

УДК 620.179.52; 674.051; 681.2.083  
DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.2.103

## **ВЛИЯНИЕ ВЛАЖНОСТИ НА ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СВОЙСТВ ДРЕВЕСИНЫ МЕТОДОМ ИЗМЕРЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ СВЕРЛЕНИЮ**

*Е.С. Шарапов, канд. техн. наук, доц.*

*В.Ю. Чернов, канд. техн. наук, доц.*

*А.С. Торопов, д-р техн. наук, проф.*

*Е.В. Смирнова, асп.*

Поволжский государственный технологический университет, пл. Ленина д. 3,  
г. Йошкар-Ола, Республика Марий Эл, Россия, 424000;  
e-mail: sharapoves@volgatech.net

Метод диагностики и контроля качества древесины, основанный на измерении сопротивления материала просверливанию, является одним из активно развивающихся направлений в области древесиноведения и экспертизы деревянных строительных конструкций. Способ определения свойств древесины сверлением основан на процессе резания. При этом влажность древесины оказывает значимое влияние как на сам процесс резания, так и на ее объемную плотность. Имеющиеся результаты исследований влияния влажности на сопротивление древесины просверливанию тонкими буровыми сверлами не позволяют с достаточной точностью описать истинный характер взаимодействия данных величин. Представленные в данной работе результаты получены с помощью мобильного устройства для диагностики состояния древесины и древесных материалов сверлением ResistYX (ООО «Новые лесные технологии», г. Йошкар-Ола), оснащенного стандартными тонкими буровыми сверлами. Экспериментально установлено значимое влияние влажности древесины на мощность сверления, процесс стружкообразования и точность определения свойств древесины. Это связано, в частности, с изменением механических характеристик древесины, а также упругим восстановлением поверхности резания. Повышение влажности древесины от абсолютно сухого состояния до уровня нормализованной влажности (10...12 %) характеризуется снижением мощности на сверление в среднем на 21 % для образцов из березы (*Bétula Péndula*) и на 15 % для образцов из сосны (*Pinus sylvéstris*) и дуба (*Quércus Róbur*). Дальнейшее повышение влажности образцов древесины до 90...150 % сопровождается увеличением мощности сверления в среднем на 50 % для березы и на 25 % для сосны и дуба. Аппроксимация экспериментальных данных осуществлена с использованием непрерывной кусочно-гладкой функции на интервалах прямой и обратной зависимостей мощности сверления от влажности древесины (коэффициент детерминации для сосны – 0,69, березы – 0,85, дуба – 0,71).

*Ключевые слова:* плотность древесины, влажность древесины, неразрушающий контроль качества древесины, измерение сопротивления сверлению, резистограф, ResistYX.

## Введение

Метод диагностики и контроля качества древесины и древесных материалов на основе измерения сопротивления материала просверливанию активно развивается как в древесиноведении, так и при проведении экспертизы деревянных строительных конструкций [9, 13, 15, 16, 18]. На основе данного метода исследований разработаны известные зарубежные устройства для определения внутреннего состояния растущих деревьев и конструкций из древесины: Резистограф® («Rinntech», Хайдельберг, Германия) и IML-Resi («IML System GmbH», Вислох, Германия) [10, 17]. В целях повышения точности измерений свойств древесины авторами разработано и запатентовано новое мобильное устройство для диагностики состояния древесины сверлением ResistYX (ООО «Новые лесные технологии», г. Йошкар-Ола, РФ) [2, 3]. Проведены экспериментальные исследования изменения свойств древесины круглых лесоматериалов по радиусу ствола [6]. На специализированном лабораторном оборудовании (DA-X, «GreCon», Альфельд, Германия) с помощью рентгеновского излучения и мобильного устройства для определения свойств древесины сверлением [2, 3] выполнен сравнительный анализ способов определения плотности древесины сосны (*Pinus sylvestris*), бука (*Fagus sylvatica*) и ясеня (*Fraxinus excelsior*) [7]. Результаты выполненных экспериментальных и теоретических исследований свидетельствуют о высокой корреляции величин мощности сверления и плотности древесины как по всему образцу, так и отдельно в пределах годовичных слоев, что подтверждает ранее полученные результаты, опубликованные в работах [10, 17, 19]. Метод определения свойств древесины сверлением основан на процессе резания. При этом влажность древесины оказывает значимое влияние не только на сам процесс резания, но и на величину ее объемной плотности.

