

КОВАЛЕВ Леонид Александрович

**ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ПИЛЕНИЯ ДРЕВЕСИНЫ
КРУГЛЫМИ ПИЛАМИ**

Специальность 05.21.05 — Древесиноведение, технология и оборудование
деревопереработки

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Архангельск - 2011

Работа выполнена в Северном (Арктическом) федеральном университете им. М.В.Ломоносова (САФУ)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Прокофьев Геннадий Федорович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
профессор Малыгин Владимир Иванович

кандидат технических наук, доцент
Шейнов Анатолий Иванович

Ведущая организация: ОАО «Научно-исследовательское
проектно-технологическое бюро «Онега»
164509 г. Северодвинск, Архангельской
обл., пр. Машиностроителей, 12

Защита состоится 21 декабря 2011 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д212.008.01 при Северном (Арктическом) федеральном университете (163002, г.Архангельск, наб. Северной Двины, 17, ауд. 1220).

Отзывы на автореферат диссертации в двух экземплярах с заверенными подписями просим высылать по адресу: 163002, г.Архангельск, наб. Северной Двины, 17, Северный (Арктический) федеральный университет, главный учебный корпус, ученому секретарю диссертационного совета Д212.008.01 Земцовскому А.Е.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке С(А)ФУ.

Автореферат разослан «__» ноября 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



Земцовский А.Е.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Перед лесопильно-деревообрабатывающей промышленностью стоит задача перехода от экстенсивного пути развития к интенсивному, при котором обеспечивается в возрастающих объемах получение пилопродукции высокого потребительского качества при минимальных расходах сырья, материалов, энергии и человеческих ресурсов. Это может быть достигнуто при совершенствовании методов и режимов подготовки и эксплуатации дереворежущих инструментов и станков, модернизации и создания нового деревообрабатывающего оборудования.

Из всего парка деревообрабатывающего оборудования, применяемого в лесопильно-деревообрабатывающей промышленности, круглопильные станки составляют более 30%. Повышение интенсификации их работы оказывает существенное влияние на технико-экономические показатели работы лесопильно-деревообрабатывающих предприятий.

Эффективность пиления древесины на круглопильных станках в значительной степени зависит от точности пиления, так как она влияет на производительность круглопильных станков, объемный выход пиломатериалов и энергозатраты. Отсюда следует, что работа, направленная на изучение точности пиления древесины круглыми пилами и определение направлений ее повышения является **актуальной**.

Цель и задачи исследований

Цель работы – разработать аналитический метод оценки точности пиления древесины круглыми пилами и дать рекомендации по повышению точности размеров пиломатериалов, получаемых на круглопильных станках.

Для достижения поставленной цели определены следующие задачи исследований.

- 1) Выполнить теоретические и экспериментальные исследования начальной жесткости круглых пил.
- 2) Выполнить теоретические исследования устойчивости круглых пил.
- 3) Разработать аналитический метод оценки точности пиления древесины на круглопильных станках.
- 4) Проверить аналитический метод оценки точности пиления древесины круглыми пилами в условиях близких к производственным.
- 5) Дать рекомендации по повышению точности пиления древесины круглыми пилами.

Научная новизна результатов исследований

1. Разработан аналитический метод определения точности пиления древесины круглыми пилами.
2. Разработаны математические модели жесткости и устойчивости круглых пил.
3. Выполнена проверка аналитического метода определения точности пиления древесины круглыми пилами.

Методы исследований:

1. При выборе направления исследования, оценке точности пиления древесины и расчета сил резания применялись методы теории резания древесины.
2. При теоретических исследованиях жесткости и устойчивости круглых пил использовались методы теории упругости.
3. Расчеты выполнялись с использованием программных комплексов Mathcad, Matlab и ANSYS (МКЭ).
4. Полученные аналитические зависимости проверялись с использованием метода конечных элементов (программы APM Structure 3D и ANSYS)
5. Обработка экспериментальных данных проводилась с использованием методов математической статистики и программного комплекса Mathcad.

Обоснованность и достоверность результатов подтверждается:

1. Аргументированностью принятых допущений при теоретических исследованиях.
2. Использованием современных методов фундаментальной науки при теоретических исследованиях.
3. Выполнением значительного объема экспериментальных исследований.
4. Сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований.

На защиту выносятся:

1. Аналитический метод определения точности пиления древесины круглыми пилами.
2. Результаты теоретических исследований жесткости и устойчивости круглых пил.
3. Результаты экспериментальных исследований точности пиления древесины круглыми пилами.

Практическая значимость работы

Результаты исследований могут быть использованы:

1. При оценке значимости работ, направленных на повышения точности пиления древесины круглыми пилами.
2. При разработке режимов пиления древесины круглыми пилами.
3. При модернизации действующих круглопильных станков.
4. При создании круглопильных станков новых конструкций.

Апробация работы

Основные положения диссертации и материалы исследований докладывались на научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава Севмашвуза (г.Северодвинск) и АГТУ (г.Архангельск) в 2006-2010 г.

Публикации

По материалам диссертации опубликовано пять печатных работ, в том числе две по списку ВАК.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, выводов и рекомендаций, списка литературы из 86 наименований. Общий объем работы 128 страниц машинописного текста, включая 49 рисунков и 17 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности темы работы; сформулированы ее цель и задачи исследований; отмечены основные положения, выносимые на защиту; обоснована научная новизна, отмечены значимость результатов исследований для теории и практики.

В первой главе приведены основные сведения об особенностях пиления древесины круглыми пилами, дан анализ современного состояния изучения точности пиления древесины на круглопильных станках и путей ее повышения.

Вопросы подготовки круглых пил и рекомендации по выбору режимов пиления древесины на круглопильных станках рассмотрены в работах А.Л. Бершадского, Ф.М.Манжоса, А.Э.Грубе, М.А.Дешевого, В.В.Амалицкого, Ю.М.Стахиева, Н.К.Якунина, П.П.Есипова, Р.А.Лейхтлинга, Р.В.Двоскина и др.

Исследованиями установлено, что точность пиления древесины на круглопильных станках зависит от сил, действующих на пилу в процессе пиления (составляющих сил сопротивления резанию P и Q) и способности пил сопротивляться действию этих сил (жесткости j_p и устойчивости $P_{кр}$).

