



АНАЛИЗ СИЛОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДИСКОВОГО НОЖА С ДРЕВЕСИНОЙ ПРИ БЕССТРУЖЕЧНОМ ДЕЛЕНИИ

Владимир П. Ивановский¹ ✉, nppkvalitet@mail.ru 0000-0001-7543-5402

Дмитрий К. Томенко¹, dimatankov64@gmail.com 0000-0001-6100-4433

Сергей П. Трофимов², tspk46@gmail.com 0000-0001-5094-7524

Александра В. Киселёва¹, avk50@yandex.ru 0000-0002-5960-6133

¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Россия

²Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет», ул. Свердлова, 13а, г. Минск, 220006, Республика Беларусь


Взаимодействие дискового ножа с древесиной простая, но интересная тема. В статье будет проведен анализ взаимодействия ножа с древесиной. Рассказывается о программе позволяющей определить предварительное усилие деформирования для различных форм дисков: кольца, призмы, сферы, по заданной площади внедрения. Рассматривается два периода прессования как сплошного, так и полого характера с резко различным изменением давления. Говорится о процессе деформирования древесины при сжатии вдоль волокон. Делаются выводы для снижения усилия резания. Для установления связи между степенью прессования и осевым напряжением (усилием деления) на испытательной машине была поставлена серия опытов с использованием стандартных образцов древесины сосны и тополя. Построена экспериментальная кривая в системе прямоугольных координат. С помощью механического динамометра определено полное усилие деления древесины мягких пород. Выполнено теоретическое обоснование полученного усилия разрезания дисковым ножом. Установлено, что общее усилие разрезания древесины мягких пород в среднем меньше, чем при пилении круглыми пилами на 20-30%. Также было установлено, что пятно контакта режущего диска с древесиной до угла контакта с древесиной 90° меняется незначительно и совокупная сила резания при уменьшении угла контакта снижается.


Ключевые слова: бесстружечное резание, нож дисковый, древесина, деление, взаимодействие


Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Ивановский, В. П. Анализ силового взаимодействия дискового ножа с древесиной при бесстружечном делении / В. П. Ивановский, Д. К. Томенко, С. П. Трофимов, А. В. Киселева // Лесотехнический журнал. – 2022. – Т. 12. – № 4 (48). – С. 130–140. – Библиогр.: с. 137–139 (21 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.4/9>.

Поступила 11.04.2022. Пересмотрена 16.11.2022. Принята 23.11.2022. Опубликована онлайн 26.12.2022.

Vladimir P. Ivanovsky¹ ✉, nppkvalitet@mail.ru,  0000-0001-7543-5402

Dmitry K. Tomenko¹, dimatankov64@gmail.com,  0000-0001-6100-4433

Sergey P. Trofimov², tspx46@gmail.com,  0000-0001-5094-7524

Alexandra V. Kiseleva¹, avk50@yandex.ru,  0000-0002-5960-6133

¹Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation

²Belarussian State Technological University, 13a, Sverdlova str., Minsk, 220006, Belarus

Abstract

The interaction of a circular knife with wood is a simple but interesting topic. The article will analyze the interaction of a knife with wood. A program is described that allows determining the preliminary deformation force for various disk shapes: rings, prisms, spheres, according to a given penetration area. Two periods of pressing are considered, both continuous and hollow, with sharply different pressure changes. Talk about the process of deformation of wood during compression along the fibers. Conclusions are drawn to reduce the cutting force. To establish the relationship between the degree of pressing and the axial stress (division force), a series of experiments were carried out on a testing machine using standard samples of pine and poplar wood. An experimental curve is constructed in a system of rectangular coordinates. With the help of a mechanical dynamometer, the total force of the division of softwood was determined. Theoretical substantiation of the obtained force of cutting with a disk knife is carried out. It has been established that the total effort of cutting soft wood is on average less than when sawing with round saws by 20-30%. It was also found that the smallest contact spot of the cutting disc with wood up to a contact angle with wood of 90 ° changes insignificantly and the total cutting force decreases with a decrease in the contact angle.

Keywords: *chip-free cutting, knife, wood, division, interaction*

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

For citation: Ivanovsky V.P., Tomenko D.K., Trofimov S.P., Kiseleva A.V. (2022) Analysis of the force interaction of a disc knife with wood in chip-free division. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 12, No. 4 (48), pp. 130-140 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.4/9>.

Received 11.04.2022. **Revised** 16.11.2022. **Accepted** 23.11.2022. **Published online** 26.12.2022.

Введение

Силовое взаимодействие рассматривалось на основе типовых элементов рельефов. Для процессов бесстружечного деления древесины [1-3]. В процессе взаимодействия при косом смятии рабочий орган с инструментом совершает прямолинейное поступательное движение. Усилие, необходимое для резания, определяется сопротивлением со стороны древесины (рис. 1):

$$dP = \delta_H dF = \delta_H dF_k, \quad (1)$$

где δ_H – нормальное напряжение на элементарном участке контактной поверхности штампа с древесиной, зависящее от профиля поверхности инструмента, свойств древесины, температуры штампа и древесины; dF_k – элементарный участок контактной поверхности, зависящей от линейных размеров штампа; α – угол между направлением движения пуансона и направлением нормального напряжения на элементарном участке, определенного внешней поверхностью штампа.

