

УДК 630.81; 674.025; 674.025

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕМАТИКИ ПРОЦЕССА СВЕРЛЕНИЯ ДРЕВЕСИНЫ ТОНКИМИ БУРОВЫМИ СВЕРЛАМИ

Е.С. ШАРАПОВ, доц., ПГТУ, канд. техн. наук⁽¹⁾,В.Ю. ЧЕРНОВ, доц., ПГТУ, канд. техн. наук⁽¹⁾,Е.В. СМЕРНОВА, асп. ПГТУ⁽¹⁾*sharapoves@volgatech.net, chernov.vas7936@yandex.ru, smirnovaev@volgatech.net*⁽¹⁾ Поволжский государственный технологический университет,
424000, г. Йошкар-Ола, Республика Марий Эл, Российская Федерация, пл. Ленина д. 3

Одним из перспективных методов определения свойств древесины является метод, основанный на измерении усилия сопротивления древесины и древесных материалов просверливанию. При проектировании новых устройств для исследования свойств древесины сверлением, а также повышения точности измерений, достоверности получаемых результатов и износостойкости режущего инструмента первоначально необходимо остановиться на выборе рациональных скоростных характеристик, а процесс сверления следует рассматривать в кинематике. В работе представлены основные геометрические параметры используемых тонких буровых сверл, формулы определения угла движения при сверлении древесины. Основным критерием при выборе режимов процесса сверления древесины тонкими буровыми сверлами является положительный задний кинематический угол резания, который зависит от конструкции режущего инструмента, скоростей главного движения и подачи. В результате исследований получена математическая модель взаимосвязи скорости вращения тонкого бурового сверла, скорости подачи и расстояния от оси вращения сверла до точки на лезвии резцов с величиной кинематического заднего угла резания. С целью повышения точности измерений свойств древесины при использовании мобильного устройства для диагностики состояния древесины и древесных материалов сверлением, а также при увеличении скоростей подачи тонкого бурового сверла следует увеличить величину заднего контурного угла резания резцов до 20–30°. В работе также даны рекомендации по изменению конструкции тонкого бурового сверла для обеспечения высокой точности измерения свойств древесины сверлением с увеличением скорости подачи режущего инструмента.

Ключевые слова: неразрушающий контроль качества древесины, измерение сопротивления сверлению, углы резания, центровое сверло, резистограф; ResistYX.

Сверление является одним из наиболее сложных процессов механической обработки древесины. Лезвия сверла осуществляют сложные виды резания, зависящие от конструкции режущего инструмента и направления подачи относительно расположения волокон в древесине. В современной науке об обработке древесины резанием накоплен большой объем результатов теоретических и экспериментальных исследований, однако остается еще немало «белых пятен». В частности, слабо изучены процессы сверления древесины сверлами с диаметрами режущей головки менее 5 мм. Безусловно, инструмент с такими геометрическими параметрами не представляет существенного интереса для деревообрабатывающих производств и для исследователей. Однако практическое его использование только на первый взгляд кажется весьма ограниченным.

Древесина и древесные материалы, обладая уникальными свойствами, не теряют

популярности и сегодня. Совершенствуются методики и оборудование в таких областях, как неразрушающие методики определения свойств древесины, дендрохронология, экспертиза деревянных строительных конструкций [2, 3, 10, 11]. Результаты работ в этих направлениях представляют реальный интерес для лесного хозяйства, деревообработки, строительства и многих других направлений науки и производства.

Одним из современных методов определения свойств древесины является метод, основанный на измерении усилия сопротивления древесины просверливанию (мощности на сверление). Именно на процессе микросверления тонкими буровыми сверлами основана работа некоторых современных мобильных устройств для диагностики скрытых пороков в растущих деревьях, выявления дефектов и определения изменения свойств древесины по годичным слоям. Наиболее известными и востребованными на сегодня являются устройства Резистограф®

