

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДРЕВЕСИНЫ МЕТОДОМ ИЗМЕРЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ СВЕРЛЕНИЮ

^{1,2}Е. С. Шарапов, ¹Е. В. Смирнова

¹Поволжский государственный технологический университет (г. Йошкар-Ола)

²Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова
(г. Архангельск)

Мобильное устройство для измерения сопротивления сверлению IML RESI PD-400 и стандартное тонкое буровое сверло (IML System GmbH, Вислох, Германия) использовались для установления взаимосвязи сопротивления древесины сверлению и подаче с плотностью, модулем упругости и пределом прочности бездефектной древесины сосны (*Pinus sylvestris* L.), бука (*Fagus sylvatica* L.), дуба (*Quercus robur* L.) и липы (*Tilia europaea* L.). Испытания проводились на образцах в абсолютно сухом состоянии, кондиционированных при 20°C/65% RH и 20°C/90% RH и пропитанных водой при варьируемой скорости подачи тонкого бурового сверла 0.5, 1.0 и 1.5 м/мин и фиксированной частоте его вращения 2000 мин⁻¹. Получены линейные модели определения плотности, модуля упругости и прогнозирования предела прочности древесины при статическом изгибе на основании данных сопротивления сверлению и подаче. Выявлено отсутствие статистически значимого влияния влажности древесины на определение модуля упругости методом измерения сопротивления сверлению. Значимое влияние влажности для определения плотности древесины установлено для образцов влажностью выше и ниже предела насыщения клеточных стенок. Максимальный эффект на коэффициент детерминации для линейных моделей определения плотности и модуля упругости древесины методом измерения сопротивления сверлению оказывает порода древесины. Для всех условий эксперимента сопротивление древесины сверлению являлось оптимальным параметром по сравнению с сопротивлением подаче, обеспечивающим максимальную точность (R²) определения плотности и модуля упругости древесины методом измерения сопротивления сверлению. Предполагается, что установленные модели взаимосвязи между сопротивлением древесины сверлению, модулем упругости и плотностью древесины могут быть использованы для оценки физико-механических свойств и внутреннего состояния древесины для радиального и тангенциального направлений сверления относительно направления волокон.

Ключевые слова: древесина; плотность; модуль упругости; сопротивление сверлению; сопротивление подаче; тонкое буровое сверло.

Введение. Определение физико-механических свойств и внутреннего состояния древесины и древесных материалов производится на основе прямых или косвенных испытаний разрушающими или неразрушающими методами, среди которых можно выделить в качестве основных акустические, электромагнитные и методы, основанные на механическом воздействии на предмет труда [1-3]. Выбор метода исследования зависит от ряда факторов, касающихся условий проведения измерений, наличия соответствующего лабораторного оборудо-

вания, квалификации персонала и задач исследования.

Одним из квазинеразрушающих методов [4] определения плотности и механических свойств древесины, при котором осуществляется частичное разрушение материала с сохранением эксплуатационных характеристик объекта исследований, является метод измерения сопротивления сверлению. Данный метод может быть основан на измерении мощности резания и подачи, возникающих при просверливании древесины и древесных материалов тонкими буровыми сверлами, диа-

метр режущей части которых не превышает 3 мм. Метод исследований хорошо себя зарекомендовал при оперативной диагностике и мониторинге технического состояния деревянных строительных конструкций, в частности при обследовании зданий, опор линий электропередач и мостов [5, 6]. Анализ полученных в ходе обследования данных о физико-механических свойствах древесины позволяет оценить текущее состояние и надежность деревянных конструкций, осуществлять прогнозирование технического состояния контролируемого объекта.

Результаты определения взаимосвязи сопротивления древесины сверлению с плотностью и удельным весом древесины отражены в ряде работ [7-16], где теснота связи параметров (R^2) варьируется от 0.25 до 0.93 и зависит от условий проведения измерений: глубины сверления [17], направления сверления относительно направления волокон древесины, геометрии/микрogeометрии тонких буровых сверл [18], породы древесины, диапазона измеряемой плотности [16], скоростных параметров (частоты вращения и скорости подачи тонкого бурового сверла) процесса сверления [19], конструктивных особенностей используемых устройств для измерения сопротивления сверлению и способа обработки экспериментальных данных [17]. Однако стоит отметить, что все исследования проводились с использованием древесины с низким уровнем влажности, измерение сопротивления сверлению осуществлялось с использованием устройств разных производителей, опыты проводились с различными скоростями подачи и частотами вращения сверла, что затрудняет объективное сравнение результатов исследований и снижает их ценность.

Цель исследования – определение влияния породы, влажности древесины и скорости подачи тонкого бурового сверла на точность определения модуля упругости, предела прочности при статическом изгибе и плотности древесины методом измерения сопротивления сверлению.

Объекты и методы исследования. При проведении эксперимента использовали образцы, изготовленные из заболони сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), бука европейского (*Fagus sylvatica* L.), дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) и липы европейской (*Tilia europaea* L.) размерами 10×10×180 мм (рис. 1). Образцы кондиционировали при температуре 20 °С и влажности воздуха 65 % до достижения постоянной массы. Далее, согласно DIN 52186 [20], с помощью универсальной испытательной машины Z010 (ZWICK, Ульм, Германия) определяли модуль упругости при статическом изгибе в тангенциальном направлении и плотность древесины при нормализованной влажности стереометрическим способом. Образцы каждой породы отсортировали по величине модуля упругости в возрастающем порядке и последовательно разделили на 5 групп, что позволило обеспечить минимальную вариацию средней величины и диапазона варьирования модуля упругости между группами (табл. 1).

Первую группу образцов высушивали до абсолютно сухого состояния, вторую и третью кондиционировали при температуре 20 °С и влажности воздуха 65 % и 95 % (20°С/65% RH и 20°С/90% RH соответственно) до достижения постоянной массы, четвертую группу пропитывали водой в вакууме (10,67 кПа) в течение 10 часов. Образцы пятой группы после кондиционирования при 20°С/65% RH использовали для определения взаимосвязи модуля упругости и предела прочности при статическом изгибе в тангенциальном направлении.

Перед процессом сверления для образцов 1-4 групп определили модуль упругости при статическом изгибе в тангенциальном ($E_{\text{ТАН}}$) и радиальном направлениях ($E_{\text{РАД}}$), а также влажность древесины [21]. В итоге использовали 549 образцов для измерения $E_{\text{ТАН}}$, $E_{\text{РАД}}$ и провели 1575 измерений сопротивления сверлению и подаче тонкого бурового сверла при различных величинах влажности, а так-

же 136 образцов кондиционировали при $20^{\circ}\text{C}/65\% \text{RH}$ и использовали для корреляции $E_{\text{тан}}$ и предела прочности при статическом изгибе $\sigma_{\text{изг12}}$.

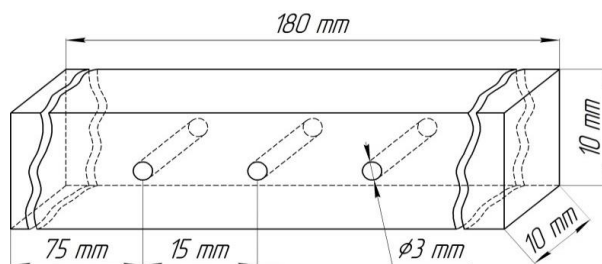


Рис. 1. Размеры образцов для исследования физико-механических свойств древесины и сопротивления древесины сверлению

Таблица 1

Сортировка образцов на группы. Значения модуля упругости при статическом изгибе в тангенциальном направлении ($E_{\text{тан}}$, МПа) и плотности образцов, кондиционированных при $20^{\circ}\text{C}/65\% \text{RH}$, а также условия подготовки образцов для измерения сопротивления сверлению