Проинтегрировав данное уравнение в пределах контактной площади штампа с древесиной, по-

лучим формулу для расчёта необходимого усилия деления:

$$P = \int S \delta_H dF_k = \int_0^{F_k} \delta_H dF_k \quad (2)$$

Выразим нормальное напряжение как функцию координат трёх точек, расположенных на контактной площади [4-7]:

$$P = \int_0^{F_k} \delta_H dx \quad (3)$$

Для диска круглой формы, конусной поверхности:

$$P = \pi R^2 \delta \cos \alpha, \quad (4)$$

где R – радиус диска; S – площадь диска; δ – средний предел текучести древесины мягких пород в осевом направлении (по результатам исследований равный в среднем 7 МПа); α – угол между направлением волокон древесины и конусной поверхностью диска [8,9].

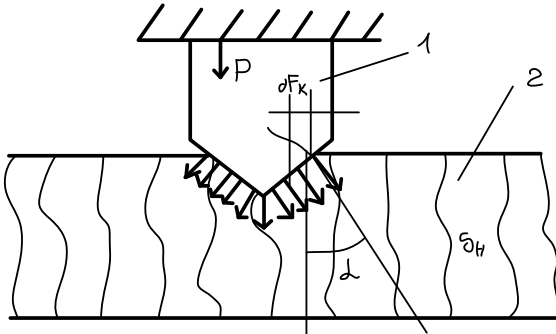


Рис. 1. Схема для определения деформирующего усилия: 1-диск круглой формы, конусной поверхности; 2-заготовка древесины.

Figure 1. Scheme for determining the deforming force: 1-disk round shape, conical surface; 2-wood harvesting.

Source: author's own schema

Источник: собственная схема авторов

Разработана программа, позволяющая определить предварительное усилие деформирования для различных форм дисков: кольцо, призма, сфера, по заданной площади внедрения.

Рассмотрим процесс бесстружечного деления древесины диском как процесс прессования древесины [10-12].

Для контурного прессования как сплошного, так и полого характерны два периода с резко различным изменением давления. Вдавливание конца прессуемого бруска или втулки в конический при-

емник характеризует первый период, а в цилиндрическую часть пресс-формы-второй период.

Целью исследований явилось уточнение силовых и энергетических показателей процесса бесстружечного резания древесины дисковым ножом. Для этого выдвигали задачи:

- перехода рассмотрения от типовых элементов рельефов к реальным [13-15];
- анализа формул, имеющихся в настоящее время по выявлению величины силы резания [16-19];
- экспериментального определения величины силы резания при бесстружечном делении и величины контактного давления [20-21].

Материалы и методы

По мере вдавливания втулки в конический приемник происходит местное неравномерное прессование древесины по круговому контуру с постепенным повышением степени прессования. При выходе из конического приемника в цилиндрическую часть пресс-формы уплотнение древесины достигает максимальной величины \sum_{\max} и с малой скоростью втулка продвигается дальше. По мере вдавливания конический приемник происходит изменение степени прессования древесины. Степень прессования выражается формулой:

$$x = \frac{2xtg\alpha}{r_1} - \frac{x^2tg^2\alpha}{r^2}, \quad (5)$$

где α - угол, образуемый осью пресс-формы с образующей поверхности конуса приемника; r_1 – радиус втулки до прессования; x - расстояние выделенного элемента от оси координат; следовательно, степень прессования древесины по длине конической части втулки изменяется по закону параболы.

Задаваясь \sum_{\max} и углом конуса 2α , может быть найдена длина конической части прессуемого бруска при $x = 1$, т.е.

$$l = \left(\frac{r_1 + \sqrt{1 - \sum_{\max}}}{tg\alpha} \right). \quad (6)$$

Величина осевой силы Q , продавливающей брусок длиной l в конической части через приемник пресс-формы, равняется

$$Q = \frac{2\pi(tg\alpha + k)}{\cos\alpha \int (r_1 - xtg\alpha) Pr dx}, \quad (7)$$

где k -коэффициент трения древесины о стенку пресс-формы; P_t – горизонтальная составляющая нормального давления стенки приемника пресс-формы на элемент; dx – толщина выделенного элемента.

Для быстрого определения поперечного осевого усилия при контурном прессовании следовало бы установить связь между степенью прессования и осевым напряжением q (МПа):

$$q = Q / F_{кон}, \quad (8)$$

где $F_{кон}$ – площадь поперечного сечения цилиндра после прессования.