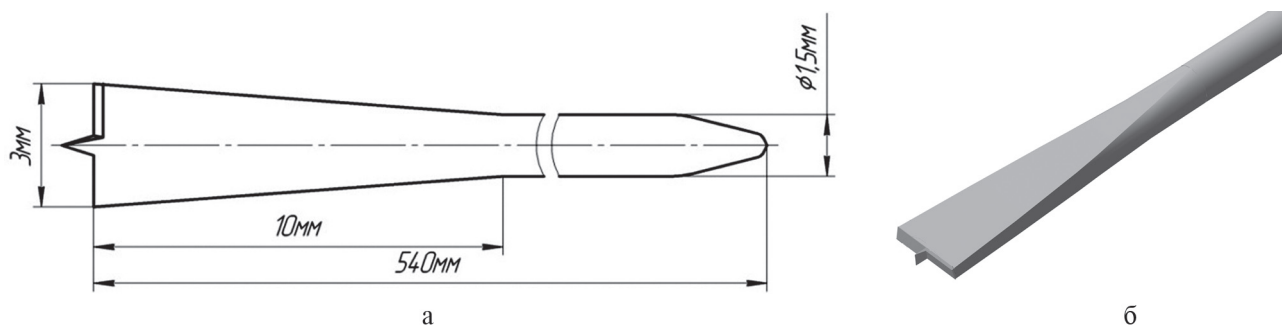


Рис. 1. Тонкое буровое сверло: а – основные размеры сверла; б – модель режущей головки тонкого бурового сверла

Fig. 1. A thin drill bit: a – the main dimensions of the drill; b – a model of the cutting head of a thin drill bit

(Rinntech, Хайдельберг, Германия) и IML-Resi (IML System GmbH, Вислох, Германия) [8–11]. Термин «микросверление» был принят зарубежными учеными в связи с использованием в данных устройствах тонких буровых сверл для получения отверстий диаметрами 2–3 мм с высокой частотой вращения режущего инструмента (до 5000 об./мин) и относительно невысокой скоростью подачи (до 1–1,5 м/мин) [7–11].

Авторский коллектив поставил перед собой задачи по разработке отечественного мобильного устройства для диагностики состояния древесины и проведению исследований в данном направлении. На сегодняшний день установлены контакты с ведущими фирмами-производителями оборудования в этой области, получен ряд патентов РФ на новые конструкции мобильных устройств для диагностики свойств древесины сверлением (№ 95128, 2448811, 2515342, 2515343), изготовлена лабораторная экспериментальная установка, проведен большой объем исследований (часть из них за рубежом), изготовлен коммерческий вариант мобильного устройства для диагностики растущих деревьев и деревянных строительных конструкций «ResistYX» (ООО «Новые лесные технологии», г. Йошкар-Ола, РФ) [4–6].

При разработке экспериментальной лабораторной установки важным этапом являлось определение рациональных скоростных характеристик процесса сверления. Правильно выбранные скоростные характеристики обеспечивают высокую точность измерения свойств древесины, достоверность получае-

мых результатов, способствуют повышению износостойкости режущего инструмента. Существует несколько вариантов конструкций режущих головок тонких буровых сверл, однако, на наш взгляд, наиболее совершенным является инструмент производства фирмы Rinntech (Хайдельберг, Германия), который и использовался для проведения представленных исследований.

Целью исследований, результаты которых представлены в данной работе, являлось определение влияния скоростных характеристик процесса сверления древесины на кинематические углы резания резцов тонкого бурового сверла.

Задачи, решаемые в данной работе:

1. Определить основные геометрические параметры тонкого бурового сверла.
2. Установить взаимодействие скоростных характеристик процесса сверления древесины с кинематическими углами резания резцов тонкого бурового сверла.
3. Определить рациональные скоростные характеристики процесса сверления древесины, обеспечивающие высокую точность измерений, быстродействие и износостойкость режущего инструмента.

Материалы и методы

Предмет исследований – тонкое буровое сверло (рис. 1), которое имеет плоскую режущую головку, направляющий центр и пару симметричных относительно оси резцов. По конструкции оно относится к центровым сверлам. Сверло изготовлено из стали, обладающей повышенным пределом упру-