В работах шведского исследователя Б. Тунелла отмечается, что точность пиления на лесопильных станках зависит в основном от следующих факторов: сил, действующих на пилу; устойчивости пил и точности работы механизма подачи. Автор отмечает, что взаимосвязь скорости подачи и точности пиления в принципе одинакова, независимо от типа станка (будь то лесопильная рама, ленточнопильный или круглопильный станок), параметров пил, породы древесины и др., но, естественно, абсолютные значения будут различны.

В работе Г.Ф.Прокофьева установлено, что жесткость рамных пил изменяется в процессе резания. Эта жесткость в дальнейшем была названа рабочей. Была получена формула, показывающая зависимость рабочей жесткости j_p от начальной жесткости j_n , сил резания P и устойчивости пил, характеризуемой критической силой $P_{кр}$.

Формула имеет вид:

$$j_p = j_n \cdot (1 - P/P_{кр}) . \quad (1)$$

Путем незначительных преобразований было получено условие точного пиления рамными пилами. Оно имеет вид:

$$y_{\max} = \frac{Q}{j_n \cdot (1 - P/P_{кр})} \leq [y], \quad (2)$$

где Q - боковая сила, действующая на пилу в процессе пиления, H .

Предварительные исследования показали, что изменение рабочей жесткости круглой пилы от величины силы P , а, следовательно, и от режимов пиления имеет тот же характер, что и у рамных и ленточных пил, то есть условие точного пиления древесины круглыми пилами может быть также представлено выражением (1).

Одной из причин низкой точности пиления древесины круглыми пилами и потери ими устойчивости является температурный перепад по радиусу диска. Уменьшение или ликвидацию температурного перепада можно осуществить за счет охлаждения периферии пилы или нагрева ее средней части. Основные направления повышения термоустойчивости круглых пил и выравниванию температурных напряжений по радиусу диска посвящены работы А.Э.Грубе, В.И.Санева, Г.С.Гуркина, Г.А.Жодзишко, Г.И.Юзефовича, Ю.М.Стахиева, М.М.Твердыниной, И.А.Грачева, В.Г.Бодалева, А.С.Красикова, А.А.Настенко, зарубежных ученых – Л.Глиера, Г.С.Калицина, Е.Барца, С.Д.Модта, Г.Палига, М.Маккензи, Б.Тунелла и др.

Рекомендации по использованию термопластического метода создания начальных напряжений в круглых пилах даны в работах А.А.Настенко, Ю.М.Стахиева, Хакенберга.

В работах ИФ ЦНИИМЭ [В.В.Жгун] и ЦНИИМОД [Ю.М.Стахийев] рассматривалась возможность создания начальных напряжений в круглых пилах методами автофреттирования. Сущность автофреттирования заключается в том, что пила разгоняется до такой скорости, при которой возникает пластическая деформация материала пилы в ее центральной зоне, с последующей выдержкой и затем снижением скорости до нуля.

Большое практическое применение находят круглые пилы с радиальными прорезями по периферии, которые выполняют роль температурных компенсаторов. Ряд конструкций круглых пил с прорезями, выполняющими роль температурных компенсаторов, приведен в работе Ю.М.Стахиева.

При пилении на древесину действуют со стороны зубьев пилы силы резания, а на резец пилы действуют силы обратные по величине и направлению. Аналитические зависимости сил, действующих на резец при резании древесины рассмотрены в работах С.А.Воскресенского, М.А.Дешевого, Е.Г.Ивановского, В.И.Любченко, В.И.Санева, И.К.Кучерова, В.К.Пашкова, Ю.М.Стахиева, Н.К.Якунина. В 1958 ... 1960 г.г. проф. А.Л.Бершадским были вскрыты общие закономерности для всех процессов резания древесины, названные им общим законом резания.

Во второй главе исследуется собственная j_c и начальная j_n жесткости круглой пилы. Собственная жесткость j_c - жесткость пилы не имеющая начального напряженного состояния от вальцевания или проковки и направляющих, определяемая размерами пилы, механическими характеристиками материала и технологией изготовления; начальная жесткость j_n - жесткость пилы, имеющая натяжение от начальных напряжений или имеющая направляющие; рабочая жесткость j_p - жесткость

пилы во время работы, испытывающая действие сил сопротивления резанию, инерционных сил и температурного перепада.

Исследованиям собственной жесткости j_c и начальной жесткости j_n посвящено достаточно большое число работ как в нашей стране [В.В.Васильев, А.Э.Грубе, В.В.Соловьев, Ю.М.Стахийев, С.В.Ершов] так и за рубежом. Исследования носили в основном экспериментальный характер.

В этой главе получена математическая модель для расчета собственной жесткости круглых пил j_c . Круглую пилу считаем круглой тонкой пластиной постоянной толщины (диск) с круглым отверстием в центре (посадочным отверстием).

$$\text{Жесткость определяется выражением: } j = Q/w, \quad (3)$$

где Q - боковая сила, действующая на пилу в процессе пиления, Н., w - прогиб пилы в плоскости наименьшей жесткости под действием этой силы, мм.

Общее уравнение для изогнутой пластины (рис. 1) имеет вид:

$$D \cdot \Delta \Delta w(r, \theta) = q(r, \theta), \quad (4)$$

где $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2}{\partial \theta^2}$ - оператор Лапласа, $D = Es^3/12(1-\nu^2)$ - цилиндрическая жесткость; E и ν - модуль Юнга и коэффициент Пуассона материала пластины соответственно; s - толщина пластины; $q(r, \theta)$ - распределенная нагрузка, перпендикулярная плоскости пластины.

Задача об изгибе пластины сводится к решению дифференциального уравнения (4) с определенными граничными условиями. Распределенная нагрузка $q(r, \theta)$ в случае сосредоточенной поперечной силы Q принимает вид: $q(r, \theta) = Q \cdot \delta(r - r_0, \theta - \theta_0)$, где (r_0, θ_0) - координаты точки в которой приложена сосредоточенная сила, $\delta(r - r_0, \theta - \theta_0)$ - дельта-функция Дирака.

Прогиб пластины (диска пилы) $w(r, \theta)$ определялся энергетическим методом. Если система находится в состоянии устойчивого равновесия, то полная энергия ее принимает минимальное из всех возможных значений.