Осевое напряжение выражается следующими полученными эмпирическими [15] уравнениями:

$$\text{Сосна-} q=40(e^{3.33-1})^{312} \text{ (МПа)} \quad (9)$$

$$\text{Осина -} q=67(e^{3.33-1})^{15} \text{ (МПа)} \quad (10)$$

Для ориентировочного определения осевого усилия при контурном прессовании пропаренной древесины до плотности $\rho = 1200 \text{ кг/см}^3$ (для берёзы $\Sigma = 0,50$ и осины $\Sigma = 0,60$ можно пользоваться следующей формулой:

$$Q = qF_{кон}(H). \quad (11)$$

Для установления связи между степенью прессования и осевым напряжением (усилием деления) на испытательной машине 5т-с была поставлена серия опытов с использованием стандартных образцов для испытания на сжатие древесины сосны и осины.

Количество замеров в каждом из опытов составляло 50. Точность измерения составила 0,03 при использовании этого минимального количества измерений. Далее был применён графический метод выравнивания, так как экспериментальная кривая на сетке прямоугольных координат имеет вид плавной кривой.

Для графического изображения результатов измерений была использована система прямоугольных координат. На основании экспериментальных данных была получены эмпирические формулы для древесины мягких пород путём аппроксимации функцией простейшими эмпирическими уравнениями типа

$$y = ax^{bx}. \quad (12)$$

А также дробно-линейные с показательной функцией и построенного графика, изображенного далее на рис. 2.

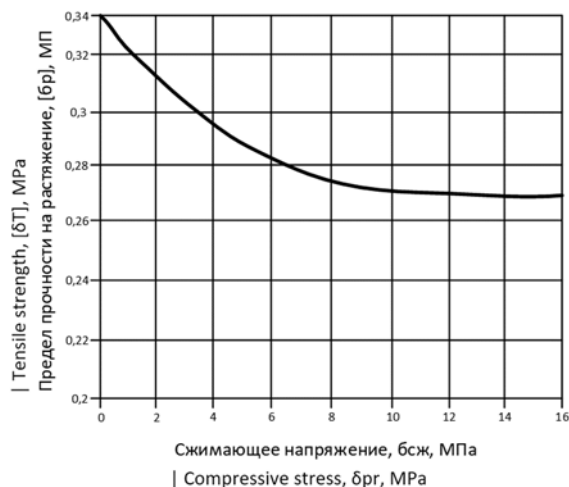


Рис. 2. Предел прочности при растяжении вдоль волокон в зависимости от сжимающего напряжения для древесины ольхи

Figure 2. Tensile strength along the grain as a function of compressive stress for alder wood

Источник: собственные вычисления авторов.
Source: author's own calculations.

Определим площадь поперечного сечения цилиндра после прессования:

$$F_{кон} = \pi R^2 - \pi r^2 = \pi(R^2 - r^2), \quad (13)$$

где R -радиус по наружному контуру прессованной втулки, см; r - радиус по внутреннему контуру прессованной втулки, см.

Пример:

$$F_{кон} = 3.14(2.5^2 - 1.6^2) = 115.9(\text{см}^2).$$

Найдем осевое усиление прессования для сосны: $G=120 \cdot 115,9=13,908$ (кН) Таким образом, полученные уравнения хорошо согласуются с данными других авторов [5,6,7].

Снижение или увеличение плотности во времени деформирования связана в нашем случае с продольным сжатием, то есть сжатием вдоль волокон. В течение этого процесса перераспределяются связи между волокнами древесины, происходит иногда разрушение в частицах сопровождающиеся микротрещинами. Всё это оказывает отрицательное влияние в процессах прессования, сжатия изделий из древесины (на рисунке 2 представлена зависи-

мость сжимающего напряжения до полного разрушения древесины).

Так, при достижении напряжения в 5 МПа и с превышением его, сильно не уменьшается предел прочности в древесине. Можно сделать вывод что оптимальным напряжением сжатия является напряжение 5-10 МПа, что полностью отвечает параметрам зоны для всех мягких лиственных пород [7]. Установлено, что прочность древесины снижается в процессе увеличения напряжения сжатия. При этом вероятность поверхностного разрушения древесины возможно существенно снизить путём подбора режима обработки в процессе деформирования. Наиболее приемлемый ступенчатый режим нагружения для распределения упругих деформаций, а также с выбором оптимальных параметров режущих инструментов [8,9].

Многочисленными исследованиями установлена связь усилия резания со многими влияющими составляющими:

$$P = f(g_l p l t) + f(\delta_h \mu_H \beta_S - S_H) + f(\delta_\sigma \mu_\sigma F_\sigma b); \quad (14)$$

где g_l - удельное давление на лезвие, Н/мм²; p - радиус округления, мкм; l - размер лезвия, мм; t - температура инструмента, °С; σ_h - величина средних напряжений на наклонных гранях ножа, Н/мм²;

μ_H - коэффициент трения качения между инструментом и древесиной; β_S - угол заточки инструмента, град.; S_H - площадь наклонных граней ножа, мм²; σ_σ - нормальное напряжение на боковых гранях ножа, Н/мм; μ_σ - коэффициент трения качения между боковыми гранями ножа с древесиной; F_σ - площадь боковых поверхностей ножа.

Установлено, что все названные факторы имеют коэффициент варьирования не менее чем 30-50 %.