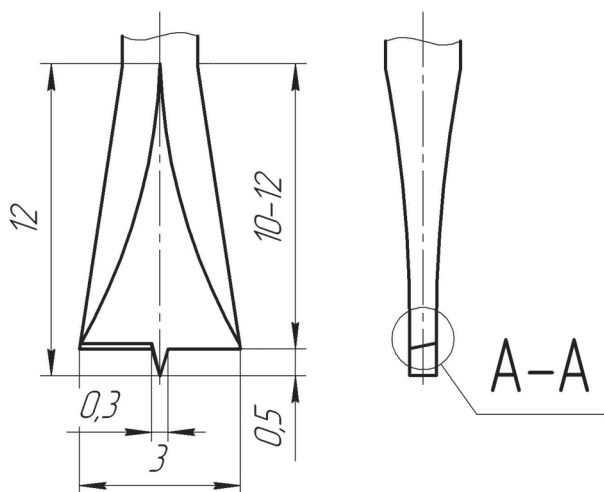


Рис. 2. Геометрические параметры режущей части сверла

Fig. 2. The geometrical parameters of the cutting part of a drill

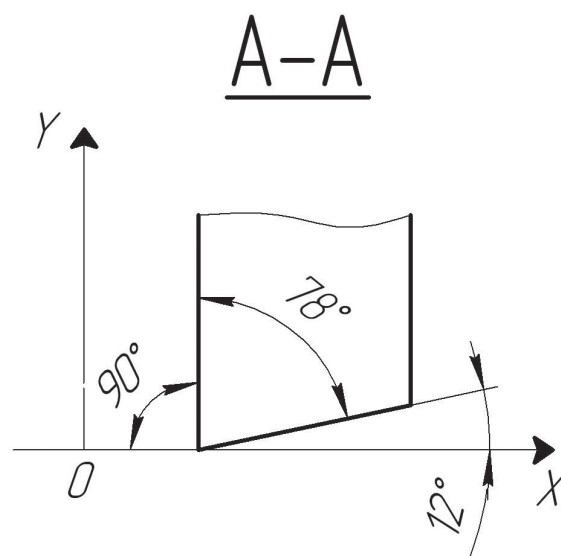


Рис. 3. Контурные углы резцов сверла
Fig. 3. Contour angle cutters of a drill

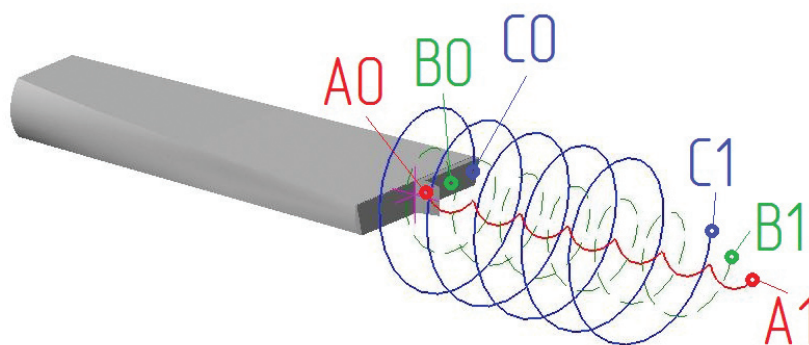


Рис. 4. Траектории движения точек, расположенных на лезвии сверла (A0-A1 – траектория точки, расположенной на лезвии у основания направляющего центра сверла; B0-B1 – траектория точки, расположенной на лезвии на расстоянии половины радиуса от оси сверла; C0-C1 – траектория точки, расположенной на лезвии на расстоянии радиуса от оси сверла)

Fig. 4. The trajectories of the points on the drill blade (A0, A1 – the trajectory of a point on the blade at the base of the pilot drill center; B0-B1 – the trajectory of a point on the blade at a distance of half the radius from the axis of the drill; C0-C1 – trajectory a point on the blade at the radius distance from the axis of the drill)

гости и прошедшей термическую обработку. Выбор материала тонкого бурового сверла основан на размерах и условиях его работы, длина просверливаемых отверстий достигает 500 мм. Данная конструкция и геометрические параметры тонкого бурового сверла наилучшим образом подходят для поперечного сверления древесины, лезвия сверла при этом совершают преимущественно продольно-поперечное резание.

Представленная конструкция позволяет повысить точность измерения свойств древесины по годичным слоям через опреде-

ление энергосиловых параметров процесса сверления.

В результате проведенных измерений и расчетов были определены основные геометрические параметры тонкого бурового сверла (рис. 2, 3), необходимые для расчета параметров процесса сверления.

Контурные углы резания тонкого бурового сверла (рис. 3): задний угол $\alpha = 12^\circ$; угол заострения $\beta = 78^\circ$; передний угол резания $\gamma \approx 0^\circ$.