Повышение величины сопротивления древесины просверливанию при определении ее свойств и сравнении образцов с влажностью 10 и 60...100 % отмечено в работе [8]. Отсутствие значимого влияния влажности на сопротивление древесины эвкалипта (*Eucalyptus globulus*) просверливанию отмечено в работе [11], однако диапазон изменения влажности составлял лишь 55...75 %. С. Mattheck и др. отмечали незначительное влияние влажности на определение свойств древесины сверлением при использовании Резистографа® [14]. Линейная модель взаимосвязи влажности и сопротивления древесины просверливанию представлена С. J. Lin и др. [12], при этом отмечается высокая вариация выходных данных, что снижает качество полученной регрессионной модели и результатов исследований. Существующие данные влияния влажности на сопротивление древесины просверливанию тонкими буровыми сверлами не позволяют с достаточной точностью прогнозировать истинный характер взаимодействия данных величин.

Целью данной работы являлось определение взаимодействия влажности и мощности, потребляемой при сверлении древесины сосны (*Pinus sylvestris*), березы (*Bétula Péndula*) и дуба (*Quércus Róbur*) тонкими буровыми сверлами.

### Материалы и методы

План экспериментальных исследований включал несколько этапов: изготовление исследуемых образцов с учетом направления волокон древесины и ориентации годичных слоев; выдерживание исследуемых образцов в контролируемых внешних условиях по температуре и влажности воздуха для приобретения древесиной номинальной равновесной влажности; измерение мощности, затрачиваемой на сверление образцов древесины тонкими буровыми сверлами; обработка экспериментальных данных.

Математические преобразования результатов исследований состояли из определения мощности холостого хода и мощности, затрачиваемой на трение хвостовика тонкого бурового сверла о стенки отверстия и стружку; расчета среднего значения мощности сверления для каждого образца; определения влажности образцов; регрессионного анализа данных.

Экспериментальные исследования проводили на образцах древесины сосны (*Pinus sylvestris*), березы (*Bétula Péndula*) и дуба (*Quércus Róbur*) при влажности в интервалах, %: 0, 5...7, 10...15, 20...35, 50...70 и 90...150. Опыты осуществляли на 10 образцах (каждой породы) размерами 50×20×100 мм (рис. 1). Для повышения точности измерений плотности, в том числе микроплотности по годичным слоям, изготавливали радиальные образцы с «максимально» параллельным расположением годичных слоев.

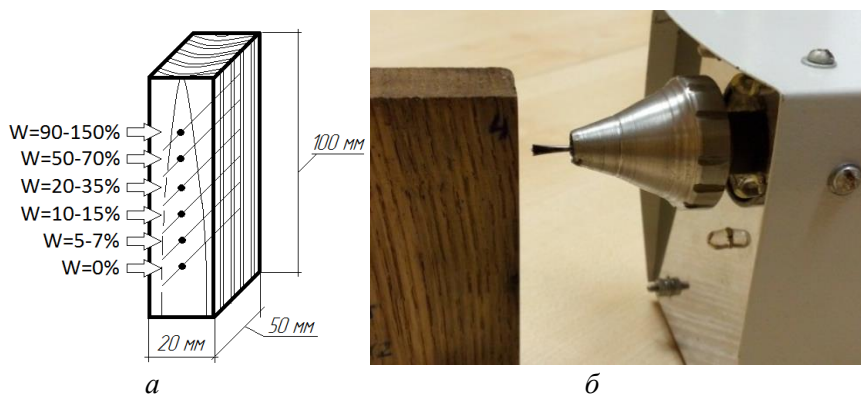


Рис. 1. Геометрические параметры исследуемых образцов древесины и расположение просверливаемых отверстий (а), а также внешний вид мобильного устройства для диагностики состояния древесины и древесных материалов сверлением ResistYX (б)

До абсолютно сухого состояния образцы высушивали в сушильном шкафу в соответствии с ГОСТ 16483.7–71. Равновесная влажность (около 6 %) была достигнута при выдерживании образцов в отопляемых комнатных условиях. Для приобретения нормализованной влажности образцы кондиционировали в лабораторной климатической камере. Изменение условий выдержки образцов в климатической камере (температура 20...22 °С, влажность воздуха 85...90 %) позволило повысить их влажность до 20...35 %. Влажность свыше 50 % древесина набирала путем вымачивания образцов в воде в течение установленного промежутка времени.