Сила резания измерялась с помощью механического динамометра Н.Г. Токаря. Получаемые формулы подбирались в пределах измеренных значений аргумента с помощью метода выравнивания. Экспериментальные точки на графиках отображались линейной формулой и рассчитывались логарифмическим способом. Также определялась дисперсия отклика (параметра оптимизации) [3,4,7].

Основным критерием для анализа процесса бесстружечного резания древесины дисковым ножом выбрана сила резания P и вспомогательным – величина контактного давления между режущим диском и древесиной.

Результаты и обсуждение

Расчёт силовых параметров по названной выше схеме не отображает весь процесс взаимодействия ножа с древесиной. В этом случае усилие резания производится при помощи удельной силы резания $K_{уд}$, Н/мм с учётом площади контакта ножа с древесиной:

$$P = K_{уд} S_k \quad (15)$$

Из формулы видно, что при снижении площади контакта ножа с древесиной снижается и сила резания. Снижение площади контакта можно получить приданием боковой поверхности ножа наклонной формы, а также послойным разрезанием древесины на отдельные слои. Особый эффект состоит в совмещении различных способов так, снижение площади контакта основывается на принципе поочередного внедрения каждого зуба в обрабатываемую древесину [10]. На дуге контакта ножа и древесины действует как касательная так и нормальная силы деления. Нами был проведён расчёт средней силы деления и средней цикловой силы резания согласно рисунку 3:

$$F_{xц} = F_{xcp} Z_p, \quad (16)$$

Где Z_p - число ножей.

$$Z_p = \frac{1}{t} = lZ / 2\pi R, \quad (17)$$

где l - длина взаимодействия ножа и древесины; t - шаг зубьев; Z - число ножей участвующих в резании.

Полное усилие деления древесины мягких пород было определено для двух пород древесины с помощью механического динамометра. На рисунке 4 представлен дисковый нож и срезки древесины мягких пород.

На рисунке 5 представлен боксплот полного усилия разрезания для осины и сосны. Полученные данные хорошо согласуются с исследованиями других авторов [8,9]. Отличие от усилия резания такой древесины круглыми пилами составляет 20-30 % в меньшую сторону.

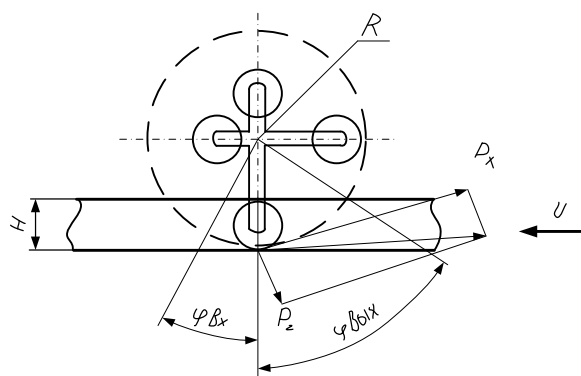


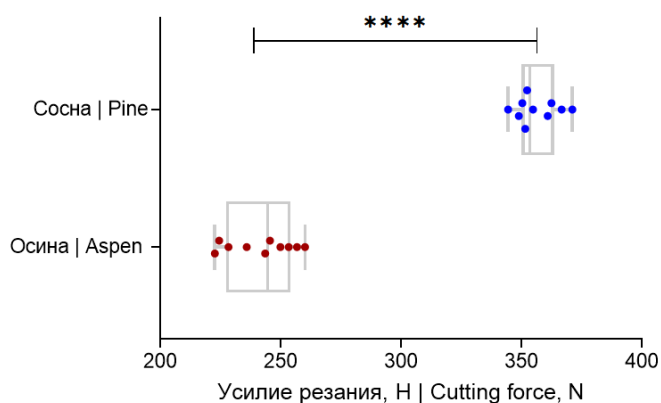
Рис. 3. Силы деления древесины с n-режущими элементами со встречной подачей заготовки
Figure 3. Forces of dividing wood with n cutting elements with counterfeed of the workpiece

Источник: собственная схема авторов.
Source: author's own schema.



Рис. 4. Дисковый нож и срезки древесины
Figure 4. Circular knife and cuttings of wood

Источник: собственная схема авторов
Source: author's own schema



Unpaired t test	
P value	<0.0001
P value summary	****
Significantly different (P < 0.05)?	Yes
One- or two-tailed P value?	Two-tailed
t, df	t=22.52, df=18

Рис. 5. Экспериментальное усилие резания суммарное на режущем диске для осины и сосны при постоянном угле заточки, 30 градусов, радиусе округления дискового ножа 10 мкм и влажности древесины 10-15%/

Figure 5. Experimental total cutting force on a cutting disc for aspen and pine at a constant sharpening angle, 30 degrees, a rounding radius of the disc knife of 10 microns and a wood moisture of 10-15 %

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

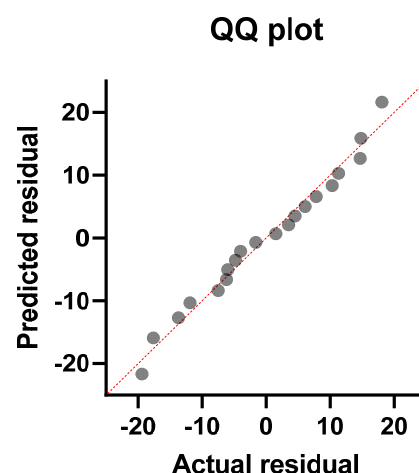
Определяем угол встречи при бесстружечном делении дискового ножа:

$$\varphi_B = \varphi_n + \varphi_{cp}, \quad (18)$$

где φ_n - угол встречи, угол между направлением волокон и скоростью подачи.