В процессе сверления инструмент совершает круговые движения, а любая точка,

Варьируемые факторы и пределы их изменения

Variable factors and the limits of their change

Факторы	Уровни варьирования			Интервал варьирования
	-1	0	+1	
А – частота вращения тонкого бурового сверла n , об./мин	1000	5500	10000	4500
В – скорость подачи тонкого бурового сверла u , м/мин	0,05	0,525	1	0,475
С – расстояние от оси сверла до точки, расположенной на лезвии сверла r , мм	0,15	1,325	2,5	1,175

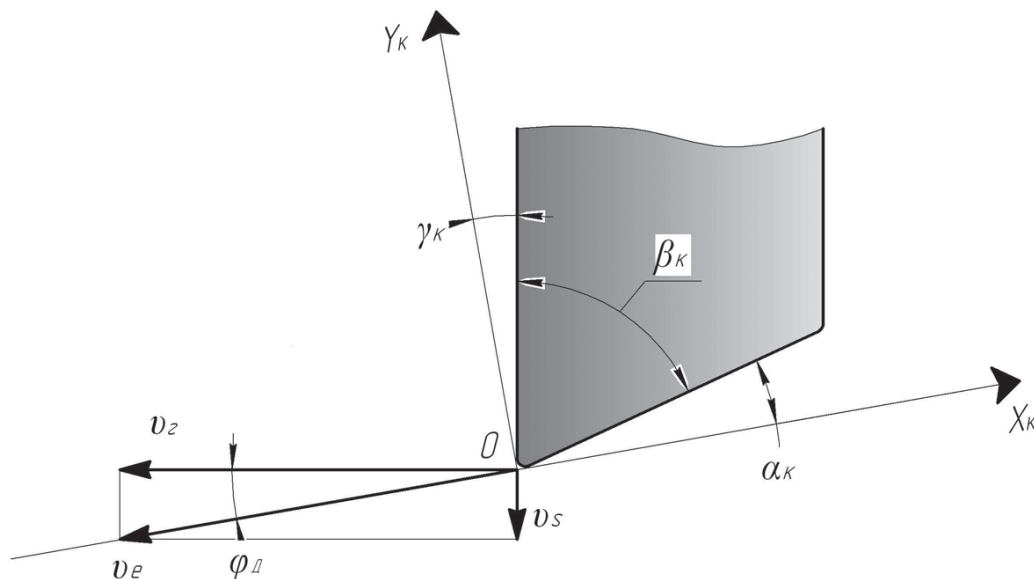


Рис. 5. Кинематические углы резания резцов в нормальном сечении и скорости: v_z – главного движения; v_s – подачи; v_e – результирующего движения резания

Fig. 5. Kinematic cutting angles of cutters in the normal section and speed: v_z – the main motion; v_s – feeding; v_e – the result of cutting motion

расположенная на его лезвиях, перемещается по цилиндрической винтовой линии. Радиус и угол наклона цилиндрической винтовой линии изменяются в зависимости от расстояния между рассматриваемой точкой на лезвии и осью вращения инструмента (рис. 4).

Скорость резания и кинематические углы резания также зависят от расстояния между рассматриваемой точкой на лезвии и осью вращения сверла, при этом изменяется угол движения ϕ_D (рис. 5) [1], достигая своего наибольшего значения вблизи оси вращения инструмента. Повышение величины угла движения отражается на увеличении трения задних поверхностей резцов сверла с плоскостью резания. Происходит увеличение мощности на сверление, и в ходе определения свойств древесины при сверлении снижается

точность измерений. Согласно выражениям (1, 2), величина угла движения зависит от скорости подачи и скорости резания, которую, в свою очередь, определяют исходя из частоты вращения и расстояния от оси вращения до точки на лезвии.

Для определения заднего кинематического угла резания необходимо найти угол движения [1]

$$\operatorname{tg} \phi_D = \frac{v_s}{v_z} = \frac{1000 \cdot v_s}{2 \cdot \pi \cdot n \cdot r}, \quad (1)$$

где v_s – скорость подачи, м/мин,

n – частота вращения тонкого бурового сверла, об./мин,

r – расстояние от выбранной точки на лезвии резца до оси вращения инструмента (радиус резания), мм.

