

Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

УДК 674.023

**Гаранин Виктор Николаевич**

**ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ ФРЕЗАМИ С ИЗМЕНЯЕМЫМИ УГЛАМИ  
РЕЗАНИЯ НА ДУГЕ КОНТАКТА**

05.21.05 – древесиноведение, технология и оборудование деревопереработки

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

Минск 2011

Работа выполнена на кафедре деревообрабатывающих станков и инструментов учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет»

Научный руководитель

**Гришкевич Александр Александрович**,  
кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой деревообрабатывающих станков и инструментов учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет»

Официальные оппоненты:

**Алифанов Александр Викторович**,  
доктор технических наук, профессор учреждения образования «Барановичский государственный университет», кафедра оборудования и автоматизации производства;

**Шетько Сергей Васильевич**,  
кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии и дизайна изделий из древесины учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет»

Оппонирующая организация

Государственное научное учреждение «Физико-технический институт НАН Беларуси»

Защита состоится « 15 » марта 2011 г. в 14.00 часов на заседании совета по защите диссертаций Д.02.08.06 в учреждении образования «Белорусский государственный технологический университет» по адресу: 220006, г. Минск, ул. Свердлова 13а, ауд. 240, корп. 4. Тел.: (017) 227-83-41, факс: (017) 227-62-17, электронная почта: root@bstu.unibel.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет».

Автореферат разослан «11» февраля 2011 г.

Ученый секретарь совета  
по защите диссертаций  
кандидат технических наук



Мохов С.П.

## ВВЕДЕНИЕ

Резание древесины и древесных материалов с использованием лезвийного инструмента является основным видом обработки при изготовлении мебели, столярных изделий, получении щепы и в других производствах. Механическая обработка древесины и древесных материалов методом фрезерования занимает в этих технологических процессах одно из ведущих мест. Обеспечение качества обработки древесины и производительности оборудования при применении существующих технологий связано с необходимостью использования разнообразного дереворежущего инструмента.

Древесина, как изотропный материал природного происхождения, имеет различные физико-механические свойства, зависящие не только от породы и влажности, но и от условий ее произрастания. В связи с этим при взаимодействии с древесиной инструмент испытывает неодинаковые условия нагружения, что и вызывает необходимость использования фрезерного инструмента с различными параметрами, в том числе и с различными углами резания.

Использование одного типа фрез с определенными фиксированными углами резания для различных технологических операций обработки древесины приводит либо к низкой работоспособности инструмента, либо к чрезмерному росту затрат энергии на деформирование стружки.

На деревообрабатывающих предприятиях, использующих в производстве различные породы древесины, часто пренебрегают выбором необходимого фрезерного инструмента, применяя имеющийся в наличии. Это, в свою очередь, ведет к значительным затратам энергии на резание и снижению работоспособности фрез.

Согласно прогнозным показателям, только концерн «Беллесбумпром» к 2015 году планирует увеличить производство мебели и строительных изделий в полтора раза и достигнуть суммы валовой продукции 1,2 трлн. руб. в ценах 2010 года, что, несомненно, приведет к росту затрат энергии в целом, в том числе и необоснованным затратам энергии.

Таким образом, разработка методов снижения энергозатрат, а также повышения работоспособности при эксплуатации сложного и дорогого дереворежущего инструмента является актуальной задачей и требует проведения теоретических и экспериментальных научных исследований в этой области.

Одним из эффективных направлений решения вышепредставленных задач для различных технологических процессов обработки древесины является придание инструменту возможности изменения углов резания с одних режимов на другие, что позволяет снизить затраты энергии на деформацию удаляемого слоя и повысить ресурс работы инструмента.

Исследование фрезерного инструмента ведущих зарубежных фирм-производителей дереворежущего инструмента «Leitz», «Leuco» (Германия), «Freud» (Италия), «Faba» (Польша) и других показало наличие возможности изменять угловые параметры инструмента, но исключительно после остановки оборудования и соответствующей переналадки фрез. Это связано с дополни-

тельными затратами времени, а также с необходимостью использовать специальную технологическую оснастку и высококвалифицированный обслуживающий персонал.

Анализ конструкций инструмента и задачи по энергосбережению предопределили задачи и содержание научных исследований, направленных на разработку инструмента, в котором изменение углов резания может производиться непосредственно в процессе обработки древесины. Новизна работы заключается в использовании инструмента с изменяемыми на дуге контакта углами резания при фрезеровании древесины с целью снижения энергетических затрат.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Связь работы с крупными научными программами, темами.** Данные исследования соответствуют основным направлениям научной деятельности УО «БГТУ» на 2006–2010 гг., утвержденным Министерством образования Республики Беларусь 14 декабря 2005 года (раздел 5 «Разработка научных основ ресурсо-, энергосберегающих и экологически чистых технологий, оборудования и специальных транспортных систем, обеспечивающих глубокую переработку древесного сырья») и сформированным на основе перечня приоритетных направлений фундаментальных и прикладных исследований Республики Беларусь на 2006–2010 гг., утвержденного Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 17.05.2005 г. № 512 (раздел 1 «Энергообеспечение, нетрадиционные и возобновляемые источники энергии, энергосбережение и эффективное использование энергии; создание энерго- и ресурсоэкономичных архитектурно-конструктивных систем нового поколения»).

Работа выполнялась на кафедре деревообрабатывающих станков и инструментов УО «БГТУ» в соответствии с утвержденным планом Республиканской госбюджетной темы ГБ 8-06 «Совершенствование процессов механической обработки древесины и древесных материалов», Минск 2006–2010 гг.

**Цель и задачи исследования.** Цель работы – разработать способ обработки древесины фрезами, обеспечивающими снижение энергетических затрат за счет уменьшения угла резания на дуге контакта при установленном качестве поверхности детали.

Для достижения поставленной цели требовалось решить следующие задачи:

1) обосновать возможность снижения энергии на резание при формировании стружки фрезерным дереворежущим инструментом за счет изменения углов резания в процессе обработки древесины;

2) разработать и обосновать модель фрезерного инструмента, позволяющую реализовать поэтапное формирование стружки с использованием изменяемых углов резания;

3) провести экспериментальные исследования фрезерного инструмента с изменяемыми углами резания для оценки его работоспособности и влияния технологических параметров (скорость главного движения, скорость подачи, при-



пуск на обработку) на энергетические характеристики процесса фрезерования древесины;

4) разработать методику проектирования фрезерного инструмента с изменяемыми углами резания с учетом требуемых технологических режимов.