Полная потенциальная энергия системы определяется как разность потенциальной энергии изгиба и работы внешних сил: $I = U - W_1$. Работа внешних сил W_1 это работа поперечной силы Q . $W_1 = w(r_0, \theta_0) \cdot Q$.

$$U = \iint \left\{ \frac{D}{2} \left[\left(\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} \right)^2 - 2 \cdot (1 - \nu) \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} \left(\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} \right) + 2 \cdot (1 - \nu) \cdot \left(\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial r \partial \theta} - \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial w}{\partial \theta} \right)^2 \right] \right\} r dr d\theta$$

В этой главе получена математическая модель для расчета собственной жесткости j_c круглых пил с учетом направляющих. Получены формулы для

расчета начальной жесткости j_n при одной, двух и произвольном числе пар направляющих (табл. 2).

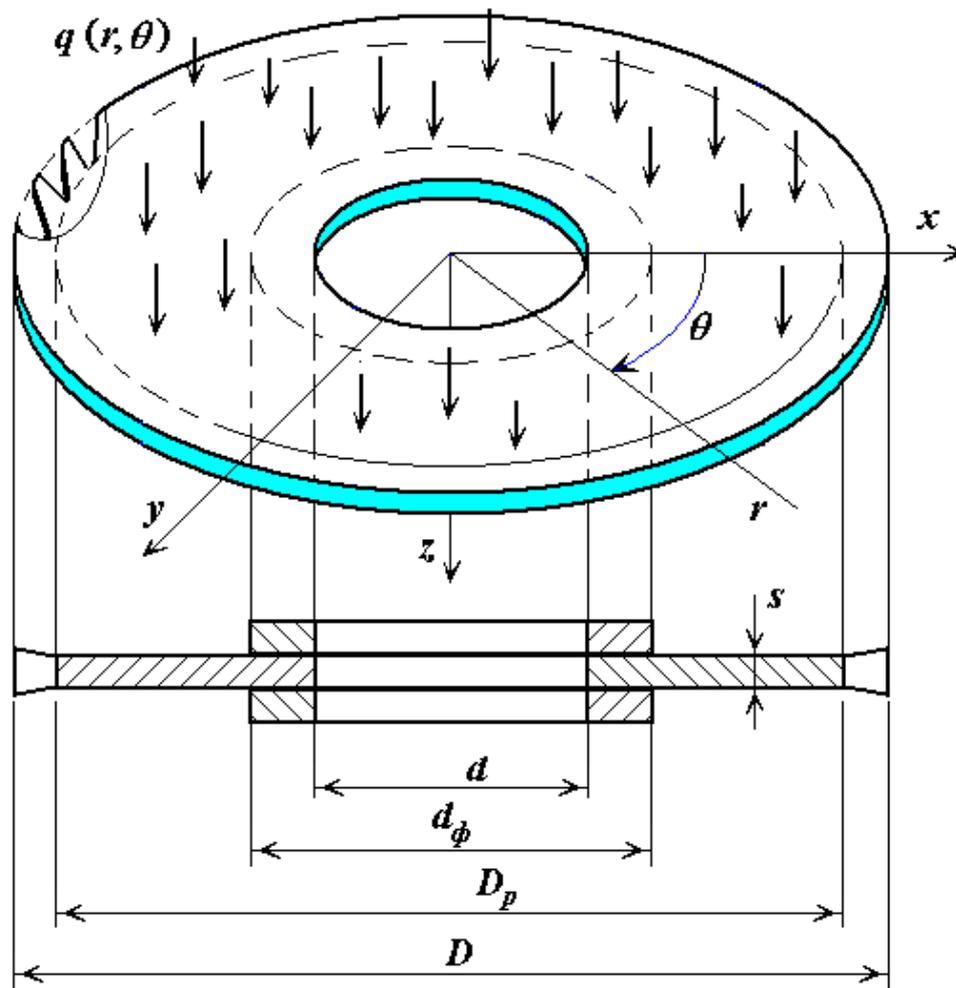


Рис. 1. Расчетная модель круглой пилы: d – диаметр посадочного отверстия; d_ϕ – диаметр зажимных фланцев; D_p - диаметр пилы по линии межзубовых впадин; D - внешний диаметр пилы; s - толщина пилы

Таблица 1.
Значения прогиба w ($Q=1$ Н) и начальной собственной жесткости j_c пилы в зависимости от ее диаметра D и толщины s ($d_\phi = 125$ мм)

D , мм	D_p	s , мм	w , мм	j_c , Н/мм
400	374	1,0	0,226	4,4
400	374	1,4	0,083	12,0
400	374	2,2	0,021	47,6
500	467	1,0	0,446	2,2
500	467	1,4	0,163	6,1
500	467	2,2	0,042	23,8

В этой главе получена математическая модель для расчета начальной жесткости j_n круглых пил с учетом их начального напряженного состояния от проковки или вальцевания.

В случае проковки (вальцевания) напряженно-деформированное состояние пластины осесимметрично: $\sigma_r = \sigma_r(r)$, $\sigma_\theta = \sigma_\theta(r)$ и уравнение для изогнутой пластины имеет вид:

$$D \cdot \Delta \Delta w(r, \theta) = q(r, \theta) + S_r \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + S_\theta \cdot \left(\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} \right), \quad (5)$$

где S_r , S_θ - радиальные и кольцевые (тангенциальные) усилия в пластине отнесенные к единице длины соответственно. $S_r = \sigma_r \cdot s$, $S_\theta = \sigma_\theta \cdot s$. Напряжения σ_r и σ_θ определялись путем решения плоской задачи теории упругости. Напряженно-деформированное состояние рассматривалось для случая $\varepsilon_{r0} = \varepsilon_{\theta0} = \varepsilon_z$. Для пластины прокованной (провальцованной) по кольцу $r_1 \leq r \leq r_2$ величина ε_z задавались ступенчатой функцией:

$$\varepsilon_z(r) = \varepsilon_0 \cdot H2(r, r_1, r_2) = \varepsilon_0 \cdot (H(r - r_1) - H(r - r_2)),$$

где $H(r)$ - ступенчатая функция Хевисайда.