Опыты по определению свойств древесины методом измерения сопротивления сверлению проводили с использованием запатентованной лабораторной экспериментальной установки ResistYX (ООО «Новые лесные технологии», г. Йошкар-Ола, Россия) [4, 5], оснащенной стандартными буровыми сверлами компании «Rinntech» (Хайдельберг, Германия). При этом на каждом образце было сделано по 6 сквозных просверливаний с шагом 10 мм для каждого значения влажности  $W$  (рис. 1, а). Результаты измерений отображались и сохранялись на ЭВМ с использованием программных комплексов «LabVIEW» («National Instruments», Остин, Техас, США) и MS «Excel». В целях повышения точности измерений при проведении исследований лабораторная экспериментальная установка и образцы закрепляли неподвижно (рис. 1, б). Частота дискретизации выходных сигналов составляла 1 кГц, что соответствует разрешению 140 измеряемых данных по мощности на 1 мм пути прохождения тонкого бурового сверла.

Измерение влажности и плотности образцов древесины осуществляли стереометрическим способом с использованием электронных лабораторных весов ViBRA AF-R220CE («Shinko Denshi Co. Ltd», Токио, Япония) по ГОСТ 16483.1–84 и ГОСТ 16483.7–71. Измерение массы образцов проводили до и после каждого просверливания, полученные данные сводили в общий отчет. После каждого просверливания образцы полностью очищали от стружки, оставшейся в отверстиях.

По данным эксперимента для каждого образца и установленной влажности в программе MS «Excel» отдельно рассчитывали динамический ряд данных по мощности, затраченной непосредственно на сверление (без мощности холостого хода и мощности, расходуемой на трение хвостовика тонкого бурового сверла в отверстии).

Регрессионный анализ взаимодействия данных влажности древесины и мощности сверления осуществляли в программе «TableCurve 2D» («Systat Software Inc.», Сан Хосе, США). Для каждой породы древесины по полученным средним значениям были построены графики зависимости мощности сверления от влажности древесины. В целях повышения точности описания взаимодействия влажности древесины и мощности сверления было принято решение использовать непрерывную кусочно-гладкую функцию, состоящую

из двух интервалов с функциями  $f_0(x)$  и  $f_1(x)$ , разделенных точкой смены формул ( $x_1$ ), которую находили как точку пересечения функций  $f_0(x)$  и  $f_1(x)$ .

В диапазонах влажности от 0 до 10...15 % и от 10...15 % до максимальной влажности 90...150 % найдены регрессионные модели разного вида, которые образуют непрерывную кусочно-гладкую функцию  $f(x)$ :

$$f(x) = \begin{cases} f_0(x), & x \leq x_1 \\ f_1(x), & x_1 < x_2 \end{cases} \quad \text{или} \quad f(x) = \begin{cases} a_0 + b_0 x^3, & x \leq x_1 \\ a + b / x, & x_1 < x_2 \end{cases}.$$

#### *Результаты исследований и их обсуждение*

В ходе исследования определено значимое влияние влажности древесины на мощность сверления и, соответственно, на точность определения свойств древесины методом измерения сопротивления просверливанию.

Сверление древесины относится к закрытому виду резания, поэтому на основании существующих данных о влиянии влажности на процессы элементарного и сложного резания [1] предполагалось плавное увеличение мощности сверления с повышением влажности древесины. Однако экспериментальные данные показали, что с повышением влажности древесины от 0 % до уровня нормализованной влажности (10...12 %) наблюдалось снижение мощности микросверления в среднем на 21 % для образцов из березы и на 15 % для образцов из сосны и дуба. Дальнейшее повышение влажности образцов до 90...150 % сопровождалось увеличением мощности сверления в среднем на 50 % для березы и на 25 % для сосны и дуба.

На наш взгляд, это связано с тем, что повышение влажности от абсолютно сухого состояния до уровня нормализованной влажности интенсивнее сказывается на снижении механических характеристик древесины и, как следствие, на снижении усилия резания и мощности сверления. Последующее повышение уровня влажности древесины способствует увеличению сил трения поверхностей режущей головки бурового сверла и, соответственно, мощности сверления вследствие упругого восстановления поверхности резания.

Необходимо отметить влияние влажности древесины на процесс стружкообразования, при этом с повышением количества влаги в древесине наблюдалось уплотнение стружки в просверливаемом отверстии.