Порода	№	N	$E_{\text{тан}}$, МПа Мин/Макс/Ср./StD	Плотность, кг/м ³ Мин/Макс/ Ср/StD	Условия подготовки/ σ_{12}	Влажность, %
Сосна	1	38	7360/17100/12858/2356		Абсол. сух. сост.	0
	2	37	7870/16900/12805/2255	459/678/	$20^{\circ}\text{C} / 65\% \text{RH}$	13,2
	3	37	8230/17000/12859/2245	567/47	$20^{\circ}\text{C} / 95\% \text{RH}$	25,4
	4	37	8360/17000/12910/2221		Пропитанные водой	139,8
	5	37	8680/17000/12974/2195		для σ_{12}	13,2
Бук	1	34	7680/12900/11090/1208		Абсол. сух. сост.	0
	2	35	7810/13200/11173/1228	606/749/	$20^{\circ}\text{C} / 65\% \text{RH}$	13,3
	3	35	7930/13300/11212/1192	683/31	$20^{\circ}\text{C} / 95\% \text{RH}$	26
	4	35	7990/13300/11257/1153		Пропитанные водой	109,5
	5	34	8110/13200/11236/1108		для σ_{12}	13,3
Дуб	1	32	4190/10900/6550/1595		Абсол. сух. сост.	0
	2	33	4230/12100/6769/1889	532/780/	$20^{\circ}\text{C} / 65\% \text{RH}$	12,2
	3	33	4290/12200/6817/1914	631/56	$20^{\circ}\text{C} / 95\% \text{RH}$	23,2
	4	32	4320/11600/6705/1728		Пропитанные водой	91,7
	5	32	4330/11800/6747/1759		для σ_{12}	12,2
Липа	1	32	9690/12300/11265/587		Абсол. сух. сост.	0
	2	33	9760/12500/1137/601	481/587/	$20^{\circ}\text{C} / 65\% \text{RH}$	12,4
	3	33	9790/12500/11327/604	523/24	$20^{\circ}\text{C} / 95\% \text{RH}$	24,5
	4	33	9950/12600/11347/610		Пропитанные водой	162,6
	5	33	10000/12800/11382/615		для σ_{12}	12,4

Примечание. Мин/Макс/Ср./StD – минимальное/ максимальное/ среднее/ стандартное отклонение; Абсол. сух. сост. – образцы в абсолютно сухом состоянии; $20^{\circ}\text{C}/65\% \text{RH}$ и $20^{\circ}\text{C}/95\% \text{RH}$ – кондиционированные образцы; N – количество тестируемых образцов соответствующей группы (№)

При проведении исследований использовали мобильное устройство для измерения сопротивления сверлению IML RESI PD-400 и новое стандартное тонкое буровое сверло (IML System GmbH, Вислох, Германия) длиной 400 мм. Диаметр хвостовика сверла 1,5 мм, диаметр режущей хромированной части 3,1 мм.

Образцы просверлили в радиальном направлении перпендикулярно волокнам (см. рис. 1). Каждый образец просверливался три раза (кроме образцов сосны и бука в абсолютно сухом состоянии, не тестируемых при скорости подачи 1.5 м/мин) при варьируемых скоростях подачи 0.5, 1.0 и 1.5 м/мин и с постоянной частотой вращения тонкого бурового сверла 2000 мин^{-1} .

При использовании устройств для измерения сопротивления сверлению и стандартных буровых сверл (IML System GmbH) сопротивления древесины сверлению (DR) и подаче (FR) могут быть преобразованы в мощность сверления (MC, Вт) и усилие подачи (УП, Н) на основании сравнительного анализа работы устройств для определения свойств древесины методом измерения сопротивления сверлению [22] и результатов калибровки усилия подачи [18].

Обновленные модели для преобразования данных можно записать в следующем виде:

$$MC \text{ (Вт)} = 1,261 \cdot DR(\%) + 1,4058, R^2 = 0,99;$$

$$УП \text{ (Н)} = 1,272 \cdot FR(\%) - 4,477, R^2 = 0,93.$$

Цифровые значения усилий сопротивления сверлению и подаче записывались через каждые 0,1 мм глубины просверливания. Данные параметры были сохранены и математически преобразованы с помощью программных продуктов: PD-Tools PRO (IML System GmbH, Вислох, Германия), Microsoft Excel® и SigmaPlot 14 (Systat Software Inc., Сан-Хосе, США).

Каждая комбинация скорости подачи тонкого бурового сверла и частоты его вращения будет оказывать влияние на толщину срезаемого слоя главными режущими кромками и может быть определена как величина подачи на главные режущие кромки тонкого бурового сверла [23, 24]:

$$S_z = \frac{1000 \cdot u_s}{z \cdot n},$$

где S_z – величина подачи на главные режущие кромки тонкого бурового сверла, мм; u_s – скорость подачи, м/мин; z – количество главных режущих кромок; n – частота вращения сверла, мин⁻¹.

Результаты исследования и их обсуждение. В таблице 1 представлены значения модуля упругости при статическом изгибе образцов, кондиционированных при 20°C/65% RH, для последующей сортировки на группы, а также значения плотности при

нормализованной влажности групп образцов, условия последующей обработки образцов и их влажность. После сортировки образцов по группам в каждой из тестируемых пород древесины отсутствовало статистически значимое отличие между средними значениями и стандартными отклонениями $E_{ТАН}$ (доверительный уровень 95 %) внутри групп, что позволило точнее сравнить результаты сопротивления древесины сверлению и подаче между группами образцов с различной влажностью.

Пятая группа образцов всех тестируемых пород древесины использовалась для корреляции модуля упругости и предела прочности при статическом изгибе. Взаимосвязь между пределом прочности при статическом изгибе и сопротивлением сверлению не может быть найдена с высокой точностью ввиду разрушения (частичного разрушения) образца после испытаний просверливанием. С этой целью предел прочности может быть спрогнозирован через модуль упругости с помощью моделей взаимосвязи сопротивления сверлению и подаче с $E_{ТАН}$.

Модели взаимосвязи модуля упругости и предела прочности при статическом изгибе, а также модели взаимосвязи плотности с модулем упругости и пределом прочности при статическом изгибе образцов, кондиционированных при 20°C/65% RH, представлены в таблице 2.

Первоначально сопротивления древесины сверлению (DR) и подаче (FR) раздельно коррелировали для всех групп образцов с плотностью, а также модулем упругости при статическом изгибе в тангенциальном и радиальном направлениях. Коэффициент детерминации (R^2) моделей взаимосвязи зависит от породы древесины, влажности образцов и скорости подачи тонкого бурового сверла (таблица 3 для плотности и таблица 4 для модуля упругости при статическом изгибе в тангенциальном направлении).

Таблица 2

Модели взаимосвязи модуля упругости при статическом изгибе в тангенциальном направлении ($E_{\text{ТАН}}$, МПа), предела прочности при статическом изгибе (σ_{12} , МПа) и плотности при нормализованной влажности (ρ_{12} , кг/м³) образцов, кондиционированных при 20°C/65% RH

Порода	Модель	R ²	N	SEE
Сосна	$\sigma_{12}=0,0079 \cdot E_{\text{ТАН}}+2,67^*$	0,90	37	5,84
	$\sigma_{12}=0,2905 \cdot \rho_{12}-62,305$	0,70	37	9,96
	$E_{\text{ТАН}}=34,7 \cdot \rho_{12}-6784,05$	0,54	186	1525,2
Бук	$\sigma_{12}=0,0073 \cdot E_{\text{ТАН}}+22,70$	0,68	34	5,57
	$\sigma_{12}=0,1552 \cdot \rho_{12}-2,876^*$	0,26	34	8,49
	$E_{\text{ТАН}}=20,494 \cdot \rho_{12}-2812,1^*$	0,30	173	977,1
Дуб	$\sigma_{12}=0,0097 \cdot E_{\text{ТАН}}+9,49$	0,93	32	4,77
	$\sigma_{12}=0,3051 \cdot \rho_{12}-119,32$	0,88	32	6,33
	$E_{\text{ТАН}}=29,608 \cdot \rho_{12}-11953,9$	0,89	162	563,4
Липа	$\sigma_{12}=0,0068 \cdot E_{\text{ТАН}}+4,98^*$	0,56	33	3,73
	$\sigma_{12}=0,1862 \cdot \rho_{12}-16,618^*$	0,66	33	3,26
	$E_{\text{ТАН}}=10,254 \cdot \rho_{12}+5961,6$	0,17	164	544,9

Примечание. R² – коэффициент детерминации; SEE – стандартная ошибка аппроксимации; N – количество измерений; регрессионные модели статистически значимы.