φ_{cp} - средний угол, величина которого определяется как:

$$\varphi_{cp} = \varphi_{вых} / 2 \quad (19)$$



$$\varphi_{\text{вых}} / \text{-угол выхода} = \arccos \left[\frac{R-H}{R} \right], \quad (20)$$

где H - высота разреза.

Рассчитаем:

$$P_{\text{хсп}} = P_{\text{хл}} + 2P_{\text{хн}} + 2P_{\text{хб}}, \quad (21)$$

где $P_{\text{хл}}$ - усилие внедрения ножа в древесину; $P_{\text{хн}}$ - условное сопротивление на наклонных боковых поверхностях ножа; $P_{\text{хб}}$ - сила трения на наклонных боковых поверхностях.

$$P_{\text{хсп}} = K_{\text{удл}} l + K_{\text{удн}} l, \quad (22)$$

где $K_{\text{уд}}$ - удельная сила внедрения основных частей ножа в древесину, Н/мм; l - длина контакта одного режущего элемента ножа с древесиной:

$$l = \Pi D \varphi_k / 360, \quad (23)$$

где φ_k - угол контакта.

Ввиду того, что $K_{\text{уд}}$ и $K_{\text{уд.б}}$ определяются чаще всего величиной давления σ и коэффициентом трения скольжения ножа о древесину. Получаем следующее значение по расчету сил резания древесины:

$$P_{\text{хсп}} = K_{\text{удл}} l + acK_{\text{уд.б}} l \quad (24)$$

$$P_{\text{хсп}} = l(K_{\text{удл}} + acK_{\text{уд.б}}), \quad (25)$$

где a - коэффициент толщины, то есть показывающий увеличение удельной силы от толщины ножа; c - коэффициент угла показывающий увеличение удельной силы от угла заточки ножа.

Удельное внедрение ножа зависит от радиуса округления лезвия, диаметра окружности резания и других параметров. Напряжение сжатия по боковым поверхностям ножа часто достигает высоких величин (100 Н/см^2 - установлено опытными исследованиями). При расчете сил в процессе бесстружечного деления также определяется крутящий момент необходимый для преодоления сопротивления:

$$M = P_{\text{хл}} \Pi. \quad (26)$$

На основании произведенного расчета крутящего момента производится подборнеобходимо привода. Определение центра тяжести пятна

контакта режущего диска и древесины осуществляется по формуле:

$$\Pi = P_1 R_1 + P_2 R_2 + \dots + P_n R_n / P_1 + P_2 P_n. \quad (27)$$

Физические процессы, протекающие при взаимодействии режущего диска и древесины имеют сложный и комплексный характер. Боковые поверхности режущего диска подвергаются меньшему давлению древесины чем наклонные. Это обуславливается действием сил упругого восстановления волокон в процессе упругопластического деформирования. В момент деления древесины режущим диском относительная деформация сжатия имеет постоянную величину, напрямую зависящую от угла заточки ножа. Наиболее частое состояние деформации является средней фазой при сжатии. Вследствие этого этапа наблюдается интенсивность снижения давления волокон при резании самой древесины вследствие её релаксации. Применяя выведенную зависимость контактного давления от угла контакта [11] производится определение такого контактного давления $P(y)$, чтобы минимизировать значение интеграла следующего вида:

$$\int_{\varphi_1}^{\varphi_2} [p(y) - fp(y)] \varphi_{cp} \rightarrow \text{extr.} \quad (28)$$

Вид функции нам заранее неизвестен, поэтому, предположим что эта функция линейна. Это предположение не нарушает общности, т.к. любую функцию можно аппроксимировать линейной.