**Объект и предмет исследования.** Объектом исследования является процесс фрезерования древесины. Предметом исследований – дереворежущий фрезерный инструмент с изменяемыми углами резания.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Поэтапное формирование стружки фрезерным инструментом за счет изменения углов резания на дуге контакта, обеспечивающее снижение затрат энергии при обработке древесины.

2. Модели инструмента, обеспечивающие изменение угла резания на дуге контакта, а также модели, устанавливающие зависимость угла поворота сектора, несущего нож, и момента сил резания от времени их действия, которые определяют условия работоспособности конструкции фрезы с изменяемыми углами резания на дуге контакта, работающей в режиме вынужденных колебаний ножа.

3. Результаты экспериментальных исследований по определению удельной работы резания древесины в зависимости от технологических параметров (скорость главного движения, скорость подачи, припуск на обработку), доказывающие снижение затрат энергии при использовании конструкции фрезерного инструмента с изменяемыми углами резания.

4. Методика проектирования фрезерного дереворежущего инструмента, заключающаяся в нахождении параметров конструкции фрезы в зависимости от технологических режимов резания древесины, которая позволяет определять изменения углов резания на дуге контакта для обеспечения снижения затрат энергии на фрезерование.

**Личный вклад соискателя.** Автор диссертации принимал непосредственное участие в постановке цели и задач исследований, проведении теоретических и экспериментальных исследований, обработке и анализе полученных данных, написании статей, тезисов, докладов, разработке патентов на изобретение, во внедрении результатов исследований в учебный процесс, в проведении промышленных испытаний инструмента с вынужденными колебаниями ножей. Все основные результаты, приводимые в диссертационной работе, получены автором лично.

**Апробация результатов диссертации.** Основные положения диссертации доложены и обсуждены на научно-технических конференциях, научных семинарах и выставках: 69–74-й научно-технических конференциях (г. Минск, БГТУ, 2005–2010 гг.), Международной научно-технической конференции «Ресурсо- и энергосберегающие технологии и оборудование, экологически безопасные технологии» (г. Минск, БГТУ, 2005), Международной научно-практической конференции «Устойчивое развитие лесов и рациональное использование лесных ресурсов» (г. Минск, БГТУ, 2005), Всероссийской научно-технической конференции «Наука – производство – технологии – экология»

(г. Киров, 2006), III Всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Научное творчество молодежи – лесному комплексу России» (г. Екатеринбург, УГЛТУ, 2007), Международной научно-технической конференции «Weinig InTech 2008» (г. Таубербишофсхайм, Германия, 2008).

**Опубликованность результатов диссертации.** По теме диссертации опубликовано 7 научных работ объемом 2,57 авторского листа, в том числе 6 статей в рецензируемых журналах, включенных в перечень ВАК по специальности, 1 статья в зарубежном периодическом издании; 3 статьи в сборниках материалов конференций. Подана 1 заявка на патент.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, библиографического списка и приложений. Работа изложена на 117 страницах, содержит 59 рисунков и 24 таблицы. Библиографический список содержит 97 наименований на 7 страницах. Пять приложений представлены на 13 страницах.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**В первой главе** проведены аналитические исследования процессов резания древесины фрезерным инструментом. Анализ исследований по резанию древесины отечественных и зарубежных ученых: профессоров А.Л. Бершадского, В.В. Амалицкого, В.И. Санева, С.А. Воскресенского, Е.Г. Ивановского, а также И.Т. Глебова, Н.А. Кряжева, П. Коха, А.В. Моисеева, E. Kivimaa, N.C. Franz и др. – показал, что для обработки древесины с различными физико-механическими свойствами необходимо устанавливать режимы, определяющие наиболее эффективные условия взаимодействия лезвия ножа с обрабатываемым материалом. Выбор режимов осуществляется как технологическими (подача на резец, скорость резания и др.), так и конструктивными способами, прежде всего выбором углов резания.

Проведенные ранее исследования в области фрезерования древесины показывают, что процесс образования стружки состоит из нескольких этапов взаимодействия ножа с обрабатываемым материалом. Причем разделение этапов происходит по критерию формирования стружки.

Применяемый на практике инструмент не позволяет создать благоприятные условия работы лезвию ножа на нескольких этапах срезания стружки. Обработка всегда будет происходить со значительными затратами энергии либо в начальном этапе (при использовании малых углов резания), что приводит к снижению ударной стойкости ножей, либо на последнем этапе (при использовании больших углов резания), что связано с деформацией стружки и повышением нагрузки на инструмент.

В существующих методиках расчета режимов резания древесины используют постоянные углы резания на дуге контакта в зависимости от свойств обрабатываемого материала. Полученные опытным путем рекомендуемые угловые параметры резания обеспечивают усреднение сил резания на нож инстру-

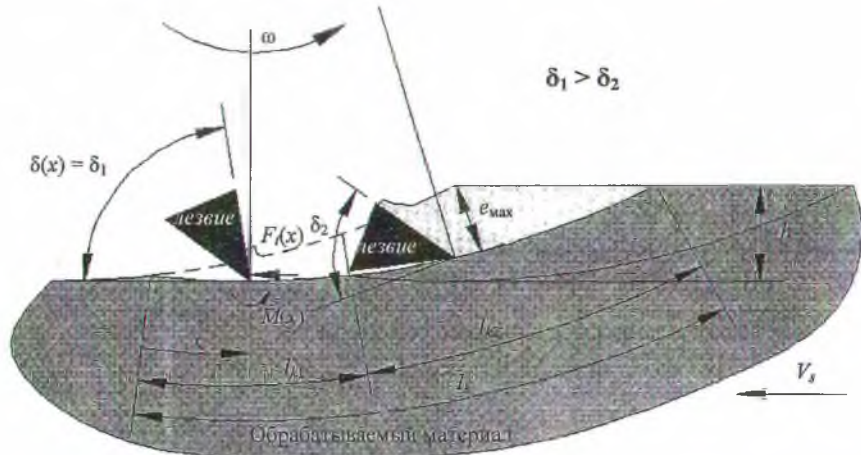
мента, что допускает воздействие на инструмент повышенных усилий на различных этапах обработки.