*Статистически незначимые коэффициенты регрессии (95 % доверительный уровень).

В большинстве случаев более тесная корреляция между тестируемыми свойствами древесины определена для сопротивления сверлению в сравнении с сопротивлением подаче. Данное обстоятельство может быть связано с особенностями конструкции устройства для измерения сопротивления сверлению (PD-400): с низкой точностью датчиков, фиксирующих усилие (сопротивление) подаче, или с алгоритмом записи и обработки данных сопротивления подаче. Одной из возможных причин может являться повышенное влияние степени затупления тонких буровых сверл на сопротивление подаче по сравнению с сопротивлением сверлению [18]. В связи с этим для оценки физико-механических свойств и внутреннего состояния бездефектной древесины сопротивление сверлению (DR) является предпочтительным параметром.

На основании тесной взаимосвязи между модулями упругости при статическом изгибе в радиальном и тангенциальном направлениях $E_{\text{ТАН}}$ и $E_{\text{РАД}}$ (для сосны R² = 0.92, для бука R² = 0.97, для дуба R² = 0.99, для липы R² = 0.97) для всех уровней варьирования влажности установлены схожие коэффициенты детерминации и отсутствие значимых различий в корреляциях между DR и $E_{\text{ТАН}}$, а также DR и $E_{\text{РАД}}$.

Анализ моделей, представленных в таблицах 3 и 4, показал, что наиболее низкими

коэффициентами детерминации взаимосвязи параметров DR и $E_{\text{ТАН}}$ характеризуются образцы липы (R² = 0.02...0.09) и бука (R² = 0.00), пропитанные водой. Важным результатом исследований являлось установление отсутствия значимого влияния влажности древесины на взаимосвязь DR и $E_{\text{ТАН}}$, наиболее вероятной причиной которого может являться то, что влажность оказывает влияние на сопротивление сверлению через модуль упругости. Таким образом, целесообразно использовать общие модели определения модуля упругости древесины методом измерения сопротивления сверлению для всех уровней влажности древесины.

На рисунке 2 приведены графики взаимосвязи плотности образцов и сопротивления сверлению при скорости подачи тонкого бурового сверла 1 м/мин. В большинстве тестов отсутствовала статистически значимая разница в корреляциях между сопротивлением сверлению и плотностью древесины образцов в абсолютно сухом состоянии и кондиционированных при 20°C/65% RH, по сравнению с образцами, пропитанными водой, и образцами, кондиционированными при 20°C/95% RH. Выраженный двухуровневый эффект влияния влажности древесины на определение ее плотности методом измерения сопротивления сверлению может быть связан с незна-

чительной разницей в деформативности и прочностных свойствах древесины образцов, выдержанных в соответствующих условиях.

Таблица 3

Модели взаимосвязи плотности древесины при нормализованной влажности и сопротивления сверлению образцов различной влажности

Порода	Скорость подачи, м/мин	Условия подготовки образцов	Модель	R ²	SEE	
<i>Сосна</i>	0.5	Абсол. сух. сост.	$\rho_{12}=323,15+19,65 \cdot DR$	0,76	21,26	
		20°C / 65% RH	$\rho_{12}=259,56+26,43 \cdot DR$	0,87	17,8	
		20°C / 95% RH	$\rho_{12}=258,4+30,2 \cdot DR$	0,76	21,63	
		Пропитанные водой	$\rho_{12}=206,19+33,08 \cdot DR$	0,82	20,71	
	1	Абсол. сух. сост.	$\rho_{12}=313,98+11,28 \cdot DR$	0,86	16,16	
		20°C / 65% RH	$\rho_{12}=276,99+14,4 \cdot DR$	0,85	19,7	
		20°C / 95% RH	$\rho_{12}=250,4+19,16 \cdot DR$	0,77	21,01	
		Пропитанные водой	$\rho_{12}=170,81+24,53 \cdot DR$	0,85	18,91	
	1.5	20°C / 65% RH	$\rho_{12}=283,49+10,37 \cdot DR$	0,83	20,9	
		20°C / 95% RH	$\rho_{12}=235,08+15,78 \cdot DR$	0,84	17,56	
		Пропитанные водой	$\rho_{12}=178,47+19,45 \cdot DR$	0,90	15,82	
		Абсол. сух. сост.	$\rho_{12}=370,66+14,7 \cdot DR$	0,84	13,69	
<i>Бук</i>	0.5	20°C / 65% RH	$\rho_{12}=375,61+14,69 \cdot DR$	0,83	11,82	
		20°C / 95% RH	$\rho_{12}=427,53+16,73 \cdot DR$	0,74	15,91	
		Пропитанные водой	$\rho_{12}=430,39+17,7 \cdot DR$	0,84	13,12	
		Абсол. сух. сост.	$\rho_{12}=376,28+8,32 \cdot DR$	0,77	16,48	
	1	20°C / 65% RH	$\rho_{12}=368,85+9,24 \cdot DR$	0,89	9,49	
		20°C / 95% RH	$\rho_{12}=371,46+12,81 \cdot DR$	0,82	13,25	
		Пропитанные водой	$\rho_{12}=393,57+13,25 \cdot DR$	0,77	15,86	
		20°C / 65% RH	$\rho_{12}=390,53+6,7 \cdot DR$	0,89	9,5	
	1.5	20°C / 95% RH	$\rho_{12}=378,29+9,98 \cdot DR$	0,87	10,97	
		Пропитанные водой	$\rho_{12}=354,27+11,86 \cdot DR$	0,88	11,36	
		Абсол. сух. сост.	$\rho_{12}=400,73+22,84 \cdot DR$	0,85	19,95	
		0.5	20°C / 65% RH	$\rho_{12}=389,16+20,47 \cdot DR$	0,86	23,6
20°C / 95% RH	$\rho_{12}=355,51+29,9 \cdot DR$		0,88	22,14		
Пропитанные водой	$\rho_{12}=275,85+40,3 \cdot DR$		0,58	37,06		
1	Абсол. сух. сост.		$\rho_{12}=365,44+14,64 \cdot DR$	0,90	16,45	
	20°C / 65% RH	$\rho_{12}=371,69+11,85 \cdot DR$	0,91	18,99		
	20°C / 95% RH	$\rho_{12}=348,76+17,97 \cdot DR$	0,91	18,37		
	Пропитанные водой	$\rho_{12}=218,95+26,78 \cdot DR$	0,79	26,5		
<i>Дуб</i>	1.5	Абсол. сух. сост.	$\rho_{12}=382,37+9,58 \cdot DR$	0,87	18,53	
		20°C / 65% RH	$\rho_{12}=345,52+9,56 \cdot DR$	0,93	15,95	
		20°C / 95% RH	$\rho_{12}=352,67+13,46 \cdot DR$	0,88	21,73	
		Пропитанные водой	$\rho_{12}=272,9+18,3 \cdot DR$	0,87	20,77	
	0.5	Абсол. сух. сост.	$\rho_{12}=336,08+21,29 \cdot DR$	0,51	15,95	
		20°C / 65% RH	$\rho_{12}=241,38+29,27 \cdot DR$	0,63	16,34	
		20°C / 95% RH	$\rho_{12}=247,3+30,61 \cdot DR$	0,85	10,39	
		Пропитанные водой	$\rho_{12}=169,73+35,05 \cdot DR$	0,77	10,60	
	<i>Липа</i>	1	Абсол. сух. сост.	$\rho_{12}=216,96+19,28 \cdot DR$	0,77	11
			20°C / 65% RH	$\rho_{12}=210,63+19,89 \cdot DR$	0,78	12,62
			20°C / 95% RH	$\rho_{12}=264,61+19,33 \cdot DR$	0,87	9,5
			Пропитанные водой	$\rho_{12}=204,57+22,14 \cdot DR$	0,81	9,74
1.5		Абсол. сух. сост.	$\rho_{12}=261,39+11,7 \cdot DR$	0,78	10,77	
		20°C / 65% RH	$\rho_{12}=178,75+16,57 \cdot DR$	0,81	11,57	
		20°C / 95% RH	$\rho_{12}=234,63+17,15 \cdot DR$	0,83	11,02	
		Пропитанные водой	$\rho_{12}=187,62+19,24 \cdot DR$	0,87	8,13	

Примечание. R² – коэффициент детерминации; SEE – стандартная ошибка аппроксимации; Абсол. сух. сост. – образцы в абсолютно сухом состоянии; 20°C/65% RH и 20°C/95% RH – кондиционированные образцы.