Прогиб пластины $w(r, \theta)$ так же определялся энергетическим методом.

Для проверки допущений, принятых при теоретических исследованиях выполнены экспериментальные исследования. Экспериментальная установка состояла из основания, к которому с помощью кронштейнов крепились: пила в зажимных фланцах, направляющая, устройство натяжения, создающее поперечную силу и индикаторная стойка. Для проведения исследований была взята круглая пила, имеющая следующие основные параметры: наружный диаметр $D=500$ мм; $D_p=456$ мм; толщина диска пилы $s=2,2$ мм; диаметр зажимных фланцев $d_\phi=125$ мм. Все опыты состояли из 3 серий по 4 опыта в каждой.

Таблица 2

Прогибы пилы w , мм, полученные экспериментально (числитель) и теоретически (знаменатель) в зависимости от боковой силы

Наличие направляющих и величина зазора Δ	Величина боковой силы Q , Н			
	6,87	11,78	16,69	21,60
Отсутствие направляющих	0,27/0,25	0,45/0,43	0,63/0,61	0,82/0,78
Контактные направляющие $\Delta=0$ мм	0,20/0,19	0,34/0,33	0,52/0,47	0,65/0,61
Направляющие с зазором $\Delta=0,5$ мм	0,25/0,25	0,44/0,43	0,57/0,58	0,73/0,72

В третьей главе дана методика расчета жесткости круглых пил при условии, что температура постоянна по толщине пилы и не зависит от полярного угла θ , но меняется в зависимости от расстояния r между точкой и центром пластины $T(r)$. Температура вдоль радиуса диска задавалась

степенной функцией: $T(r) = T_a + \Delta T \cdot (r - a/b - a)^4$, где $T(r)$ - температура в точке, отстоящей от центра диска на расстоянии r ; T_a, T_b - температура на внутреннем и внешнем контуре диска соответственно; $\Delta T = T_b - T_a$ - перепад температур ($a = d_\phi/2, b = D_p/2$).

Невращающийся диск пилы зажат в центральной части зажимными шайбами. Для заданного распределения температуры решена плоская задача теории упругости и определены функции $\sigma_r(r)$ и $\sigma_\theta(r)$. Уравнение для изогнутой пластины принимает вид (5).

Как и в главе 2 прогиб пластины $w(r, \theta)$ определяется энергетическим методом. Полная потенциальная энергия системы определяется как разность потенциальной энергии изгиба и работы внешних сил и внутренних осевых сил: $I = U - W_1 - W_2$. Работа внешних сил W_1 это работа поперечной силы Q

Работа внутренних осевых сил W_2 берется в форме Брайана:

$$W_2 = \frac{1}{2} \cdot \iint \left[S_r \cdot \left(\frac{\partial w}{\partial r} \right)^2 + S_\theta \cdot \left(\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial w}{\partial \theta} \right)^2 \right] r dr d\theta,$$

W_2 зависит от S_r и S_θ , а те от температурного перепада ΔT .

Результаты расчетов показаны на рис. 2.

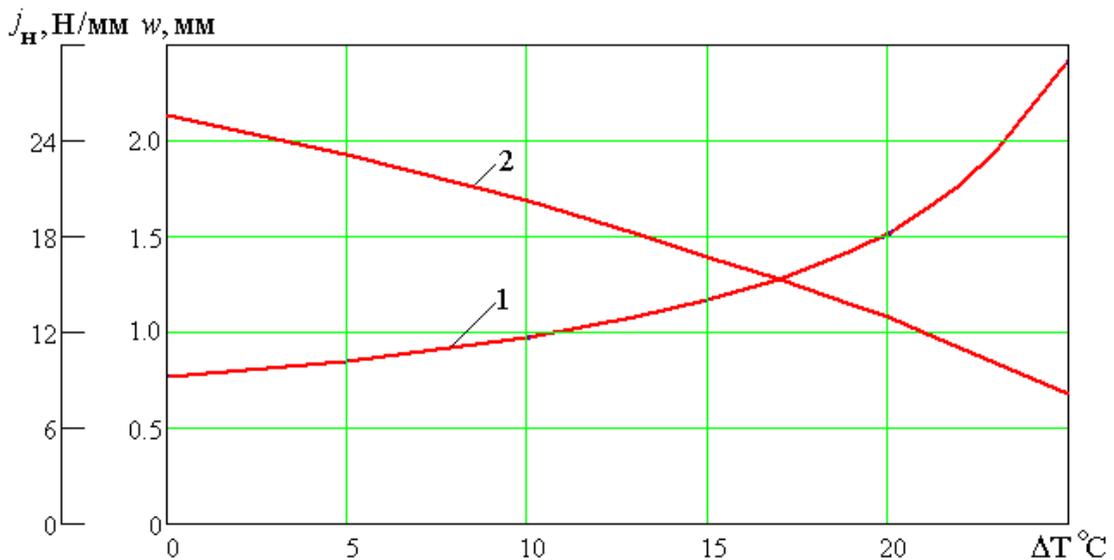


Рис. 2. Зависимость прогиба w (1) и начальной жесткости j_n (2) пилы от температурного перепада ΔT при боковой силе $Q = 19.62$ Н и следующих параметрах пилы: $D = 500$ мм, $D_p = 467$ мм, $s = 2,2$ мм, $d_\phi = 125$ мм

Критические температуры нагревания в диске круглой пилы, защемленном в центральной части зажимными шайбами, определяются в предположении, что в диске имеются температурные напряжения $\sigma_r(r)$ и $\sigma_\theta(r)$. Критическому состоянию (потере плоской формы равновесия) соответствует условие равенства потенциальной энергии изгиба и работы

внешних сил: $U-W=0$. Критическое значение температурного перепада $\Delta T_{кр}$ определяем энергетическим методом. Результаты расчетов приведены в табл. 3.

Таблица 3

Зависимость критического значения температурного перепада $\Delta T_{кр}$ от диаметра пилы D ; диаметра зажимных фланцев d_ϕ и толщины пилы s .