Следовательно, задача имеет вид:

$$\int_{\varphi_1}^{\varphi_2} [p(y) - ap(y)] \varphi_{cp} \rightarrow \text{extr.} \quad (29)$$

Уравнение Эйлера для задачи вариационного исчисления записывается в виде:

$$[p(y) - ap(y)] - \frac{\partial [p(y) - ap(y)]}{\partial p} * p(y) = \text{const} \quad (30)$$

$$\text{и } P(y) - ap(y) - a = \text{const} \quad (31)$$

следовательно

$$P(y) - ap(y) = \text{const.} \quad (32)$$

Решая это дифференциальное уравнение, получаем допустимые экстремали:

$$P(y) = C_1 + C_2 l \frac{\varphi}{2a}, \quad (33)$$

где константы C_1 и C_2 вычисляются из условий:

$$p(y_1) = p_1; p(y_2) = p_2 \quad (34)$$

Заключение

Наименьшее пятно контакта режущего диска с древесиной до угла 90° изменяется несущественно, совокупная режущая сила при уменьшении угла контакта существенно снижается. В процессе проектирования режущих инструментов снижения угла контакта и площади пятна контакта возможно достичь путем изменения в сторону уменьшения длины задней грани режущих инструментов. Площадь пятна контакта между режущим инструментом и

обрабатываемой древесиной возможно уменьшить путем поднутрения режущих инструментов, а также нанесением смазки на режущие поверхности инструментов. Экспериментальные исследования показали, что при увеличении скорости подачи древесины происходит интенсивный нагрев плоских поверхностей режущих инструментов с возможным обугливанием разделяемой древесины. Крайне важной задачей является обеспечение нормального функционирования с учетом допусков режущих инструментов с возможностью обеспечения их безопасного обслуживания.

Список литературы

1. Патент № 2726557 РФ, МПК В27В 33/02. Режущий диск для мягколиственной древесины : № 2019107993 : заявл. 20.03.2019 : опубл. 14.07.2020 / Ивановский Владимир Павлович, Платонов Алексей Дмитриевич, Волганкин Александр Михайлович, Недиков Роман Анатольевич ; патентообладатель(и): Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова. – Режим доступа: https://yandex.ru/patents/doc/RU2726557C1_20200714.
2. Lulu X, Ye X, Baokang D, Zhangning Ye, Chunde J, Qingfeng S and Xiaohong Yu 2019 In-situ anchoring of Fe₃O₄/ZIF-67 dodecahedrons in highly compressible wood aerogel with excellent microwave absorption properties. *Materials & Design*, Volume 182, 2019, 108006, ISSN 0264-1275, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108006>;
3. Zhe Q, Zefang X, Likun G, Jian Li, Haigang W, Yonggui Wa and Yanjun X 2019 Transparent wood bearing a shielding effect to infrared heat and ultraviolet via incorporation of modified antimony-doped tin oxide nanoparticles. *Composites Science and Technology*, Volume 172, 2019, Pages 43-48, ISSN 0266-3538, <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2019.01.005>;
4. Christian Brischke and Lone Ross Gobakken 2020 Protecting wood infrastructure and mass timber buildings. *Wood Material Science & Engineering*, 15:6, 325, DOI: 10.1080/17480272.2020.1799242;
5. Rahayu, Istie & Darmawan, Wayan & Zaini, Lukmanul & Prihatini, Esti. 2019 Characteristics of fast-growing wood impregnated with nanoparticles. *Journal of Forestry Research*. 31. 1-9. 10.1007/s11676-019-00902-3;
6. Sadrtdinov A.R., Safin R.G., Timerbaev N.F., Ziatdinova D.F. and Saprykina N.A. 2016 The development of equipment for the disposal of solid organic waste and optimization of its operation IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 142(1), 012095. DOI:10.1088/1757-899X/142/1/012095;
7. Шамаев В.А., Паринов Д.А., Полилов А. 2018 Исследование подшипников скольжения из модифицированной древесины для высоконагруженных узлов трения. *Журнал машиностроения и надежности*. 47. 168-172. 10.3103 / S1052618818020115;
8. Shamaev V, Parinov D and Medvedev I 2018 Wood Modification by Pressing. *Engineering Studies*, Issue 3 (2), Volume 10. *Taylor & Francis*, 2018. 708-718 pp;
9. Shamaev V, Parinov D and Medvedev I 2018 Study Of Modified Wood As A Bearing Material For Machine-Building. *International Conference on Aviaemechanical Engineering and Transport (AviaENT 2018)*, *Advances in Engineering Research*, volume 158, P. 478-482.
10. Shamaev V, Medvedev I, Parinov D, Shakirova O and Anisimov M 2018 Investigation of modified wood as a material power transmission pole produced by self-pressing method. *Acta Facultatis Xylogologiae Zvolen*, volume 60, № 2, 2018, 25-32 pp. DOI: 10.17423/afx.2018.60.2.02.