Таблица 4

Модели взаимосвязи модуля упругости при статическом изгибе в тангенциальном направлении и сопротивления древесины сверлению образцов различной влажности

Порода	Скорость подачи, м/мин	Условия подготовки образцов	Модель	R ²	SEE
Сосна	0.5	Абсол. сух. сост.	$E_{ТАН}=2296,11+984,15 \cdot DR$	0,60	1530,75
		20°C / 65% RH	$E_{ТАН}=2434,78+882,46 \cdot DR$	0,47	1667,37
		20°C / 95% RH	$E_{ТАН}=-1786,76+1150,92 \cdot DR$	0,57	1257,89
		Пропитанные водой	$E_{ТАН}=-863,07+963,24 \cdot DR$	0,49	1334,25
	1	Абсол. сух. сост.	$E_{ТАН}=1899,9+562,11 \cdot DR$	0,67	1379,59
		20°C / 65% RH	$E_{ТАН}=2317,47+515,16 \cdot DR$	0,52	1583,84
		20°C / 95% RH	$E_{ТАН}=-1561,4+697,85 \cdot DR$	0,53	1314,72
		Пропитанные водой	$E_{ТАН}=-1155,39+667,44 \cdot DR$	0,44	1394,29
	1.5	20°C / 65% RH	$E_{ТАН}=2676,39+366,36 \cdot DR$	0,50	1623,67
		20°C / 95% RH	$E_{ТАН}=-1887,66+563,55 \cdot DR$	0,56	1278,04
		Пропитанные водой	$E_{ТАН}=677,29+445,47 \cdot DR$	0,33	1528,30
Бук	0.5	Абсол. сух. сост.	$E_{ТАН}=3327,97+459,96 \cdot DR$	0,42	1152,03
		20°C / 65% RH	$E_{ТАН}=1995,72+435,27 \cdot DR$	0,38	980,64
		20°C / 95% RH	$E_{ТАН}=5169,7+208,51 \cdot DR$	0,09	1069,37
		Пропитанные водой	$E_{ТАН}=7029,89+14,77 \cdot DR$	0,00	1080,75
	1	Абсол. сух. сост.	$E_{ТАН}=2666,6+283,21 \cdot DR$	0,45	1117,68
		20°C / 65% RH	$E_{ТАН}=2837,08+243,23 \cdot DR$	0,32	1025,31
		20°C / 95% RH	$E_{ТАН}=4025,09+177,74 \cdot DR$	0,12	1049,89
		Пропитанные водой	$E_{ТАН}=7287,1-2,32 \cdot DR$	0,00	1081,04
	1.5	20°C / 65% RH	$E_{ТАН}=3542,53+173,33 \cdot DR$	0,31	1033,77
		20°C / 95% RH	$E_{ТАН}=3479,93+159,04 \cdot DR$	0,17	1019,67
		Пропитанные водой	$E_{ТАН}=7559,37-11,77 \cdot DR$	0,00	1080,61
Дуб	0.5	Абсол. сух. сост.	$E_{ТАН}=-361,76+770,24 \cdot DR$	0,80	801,74
		20°C / 65% RH	$E_{ТАН}=-674,78+632,1 \cdot DR$	0,86	728,64
		20°C / 95% RH	$E_{ТАН}=-1988,53+775,51 \cdot DR$	0,88	569,42
		Пропитанные водой	$E_{ТАН}=-3332,79+867,93 \cdot DR$	0,61	763,37
	1	Абсол. сух. сост.	$E_{ТАН}=-966,75+461,11 \cdot DR$	0,74	916,92
		20°C / 65% RH	$E_{ТАН}=-1135,33+362,18 \cdot DR$	0,89	639,69
		20°C / 95% RH	$E_{ТАН}=-2127,44+463,64 \cdot DR$	0,91	495,48
		Пропитанные водой	$E_{ТАН}=-4109,49+547,89 \cdot DR$	0,74	624,27
	1.5	Абсол. сух. сост.	$E_{ТАН}=-829,88+317,29 \cdot DR$	0,79	821,47
		20°C / 65% RH	$E_{ТАН}=-1833,57+288,73 \cdot DR$	0,89	623,08
		20°C / 95% RH	$E_{ТАН}=-1709,61+331,89 \cdot DR$	0,80	731,24
		Пропитанные водой	$E_{ТАН}=-3043,99+376,27 \cdot DR$	0,82	513,76
Липа	0.5	Абсол. сух. сост.	$E_{ТАН}=9221,39+461,22 \cdot DR$	0,36	471,13
		20°C / 65% RH	$E_{ТАН}=7072,69+432,75 \cdot DR$	0,26	524,52
		20°C / 95% RH	$E_{ТАН}=6289,72+288,2 \cdot DR$	0,16	523,94
		Пропитанные водой	$E_{ТАН}=5471,08+255,37 \cdot DR$	0,09	444,33
	1	Абсол. сух. сост.	$E_{ТАН}=7386,97+369,86 \cdot DR$	0,43	446,9
		20°C / 65% RH	$E_{ТАН}=8564,13+172,23 \cdot DR$	0,11	575,77
		20°C / 95% RH	$E_{ТАН}=5801,23+230,15 \cdot DR$	0,27	490,14
		Пропитанные водой	$E_{ТАН}=6948,65+75,56 \cdot DR$	0,02	461,41
	1.5	Абсол. сух. сост.	$E_{ТАН}=7973,13+236,81 \cdot DR$	0,48	425,96
		20°C / 65% RH	$E_{ТАН}=7832,26+165,15 \cdot DR$	0,15	561,66
		20°C / 95% RH	$E_{ТАН}=5427,58+205,21 \cdot DR$	0,26	493,82
		Пропитанные водой	$E_{ТАН}=6771,69+72,54 \cdot DR$	0,03	459,86

Примечание. R² – коэффициент детерминации; SEE – стандартная ошибка аппроксимации; Абсол. сух. сост. – образцы в абсолютно сухом состоянии; 20°C/65% RH и 20°C/95% RH – кондиционированные образцы