Для повышения точности аппроксимации результатов исследований взаимосвязи рассматриваемых параметров может быть использована непрерывная кусочно-гладкая функция на интервалах прямой и обратной зависимости мощности сверления от влажности древесины.

Графические отображения результатов экспериментальных исследований (точки), а также функций  $f(x)$  (кривые) для каждой из исследуемых пород древесины представлены на рис. 2–4.

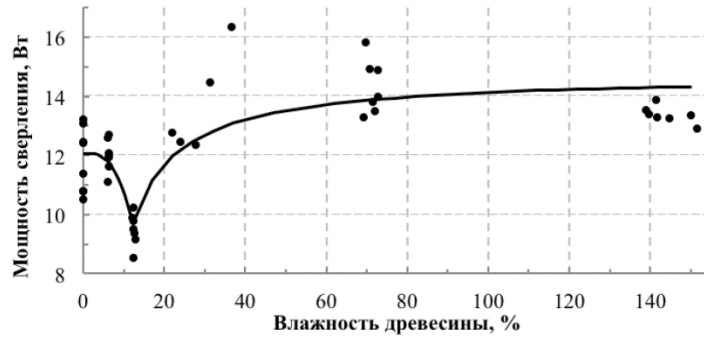


Рис. 2. Результаты экспериментальных исследований взаимодействия влажности древесины сосны с мощностью сверления (коэффициенты моделей (1):  $a_0 = 12,05431$ ;  $b_0 = -0,001309$ ;  $a = 14,72845$ ;  $b = -61,138359$ )

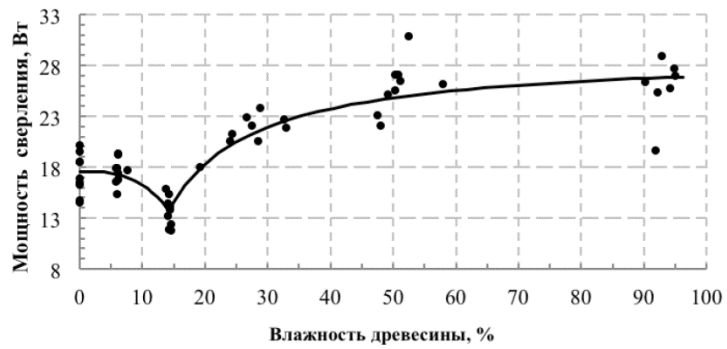


Рис. 3. Результаты экспериментальных исследований взаимодействия влажности древесины березы с мощностью сверления ( $a_0 = 17,58023$ ;  $b_0 = -0,00136$ ;  $a = 29,14136$ ;  $b = -215,2002$ )

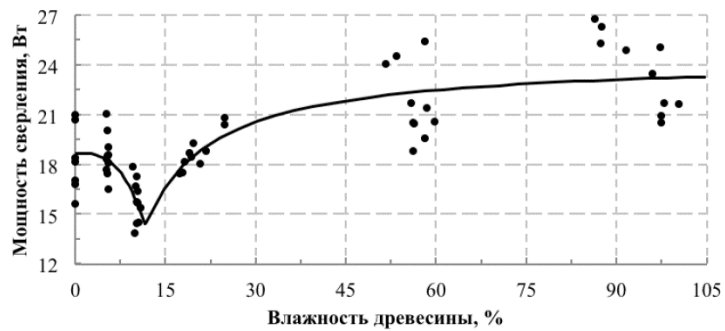


Рис. 4. Результаты экспериментальных исследований взаимодействия влажности древесины дуба с мощностью сверления ( $a_0 = 18,72768$ ;  $b_0 = -0,00274$ ;  $a = 24,38915$ ;  $b = -114,9241$ )

Определены коэффициенты регрессионных моделей  $f_0(x)$  и  $f_1(x)$  (рис. 2–4) и их основные статистики, которые представлены в таблице.