D , мм	D_p , мм	d_ϕ , мм	s , мм	$\Delta T_{кр}$, °C
400	374	125	1,4	21,2
			1,8	43,2
			2,2	65,0
450	421	125	1,4	9,7
			1,8	23,3
			2,2	41,9
500	467	125	1,4	4,2
			1,8	14,1
			2,2	26,3

В четвертой главе теоретически и экспериментально исследовано влияние радиальной силы P и касательной силы R на рабочую жесткость j_p круглой пилы. Уравнение для изогнутой пластины имеет вид:

$$D \cdot \Delta \Delta w(r, \theta) = \frac{Q}{D} \cdot \delta(r - r_0, \theta - \theta_0) + \\ + \frac{1}{D} \cdot \left(S_r \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + S_\theta \cdot \left(\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} \right) + 2 \cdot T_{r\theta} \cdot \left(\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial r \partial \theta} - \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial w}{\partial \theta} \right) \right)$$

где S_r , S_θ , $T_{r\theta}$ - радиальные, кольцевые (тангенциальные) и касательные усилия в пластине отнесенные к единице длины соответственно. $S_r = \sigma_r \cdot s$, $S_\theta = \sigma_\theta \cdot s$. $T_{r\theta} = \tau \cdot s$.

Аналитическое решение данной задачи представляет значительные трудности так как задача не симметрична. Расчеты выполнялись с помощью метода конечных элементов (МКЭ). Расчетная схема круглой пилы приведена на рис. 3. Определялись прогиб пилы w и ее рабочая жесткость j_p в зависимости от величины радиальной силы сопротивления резанию P , одновременно определялось и изменение низшей частоты собственных колебаний f_c . Результаты расчетов приведены в табл. 4.

Теоретические исследования показали, что изменение рабочей жесткости круглой пилы от величины силы P , а, следовательно, и от режимов пиления имеет тот же характер, что и у рамных и ленточных пил, то есть условие точного пиления древесины круглыми пилами может быть также представлено выражением (2).

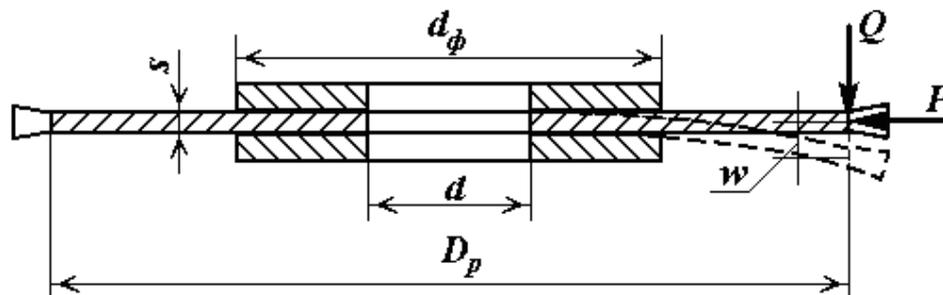


Рис. 3. Расчетная схема круглой пилы для определения $j_p = f(P)$
методом конечных элементов

Таблица 4

Зависимость прогиба w круглой пилы в точке приложения силы, рабочей жесткости j_p и частоты собственных колебаний f_c ($D = 500$ мм, $D_p = 467$ мм, $s = 2,2$ мм, $d_\phi = 125$ мм, $Q = 19.62$ Н) от величины радиальной силы P

P , Н	w , мм	j_p , Н/мм	f_c , Гц
0	0,740	26,51	59,8
500	0,847	23,16	58,1
1000	0,992	19,78	55,5
1500	1,191	16,47	52,0
2000	1,511	12,98	47,5
2500	2,057	9,54	41,6
3000	3,080	6,37	33,6
3500	6,172	3,18	20,9

Установлено, что при увеличении силы P частота собственных колебаний уменьшается и принципиально возможно при снижении частоты собственных колебаний до частоты вынужденных колебаний явление резонанса. В тоже время расчеты показывают, что при таком увеличении силы P рабочая жесткость снижается настолько, что необходимая точность пиления не обеспечивается. При пиления древесины с режимами, обеспечивающими требуемую точность пиления пила находится, как правило, вне резонансной зоны, и это объясняет возможность использования статических методов расчета точности пиления при динамических нагрузках.

Для того чтобы использовать условие точного пиления древесины круглыми пилами (2) или вычислить значение рабочей жесткости j_p необходимо знать значение критической радиальной силы $P_{кр}$ для данной пилы. При определении критической радиальной силы $P_{кр}$ с помощью МКЭ решалась задача по определению частоты собственных колебаний. При достижении силы своего критического значения низшая частота собственных колебаний пилы превращается в ноль. Результаты расчета критической радиальной силы $P_{кр}$ для различных пил приведены в табл. 5.

Для учета влияния касательной силы R на рабочую жесткость j_p круглой пилы была рассмотрена пила с наружным диаметром $D=500$ мм,

защемленная в центральной части фланцами. К кромке пилы была приложена боковая сила $Q = 19.62$ Н. В плоскости пилы были приложены касательная сила R и радиальная сила P . Расчетная схема круглой пилы приведена на рис. 3. Полученные значения w и j_p приведены в табл. 6.

Таблица 5

Зависимость критической радиальной силы $P_{кр}$ от диаметра пилы D ; диаметра зажимных фланцев d_ϕ и толщины пилы s

D , мм	D_p , мм	d_ϕ , мм	s , мм	$P_{кр}$, кН (ANSYS)	$P_{кр}$, кН [по Ю.М.Стахиеву]
400	374	125	1,4	1,39	1,45
			1,8	2,96	3,09
			2,2	5,40	5,59
450	421	125	1,4	1,14	1,21
			1,8	2,41	2,57
			2,2	4,44	4,73
500	467	125	1,4	0,97	1,04
			1,8	2,08	2,22
			2,2	3,79	4,09

Таблица 6

Зависимость прогиба w , мм кромки круглой пилы (в числителе) и ее рабочей жесткости j_p , Н/мм (в знаменателе) от величины касательной силы R , Н при разных значениях радиальной силы P , Н ($D = 500$ мм, $D_p = 467$ мм, $s = 2,2$ мм, $d_\phi = 125$ мм, $Q = 19,62$ Н).