В результате проведенного анализа сформулирована цель исследований и задачи для ее реализации, заключающиеся в возможности снижения затрат энергии при фрезеровании древесины за счет использования изменения углов резания на дуге контакта.

Во второй главе представлена разработанная автором схема двухэтапного стружкообразования при изменении углов резания на дуге контакта (рисунок 1). Разделение дуги контакта на два этапа происходит по критерию формирования обработанной поверхности.

На первом этапе формируется обработанная поверхность. Здесь в основном образуется микростружка, и поэтому с целью улучшения концентрации напряжений сжатия и снижения энергии на трение материала о заднюю поверхность лезвия ножа в этой зоне следует увеличить углы резания.

На втором этапе происходит отделение и удаление снимаемого слоя. Здесь нет необходимости обеспечивать качество поверхности резания. Главное на этом участке – снизить затраты энергии на деформацию стружки. Это можно обеспечить путем уменьшения углов резания на этапе взаимодействия ножа с обрабатываемым материалом.



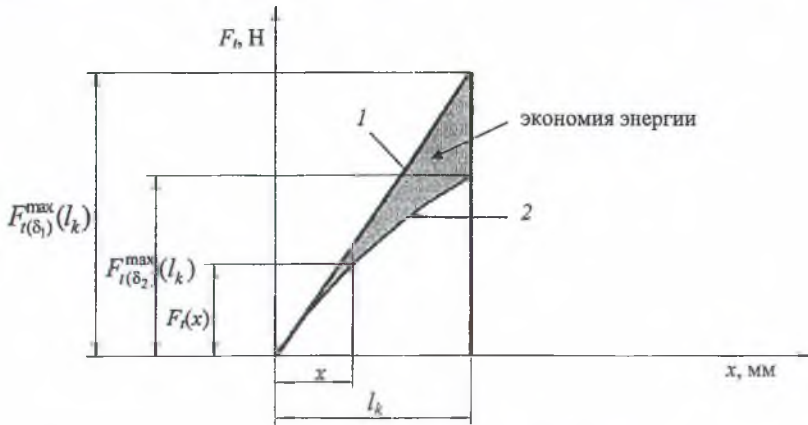
$l_{k1}$  – путь лезвия на первом этапе резания;  $l_{k2}$  – путь лезвия на втором этапе резания

Рисунок 1 – Схема стружкообразования при фрезеровании древесины с использованием изменяемых на дуге контакта углов резания

Обрабатываемый материал подается со скоростью подачи  $V_s$  к инструменту, вращающемуся с угловой скоростью  $\omega$ , с целью снятия припуска на обработку  $h$ . Лезвие прикрепленного к инструменту ножа воздействует на обрабатываемый материал на дуге контакта  $l_k$ . Из-за роста толщины стружки до максимального значения  $e_{\max}$  на пути взаимодействия  $x$  (в зависимости от времени  $t$ ) лезвие испытывает увеличение касательной силы резания  $F_t(x) \equiv F_t(t)$  и резуль-

тирующего момента сил резания  $M(x) \equiv M(t)$ . Плавное снижение угла резания  $\delta(x)$  с  $\delta_1$  (первый этап формирования стружки на пути  $l_{k1}$ ) до  $\delta_2$  (второй этап формирования стружки на пути  $l_{k2}$ ) способствует уменьшению роста  $F_t(x)$  и  $M(x)$ , что позволяет обеспечить экономию энергии на разделение обрабатываемого материала (рисунок 1).

На рисунке 2 представлены зависимости касательной силы резания  $F_t(x)$  на дуге контакта от пути резания  $x$  при постоянном и изменяемом углах резания.



- 1 – зависимость касательной силы резания на дуге контакта при постоянном угле резания;  
 2 – зависимость касательной силы резания на дуге контакта при изменяемом угле резания

**Рисунок 2 – Изменение касательной силы резания на дуге контакта**

При неподвижно закрепленном в корпусе фрезы ноже его взаимодействие с обрабатываемым материалом будет происходить с увеличением касательной силы резания  $F_t(x)$  по известной зависимости 1 (рисунок 2). Максимальная касательная сила резания  $F_{t(\delta_1)}^{\max}(l_k)$  при фиксированном угле резания  $\delta_1$  больше максимальной касательной силы резания  $F_{t(\delta_2)}^{\max}(l_k)$  при измененном угле резания  $\delta_2$  при условии  $\delta_1 > \delta_2$ .

Зависимость касательной силы резания на дуге контакта при плавном изменении углов резания от  $\delta_1$  до  $\delta_2$  можно описать зависимостью (1):

$$F_t(x) = \frac{F_{t(\delta_1)}^{\max}(l_k)}{l_k} \cdot x - \frac{F_{t(\delta_1)}^{\max}(l_k) - F_{t(\delta_2)}^{\max}(l_k)}{l_k^2} \cdot x^2, \quad (1)$$

представленной на рисунке 2 кривой 2.

Работа процесса фрезерования  $A$  при изменяющемся угле резания на дуге контакта от  $\delta_1$  до  $\delta_2$  определяется зависимостью (2):

$$A = \int_0^{l_k} F_t(x) dx = \frac{F_{t(\delta_1)}^{\max}(l_k) + 2F_{t(\delta_2)}^{\max}(l_k)}{6} \cdot l_k. \quad (2)$$





радиусом  $R$  относительно оси вращения инструмента  $O_1$  независимо от нагрузки и угла поворота сектора  $\varphi_{\text{вын}}(t)$ . При установившейся угловой скорости вращения инструмента  $\omega$  сектор занимает положение устойчивого равновесия  $\varphi$ , при котором начальный угол резания составляет  $\delta_0$ . Сектор с центром масс  $C$ , расположенным на расстоянии  $r_c$  от точки  $O$ , испытывает инерционные силы, что обуславливает необходимость его стабилизации в процессе работы. С этой целью вводится упругая связь (пружина  $NK$  жесткости  $c$ ) сектора с корпусом инструмента. Пружина крепится с одной стороны к корпусу инструмента (точка  $N$ ) на расстоянии  $L$  от оси  $O$ , а с другой – к сектору в точке  $K$ , расположенной на расстоянии  $r_k$  от  $O$ .