**Основные статистики регрессионных моделей  $f_0(x)$  и  $f_1(x)$**

Коэффициенты моделей	Стандартная ошибка	t-критерий	P> t	r <sup>2</sup>	Скорректированный r <sup>2</sup>	Стандартная ошибка оценки регрессии	F-критерий	
Сосна	$a_0$	0,2080	57,96	0,00000	0,67	0,66	0,78	46,0
	$b_0$	0,0002	-6,78	0,00000				
	$a$	0,3360	43,83	0,00000	0,74	0,72	1,13	68,4
	$b$	7,3927	-8,27	0,00000				
Береза	$a_0$	0,3840	45,75	0,00000	0,59	0,55	1,56	35,6
	$b_0$	0,0003	-5,97	0,00000				
	$a$	0,6445	45,22	0,00000	0,85	0,84	2,14	192,0
	$b$	15,5309	-13,86	0,00000				
Дуб	$a_0$	0,3333	56,18	0,00000	0,49	0,45	1,39	26,5
	$b_0$	0,0005	-5,15	0,00002				
	$a$	0,6432	37,92	0,00000	0,72	0,70	1,76	92,7
	$b$	20,4879	-5,61	0,00001				

Таким образом, влияние влажности на точность определения свойств древесины методом измерения сопротивления сверлению можно описать регрессионными моделями в виде непрерывных кусочно-гладких функций:

для сосны

$$P_c = \begin{cases} a_0 + b_0 W^3; & 0 \leq 12,16 \\ a + b / W; & 12,16 < W_{\max} \end{cases};$$

для березы

$$P_b = \begin{cases} a_0 + b_0 W^3; & 0 \leq 14,04 \\ a + b / W; & 14,04 < W_{\max} \end{cases};$$

для дуба

$$P_d = \begin{cases} a_0 + b_0 W^3; & 0 \leq 14,47 \\ a + b / W; & 14,47 < W_{\max} \end{cases},$$

где  $P$  – мощность сверления, Вт;

$W$  – влажность древесины, %;

$W_{\max}$  – максимальная влажность древесины.

Для каждой непрерывной кусочно-гладкой функции были рассчитаны общие коэффициенты детерминации: для сосны – 0,69; березы – 0,85; дуба – 0,71.

#### Выводы

1. Влажность является одним из основных параметров, влияющих на точность определения свойств древесины методом измерения сопротивления сверлению.

2. Повышение влажности древесины от абсолютно сухого состояния до уровня нормализованной влажности характеризуется снижением мощности сверления тонкими буровыми сверлами по причине уменьшения механических свойств древесины. Дальнейшее повышение влажности образцов древесины исследуемых пород сопровождается ростом мощности сверления, что связано с увеличением сил трения режущей головки сверла с поверхностью резания и обработки.

3. Изменение влажности древесины оказывает значимое влияние на процесс стружкообразования, при этом изменяются геометрические параметры стружки, а также процесс ее перемещения в отверстии.

4. Использование непрерывной кусочно-гладкой функции на интервалах прямой и обратной зависимостей мощности сверления от влажности древесины позволяет повысить точность математического описания результатов исследований.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Любченко В.И. Резание древесины и древесных материалов: учеб. пособие для вузов. М.: Лесн. пром-сть, 1986. 296 с.
2. Устройство для измерения сопротивления сверлению: пат. 95128 РФ МПК 6 G01 N3/40 / Шарапов Е.С., Чернов В.Ю., Бычкова Т.В. №2010106686/22; заявл. 24.02.2010; опубл. 10.06.2010.
3. Устройство для измерения сопротивления сверлению: пат. 2448811 РФ МПК 6 B23B 25/06 / Шарапов Е.С., Чернов В.Ю., Чернов Ю.В. №2010145313/28; заявл. 08.11.2010; опубл. 27.04.2012.
4. Шарапов Е.С., Чернов В.Ю. Исследование процесса сверления древесины с использованием устройства сбора данных NI USB 6008 // Лесн. журн. 2012. № 6. С. 96–100. (Изв. высш. учеб. заведений).
5. Шарапов Е.С., Чернов В.Ю. Обоснование конструкции устройства для исследования свойств древесины сверлением // Изв. СПбГЛТА. 2011. № 195. С. 134–142.
6. Шарапов Е.С., Торопов А.С., Чернов В.Ю. Результаты экспериментальных исследований свойств древесины круглых лесоматериалов по радиусу ствола // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2012. № 2. С. 162–167.
7. Шарапов Е.С., Чернов В.Ю. Сравнительный анализ способов определения плотности древесины с помощью рентгеновского излучения и устройства для измерения сопротивления сверлению // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2014. № 2. С. 89–95.
8. Eckstein D., Saß U. Bohrwiderstandsmessungen an Laubbäumen und ihre holzanatomische Interpretation // HolzRohWerkst. 1994. N52. P. 279–286.
9. Gretchen L., Bohumil K. and Ron A. In situ assessment of structural timber // State of the Art Report of the RILEM Technical Committee 215-AST. 2010. P. 51–57.
10. Isik F., Li B.L. Rapid assessment of wood density of live trees using the Resistograph for selection in tree improvement programs // Can. J. Forest Res. 2003. №33(12). P. 2426–2435.
11. Johnstone D., Ades P., Moore G.M., Smith I.W. Using an IML-Resi drill to assess wood density in *Eucalyptus globulus* subsp. *pseudoglobulus*. Australian Forestry. 2011. N74(3). P. 190–196.