Факторный план исследований и выходная величина

Factorial design studies and the output value

№ п/п	Фактор А n , об./мин	Фактор В u , м/мин	Фактор С r , мм	Выходная величина α_k , град
1	1000	0,05	0,15	8,96
2	10000	0,525	1,325	11,647
3	5500	0,05	1,325	11,94
4	10000	0,05	0,15	11,7
5	5500	0,525	1,325	11,34
6	10000	1	0,15	5,94
7	5500	0,525	1,325	11,34
8	10000	1	2,5	11,64
9	1000	0,525	1,325	8,39
10	5500	0,525	0,15	6,21
11	5500	1	1,325	10,75
12	10000	0,05	2,5	11,98
13	1000	0,05	2,5	11,82
14	1000	1	0,15	-34,71
15	5500	0,525	2,5	11,65
16	1000	1	2,5	8,36
17	5500	0,525	1,325	11,34

Выразим из формулы (1) угол φ_D град

$$\varphi_D = \arctg\left(\frac{v_s}{v_z}\right) = \arctg\left(\frac{1000 \cdot v_s}{2 \cdot \pi \cdot n \cdot r}\right). \quad (2)$$

При этом задний кинематический угол резания, град

$$\alpha_k = \alpha - \varphi_D, \quad (3)$$

где α – задний контурный угол резания, град.

Исходя из технических характеристик мобильного устройства для диагностики состояния древесины сверлением, геометрических параметров используемого тонкого бурового сверла и анализа факторов, влияющих на величину заднего кинематического угла резания, выбраны варьируемые факторы модели, а также пределы их изменения (табл. 1).

Для определения математической модели изменения величины заднего кинематического угла резания использовался центральный композиционный В-план второго порядка (ГОСТ 50.1.040-2002).

Результаты исследований

Разработка и анализ плана исследований осуществлялись в программе STATGRAPHICS Centurion XVI (Statpoint Technologies Inc., Уоррентон (VA), США), где

была составлена таблица плана эксперимента (табл. 2); значения отклика для каждого опыта были определены по формулам (2, 3).

Наибольшее влияние на величину заднего кинематического угла резания оказывают расстояние от оси вращения до точки на лезвии резца и скорость подачи бурового сверла. Регрессионная модель изменения заднего кинематического угла резания тонкого бурового сверла ($R^2 = 0,87$; скорректир. $R^2 = 0,69$; стандартная ошибка оценки регрессии = 6,15)

$$\begin{aligned} \alpha_k = & 2,64459 + 0,00249879 \cdot n - \\ & - 32,412 \cdot u + 11,7116 \cdot r - 1,26811 \cdot 10^{-7} \cdot n^2 + \\ & + 0,0023989 \cdot n \cdot u - 0,000943996 \cdot n \cdot r - \\ & - 5,49532 \cdot u^2 + 10,2141 \cdot u \cdot r - 2,64287 \cdot r^2. \end{aligned}$$

На основании результатов дисперсионного анализа (уровня значимости факторов) статистически значимые эффекты имеют все входные факторы и взаимодействие факторов В и С. Это подтверждает и карта Парето, где соответствующие им колонки пересекают вертикальную линию, представляющую 95 % доверительную вероятность.

Графическое представление результатов обработки данных отображено на примере поверхностей отклика выходной величины на рис. 6, 7 и контурного графика на рис. 8.

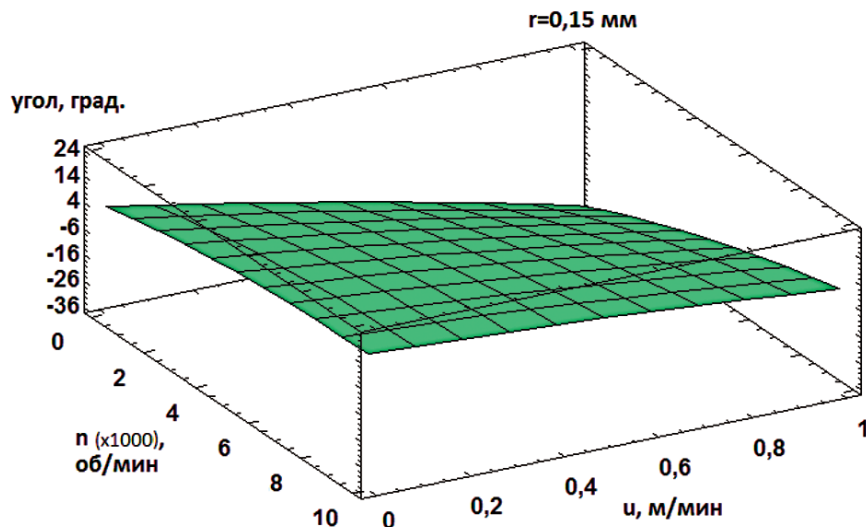


Рис. 6. График поверхности отклика выходной величины (расстояние от оси сверла до рассматриваемой точки на его лезвии 0,15 мм)