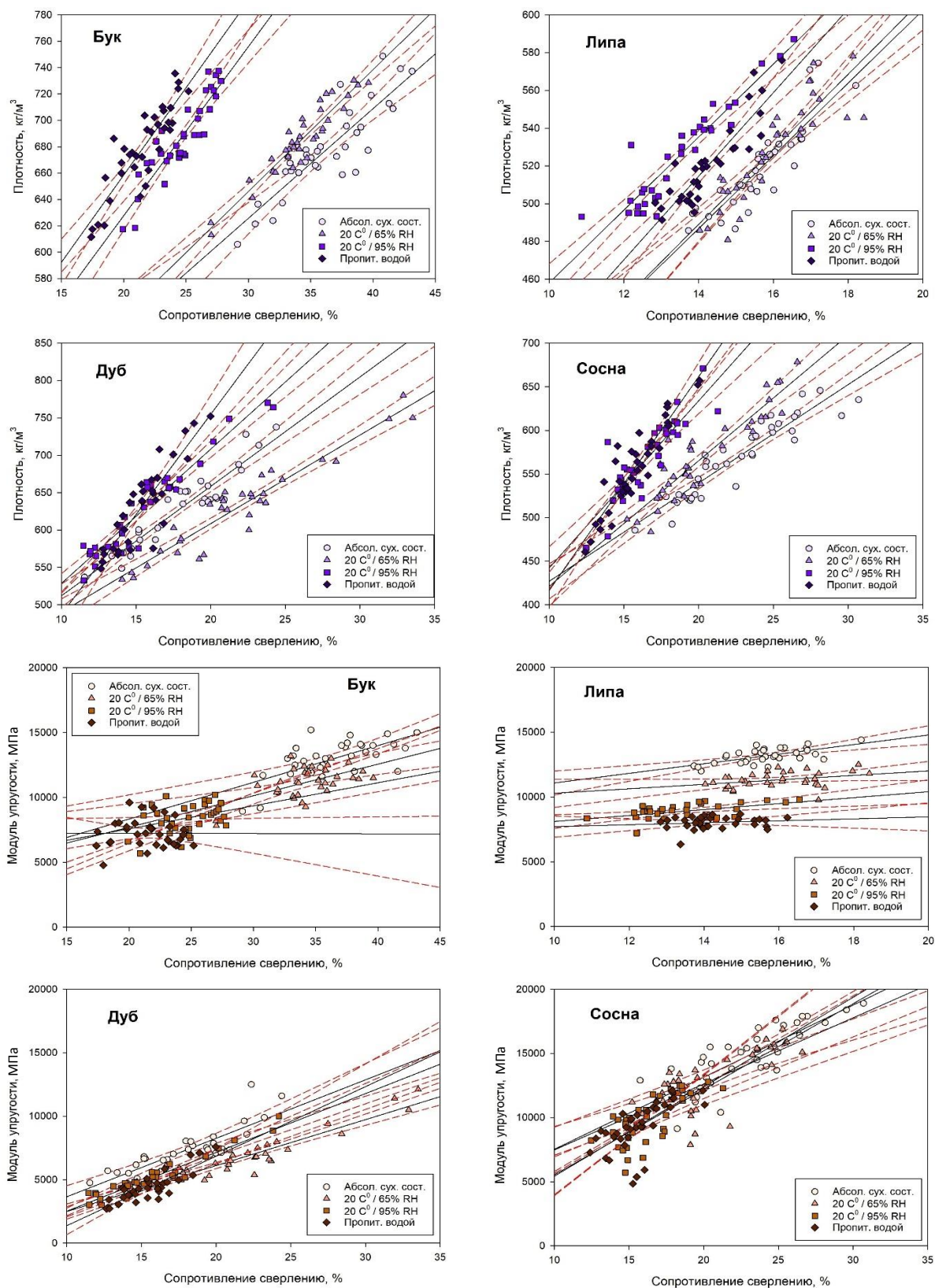


Рис. 2. Взаимосвязь сопротивления древесины просверливанию (DR) с ее плотностью при нормализованной влажности ρ_{12} и модулем упругости при статическом изгибе в тангенциальном направлении $E_{тан}$ (скорость подачи тонкого бурового сверла 1 м/мин при различной влажности образцов из сосны (*Pinus sylvestris L.*), бука (*Fagus sylvatica L.*), дуба (*Quercus robur L.*) и липы (*Tilia europaea L.*))

В процессе исследований просверливание образцов осуществлялось в радиальном направлении перпендикулярно волокнам, что позволяло фиксировать изменение свойств древесины в пределах годовичных слоев [7, 25, 26]. Изменение направления сверления в сторону тангенциального направления снижает разрешение определения свойств древесины в пределах годовичных слоев [7] ввиду того, что режущие кромки тонкого бурового сверла одновременно контактируют с ранней и поздней древесиной в слоях. В данном случае происходит усреднение сопротивления древесины просверливанию. Теоретически изменение направления просверливания с радиального на тангенциальный не должно оказывать значимого влияния на сопротивление древесины просверливанию, так как условия резания для главных режущих кромок тонкого бурового сверла остаются неизменными – преимущественно осуществляется продольно-поперечное резание.

Предполагается, что модели определения плотности и модуля упругости при статическом изгибе (см. табл. 3 и 4), а также модели прогнозирования предела прочности древесины (см. табл. 2) могут быть использованы для определения свойств древесины методом измерения сопротивления сверлению при радиальном и тангенциальном направлениях просверливания.

Просверливание древесины тонкими буровыми сверлами в продольном направлении (в направлении волокон) изменяет условия резания для главных режущих кромок тонкого бурового сверла, при этом данными кром-

ками осуществляется преимущественно торцовое резание. На основании результатов исследований процесса элементарного резания древесины [23, 24] можно прогнозировать значительное увеличение усилий резания (DR) при продольном сверлении древесины тонкими буровыми сверлами. В данном случае конструкция режущей части тонкого бурового сверла также оказывает влияние на процесс сверления и прогнозирование физико-механических свойств древесины. Подтверждение данной гипотезы требует проведения отдельной серии опытов.

С целью определения оптимальных величин влажности древесины, скорости подачи тонкого бурового сверла, обоснования выбора параметров сопротивления древесины сверлению или подаче, а также установления влияния породы на коэффициенты детерминации моделей определения плотности (при нормализованной влажности) и модуля упругости при статическом изгибе использовали многоуровневый D-оптимальный план второго порядка [27-29].

В качестве входных непрерывных и категориальных факторов эксперимента приняли влажность древесины и скорость подачи тонкого бурового сверла, сопротивление древесины просверливанию (DR) и подаче (FR), порода древесины (табл. 5). Выходной величиной являлся коэффициент детерминации линейных моделей определения модуля упругости при статическом изгибе в тангенциальном направлении ($E_{\text{ТАН}}$, МПа) и плотности (ρ_{12} , кг/м³) образцов, кондиционированных при 20 °С/65 % RH (см. табл. 3, 4).

Таблица 5

Входные факторы эксперимента и уровни их варьирования

Фактор	Единица измерения	Тип фактора	Нижний уровень	Верхний уровень	Количество уровней
А: Влажность древесины	%	Непрерывный	0.0	45.0	4
В: Скорость подачи	м/мин	Непрерывный	0.5	1.5	3
С: сопротивление сверлению (DR); подаче (FR)		Категориальный			1;2
Д: Порода древесины сосна; бук; дуб; липа		Категориальный			1;2;3;4

Уравнения множественной регрессии для прогнозирования коэффициента детерминации моделей определения стандартной плот-

ности $R^2(\rho_{12})$ и модуля упругости при статическом изгибе $R^2(E_{ТАН})$, полученные в ходе эксперимента, имеют вид:

$$\begin{aligned} R^2 = & 0,654716 + 0,00602385 \cdot A + 0,192419 \cdot B + 0,194274 \cdot C + 0,248798 \cdot D(1) - \\ & - 0,0994116 \cdot D(2) - 0,0628282 \cdot D(3) - 0,000120643 \cdot A^2 - 0,000243601 \cdot A \cdot B + \\ & + 0,00434834 \cdot A \cdot C - 0,00485851 \cdot A \cdot D(1) + 0,000767312 \cdot A \cdot D(2) + 0,000233978 \times \\ & \times A \cdot D(3) - 0,0534933 \cdot B^2 - 0,0253543 \cdot B \cdot C - 0,123743 \cdot B \cdot D(1) + 0,114872 \cdot B \cdot D(2) + \\ & + 0,0111217 \cdot B \cdot D(3) + 0,0250145 \cdot C \cdot D(1) - 0,15759 \cdot C \cdot D(2) + 0,255743 \cdot C \cdot D(3) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} R^2 = & 0,478062 + 0,000579677 \cdot A + 0,10608 \cdot B + 0,192391 \cdot C - 0,0378524 \cdot D(1) + \\ & + 0,176192 \cdot D(2) - 0,184058 \cdot D(3) - 0,000100785 \cdot A^2 - 0,00148259 \cdot A \cdot B - \\ & - 0,00207145 \cdot A \cdot C - 0,0045254 \cdot A \cdot D(1) + 0,00383586 \cdot A \cdot D(2) - 0,00137525 \times \\ & \times A \cdot D(3) - 0,0354353 \cdot B^2 - 0,0708623 \cdot B \cdot C - 0,0820683 \cdot B \cdot D(1) + 0,105218 \cdot B \cdot D(2) + \\ & + 0,00978237 \cdot B \cdot D(3) + 0,0948139 \cdot C \cdot D(1) + 0,0142458 \cdot C \cdot D(2) - 0,00825423 \cdot C \cdot D(3) \end{aligned} \quad (2)$$

Порода древесины оказывает максимальное влияние на точность определения плотности и модуля упругости древесины методом измерения сопротивления сверлению (рис. 3). В первую очередь, это связано с тем, что диапазон варьирования данных параметров для образцов сосны и дуба значительно превосходит диапазон варьирования, например, для липы.