Величина силы R , Н	Величина силы P , Н			
	0	500	1000	1500
0	0,752/26,60	0,859/23,28	1,003/19,94	1,209/16,54
500	0,753/26,56	0,862/23,20	1,006/19,88	1,214/16,47
1000	0,757/26,42	0,869/23,01	1,016/19,68	1,230/16,26
1500	0,764/26,18	0,881/22,70	1,033/19,36	1,256/15,92
2000	0,773/25,87	0,900/22,22	1,057/18,92	1,296/15,43

Влияние касательной составляющей силы сопротивления резанию R на рабочую жесткость пилы мало и ею можно пренебречь при оценке точности пиления.

Для проверки характера зависимости рабочей жесткости круглой пилы от начальной жесткости и критической силы были проведены эксперименты. Общий вид экспериментальной установки показан на рис. 4.

Экспериментальная установка состояла из основания к которому с помощью кронштейнов крепились: пила в зажимных фланцах, направляющая, устройство натяжения, создающие поперечную силу, устройство натяжения, создающие радиальную силу и индикаторная стойка. Для проведения исследований была взята круглая пила, имеющая следующие

основные параметры: наружный диаметр $D=500$ мм; $D_p=456$ мм; толщина диска пилы $s=2,2$ мм; диаметр зажимных фланцев $d_\phi=125$ мм. Все опыты состояли из 1 серии, серия состояла из 5 опытов. Исследовалось влияние радиальной силы на прогиб пилы. Сила принимала значения: 70,1 Н; 270 Н; 429 Н; 690 Н; 950 Н. Оценочным показателем являлся прогиб пилы в точке приложения боковой силы.



Рис. 4. Общий вид экспериментальной установки для исследования рабочей жесткости круглой пилы

Результаты экспериментальных данных приведены в табл. 7. По данным табл. 4 и 7 на рис. 5 приведены графики, показывающие зависимость прогибов w и рабочей жесткости j_p от силы P , полученные в результате теоретических и экспериментальных исследований.

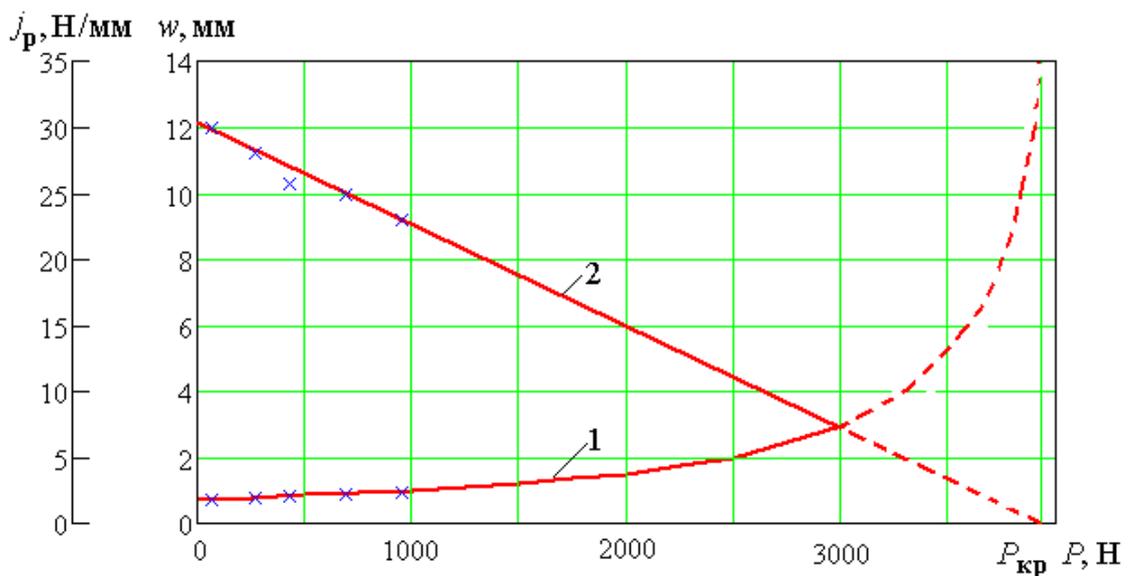


Рис. 5. Зависимость прогиба w (1) и рабочей жесткости j_p (2) от величины силы P

Влияние радиальной силы P на прогибы пилы w , мм (в числителе) и рабочую жесткость j_p , Н/мм (в знаменателе) по данным экспериментов и теоретических исследований ($D = 500$ мм, $D_p = 456$ мм, $s = 2,2$ мм, $d_\phi = 125$ мм, $Q = 21.6$ Н)

Вид исследований	радиальная сила P , Н				
	70,1	270	429	690	950
теоретическое	0,73/29,8	0,79/28,3	0,84/27,1	0,91/25,0	0,99/23,0
экспериментальное	0,72/30,0	0,77/28,1	0,84/25,7	0,87/24,8	0,94/23,0

Экспериментальные исследования рабочей жесткости круглой пилы показали справедливость допущений, при теоретических исследованиях. Разница значений j_p полученных теоретически и экспериментально не превышала 6%.

В пятой главе выполнены экспериментальные исследования для проверки закономерностей точности пиления древесины, полученных теоретическим путем, и справедливости допущений, принятых при теоретических исследованиях.

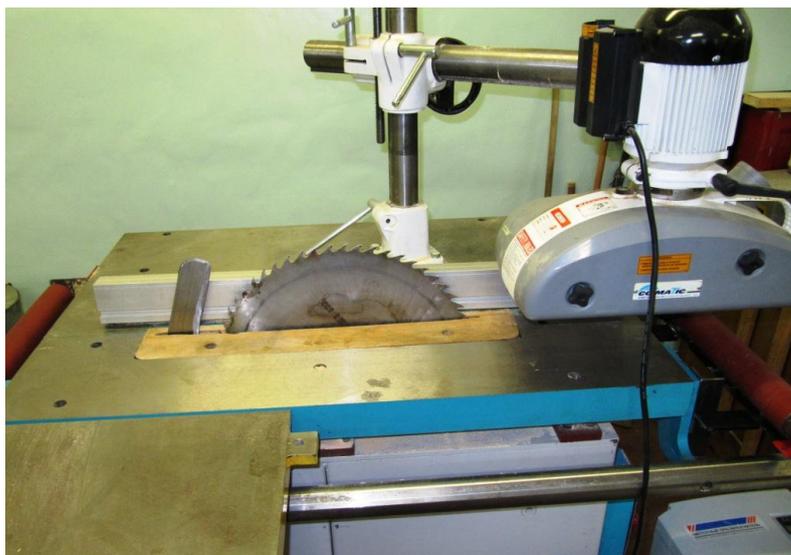


Рис. 6. Общий вид экспериментальной установки для проверки закономерностей точности пиления древесины