Момент сил  $M(\mu) \equiv M(t)$ , действующий на нож со стороны стружки, и закон относительно движения ножей представлены соответственно зависимостями (4) и (5):

$$M(\mu) = \begin{cases} \frac{M_{\max}}{\mu_1^2} \mu^2 & \text{при } 0 \leq \mu \leq \mu_1, \\ 0 & \text{при } \mu_1 \leq \mu \leq 2\pi, \end{cases} \quad (4)$$

где  $M_{\max} = M(l_k)$  – максимальный момент сил резания на дуге контакта, Нм;

$\mu_1 = \sqrt{0,002h/R}$  – угол дуги контакта, рад;

$\mu$  – угол поворота инструмента, рад;

$$\varphi_{\text{вын}}(t) = \frac{M_{\max}}{I_O \omega^2} \left( \frac{B_0}{(k/\omega)^2} + \frac{A_1}{(k/\omega)^2 - 1} \cos(\omega t - \vartheta_1) \right), \quad (5)$$

где  $I_O$  – момент инерции сектора относительно точки  $O$ ,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ ;

$k$  – частота собственных колебаний сектора,  $\text{с}^{-1}$ ;

$A_1$  и  $B_0$  – коэффициенты разложения  $M(\mu)$  в ряд Фурье, определяемые из условия ортогональности гармонических функций;

$\vartheta_1$  – запаздывание по фазе угла поворота ножа от угла поворота инструмента, рад.

Силы трения в парах качения, сопротивление воздуха приводят к затуханию собственных колебаний сектора со временем. Поэтому рассматриваются только вынужденные колебания сектора.

Механическая модель, представленная на рисунке 3, позволяет реализовать вынужденные колебания ножа при обработке древесины с использованием промышленных режимов резания.

В четвертой главе представлена методика проведения экспериментальных исследований. Использование промышленных режимов обработки позволило реально оценить работоспособность инструмента и влияние колебаний ножа на силовые и энергетические показатели процесса фрезерования древесины сосны.

С целью изучения работы механической модели, представленной на рисунке 3, на промышленных режимах эксплуатации фрезерного инструмента разработана и изготовлена опытная конструкция насадного фрезерного инструмента с изменяемыми углами резания (рисунок 4). Инструмент был предвари-

тельно динамически уравновешен на станке модели «Tooldone SV2» производства фирмы SCHENCK (Германия) по качеству G16.

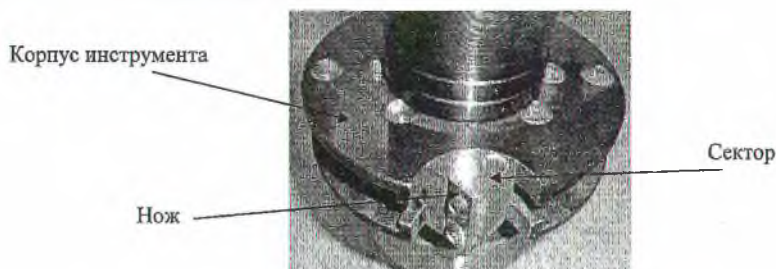


Рисунок 4 – Экспериментальная фреза с изменяемыми углами резания

Представленная на рисунке 4 экспериментальная фреза (масса сектора  $m_c = 0,15$  кг,  $c = 12\,000$  Н/м,  $R = 0,0625$  м,  $r_k = 0,03$  м,  $L = 0,05$  м,  $r_c = 0,02$  м,  $I_0 = 0,00015$  кг·м<sup>2</sup>, число ножей  $z = 1$ ) позволяет реализовать условие поэтапно-го формирования стружки с помощью вынужденных колебаний ножа.

Условия проведения экспериментальных исследований выбраны на основе результатов теоретического рассмотрения работы инструмента. Установлены и обоснованы основные варьируемые факторы: скорость главного движения  $V$ , средняя толщина стружки  $e$ , угол перерезания волокон  $\psi$ , угол резания  $\delta$ ; и дополнительные варьируемые факторы: припуск на обработку  $h$  и частота вращения инструмента  $n$  (таблица 1). Постоянные факторы: влажность материала ( $W = 12\%$ ), диаметр фрезерования ( $D = 125$  мм), радиус затупления резца ( $\rho = 5$  мкм), угол заострения твердосплавного ножа ( $\beta = 55$  град), обрабатываемый материал – сосна.

Таблица 1 – Переменные факторы эксперимента

Наименование фактора	Обозначение		Интервал варьирования фактора	Уровень варьирования фактора				
	натуральное	нормализованное		1-й (0)	2-й (+1)	3-й (+2)	4-й (+3)	5-й (+4)
<b>Основные:</b>								
средняя толщина стружки, мм	$e$	x1	0,1	0,15	0,25	0,35	0,45	0,55
скорость главного движения, м/с	$V$	x2	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0
угол перерезания волокон, град	$\psi$	x3	3,4	67,5	70,9	74,3	77,7	81,1
угол резания, град	$\delta$	x4	20	70	90	$\delta = \text{var}$	$\delta = \text{var}$	$\delta = \text{var}$
<b>Дополнительные:</b>								
частота шпинделя, мин <sup>-1</sup>	$n$	x5	764	1528	2292	3056	3820	4584
припуск на обработку, мм	$h$	x6	–	18,3	13,4	9,2	5,7	3,0

Экспериментальная часть работы выполнена на экспериментальной установке (рисунок 5), созданной на кафедре деревообрабатывающих станков и инструментов (БГТУ) на базе обрабатывающего центра Rover B4.35, позволяющей исследовать силовые и энергетические параметры процесса фрезерования древесины инструментом с изменяемыми углами резания на различных технологических режимах.

Экспериментальная установка позволяет фиксировать силовое воздействие ножа на обрабатываемый материал, используя тензометрическую измерительную систему EX-UT 10 производства фирмы Sony (Япония) и универсальный динамометрический мост УДМ-1200. Установка предназначена для проведения лабораторных исследований резания древесины и древесных материалов при фрезеровании, пилении и сверлении.



1 – заготовка; 2 – универсальный динамометрический мост УДМ-1200;  
3 – тензометрическая измерительная система EX-UT 10; 4 – компьютер;  
5 – обрабатывающий центр Rover B4.35

Рисунок 5 – Общий вид экспериментальной установки

Функциональная схема взаимодействия инструмента с обрабатываемым материалом представлена на рисунке 6.