На основе регрессионных моделей 1 и 2 подтверждено, что сопротивление древесины сверлению является оптимальным параметром по сравнению с сопротивлением подаче (FR), обеспечивающим максимальные коэффициенты детерминации для линейных моделей определения плотности (ρ_{12}) и модуля упругости бездефектной древесины ($E_{ТАН}$, $E_{РАД}$) методом измерения сопротивления сверлению.

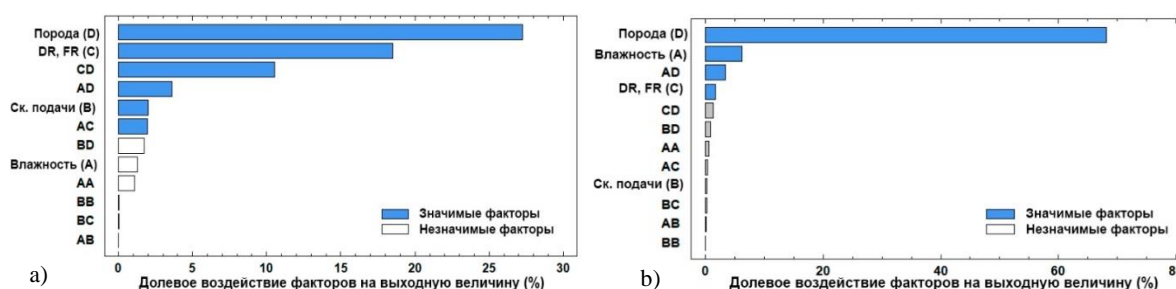


Рис. 3. Карты Парето для определения значимости коэффициентов регрессионных моделей и долей влияния факторов на коэффициент детерминации моделей определения стандартной плотности (а) и модуля упругости (б) древесины методом измерения сопротивления сверлению

Скорость подачи и влажность образцов древесины оказывают существенно меньший эффект на точность определения плотности и модуля упругости древесины методом измерения сопротивления сверлению. При этом повышение скорости подачи положительно влияет на точность определения плотности древесины. Увеличение толщины срезаемого

слоя главными режущими кромками тонкого бурового сверла при повышении скорости подачи способствует увеличению усилий, расходуемых на деформацию древесины по передним поверхностям главных режущих кромок. Повышается доля данных сил по сравнению с усилиями трения, что способствует более тесной взаимосвязи сопротивле-

ния сверлению и подаче с прочностными свойствами древесины и ее плотностью как основным параметром, характеризующим прочностные показатели.

Для древесины сосны (*Pinus sylvestris*), дуба (*Quercus robur* L.) и липы (*Tilia europaea* L.) оптимальным значением скорости подачи, обеспечивающей максимальные коэффициенты детерминации линейных моделей определения плотности (ρ_{12}) и модуля упругости бездефектной древесины при статическом изгибе ($E_{ТАН}$, $E_{РАД}$), является 1.5 м/мин (при частоте вращения тонкого бурового сверла 2000 мин⁻¹). Для прогнозирования плотности (ρ_{12}) древесины бука (*Fagus sylvatica*) оптимальной величиной скорости подачи является 0.63 м/мин.

Выводы

1. Метод измерения сопротивления сверлению может быть рекомендован в качестве быстрого квазинеразрушающего метода для определения плотности древесины и модуля упругости, а также прогнозирования предела прочности древесины при статическом изгибе. Резко возрастающая положительная линейная корреляция установлена между энергосиловыми параметрами процесса сверления древесины тонкими буровыми сверлами (сопротивлением сверлению (DR) и подаче (FR)), плотностью древесины (ρ_{12}) и модулем упругости при статическом изгибе ($E_{ТАН}$). Исключением является древесина липы, испытанная при скоростях подачи тонкого бурового сверла 0.5 и 1.0 м/мин. Частота вращения 2000 мин⁻¹ и скорость подачи 1.5 м/мин (подача на главные режущие кромки $S_z = 0.375$ мм) рекомендуются для определения модуля упругости древесины липы методом измерения сопротивления сверлению.

Работа выполнена в рамках совместного научного проекта германской службы академических проектов, DAAD (ID 91547167; 57447934) и государственного задания в сфере научной деятельности Министерства науки и высшего образования РФ (№ 5.8394.2017/8.9; 37.13394.2019/13.2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Niemz P., Mannes D. Non-destructive testing of wood and wood-based materials // Journal of Cultural Heritage. 2012. Vol. 13, iss. 3. P. 26–34.

2. Порода древесины, скорость подачи тонкого бурового сверла (подача на главные режущие кромки), выбор фактора сопротивления древесины сверлению (DR) или подаче (FR) имеют значимое влияние на точность определения (R^2) плотности (ρ_{12}) и модуля упругости $E_{ТАН}$ ($E_{РАД}$) и должны учитываться при сравнении данных результатов измерений. Максимальный эффект на коэффициент детерминации линейных моделей определения плотности (ρ_{12}) и модуля упругости методом измерения сопротивления сверлению оказывает порода древесины.

3. Для всех условий эксперимента сопротивление древесины сверлению (DR) является оптимальным параметром по сравнению с сопротивлением подаче (FR), обеспечивающим максимальные коэффициенты детерминации линейных моделей определения плотности и модуля упругости бездефектной древесины методом измерения сопротивления сверлению.

4. Предполагается, что установленные модели взаимосвязи между сопротивлением древесины сверлению (DR) и модулем упругости $E_{ТАН}$ ($E_{РАД}$), а также плотностью древесины (ρ_{12}) могут быть использованы для оценки свойств и внутреннего состояния древесины в радиальном и тангенциальном направлениях сверления относительно направления волокон.

5. Дальнейшие исследования могут быть направлены на изучение влияния направления сверления по отношению к направлению волокон древесины, а также установление взаимосвязи сопротивления древесины сверлению и подаче и прочности на сжатие при разных уровнях влажности древесины и варьировании скорости подачи тонкого бурового сверла.