11. James A. Brient, Mark J. Manning and Mike H. Freeman 2020 Copper naphthenate - protecting America's infrastructure for over 100 years and its potential for expanded use in Canada and Europe, *Wood Material Science & Engineering*, 15:6, 368-376, DOI: 10.1080/17480272.2020.1837948;
12. Li B., Ma H., Yu X., Zeng J., Guo X., Wen B. (2019). Nonlinear vibration and dynamic stability analysis of rotor-blade system with nonlinear supports. *Archive of Applied Mechanics*. doi:10.1007/s00419-019-01509-0.
13. Yu K., Ma H., Han H. (et al.) (2019). Second order multi-synchrosqueezing transform for rub-impact detection of rotor systems. *Mechanism and Machine Theory*, 140, 321– 349. doi:10.1016/j.mechmachtheory.2019.06.007.
14. Yu K., Fu Q., Ma H., Lin T. R., Li X. (2020). Simulation data driven weakly supervised adversarial domain adaptation approach for intelligent cross-machine fault diagnosis. *Structural Health Monitoring*, 147592172098071. doi:10.1177/1475921720980718.
15. Li Y., Luo Z., Wang J., Ma H., Yang D. (2021). Numerical and experimental analysis of the effect of eccentric phase difference in a rotor-bearing system with bolted-disk joint. *Nonlinear Dynamics*, 105(3), 2105– 2132. doi:10.1007/s11071-021-06698-4
16. Liu Y., Zhao Y., Li J., Lu H., Ma H. (2019). Feature extraction method based on NOFRFs and its application in faulty rotor system with slight misalignment. *Nonlinear Dynamics*. doi:10.1007/s11071-019-05340-8
17. MA X., MA H., QIN H., GUO X., ZHAO,C., YU M. (2021). Nonlinear vibration response characteristics of a dual-rotor-bearing system with squeeze film damper. *Chinese Journal of Aeronautics*, 34(10), 128–147. doi:10.1016/j.cja.2021.01.013
18. Aghayari J., Bab S., Safarpour P., Rahi A. (2021). A novel modal vibration reduction of a disk-blades of a turbine using nonlinear energy sinks on the disk. *Mechanism and Machine Theory*, 155, 104048. doi:10.1016/j.mechmachtheory.2020.104048
19. Xiong C., Huang Z., Shi H., Yang R., Dai X., He W. (2021). 3D Cutting Force Model of a Stinger PDC Cutter: Considering Confining Pressure and the Thermal Stress. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 54(9), 5001–5022. doi:10.1007/s00603-021-02494-z
20. Farrokh E. (2021). Cutter change time and cutter consumption for rock TBMs. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 114, 104000. doi:10.1016/j.tust.2021.104000
21. Liu Y., Han J., Zhao S. (et al.) (2019). Study on the Dynamic Problems of Double-Disk Rotor System Supported by Deep Groove Ball Bearing. *Shock and Vibration*, 2019, 1–12. doi:10.1155/2019/8120569.

References

1. Patent No. 2726557 RF, IPC B27B 33/02. Cutting disc for softwood: no.2019107993: app. 20.03.2019: publ. 07/14/2020 / Ivanovsky Vladimir Pavlovich, Platonov Alexey Dmitrievich, Volgankin Alexander Mikhailovich, Nedikov Roman Anatolyevich; Patent holder (s): Voronezh State Forestry University named after G.F. Morozov. - 2020. - eLIBRARY. - Bul. No. 20;
2. Lulu X, Ye X, Baokang D, Zhangning Ye, Chunde J, Qingfeng S and Xiaohong Yu 2019 In-situ anchoring of Fe₃O₄ / ZIF-67 dodecahedrons in highly compressible wood aerogel with excellent microwave absorption properties. *Materials & Design*, Volume 182, 2019, 108006, ISSN 0264-1275, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108006>;
3. Zhe Q, Zefang X, Likun G, Jian Li, Haigang W, Yonggui Wa and Yanjun X 2019 Transparent wood bearing a shielding effect to infrared heat and ultraviolet via incorporation of modified antimony-doped tin oxide nanoparticles. *Composites Science and Technology*, Volume 172, 2019, Pages 43-48, ISSN 0266-3538, <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2019.01.005>;
4. Christian Brischke and Lone Ross Gobakken 2020 Protecting wood infrastructure and mass timber buildings. *Wood Material Science & Engineering*, 15: 6, 325, DOI: 10.1080 / 17480272.2020.1799242;
5. Rahayu, Istie & Darmawan, Wayan & Zaini, Lukmanul & Prihatini, Esti. 2019 Characteristics of fast-growing wood impregnated with nanoparticles. *Journal of Forestry Research*. 31.1-9. 10.1007 / s11676-019-00902-3;