Общий вид экспериментальной установки показан на рис. 6. Основу экспериментальной установки составлял круглопильный станок модели 6Ц-2ИТ производства ООО «Техснаб» (г.Иваново). Для регулирования скорости подачи заготовки, на станину станка 6Ц-2ИТ был смонтирован автоподатчик Comatech MX38. Движение подачи задавалось напрямую заготовке. Для получения необходимой частоты вращения пилы электродвигатель станка 6Ц-2ИТ был подключен через частотный преобразователь модели EI-9011 компании «Веспер». Для проведения исследований в качестве режущего инструмента была взята круглая пила (для продольной распиловки древесины) исполнения 1 (с ломаной задней кромкой зубьев), имеющей следующие основные параметры: наружный

диаметр $D=500$ мм, диаметр посадочного отверстия $d=50$ мм, толщина диска пилы $s=2,2$ мм, число зубьев $z=60$. Скорость резания была принята постоянной, равной $v=50$ м/сек.

Основной задачей опытов являлась проверка допущений, принятых при теоретических исследованиях и аналитического метода оценки точности пиления древесины круглыми пилами. Все опыты состояли из двух серий.

Оценочным показателем точности пиления является разнотолщинность отпиливаемого материала (досок), оцениваемая среднеквадратическим отклонением S . Одновременно замерялась мощность $N_{рез}$, затрачиваемая на резание.

Радиальная сила резания и мощность рассчитывались с использованием методики проф. А.Л. Бершадского и по эмпирическим формулам проф. В.И.Санева.

Таблица 8

Результаты исследований точности пиления древесины круглой пилой

Высота пропила	h	мм	50	75	100	75			
Скорость подачи	u	м/сек	7,0			3,5	5,0	7,0	10
Номер опыта			1	2	3	4	5	6	7
Результаты экспериментов									
Среднее значение толщины досок	\bar{y}	мм	18,97	18,99	19,03	19,00	18,95	18,99	19,03
Среднеквадратичное отклонение	S	мм	0,153	0,184	0,281	0,139	0,157	0,184	0,248
Максимальное отклонение пилы	$3 \cdot S$	мм	0,459	0,552	0,843	0,417	0,471	0,552	0,744
Мощность резания	$N_{рез}$	кВт	2,2	3,0	4,1	2,2	2,6	3,0	4,0
Результаты теоретических исследований									
Максимальное отклонение пилы	w_{max}	мм	0.112	0.189	0.271	0.110	0.146	0.189	0.250
Мощность резания [Бершадский]	$N_{рез}$	кВт	1,58	2,66	3,80	1,55	2,05	2,66	3,62
Боковая сила	Q	Н	2.53	4.25	6.07	2.48	3.27	4.25	5.62

Методы расчета боковой силы Q для круглых пил не разработаны [Ю.М.Стахийев]. В зависимости от условий пиления суммарная боковая сила Q может составлять 10 ... 20 Н [Ю.М.Стахийев]. Средние значения боковой силы составляют 8% от значения касательной силы и увеличиваются с увеличением радиуса закругления режущих кромок зубьев [В.И.Санев, Обработка древесины круглыми пилами].

Прогиб кромки пилы, определен по формуле (1), а значения приведены в табл. 8. Максимальное отклонение кромки пилы полученное экспериментально равно $y_{max}^{экс} = 3 \cdot S$, а значения приведены в табл. 8.

По данным табл. 8 построены графики зависимости максимального отклонения пилы от высоты пропила (рис. 7) и от скорости подачи (рис. 8). Графики содержат данные полученные экспериментально и теоретически. Результаты теоретических исследований получены при помощи аналитического метода.

Эксперименты показали одинаковый характер зависимости точности пиления древесины круглыми пилами полученный аналитическим методом и экспериментально. В месте с тем теоретические данные отклонений пилы оказались заниженными по сравнению с экспериментальными. Это объясняется тем, что отсутствует надежный аналитический метод расчета боковых сил в зависимости от точности подготовки пил, установки и подачи распиливаемого материала и режимов пиления. Боковые силы, действующие при пиление древесины круглыми пилами требуют в дальнейшем самостоятельного изучения.

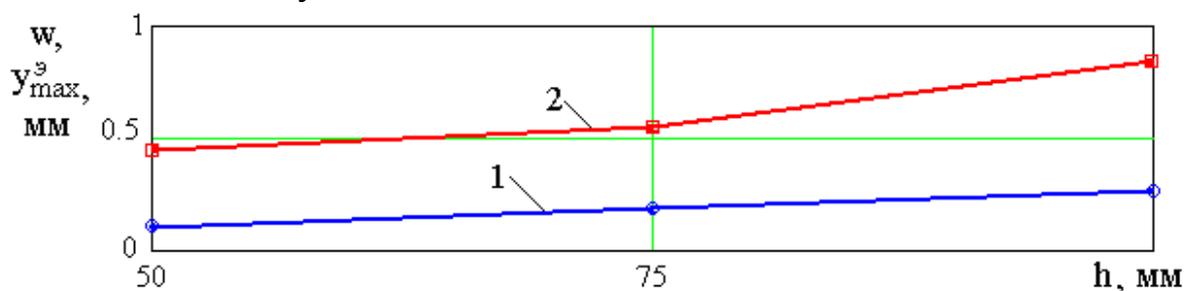


Рис. 7. Зависимость максимального отклонения пилы от высоты пропила ($u=7$ м/мин): 1 - w ; 2 - $y_{\max}^{\text{экс}} = 3 \cdot S$.