2. Wood and Timber Condition Assessment Manual / R.J. Ross, B.K. Brashaw, X. Wang, R.H. White, R.F. Pellerin. Madison, WI: Forest Products Society, 2004.
3. Vössing K.J., Niederleithinger E. Nondestructive assessment and imaging methods for internal inspection of timber. A review // *Holzforschung*. 2018. Vol. 72, iss. 6. P. 467–476.
4. Nowak T.P., Jasienko J., Hamrol-Bielecka K. In situ assessment of structural timber using the resistance drilling method – Evaluation of usefulness // *Constr. Build. Mater.* 2016. Vol. 102. P. 403–415.
5. Condition assessment of timber bridges 1. Evaluation of a micro-drilling resistance tool. Gen Tech Rep FPL-GTR-159 / B.K. Brashaw, R.J. Vatalaro, J.P. Wacker, R.J. Ross. Madison, WI: USDA For Serv Forest Prod Lab, 2005. 8 p.
6. Characterization of decay in the wooden roof of the S. Agata Church of Ragusa Ibla (Southeastern Sicily) by means of sonic tomography and resistograph penetration tests / S. Imposa, G. Mele, M. Corrao, G. Coco, G. Battaglia // *The International Journal of Architectural Heritage*. 2014. Vol. 8, iss. 2. P. 213–223.
7. Rinn F. Resistographic visualization of tree ring density variations // *Proceedings of the International Conference Tree Rings and Environment*. Tucson, AZ, USA: Radiocarbon, 1996. P. 871–878.
8. Ceraldi C., Mormone V., Russo-Ermolli E. Resistographic inspection of ancient timber structures for the evaluation of mechanical characteristics // *Materials and Structures*. 2001. Vol. 34, iss. 235. P. 59–64.
9. Park C.Y., Kim S.J., Lee J.J. Evaluation of specific gravity in post member by drilling resistance test // *Mokhae Konghak*. 2006. Vol. 34, iss. 2. P. 1–9.
10. Can wood density be efficiently selected at early stage in maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.)? / L. Bouffier, C. Charlot, A. Raffin, P. Rozenberg, A. Kremer // *Annals of Forest Science*. 2008. Vol. 65, iss. 1. P. 106–113. DOI: 10.1051/forest:2007078.
11. Determining Modulus of Elasticity of Ancient Structural Timber / H. Zhang, L. Zhu, Y. Sun, X. Wang, H. Yan // *Adv mater res-Switz*. 2011. Vol. 217–218. P. 407–412.
12. Application of resistograph to obtain the density and to differentiate wood species / L. Acuna, L.A. Basterra, M. Casado, G. Lopez, G. Ramon-Cueto, E. Relea, C. Martinez, A. Gonzalez // *Mater Construcc*. 2011. Vol. 61, iss. 303. P. 451–464.
13. Morales-Conde M.J., Rodríguez-Liñán C., Saporiti-Machadob J. Predicting the density of structural timber members in service. The combine use of wood cores and drill resistance data // *Mater Construcc*. 2014. Vol. 64, iss. 315. DOI: 10.3989/mc.2014.03113.
14. Oliveira J.T.S., Wang X., Vidaurre G. Assessing specific gravity of young Eucalyptus plantation trees using a resistance drilling technique // *Holzforschung*. 2017. Vol. 71, iss. 2. P. 137–145.
15. Drilling resistance method to evaluate density and hardness properties of resinous wood of agarwood (*Aquilaria malaccensis*) / L. Karlinasari, M.I. Danu, D. Nandika, M. Tujaman // *Wood Research*. 2017. Vol. 6, iss. 5. P. 683–690.
16. Application of the IML Resistograph to the infield assessment of basic density in plantation eucalypts / G.M. Downes, M. Lausberg, B.M. Potts, D.L. Pilbeam, M. Bird, B. Bradshaw // *Australian Forestry*. 2018. Vol. 81, is. 3. DOI: 10.1080/00049158.2018.1500676.
17. Sharapov E., Wang X., Smirnova E. Drill bit friction and its effect on resistance drilling measurements in logs // *Proceedings of the 20th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium, 12-15 September 2017*. Madison, WI: USDA For Serv Forest Prod Lab, 2017. Pp. 405–415.
18. Wear behavior of drill bits in wood drilling resistance measurements / E. Sharapov, X. Wang, E. Smirnova, J.P. Wacker // *Wood and Fiber Science*. 2018. Vol. 50, is. 2. P. 154–166.
19. Combined effect of wood moisture content, drill bit rotational speed and feed rate on drilling resistance measurements in Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) / E. Sharapov, C. Brischke, H. Militz, E. Smirnova // *Wood Material Science and Engineering*. 2018. DOI: 10.1080/17480272.2018.1557249.
20. DIN 52186. Testing of wood; bending test. DIN German Institute for Standardization, Berlin, 1978.
21. DIN 52183. Testing of wood; determination of moisture content. DIN German Institute for Standardization, Berlin, 1977.
22. Шаратов Е.С., Смирнова Е.В., Торопов А.С. Сравнительный анализ работы устройств для определения свойств древесины методом измерения сопротивления сверлению // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*. 2018. № 225. С. 188–201.
23. Бершадский А.Л., Цветкова Н.И. Резание древесины: учебное пособие. Минск: Высшая школа, 1975. 304 с.
24. Любченко В.И. Резание древесины и древесных материалов: учебник для вузов. 3-е изд. Москва: ГОУ ВПО МГУЛ, 2004. 310 с.
25. Wang S.-Y., Chiu C.-M., Lin C.-J. Application of the drilling resistance method for annual ring characteristics: evaluation of *Taiwania* (*Taiwania cryptomerioides*) trees grown with different thinning and pruning treatments // *Journal of Wood Science*. 2003. Vol. 49, is. 2. P. 116–124.

26. Guller B., Guller A., Kazaz G. Is Resistograph an appropriate tool for the annual ring measurement of *Pinus brutia*? // Proceedings of the International Conference NDE Safety, Czech Republic, 2012. Pp. 89–94.
27. Дюк В. Обработка данных на ПК в примерах. Санкт-Петербург: Питер, 1997. 240 с.
28. STATGRAPHICS® (2009a) DOE Wizard – Quantitative and Categorical Factors. StatPoint Technologies, Inc. The Plains, Virginia, USA. URL: <https://ru.scribd.com/document/369609012/DOE-Wizard-Quantitative-and-Categorical-Factors>.
29. STATGRAPHICS® (2009b) DOE Wizard – Multi-Factor Categorical Designs. StatPoint Technologies, Inc. The Plains, Virginia, USA. URL: <https://ru.scribd.com/document/369609065/DOE-Wizard-Multi-Factor-Categorical-Designs>.

Информация об авторах

ШАРАПОВ Евгений Сергеевич – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Управления научной и инновационной деятельности Поволжского государственного технологического университета, г. Йошкар-Ола; докторант Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова, г. Архангельск. Область научных интересов – неразрушающие методы контроля свойств древесины. E-mail: sharapoves@volgatech.net

СМИРНОВА Елена Владимировна – младший научный сотрудник Поволжского государственного технологического университета, г. Йошкар-Ола. Область научных интересов – неразрушающие методы контроля свойств древесины. E-mail: smirnovaev@volgatech.net

UDC 620.179

DOI: 10.25686/2542-114X.2019.4.120

EVALUATION OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF WOOD BY THE DRILLING RESISTANCE MEASUREMENTS

^{1,2}**E. S. Sharapov, ¹E. V. Smirnova**

¹*Volga State University of Technology (Yoshkar-Ola)*

²*Northern Arctic Federal University (Arkhangelsk)*

Mobile tool for wood properties evaluation by the drilling resistance measurements method IML-Resi PD-400 and standard drill bit (IML System GmbH, Wiesloch, Germany) were used for the investigation of correlation between drilling and feeding resistance with density, modulus of elasticity and modulus of rupture for defect free Scots pine (*Pinus sylvestris* L.), European beech (*Fagus sylvatica* L.), English oak (*Quercus robur* L.) and Common lime (*Tilia europaea* L.). Tests were conducted on specimens, which were oven-dried, conditioned at 20 °C /65 % RH and 20 °C /95% RH, and vacuum-impregnated with water at varied feed rates - 0.5, 1.0 and 1.5 m/min and constant drill bit rotational frequency 2000 min⁻¹. Linear models were found for evaluation of density and modulus of elasticity and prediction of modulus of rupture by the drilling and feeding resistance. The impact of the wood moisture content on the evaluation of modulus of elasticity by the drilling resistance measurements was not significant. Effect of moisture content on density evaluation was found for specimens with moisture content above and below the water saturation point. The maximum influence on the coefficient of determination for linear models for density and modulus of elasticity evaluation by the drilling resistance measurements had a wood species. For all tests conditions, the drilling resistance was the optimal parameter compared to the feeding resistance providing higher predictive power (R²) for models for density and modulus of elasticity evaluation. It is assumed that the established linear models of the interaction between drilling resistance, modulus of elasticity and density can be used for prediction the internal conditions, physical and mechanical properties of wood for radial and tangential drillings direction in relation to the wood grain direction.