6. Sadrtidinov A.R., Safin R.G., Timerbaev N.F., Ziatdinova D.F. and Saprykina N.A. 2016 The development of equipment for the disposal of solid organic waste and optimization of its operation IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 142 (1), 012095. DOI: 10.1088 / 1757-899X / 142/1/012095;
7. Shamaev V.A., Parinov D.A. and Polilov, A. 2018 Investigation of sliding bearings made of modified wood for highly loaded friction units. *Journal of Mechanical Engineering and Reliability*. 47.168-172. 10.3103 / S1052618818020115;
8. Shamaev V, Parinov D and Medvedev I 2018 Wood Modification by Pressing. *Engineering Studies*, Issue 3 (2), Volume 10. Taylor & Francis, 2018.708-718 pp.;
9. Shamaev V, Parinov D and Medvedev I 2018 Study Of Modified Wood As A Bearing Material For Machine-Building. *International Conference on AviaMechanical Engineering and Transport (AviaENT 2018)*, *Advances in Engineering Research*, volume 158, 478-482 pp.;
10. Shamaev V, Medvedev I, Parinov D, Shakirova O and Anisimov M 2018 Investigation of modified wood as a material power transmission pole produced by self-pressing method. *Acta Facultatis Xylogologiae Zvolen*, volume 60, No. 2, 2018, 25-32 pp. DOI: 10.17423 / afx.2018.60.2.02;
11. James A. Brient, Mark J. Manning and Mike H. Freeman 2020 Copper naphthenate - protecting America's infrastructure for over 100 years and its potential for expanded use in Canada and Europe, *Wood Material Science & Engineering*, 15: 6, 368- 376, DOI: 10.1080 / 17480272.2020.1837948;
12. Li B., Ma H., Yu X., Zeng J., Guo X., Wen B. (2019). Nonlinear vibration and dynamic stability analysis of rotor-blade system with nonlinear supports. *Archive of Applied Mechanics*. doi:10.1007/s00419-019-01509-0
13. Yu K., Ma H., Han H. (et al.) (2019). Second order multi-synchrosqueezing transform for rub-impact detection of rotor systems. *Mechanism and Machine Theory*, 140, 321– 349. doi:10.1016/j.mechmachtheory.2019.06.007
14. Yu K., Fu Q., Ma H., Lin T. R., Li X. (2020). Simulation data driven weakly supervised adversarial domain adaptation approach for intelligent cross-machine fault diagnosis. *Structural Health Monitoring*, 147592172098071. doi:10.1177/1475921720980718
15. Li Y., Luo Z., Wang J., Ma H., Yang D. (2021). Numerical and experimental analysis of the effect of eccentric phase difference in a rotor-bearing system with bolted-disk joint. *Nonlinear Dynamics*, 105(3), 2105– 2132. doi:10.1007/s11071-021-06698-4
16. Liu Y., Zhao Y., Li J., Lu H., Ma H. (2019). Feature extraction method based on NOFRFs and its application in faulty rotor system with slight misalignment. *Nonlinear Dynamics*. doi:10.1007/s11071-019-05340-8
17. Ma X., Ma H., Qin H., Guo X., Zhao C., Yu M. (2021). Nonlinear vibration response characteristics of a dual-rotor-bearing system with squeeze film damper. *Chinese Journal of Aeronautics*, 34(10), 128–147. doi:10.1016/j.cja.2021.01.013
18. Aghayari J., Bab S., Safarpour P., Rahi A. (2021). A novel modal vibration reduction of a disk-blades of a turbine using nonlinear energy sinks on the disk. *Mechanism and Machine Theory*, 155, 104048. doi:10.1016/j.mechmachtheory.2020.104048
19. Xiong C., Huang Z., Shi H., Yang R., Dai X., He W. (2021). 3D Cutting Force Model of a Stinger PDC Cutter: Considering Confining Pressure and the Thermal Stress. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 54(9), 5001– 5022. doi:10.1007/s00603-021-02494-z
20. Farrokh E. (2021). Cutter change time and cutter consumption for rock TBMs. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 114, 104000. doi:10.1016/j.tust.2021.104000
21. Liu Y., Han J., Zhao S. (et al.) (2019). Study on the Dynamic Problems of Double-Disk Rotor System Supported by Deep Groove Ball Bearing. *Shock and Vibration*, 2019, 1–12. doi:10.1155/2019/8120569.

Сведения об авторах

Ивановский Владимир Павлович - кандидат техн. наук, доцент каф. древесиноведения, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7543-5402>, e-mail: nppkvalitet@mail.ru.

Томенко Дмитрий Константинович – бакалаврант лесопромышленного факультета, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6100-4433>, e-mail: dimatankov64@gmail.com.

Трофимов Сергей Петрович – канд. техн. наук, доцент, «Белорусский государственный технический университет», пр-т Независимости, д. 4, г. Минск, Республика Беларусь, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5094-7524>, e-mail: tspх46@gmail.com.

Киселёва Александра Владимировна – канд. техн. наук, доцент каф. древесиноведения, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5960-6133>, e-mail: avk50@yandex.ru.

Information about the authors

Vladimir P. Ivanovsky - Candidate of Engineering sciences, associate professor of the department. wood science, Voronezh State Forestry University named after G. F. Morozov, Timiryazev str., 8 Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7543-5402>, e-mail: nppkvalitet@mail.ru.

Dmitriy K. Tomenko – bachelor of the Faculty of Forestry, Voronezh State Forestry University named after G.F. Morozova ", st. Timiryazeva, 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6100-4433>, e-mail: dimatankov64@gmail.com.

Sergei P. Trofimov – candidate of Engineering sciences, associate professor, Belarusian State Technical University, Nezavisimosti Ave., 2, of. 4, Minsk, Republic of Belarus, <http://orcid.org/0000-0001-5094-7524>, e-mail: tspх46@gmail.com.

Alexandra V. Kiseleva – Ph.D. tech. Sciences, Associate Professor Timber Science, Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozova, st. Timiryazeva, 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5960-6133>, e-mail: avk50@yandex.ru.

✉ – Для контактов/Corresponding author