Заготовка крепится в УДМ-1200, позволяющем измерять силы по осям  $x$ ,  $y$  и  $z$ . При обработке заготовки фрезерованием со скоростью резания  $V$  фиксируется импульс взаимодействия  $p$  (при измерении его составляющих по осям  $x$  и  $y$  –  $p_x$  и  $p_y$ ). Инструмент испытывает результирующую силу резания  $F$  импульсного характера, направленную под углом  $\xi$  к ее касательной составляющей  $F_t$ . Через импульс взаимодействия  $p$  косвенным путем определяется касательная сила резания  $F_t$ , мощность  $P$  и работа резания  $A$ .



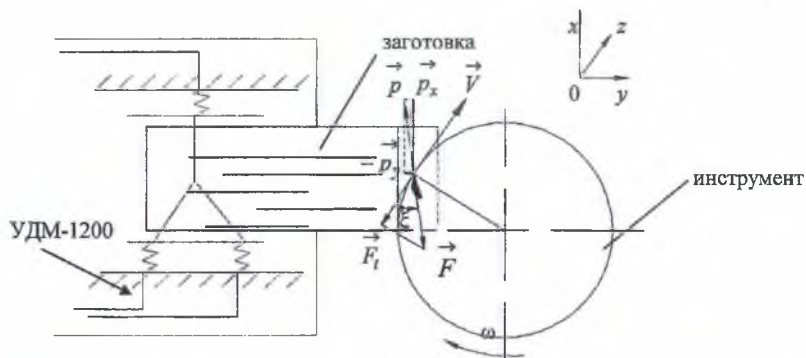
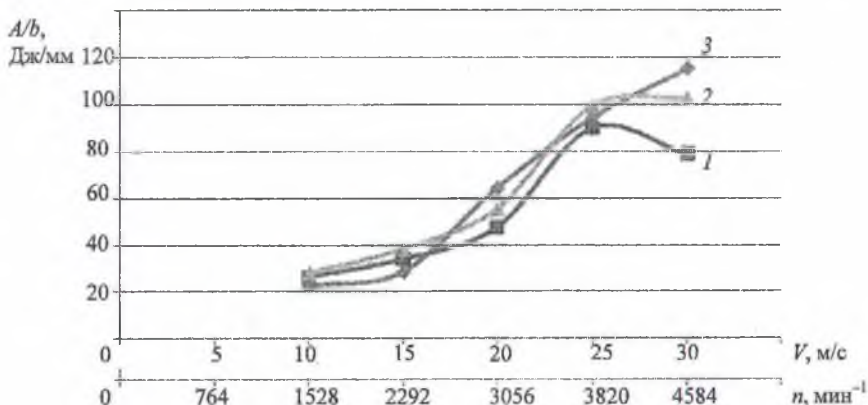


Рисунок 6 – Схема определения составляющих импульса взаимодействия ножа инструмента с заготовкой

Результаты экспериментальных исследований, анализ которых позволил установить закономерности поведения инструмента с вынужденными колебаниями ножей, представлены на рисунках 7–9.



1 –  $\delta = 70$  град,  $e = 0,15$  мм,  $h = 18,3$  мм,  $D = 125$  мм,  $z = 1$ ;

2 –  $\delta = 90$  град,  $e = 0,15$  мм,  $h = 18,3$  мм,  $D = 125$  мм,  $z = 1$ ;

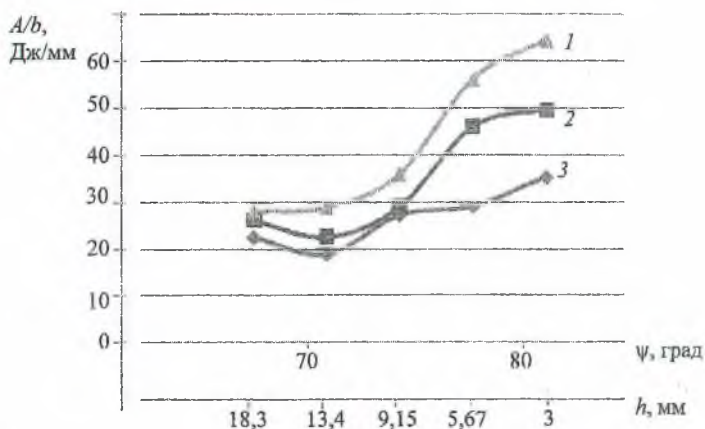
3 –  $\delta = \text{var}$ ,  $e = 0,15$  мм,  $h = 18,3$  мм,  $D = 125$  мм,  $z = 1$

Рисунок 7 – Зависимость удельной работы от скорости резания

Использование инструмента с вынужденными колебаниями ножей зависит от жесткости связи подвижной части инструмента (сектора) с его корпусом. Согласно рисунку 7, при скоростях главного движения выше 15 м/с наблюдается увеличение удельной (на единицу ширины обработки  $b$ ) работы резания  $A/b$ . Это объясняется колебанием сектора в противофазе с возникающей нагрузкой. При таких условиях врезание лезвия в обрабатываемый материал происходит под относительно небольшим углом резания (до 60 град), что ведет к большим затратам энергии на трение по задней поверхности лезвия на первом этапе формирования стружки.

Увеличение угла резания на дуге контакта ведет к росту затрат энергии на деформирование удаляемого материала, что в конечном итоге приводит к увеличению работы резания. Положительный эффект при скоростях главного движения выше 15 м/с для исследуемого инструмента можно получить путем снижения массы сектора или увеличения жесткости упругого элемента, связывающего сектор с корпусом инструмента.

Представленный на рисунке 8 график свидетельствует о том, что с увеличением угла перерезания волокон древесины  $\psi$ , при неизменной средней толщине стружки  $e$ , удельная работа резания возрастает, что связано с ростом энергии на разделение волокон древесины.



1 –  $\delta = 90$  град,  $e = 0,15$  мм,  $V = 10$  м/с,  $D = 125$  мм,  $z = 1$ ;

2 –  $\delta = 70$  град,  $e = 0,15$  мм,  $V = 10$  м/с,  $D = 125$  мм,  $z = 1$ ;

3 –  $\delta = \text{var}$ ,  $e = 0,15$  мм,  $V = 10$  м/с,  $D = 125$  мм,  $z = 1$

**Рисунок 8 – Зависимость удельной работы резания от угла перерезания волокон при фрезеровании сосны**

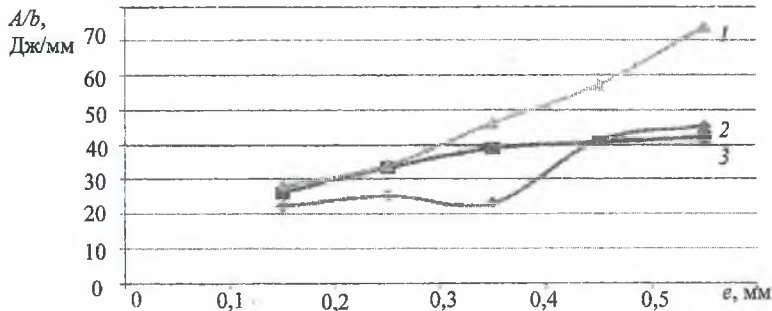
Увеличение удельной работы фрезерования объясняется большим влиянием роста касательной силы резания при изменении направления волокон, чем пути резания при уменьшении толщины снимаемого слоя.