Keywords: wood; density; modulus of elasticity; drilling resistance; feeding resistance; thin boring drill bit.

This research work was supported by the German Academic Exchange Service, DAAD (ID 91547167; 57447934) and the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (№ 5.8394.2017/8.9; 37.13394.2019/13.2)

REFERENCES

1. Niemz P., Mannes D. Non-destructive testing of wood and wood-based materials, *Journal of Cultural Heritage*, 2012, vol. 13 (3), pp. 26–34.
2. Ross R.J., Brashaw B.K., Wang X., White R.H., Pellerin R.F. Wood and Timber Condition Assessment Manual, Madison, WI: Forest Products Society, 2004.
3. Vössing K.J., Niederleithinger E. Nondestructive assessment and imaging methods for internal inspection of timber. A review, *Holzforschung*, 2018, vol. 72 (6), pp. 467–476.
4. Nowak T.P., Jasienko J., Hamrol-Bielecka K. In situ assessment of structural timber using the resistance drilling method – Evaluation of usefulness, *Constr. Build. Mater*, 2016, vol. 102, pp. 403–415.
5. Brashaw B.K., Vatalaro R.J., Wacker J.P., Ross R.J. Condition assessment of timber bridges 1. Evaluation of a micro-drilling resistance tool, *Gen Tech Rep FPL-GTR-159*, Madison, WI: USDA For Serv Forest Prod Lab, 2005, 8 pp.
6. Imposa S., Mele G., Corrao M., Coco G., Battaglia G. Characterization of decay in the wooden roof of the S. Agata Church of Ragusa Ibla (Southeastern Sicily) by means of sonic tomography and resistograph penetration tests, *The International Journal of Architectural Heritage*, 2014, vol. 8 (2), pp. 213–223. DOI: 10.1080/15583058.2012.685924.
7. Rinn F. Resistographic visualization of tree ring density variations, *Proceedings of the International Conference Tree Rings and Environment*. Tucson, AZ, USA: Radiocarbon, 1996, pp. 871–878.
8. Ceraldi C., Mormone V., Russo-Ermolli E. Resistographic inspection of ancient timber structures for the evaluation of mechanical characteristics, *Materials and Structures*, 2001, vol. 34 (235), pp. 59–64.
9. Park C.Y., Kim S.J., Lee J.J. Evaluation of specific gravity in post member by drilling resistance test, *Mokchae Konghak*, 2006, vol. 34 (2), pp. 1–9.
10. Bouffier L., Charlot C., Raffin A., Rozenberg P., Kremer A. Can wood density be efficiently selected at early stage in maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.)? *Annals of Forest Science*, 2008, vol. 65 (1), pp. 106–113. DOI: 10.1051/forest:2007078.
11. Zhang H., Zhu L., Sun Y., Wang X., Yan H. Determining Modulus of Elasticity of Ancient Structural Timber, *Adv mater res-Switz*, 2011, vol. 217–218, pp. 407–412.
12. Acuna L., Basterra L.A., Casado M., Lopez G., Ramon-Cueto G., Relea E., Martinez C., Gonzalez A. Application of resistograph to obtain the density and to differentiate wood species, *Mater Construcc*, 2011, vol. 61 (303), pp. 451–464.
13. Morales-Conde M.J., Rodríguez-Liñán C., Saporiti-Machadob J. Predicting the density of structural timber members in service. The combine use of wood cores and drill resistance data, *Mater Construcc*, 2014, vol. 64 (315). DOI: 10.3989/mc.2014.03113.
14. Oliveira J.T.S., Wang X., Vidaurre G. Assessing specific gravity of young Eucalyptus plantation trees using a resistance drilling technique, *Holzforschung*, 2017, vol. 71 (2), pp. 137–145.
15. Karlinasari L., Danu M.I., Nandika D., Tujaman M. Drilling resistance method to evaluate density and hardness properties of resinous wood of agarwood (*Aquilaria malaccensis*), *Wood Research*, 2017, vol. 6 (5), pp. 683–690.
16. Downes G.M., Lausberg M., Potts B.M., Pilbeam D.L., Bird M., Bradshaw B. Application of the IML Resistograph to the infield assessment of basic density in plantation eucalypts, *Australian Forestry*, 2018, vol. 81(3). DOI: 10.1080/00049158.2018.1500676.
17. Sharapov E., Wang X., Smirnova E. Drill Bit Friction and Its Effect on Resistance Drilling Measurements in Logs, *Proceedings of the 20th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium*, 12–15 September. USDA For Serv For-est Prod Lab, Madison, WI, USA, 2017, pp. 405–415.
18. Sharapov E., Wang X., Wacker J.P., Smirnova E. Wear behavior of drill bits in wood drilling resistance measurements, *Wood and Fiber Science*, 2018, vol. 50 (2), pp. 154–166.
19. Sharapov E., Brischke C., Militz H., Smirnova E. Combined effect of wood moisture content, drill bit rotational speed and feed rate on drilling resistance measurements in Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.), *Wood Material Science and Engineering*, 2018. DOI: 10.1080/17480272.2018.1557249.
20. DIN 52186. Testing of wood; bending test. DIN German Institute for Standardization, Berlin, 1978.
21. DIN 52183. Testing of wood; determination of moisture content. DIN German Institute for Standardization, Berlin, 1977.

22. Sharapov E.S., Smirnova E.V., Toropov A.S. Sravnitel'nyj analiz raboty ustrojstv dlya opredeleniya svoystv drevesiny metodom izmereniya soprotivleniya sverleniyu [Comparative analysis of drilling tools for wood properties evaluation by the drilling resistance measurements], *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii*, 2018, is. 225, pp. 188–201. DOI: 10.21266/2079-4304.2018.225.188-201.
23. Bershadskiy A.L., Tsvetkova N.I. Rezanie drevesiny: ucheb. [Wood Cutting], Minsk, 1975, 304 p.
24. Lyubchenko V.I. Rezanie drevesiny i drevesnykh materialov: ucheb. posobie dlya vuzov [Wood and Wood Materials Cutting], Moscow, 2004, 310 p.
25. Wang S.-Y., Chiu C.-M., Lin C.-J. Application of the drilling resistance method for annual ring characteristics: evaluation of Taiwania (*Taiwania cryptomerioides*) trees grown with different thinning and pruning treatments, *Journal of Wood Science*, 2003, vol. 49 (2), pp. 116–124.
26. Guller B., Guller A., Kazaz G. Is Resistograph an appropriate tool for the annual ring measurement of *Pinus brutia*? *Proceedings of the International Conference NDE Safety*, Czech Republic, 2012, pp. 89–94.
27. Dyuk V. Obrabotka dannyh na PK v primerah [PC data processing in examples], Saint Petersburg: Piter, 1997, 240 p.
28. STATGRAPHICS® (2009a) DOE Wizard – Quantitative and Categorical Factors. StatPoint Technologies, Inc. The Plains, Virginia, USA. Available at: <https://ru.scribd.com/document/369609012/DOE-Wizard-Quantitative-and-Categorical-Factors>.
29. STATGRAPHICS® (2009b) DOE Wizard – Multi-Factor Categorical Designs. StatPoint Technologies, Inc. The Plains, Virginia, USA. Available at: <https://ru.scribd.com/document/369609065/DOE-Wizard-Multi-Factor-Categorical-Designs>.

Information about the authors

SHARAPOV Evgenii Sergeevich – Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher, Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola; Northern (Arctic) Federal University, Arkhangelsk. Research interests – nondestructive wood properties evaluation. Author of about 100 publications. E-mail: sharapoves@volgatech.net

SMIRNOVA Elena Vladimirovna – Junior Researcher, Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola. Research interests – nondestructive wood properties evaluation. E-mail: smirnovaev@volgatech.net

Библиографическая ссылка

Шарапов Е. С., Смирнова Е. В. Определение физико-механических свойств древесины методом измерения сопротивления сверлению // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Материалы. Конструкции. Технологии. – 2019. – № 4(12). – С. 120-134. – DOI: 10.25686/2542-114X.2019.4.120