Fig. 6. Schedule of the response surface of the output variable (the distance from the axis of the drill to the point in question on its blade 0.15 mm)

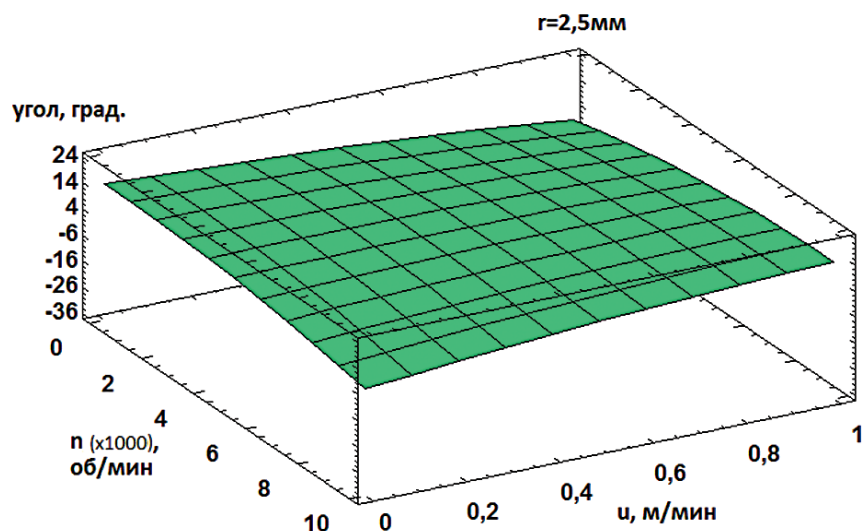


Рис. 7. График поверхности отклика выходной величины (расстояние от оси сверла до рассматриваемой точки на его лезвии 2,5 мм)

Fig. 7. Schedule the response surface of the output variable (the distance from the axis of the drill to the point in question on its blade 2,5 mm)

Разработанная экспериментальная лабораторная установка для диагностики состояния древесины сверлением оснащена электрическим двигателем привода резания с номинальной частотой вращения 4100 об./мин. Безусловно, повышение точности определения свойств древесины сверлением возможно при условии достижения положительных значений задних кинематических углов резцов тонкого бурового сверла. При исполь-

зовании разработанной экспериментальной установки рациональная скорость подачи находится в пределах 0,5 м/мин (рис. 8).

Выводы

Основным критерием при выборе режимов процесса сверления древесины тонкими буровыми сверлами является положительный задний кинематический угол резания, который зависит от конструкции