Влияние средней толщины стружки на удельную работу резания при фрезеровании сосны представлено на рисунке 9.

Повышение средней толщины стружки  $e$  увеличивает максимальный момент сил резания  $M(l_k)$ , действующих на лезвие инструмента со стороны обрабатываемого материала.

Амплитуда вынужденных колебаний сектора инструмента, согласно зависимости (5), пропорциональна моменту  $M_{\text{max}} = M(l_k)$ . При изменении средней толщины стружки от 0,15 до 0,35 мм из-за повышения амплитуды вынужденных колебаний, обеспечивающей снижение деформации стружки вследствие уменьшения угла резания, наблюдается падение удельной работы резания. При дальнейшем повышении  $e$  от 0,35 до 0,55 мм амплитуда вынужденных колеба-

ний достигает значений, при которых задняя поверхность ножа начинает соприкасаться с обрабатываемой поверхностью. В результате возрастает сила трения о заднюю поверхность ножа, что приводит к повышению затрат энергии на резание древесины.



1 -  $\delta = 90$  град,  $V = 10$  м/с,  $h = 18,3$  мм,  $D = 125$  мм,  $z = 1$ ;  
 2 -  $\delta = \text{var}$ ,  $V = 10$  м/с,  $h = 18,3$  мм,  $D = 125$  мм,  $z = 1$ ;  
 3 -  $\delta = 70$  град,  $V = 10$  м/с,  $h = 18,3$  мм,  $D = 125$  мм,  $z = 1$

**Рисунок 9 – Зависимость удельной работы резания от средней толщины стружки**

Исключить отрицательное явление трения о заднюю поверхность лезвия ножа можно:

- а) ограничением амплитуды вынужденных колебаний лезвия инструмента с использованием ограничительных упоров;
- б) использованием ножей с меньшими углами заострения  $\beta$ .

Качество обработки проверялось на образцах, обработанных фрезерным инструментом с изменяемым и постоянным углами резания (рисунок 10).



а – изменяемый угол резания      б – постоянный угол резания ( $\delta = 70$  град)  
 $V = 10$  м/с;  $h = 18,3$  мм;  $e = 0,15$  мм

**Рисунок 10 – Торцевое фрезерование древесины сосны**

Улучшение качества обработки инструментом с изменяемыми углами резания (рисунок 10, а) по сравнению с использованием постоянного угла резания  $\delta = 70$  град (рисунок 10, б) объясняется улучшением условий локализации напряжений у режущей кромки на первом этапе формирования стружки.

Проведенные экспериментальные исследования подтверждают снижение энергетических затрат на фрезерование древесины при использовании инструмента с изменяемыми углами резания на дуге контакта.

**В пятой главе** изложена методика проектирования фрезерного инструмента с вынужденными колебаниями ножей, которая состоит из этапов выбора основных конструктивных параметров инструмента и расчета жесткости связи сектора с корпусом инструмента ( $c$ ) в зависимости от максимального момента сил резания  $M(l_k)$ .

При проектировании инструмента необходимо ограничить амплитуду колебаний таким образом, чтобы при максимальном отклонении сектора от положения равновесия задний угол резания  $\alpha$  на дуге контакта не был меньше 10 град.

Особенностью представленных расчетов является то, что снижение энергетических затрат при фрезерование древесины достигается не путем определения оптимальных режимов обработки, что иногда трудно осуществить на практике, а использованием установленных режимов работы фрезерного инструмента. Это позволяет проектировать фрезерный инструмент с изменяемыми углами резания под известные технологические режимы фрезерования древесины.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. Обоснована возможность снижения затрат энергии на резание при работе фрезерного инструмента в результате двухэтапного формирования стружки, при условии использования изменяющихся углов резания на дуге контакта: на первом этапе формирование поверхности с отделением микростружки, на втором этапе образование стружки с уменьшением угла резания. Это позволяет снизить силы резания и в целом энергетические затраты в сравнении с постоянными углами резания [2, 4, 5, 7, 10, 11].

2. Разработана и обоснована модель фрезерного инструмента, позволяющая реализовать поэтапное формирование стружки с использованием изменяемых углов резания. Предложен принцип обеспечения изменения углов резания при фрезеровании древесины, основанный на использовании вынужденных колебаний сектора, несущего нож, под действием момента сил со стороны образующейся стружки. Разработана методика расчета вынужденных колебаний сектора, несущего нож [1, 6].

Частота собственных колебаний  $k$ , определяющая допустимую частоту вращения инструмента  $\omega$ , должна удовлетворять условию  $k > \omega$ , что обеспечивает вынужденные колебания ножа в фазе с нагрузкой.

Разработанная конструкция фрезы, работающая на частоте вращения инструмента  $n = 1528 \text{ мин}^{-1}$ , позволяет обеспечить изменение углов резания на дуге контакта при следующих конструктивных параметрах:  $D = 125 \text{ мм}$ ,  $c = 12\,000 \text{ Н/м}$ ,  $l_0 = 0,015 \text{ м}$ ,  $I_0 = 0,00015 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ ,  $m_c = 0,15 \text{ кг}$ ,  $r_k = 0,02 \text{ м}$ ,  $L = 0,04 \text{ м}$ ,  $r_c = 0,025 \text{ м}$ .

3. Проведены экспериментальные исследования фрезерного инструмента с изменяемыми углами резания. Установлено влияние скорости резания, средней



толщины стружки и высоты снимаемого слоя на энергетические затраты резания древесины сосны фрезерованием. Снижение удельной работы на резание до 50% наблюдается при скорости резания в диапазоне 10–15 м/с и средней толщине стружки 0,15–0,40 мм.