12. *Lin C.J., Wang S.Y., Lin F.C., Chiu C.M.* Effect of moisture content on the drill resistance value in Taiwan plantation wood // *Wood Fiber Sci.* 2003. N35(2). P. 234–238.
13. *Mattheck C. and Betge K.* VTA – Visual tree defect assessment // *Proc. 9th Int. Mett. non-destructive testing.* Madison. September, 1993.
14. *Mattheck C., Bethge K., Albrecht W.* How to read the results of resistograph // *M. Arboricultural Journal.* 1997. N21 (4). P. 331–346.
15. *Rinn F.* Catalog of relative density profiles of trees, poles and timber derived from resistograph microdrilling // *Proceedings of the 9th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood.* September 22–24. 1993. Madison. WI. Published by Conferences & Institutes. Washington State University. 1994. P. 61–67.
16. *Rinn F.* Resistographic visualization of tree-ring density variations // *Tree Rings. Environment and Humanity. Radiocarbon.* 1996. P. 871–878.
17. *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. N50 (4), P. 303–311.
18. *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. 11 p.
19. *Winistorfer P.M., Xu W., Wimmer R.* Application of a drill resistance technique for density profile measurement in wood composite panels // *Forest Products Journal.* 1995. N45(6). P. 90–93.

Поступила 30.11.15

UDC 620.179.52; 674.051; 681.2.083  
DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.2.103

### **The Impact of Moisture Content on the Accuracy of Wood Properties Evaluation by Drilling Resistance Measurement Method**

*E.S. Sharapov, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor*

*V.Yu. Chernov, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor*

*A.S. Toropov, Doctor of Engineering Sciences, Professor*

*E.V. Smirnova, Postgraduate Student*

Volga State University of Technology, Lenin sq., 3, Yoshkar-Ola, Mari El Republic, 424000, Russian Federation; e-mail: sharapoves@volgatech.net

The method of diagnostics and control of wood on the basis of drilling resistance measuring is one of the rapidly developing areas in the field of wood science and examination of wooden building constructions. The method of wood properties evaluation by drilling is based on the cutting process. Thus wood moisture content has a significant impact both on the cutting process and density determination. The available results of the studies of the influence of moisture content on wood drilling resistance using boring drill bits do not allow to describe the true nature of the interaction of these variables with sufficient accuracy. The investigations were carried out by a mobile device for wood and wood materials properties evaluation by drilling "ResistYX" (New Forest Technology LLC, Yoshkar-Ola), equipped with the standard drill bits. The significant impact of wood moisture content on wood drilling power, the process of wood chip formation and the accuracy of wood properties evaluation

tion was established experimentally. It is related to changes in the mechanical properties of wood, and with an elastic recovery of cutting surface. The increasing of wood moisture content from absolutely dry condition to a normalized moisture level (10...12 %) is characterized by the decreased drilling power in average of 21 % for birch (*Bétula Péndula*) and 15 % for the samples of pine (*Pínus sylvéstris*) and oak (*Quércus Róbur*). A further increase of moisture content of wood samples up to 90...150 % is accompanied by the increasing of drilling power in average up to 50 % for birch and 25 % for pine and oak. The approximation of experimental data was carried out by using continuous piecewise smooth function on the intervals of direct and inverse relationship of drilling power with wood moisture content (coefficient of determination for pine – 0.69, for birch – 0.85, for oak – 0.71).

*Keywords:* wood density, wood moisture content, non-destructive wood properties control, drilling resistance measurement, resistograph, ResistYX.