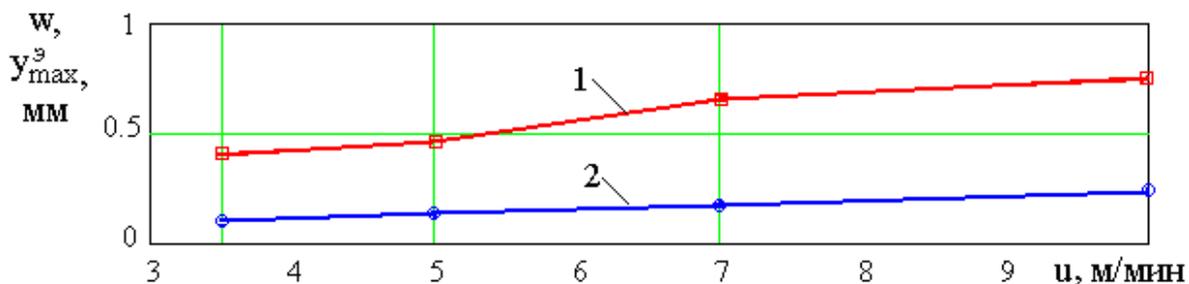


Рис. 8. Зависимость максимального отклонения пилы от скорости подачи ($h=75$ мм): 1 - w ; 2 - $y_{\max}^{\text{экс}} = 3 \cdot S$.

ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Производительность круглопильных станков в значительной степени зависит от правильного выбора режимов пиления – скорости резания и скорости подачи.
2. Точность пиления древесины зависит от сил, действующих на пилу в процессе пиления (R , P , Q) и способности пилы противостоять этим силам: жесткости (j) и устойчивости ($P_{кр}$).
3. Отсутствуют простые и надежные математические модели жесткости и устойчивости круглых пил и программы для их расчета.

4. Получены математические модели для расчета собственной жесткости j_c круглых пил и начальной жесткости j_n круглых пил с учетом их начального напряженного состояния от проковки или вальцевания и от наличия направляющих.
5. Экспериментальные исследования показали надежность разработанных моделей расчета изгибной жесткости круглых пил. Разность между теоретическими и экспериментальными данными не превышает 8%.
6. Исследования показали большое влияние на жесткость круглых пил наличия направляющих и величины зазора между пилой и направляющими. При изменении зазора Δ от 0,5 мм до нуля начальная жесткость возросла на 18%.
7. Разработанные математические модели для расчета жесткости круглых пил позволяют оценить мероприятия направленные на повышение жесткости пил, определить направления совершенствования круглопильных станков, разработать режимы пиления древесины на круглопильных станках с ограничением по точности.
8. Дана методика и разработана программа расчета жесткости круглых пил в зависимости от величины температурного перепада ΔT по радиусу диска.
9. Расчеты показывают большое влияние температурного перепада ΔT на начальную жесткость круглых пил j_n . При $\Delta T = 25^\circ\text{C}$ жесткость круглой пилы ($D=500$ мм; $D_p=467$ мм; $d_\phi=125$ мм; $s=2,2$ мм) уменьшилась по сравнению с пилой, имеющей $\Delta T = 0^\circ\text{C}$ на 65% (почти в три раза).
10. Полученные материалы позволяют учитывать ΔT при расчетах начальной жесткости пил j_n и точности пиления, а так же оценить эффективность мероприятий по снижению ΔT .
11. При определенных $\Delta T = \Delta T_{кр}$ может произойти потеря пилой устойчивости плоской формы равновесия. Приведенные зависимости позволяют определить $\Delta T_{кр}$ в зависимости от размеров пил и начальных напряжений от проковки (вальцевания)
12. Теоретические исследования показали большое влияние радиальной силы P на рабочую жесткость j_p круглой пилы. Характер изменения рабочей жесткости j_p от силы P такой же, как и у рамных и ленточных пил, то есть $j_p = j_n \cdot (1 - P/P_{кр})$, где j_n - начальная жесткость пилы, Н/мм; $P_{кр}$ - критическая сила, Н.
13. Влияние касательной составляющей силы сопротивления резанию R на рабочую жесткость пилы мало и ею можно пренебречь при оценке точности пиления.

14. Экспериментальные исследования рабочей жесткости круглой пилы показали справедливость допущений, принятых при теоретических исследованиях и адекватность полученных математических моделей.
15. Зависимость максимального отклонения пилы от высоты пропила и скорости подачи по данным экспериментов качественно совпадает с такой же зависимостью полученной путем расчетов. Количественная разница объясняется отсутствием точных значений для расчета боковых сил.
16. Работа показала необходимость в дальнейшем выполнить самостоятельную работу по определению величины боковых сил, действующих при пилении древесины круглыми пилами в зависимости от точности подготовки пил, установки в станок, подачи распиливаемого материала и режимов пиления.

Основные результаты диссертации опубликованы:

В изданиях по перечню ВАК:

1. Прокофьев Г.Ф. Определение аналитическим методом точности пиления древесины круглыми пилами [Текст]/ Г.Ф. Прокофьев, И.И. Иванкин, Л.А.Ковалев // Лесной журнал, 2009. — №1. — с.78-83. — (Изв. Высш. Учеб. заведений).
2. Шубный П.Б. Определение возможности использования аэростатических направляющих для охлаждения круглых пил при пилении древесины [Текст]/ П.Б. Шубный, М.В. Дербин, Л.А.Ковалев // Лесной журнал, 2011. — №5. — с.69-72. — (Изв. Высш. Учеб. заведений).

В прочих изданиях:

3. Ковалев Л.А. Влияние касательной составляющей силы сопротивления резанию на точность пиления материалов круглыми пилами [Текст]/ Л.А.Ковалев // Вопросы технологии, эффективности производства и надежности. Сборник докладов. Выпуск №22. Северодвинск, 2009 — с.176-179.
4. Ковалев Л.А. Экспериментальные исследования рабочей жесткости круглой пилы [Текст]/ Л.А.Ковалев, П.Б.Шубный // Наука – Северному региону. Сборник научных статей. Архангельск, 2011 – с. 207-211.
5. Ковалев Л.А. Экспериментальные исследования начальной жесткости круглой пилы [Текст]/ Л.А.Ковалев, П.Б.Шубный // Наука – Северному региону. Сборник научных статей. Архангельск, 2011 – с. 224-229.

Подписано в печать XX.XX.2011. Формат 60x84/16.

Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 257.

Отпечатано в типографии ФГАОУ ВПО «Северного (Арктического)
федерального университета»

163002, г. Архангельск, наб. Северной Двины, 17