин // Актуальные проблемы лесного комплекса: Сборник научных трудов по итогам международной научно-технической конференции. Вып. 11. Брянск: БГИТА, 2005. С. 135-139.
13. Щепочкин С.В. Измерительная система для регистрации температурных полей зуба пилы / В.К. Пашков, С.В. Щепочкин // Сборник научных трудов факультета МТД. Вып. 1 / Екатеринбург: УГЛТУ, 2005. С. 116 – 119.
14. Щепочкин С.В. О теплоотдаче диска пилы при резании / В.К. Пашков, С.В. Щепочкин // Сб. научных трудов факультета МТД. Вып. 1 / УГЛТУ, 2005. С. 119 – 126.
15. Щепочкин С.В. Определение температурных перепадов плоских круглых пил / В.К. Пашков, С.В. Щепочкин // Актуальные проблемы лесного комплекса: Сборник научных трудов по итогам международной научно-технической конференции. Вып. 14. Брянск: БГИТА, 2006. С. 147-152.
16. Щепочкин С.В. О конвективном теплообмене режущей части пилы при резании / В.К. Пашков, С.В. Щепочкин // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века: Труды международного евразийского симпозиума. Екатеринбург, 2006. С. 138-143.
17. Щепочкин С.В. Об оценке температуры резания при пилении круглыми пилами / С.В. Щепочкин // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века: Труды международного евразийского симпозиума. Екатеринбург, 2006. С. 143 – 146.
18. Щепочкин С.В. Влияние конструктивных и технологических параметров на температурное поле зуба круглой пилы / В.К. Пашков, С.В. Щепочкин // Лесной и химический комплексы – проблемы и решения. Сборник статей по материалам Всероссийской научно-практической конференции. Том 2 – Красноярск: СибГТУ, 2006. С. 199 – 204.
19. Щепочкин С.В. К вопросу определения скорости подачи в круглопильных станках с учетом теплостойкости инструмента / С.В. Щепочкин, А.А. Лимонов // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века. Труды II международного евразийского симпозиума. Екатеринбург, 2007. С.259 – 261.
20. Щепочкин С.В. Термическое сопротивление дисков круглых пил / В.К. Пашков, С.В. Щепочкин // Социально-экономические и экологические проблемы лесного комплекса в рамках концепции 2020: материалы VII междунар. науч.-техн. конф. Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т. 2009. Ч.2. С. 21 – 24.
21. Щепочкин С.В. Экспериментальные исследования коэффициентов теплоотдачи режущей части круглых пил / С.В. Щепочкин, В.К. Пашков // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века. Труды VI международного евразийского симпозиума. Екатеринбург, 2011. С. 324 – 331.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью, заверенной гербовой печатью, просим направлять по адресу: 620100, г. Екатеринбург, Сибирский тракт, 37, Ученому секретарю диссертационного совета Куцубиной Н.В.

Подписано в печать 09.04.12 Объем 1 п.л. Заказ № 646 Тираж 100.
620100, Екатеринбург, Сибирский тракт, 37.
Уральский государственный лесотехнический университет
Отдел оперативной полиграфии.