Рекомендуемые параметры обработки древесины сосны предлагаемым инструментом из условия минимальных энергозатрат следующие:  $e = 0,35$  мм,  $n = 1528$  мин<sup>-1</sup>,  $z = 1$ ,  $b = 16$  мм,  $h = 6$  мм [3].

4. Разработана методика проектирования фрезерного инструмента с изменяемыми углами резания с учетом требуемых технологических режимов.

С целью создания условий, обеспечивающих максимальную амплитуду колебаний сектора при изменении параметров фрезерования, предлагается использовать при проектировании минимальную скорость подачи материала. Тем самым обеспечивается возможность в дальнейшем изменять момент сил резания и корректировать изменение углов резания на дуге контакта [8, 9].

### **Рекомендации по практическому использованию результатов исследований**

По результатам проведенных исследований в рамках диссертационной работы изготовлена насадная фреза с изменяемыми углами резания, позволяющая использовать явление вынужденных колебаний ножа для изменения условий формирования стружки на дуге контакта. Инструмент прошел промышленные испытания на Вилейской мебельной фабрике и показал высокие технико-экономические показатели. Выполненные расчеты по экономической эффективности использования нового инструмента на фрезерном оборудовании этого предприятия достигают ожидаемого годового экономического эффекта в размере 29,946 млн. руб. (в ценах 2010 г.) за счет снижения затрат электрической энергии на 16% при обеспечении установленного качества продукции, а также за счет повышения ресурса ножей на 12%.

Разработанная механическая модель инструмента, позволяющая реализовать изменение угла резания на дуге контакта, математические зависимости, определяющие угол  $\phi$  положения устойчивого равновесия сектора, внедрены в учебный процесс на кафедре деревообрабатывающих станков и инструментов учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет» по дисциплинам «Механическая обработка древесины и древесных материалов, управление процессом резания» и проектирование и производство дереворежущего инструмента с основами систем автоматизированного проектирования) учебного плана специальности 1-36 05 01 «Машины и оборудование лесного комплекса».

Разработанные в составе диссертационных исследований математические модели, определяющие условия работы инструмента с вынужденными колебаниями ножа на частотах, близких к резонансным, и методика проектирования инструмента по устанавливаемым технологическим режимам рекомендованы для использования на предприятиях по производству дереворежущего инструмента при его проектировании.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи в рецензируемых журналах, включенных в перечень ВАК

1. Гаранин, В.Н. Расчет на устойчивость сектора сборной фрезы / В.Н. Гаранин // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообаб. пром-сть. – 2006. – Вып. XIV. – С. 178–180.
2. Гаранин, В.Н. Влияние вибрации лезвия инструмента на резание древесины и древесных материалов / В.Н. Гаранин // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообаб. пром-сть. – 2007. – Вып XV. – С. 239–242.
3. Гаранин, В.Н. Результаты экспериментальных исследований, определяющие влияние угла атаки на силу и мощность процесса открытого резания древесины / В. Н. Гаранин // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообаб. пром-сть. – 2008. – Вып. XVI. – С. 209–214.
4. Гиль, В. И. Определение коэффициента трения при элементарном резании древесноволокнистых плит средней плотности (МДФ) / В.И. Гиль, В.Н. Гаранин // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообаб. пром-сть. – 2008. – Вып. XVI. – С. 337–339.
5. Гаранин, В.Н. Предпосылки создания рефлекторного самоустанавливающегося дереворезающего инструмента / В.Н. Гаранин // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообаб. пром-сть. – 2009. – Вып. XVII. – С. 311–316.
6. Гаранин, В.Н. Условия работы фрезерного дереворезающего инструмента с самоизменяющимися углами резания / В.Н. Гаранин // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообаб. пром-сть. – 2010. – Вып. XVIII. – С. 240–245.

### Статьи в сборниках материалов и трудов научных конференций

7. Гришкевич, А.А. Износостойкий дереворезающий инструмент для фрезерования погонажных строительных изделий / А.А. Гришкевич, А.П. Клубков, В.Н. Гаранин // Наука и технология строительных материалов: состояние и перспективы развития: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 25–26 мая 2005 г. – Минск, 2005. – С. 251–254.
8. Гаранин, В.Н. Влияние момента инерции фрезы на качество фрезерования / В.Н. Гаранин, Е.И. Глушенко // Ресурсо- и энергосберегающие технологии и оборудование, экологически безопасные технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 16–18 ноября 2005 г. – Минск, 2005. – С. 264–266.
9. Гришкевич, А.А. Влияние момента инерции инструмента на его работоспособность / А.А. Гришкевич, В.Н. Гаранин // Наука – производство – технологии – экология: сб. материалов Всерос. науч.-техн. конф., Киров, 2006 г.: в 8 т. – Киров, 2006. – Т. 5. – С. 184–189.
10. Гаранин, В.Н. Определение оптимальных углов резания и заострения для обработки древесины / В.Н. Гаранин // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века: труды II Междунар. евраз. симпоз., Екатеринбург, 2007 г. – Екатеринбург, 2007. – С. 226–231.

### Заявка на патент

11. Способ изготовления радиусной фрезы: заявка на пат. Респ. Беларусь МПК<sup>9</sup> В23С 5/16 / С.И. Карпович, А.А. Гришкевич, С.С. Карпович, В.М. Музыченко, В.Н. Гаранин; заявитель учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет». – № а 20100031; заявл. 11.01.10.



## РЕЗЮМЕ

Гаранин Виктор Николаевич

### Обработка древесины фрезами с изменяемыми углами резания на дуге контакта

**Ключевые слова:** энергосбережение, стружка, фреза, нож, угол резания, этап, колебания вынужденные, импульс.

**Объект исследований** – процесс фрезерования древесины.

**Предмет исследований** – дереворежущий фрезерный инструмент с изменяемыми углами резания.

**Цель работы** – разработать способ обработки древесины фрезами, обеспечивающими снижение энергетических затрат за счет уменьшения угла резания на дуге контакта при установленном качестве поверхности детали.

**Методы исследований и аппаратура.** В процессе проведения исследований применялся классический метод планирования экспериментов. При проведении экспериментов, регистрации и обработке полученных результатов использовались обрабатывающий центр Rover B4.35, универсальный динамометрический мост УДМ-1200, силоизмерительная система EX-UT-10. Тарировка установки выполнялась с использованием импульсного воздействия на заготовку в поле потенциальных сил тяжести.