#### REFERENCES

1. Lyubchenko V.I. *Rezanie drevesiny i drevesnykh materialov* [Wood and Wood Materials Cutting]. Moscow, 1986. 296 p.
2. Sharapov E.S., Chernov V.Yu., Bychkova T.V. *Ustroystvo dlya izmereniya soprotivleniya sverleniyu* [The Device for Drill Resistance Measuring]. Patent RF, no. 95128, 2010.
3. Sharapov E.S., Chernov V.Yu., Chernov Yu.V. *Ustroystvo dlya izmereniya soprotivleniya sverleniyu* [The Device for Drill Resistance Measuring]. Patent RF 2448811, 2010.
4. Sharapov E.S., Chernov V.Yu. *Issledovanie protsessa sverleniya drevesiny s ispol'zovaniem ustroystva sbora dannykh NI USB 6008* [The Research of Wood Drilling Process Using the Data Acquisition Device NI USB 6008]. *Lesnoy Zhurnal*, 2012, no. 6, pp. 96–100.
5. Sharapov E.S., Chernov V.Yu. *Obosnovanie konstruktsii ustroystva dlya issledovaniya svoystv drevesiny sverleniem* [Design Rationale of the Drilling Device for Wood Properties Evaluation]. *Izvestia SPbLTA*, 2011, no. 195, pp. 134–142.
6. Sharapov E.S., Toropov A.S., Chernov V.Yu. *Rezul'taty eksperimental'nykh issledovaniy svoystv drevesiny kruglykh lesomaterialov po radiusu stvola* [Experimental Researches Results of Wood Properties Along the Round Logs Radius]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa — Lesnoy vestnik* [Moscow State Forest University Bulletin – Lesnoy Vestnik], 2012, no. 2, pp. 162–167.
7. Sharapov E.S., Chernov V.Yu. *Sravnitel'nyy analiz sposobov opredeleniya plotnosti drevesiny s pomoshch'yu rentgenovskogo izlucheniya i ustroystva dlya izmereniya soprotivleniya sverleniyu* [Comparative Analysis of Wood Density Techniques Determination with Using X-Ray Radiation and Device for Drilling Resistance Measurements]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa — Lesnoy vestnik* [Moscow State Forest University Bulletin – Lesnoy Vestnik], 2014, no. 2, pp. 89–95.
8. Isik F., Li B.L. *Rapid Assessment of Wood Density of Live Trees Using the Resistograph for Selection in Tree Improvement Programs*. *Can. J. Forest Res.*, 2003, no. 33(12), pp. 2426–2435.
9. Eckstein D., Saß U. *Bohrwiderstandsmessungen an Laubbäumen und ihre holzanatomische Interpretation*. *HolzRohWerkst.*, 1994, no. 52, pp. 279–286.
10. Gretchen L., Bohumil K., Ron A. *In Situ Assessment of Structural Timber*. *State of the Art Report of the RILEM Technical Committee 215-AST*, 2010, pp. 51–57.

11. Johnstone D., Ades P., Moore G.M., Smith I.W. Using an IML-Resi Drill to Assess Wood Density in Eucalyptus Globulus Subsp Pseudoglobulus. *Australian Forestry*, 2011, no. 74(3), pp. 190–196.

12. Lin C.J., Wang S.Y., Lin F.C., Chiu C.M. Effect of Moisture Content on the Drill Resistance Value in Taiwania Plantation Wood. *Wood Fiber Sci.*, 2003, no. 35(2), pp. 234–238.

13. Mattheck C., Betghe K. VTA – Visual Tree Defect Assessment. *Proc. 9th Int. Mett. Non-Destructive Testing*. Madison, 1993.

14. Mattheck C., Bethge K., Albrecht W. How to Read the Results of Resistograph *M. Arboricultural Journal*, 1997, no. 21 (4), pp. 331–346.

15. Rinn F. *Resistographic Visualization of Tree-Ring Density Variations. Tree Rings. Environment and Humanity. Radiocarbon*, 1996, pp. 871–878.

16. Rinn F. Catalog of Relative Density Profiles of Trees Poles and Timber Derived from Resistograph Microdrilling. *Proc. 9th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood. September 22–24, 1993. Madison. WI. Published by Conferences & Institutes*. Washington, 1994, pp. 61–67.

17. 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, no. 50 (4), pp. 303–311.

18. 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.

19. Winistorfer P.M., Xu W., Wimmer R. Application of a Drill Resistance Technique for Density Profile Measurement in Wood Composite Panels. *Forest Products Journal*, 1995, no. 45(6), pp. 90–93.

Received on November 30, 2015

---