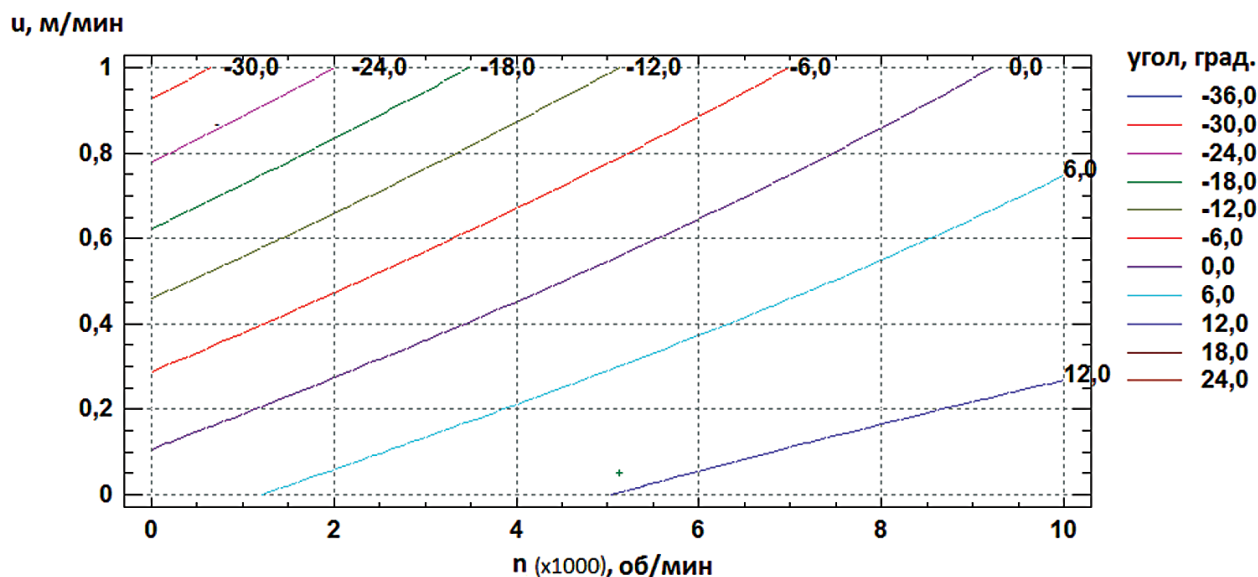


Рис. 8. Контурный график взаимодействия факторов (расстояние от оси сверла до рассматриваемой точки на его лезвии 0,15 мм)

Fig. 8. Contour graph interaction of factors (the distance from the axis of the drill to the point in question on its blade 0,15 mm)

режущего инструмента (контурных углов резания резцов), скоростей главного движения и подачи.

Полученная регрессионная зависимость и ее графические интерпретации (рис. 6–8) в пределах варьирования входных факторов позволяют определять рациональные скоростные режимы процесса сверления при определении свойств древесины и древесных материалов сверлением.

С целью повышения точности измерений свойств древесины при использовании мобильного устройства для диагностики состояния древесины и древесных материалов сверлением, а также при увеличении скоростей подачи тонкого бурового сверла следует увеличить величину заднего контурного угла резания резцов до 20–30°. Возможно использование конической заточки резцов, при этом величина заднего контурного угла резания резцов тонкого бурового сверла увеличивается при приближении к оси вращения инструмента.

Библиографический список

1. Любченко, В.И. Резание древесины и древесных материалов: учебное пособие для вузов / В.И. Любченко. – М.: Лесная пром-сть, 1986. – 296 с.
2. Полубояринов, О.И. Плотность древесины / О.И. Полубояринов. – М.: Лесная пром-сть, 1976. – 160 с.
3. Уголев, Б.Н. Древесиноведение с основами лесного товароведения: учебник для лесотехнических вузов / Б.Н. Уголев. – М.: МГУЛ, 2001. – 340 с.
4. Шарапов, Е.С. Исследование процесса сверления древесины с использованием устройства сбора данных NI USB 6008 / Е.С. Шарапов, В.Ю. Чернов // Изв. вузов. Лесн. журн. – 2012. – № 6. – С. 96–100.
5. Шарапов, Е.С. Обоснование конструкции устройства для исследования свойств древесины сверлением / Е.С. Шарапов, В.Ю. Чернов // Известия СПбГЛТА. – 2011. – № 195. – С. 134–142.
6. Шарапов, Е.С. Результаты экспериментальных исследований свойств древесины круглых лесоматериалов по радиусу ствола / Е.С. Шарапов, А.С. Торопов, В.Ю. Чернов // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. – 2012. – №2. – С. 162–167.
7. Mattheck, C. VTA – Visual tree defect assessment / C. Mattheck, K. Betghe // Proc. 9th Int. Mett. Non-destructive testing, Madison, September 1993.
8. Rinn, F. Ein neues verfahren zur direkten messung der holzdichte bei Laub- und Nadelholzern / F. Rinn, B. Becker, B. Kromer // Dendrochronologia. 1990. № 7 P. 159–168.
9. Rinn F., Schweingruber F.H., Schar E. Resistograph and X-ray density charts of wood comparative evaluation of drill resistance profiles and X-ray density charts of different wood species. Holzforschung. 1996. 50 (4), pp. 303–311.
10. Rinn, F. Resistographic visualization of tree-ring density variations / F. Rinn // Tree Rings, Environment and Humanity, Radiocarbon. 1996. P. 871–878.
11. Wang X., Wiedenbeck J., Ross R.J., Forsman J.W., Erickson J.R., Pilon C., Brashaw B.K. Nondestructive evaluation of incipient decay in hardwood logs. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-162. Madison. WI: U.S. Department of Agriculture. Forest Service. Forest Products Laboratory. 2005. 11p.