**Научная новизна полученных результатов.** Рассмотрен процесс стружкообразования как поэтапный механизм взаимодействия лезвия инструмента с обрабатываемым материалом, позволяющий выявить возможности снижения энергетических затрат при фрезеровании древесины ножами с изменяемыми углами резания на дуге контакта. Предложена уточненная классификация дереворежущего фрезерного инструмента, учитывающая особенность изменения угловых параметров представленной экспериментальной фрезы. Определены основные динамические модели конструкции фрезы, позволяющие выявить возможности использования фрезерного инструмента с вынужденно изменяемыми углами резания. Установлено влияние различных технологических параметров фрезерования на энергетические затраты обработки экспериментальным инструментом. Разработаны практические рекомендации по проектированию фрезерного дереворежущего инструмента с вынужденными колебаниями ножей в зависимости от режимов его эксплуатации.

**Область применения результатов диссертации** – станки фрезерной группы в мебельной промышленности, лесопильно-деревообрабатывающие предприятия для получения щепы.



## РЭЗІЮМЭ

Гаранін Віктар Мікалаевіч

### Апрацоўка драўніны фрэзамі са змяняемымі вугламі рэзання на дузе кантакту

**Ключавыя словы:** энергазберажэнне, стружка, фрэза, нож, вугал рэзання, этап, ваганні вымушаныя, імпульс.

**Аб'ект даследаванняў** – працэс фрэзеравання драўніны.

**Прадмет даследаванняў** – дрэварэзальны фрэзерны інструмент са змяняемымі вугламі рэзання.

**Мэта работы** – распрацаваць спосаб апрацоўкі драўніны фрэзамі, якія забяспечваюць зніжэнне энергетычных затрат дзякуючы зніжэнню вугла рэзання на дузе кантакту пры ўстаноўленай якасці паверхні дэталі.

**Метады даследаванняў і апаратура.** У працэсе правядзення даследаванняў прымяняўся класічны метады планавання эксперыментаў. Пры правядзенні эксперыментаў, рэгістрацыі і апрацоўцы атрыманых вынікаў выкарыстоўваліся апрацоўчы цэнтр Rover B4.35, універсальны дынамаметрычны мост УДМ-1200, сілавымяральная сістэма EX-UT-10. Тарыроўка ўстаноўкі выконвалася з дапамогай імпульснага нагружэння загатоўкі ў полі патэнцыяльных сіл цяжару.

**Навуковая навізна атрыманых вынікаў.** Разгледжаны працэс стружкаўтварэння як паэтапны механізм узаемадзеяння ляза інструмента з апрацоўваемым матэрыялам, які дазваляе выявіць магчымасці зніжэння энергетычных затрат пры фрэзераванні драўніны нажом са змяняемымі вугламі рэзання. Прапанавана ўдакладненая класіфікацыя дрэварэзальнага фрэзернага інструменту, якая ўлічвае асаблівасць змянення вуглавых параметраў прадстаўленай эксперыментальнай фрэзы. Вызначаны асноўныя дынамічныя мадэлі канструкцый фрэз, якія дазваляюць выявіць магчымасці выкарыстання фрэзернага інструмента са змяняемымі вугламі рэзання. Устаноўлены ўплыў розных тэхналагічных параметраў фрэзеравання на энергетычныя затраты апрацоўкі эксперыментальным інструментам. Распрацаваны практычныя рэкамендацыі па праектаванні фрэзернага дрэварэзальнага інструменту з вымушанымі ваганнямі нажоў у залежнасці ад рэжымаў яго эксплуатацыі.

**Вобласць ужывання вынікаў дысертацыі** – станкі фрэзернай групы ў мэблевай прамысловасці, лесапільна-дрэваапрацоўчыя прадпрыемствы для атрымання шчэпак.

## SUMMARY

Garanin Victor Nikolaevich

### Wood processing mills with changing angles of cutting on the arc of contact

**Keywords** – the Power savings, technology, a shaving, a mill, an edge, a cutting corner, stages of interaction, fluctuation compelled, an impulse.

**Object of researches** – process of milling of wood.

**Subject of researches** – the woodworking milling tool with changing angles of cutting.

**The work purpose** – to develop a way of processing of wood the mills providing reduction of power expenses due to the decreasing of a corner of cutting on an arch of contact at established quality of a surface of a detail.

**Methods of researches and equipment.** In the course of carrying out of researches classical method of planning of experiments was applied. At carrying out of experiments, registration and processing of the received results were used processing centre Rover B4.35, universal dynamometer UDB-1200, force measuring system EX-UT-10. The definition of scale factor was carried out by use of pulse influence on preparation in the field of a potential gravity.

**Scientific novelty of the received results.** Process of formation of a shaving as the stage-by-stage mechanism of interaction of an edge of the tool with the processed material, allowing to reveal possibilities of decrease in forces of cutting at milling of wood by knives with changeable corners of cutting on a contact arch is considered. The specified classification the woodworking milling tool, considering feature of change of angular parameters of the offered experimental mill is offered. The basic dynamic models of a design of the mill are revealed, allowing to define possibilities of use of the milling tool with forcedly changeable corners of cutting. Influence of various technological parameters of milling on power characteristics of process of processing is established by the experimental tool. Practical recommendations about designing milling the woodworking tool with the compelled fluctuations of knives depending on its modes eks-pluatatsii are developed.

**Scope of results of the dissertation** – machine tools of milling group on the furniture industry, woodworking enterprises for reception chips.

Научное издание

**Гаранин Виктор Николаевич**

**ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ ФРЕЗАМИ С ИЗМЕНЯЕМЫМИ УГЛАМИ  
РЕЗАНИЯ НА ДУГЕ КОНТАКТА**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук  
по специальности 05.21.05 – древесиноведение, технология и оборудование  
деревопереработки

Ответственный за выпуск В.Н. Гаранин

Подписано в печать 10.02.2011. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная.  
Гарнитура Таймс. Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,3. Уч.-изд. л. 1,4.

Тираж 60 экз. Заказ39.

Отпечатано в Центре издательско-полиграфических  
и информационных технологий учреждения образования  
«Белорусский государственный технологический университет».

220006. Минск, Свердлова, 13а.

ЛИ № 02330/0549423 от 08.04.2009.

ЛП № 02330/0150477 от 16.01.2009.