KINEMATICS OF DRILLING PROCESS IN WOOD DRILLING RESISTANCE MEASUREMENTS

Sharapov E.S., Assoc. Prof. VSUT, Ph.D. (Tech.)⁽¹⁾; Chernov V.Y., Assoc. Prof. VSUT, Ph.D. (Tech.)⁽¹⁾; Smirnova E.V., pg. VSUT⁽¹⁾

sharapoves@volgatech.net, chernov.vas7936@yandex.ru, smirnovaev@volgatech.net

⁽¹⁾ Volga State University of Technology, 3 Lenin sq., Yoshkar-Ola, Republic of Mari El, Russian Federation, 424000

One of the promising methods to determine both wood and wood-based material properties is a method based on measuring the drilling resistance. When designing new devices to study wood properties by drilling, as well as, to improve the measurement accuracy, the results reliability and the durability of a drilling tool, it is necessary, first of all, to focus on the rational choice of speed characteristics, and the drilling process should be considered through the kinematics. The paper presents some results of the basic geometrical parameters of boring drill bits used and the equation model to determine the movement angle during the drilling process. The main criterion to choose a mode of drilling process with boring drill bits is a positive clearance angle in kinematic, which depends on the design of the drill bit cutting head, cutting speed and feed rate. As a result of this research, we got a regression model of interaction between rotation speed of a drill bit, a feed rate and the distance from the axis of rotation of the drill bit to the point on the cutting edge with the clearance angle in kinematic. In order to improve the accuracy of wood properties' measurements with the use of the mobile device for wood and wood-based materials properties' evaluation by drilling, as well as by increasing the feed rates of the boring drill bits it is necessary to increase the clearance angle in static up to 20-30 degrees. Also, it can be recommended to change the design of a drill bit cutting head to achieve higher accuracy of wood properties' measurements by using conic sharpening of the cutting edges.

Keywords: non-destructive wood properties' evaluation; drilling resistance; cutting angles; spade-type drill bit Resistograph; ResistYX.

References

1. Lyubchenko V.I. *Rezanie drevesiny i drevesnykh materialov* [Wood and wood materials cutting]. Moscow, 1986. 296 p.
2. Poluboyarinov O.I. *Plotnost' drevesiny* [Wood density]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1976. 160 p.
3. Ugolev B.N. *Drevesinovedenie s osnovami lesnogo tovarovedeniya: Uchebnik dlya lesotekhnicheskikh vuzov* [The wood science with the basics timber merchandising]. Moscow, MGUL Publ., 2001. 340 p.
4. Sharapov E.S., Chernov V.Y. *Issledovanie processa sverleniya drevesiny s ispol'zovaniem ustroystva sbora dannykh NI USB 6008* [The research of wood drill process with using a data acquisition device NI USB 6008]. *Izv. vuzov. Lesn. Zhurn* [Bulletin of higher educational institutions. Lesnoy zhurnal], 2012, №. 6, pp. 96-100.
5. Sharapov E.S., Chernov V.Y. *Obosnovanie konstruksii ustroystva dlya issledovaniya svoystv drevesiny sverleniem* [Design of the drilling device for the wood properties researches substantiation]. *Izvestiya SPbGLTA*, 2011, №.195, pp. 134-142.
6. Sharapov E.S., Toropov A.S., Chernov V.Y. *Rezultaty eksperimental'nykh issledovaniy svoystv drevesiny kruglykh lesomaterialov po radiusu stvola* [Experimental researches results of wood properties along the round logs radius]. *Moscow State Forest University Bulletin – Lesnoy Vestnik*, 2012, №. 2, pp. 162–167.
7. Mattheck C., Betghe K. VTA – Visual tree defect assessment. Proc. 9-th Int. Mett. non-destructive testing. Madison. September 1993.
8. Rinn F. et al. Ein neues Verfahren zur direkten Messung der Holzdichte bei Laub- und Nadelhölzern, dendrochronologia 7-1989. pp. 159-169.
9. Rinn F., Schweingruber F.H., Schar E. Resistograph and X-ray density charts of wood comparative evaluation of drill resistance profiles and X-ray density charts of different wood species. *Holzforschung*. 1996. 50 (4), pp. 303-311.
10. Rinn F. Resistographic visualization of tree-ring density variations. *Tree Rings. Environment and Humanity. Radiocarbon*. 1996. pp. 871-878.
11. Wang X., Wiedenbeck Y., Ross R.Y., Forsman Y.W., Erickson Y.R., Pilon C., Brashaw B.K. Nondestructive evaluation of incipient decay in hardwood logs. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-162. Madison. WI: U.S. Department of Agriculture. Forest Service. Forest Products Laboratory. 2005. 11 p.