

РАЗРАБОТКА И ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ДРЕВЕСИНЫ

Рен. Х. Гайнуллин^{1✉}, Риш. Х. Гайнуллин¹, Е.М. Цветкова¹, Р.Р. Сафин²

¹ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет», Россия, 424000, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, д. 3

²ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», Россия, 420015, г. Казань, ул. Карла Маркса, д. 68

gainylinrh@yandex.ru

Приведен краткий обзор методов определения плотности древесины, которые согласно классификации подразделяются на прямые и косвенные. Предложен математически обоснованный авторский метод определения плотности древесины, с учетом законов физики, являющийся разновидностью метода вытеснения воды. Проведены экспериментальные исследования на девяти породах древесины, показавшие работоспособность и применимость метода. Выполнено сравнение данных, полученных стереометрическим методом (значение погрешности составило менее 3 %). Определены условия подбора груза в виде шарика для исследований таким образом, чтобы происходило неполное погружение образца с одновременным обеспечением вертикального положения в среде жидкости. Рекомендуется использование предложенного метода для определения плотности древесины в «полевых» условиях.

Ключевые слова: плотность древесины, методы определения плотности древесины, экспресс-метод определения плотности древесины

Ссылка для цитирования: Гайнуллин Рен.Х., Гайнуллин Риш.Х., Цветкова Е.М., Сафин Р.Р. Разработка и обоснование метода определения плотности древесины // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2024. Т. 28. № 4. С. 147–156. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-4-147-156

Древесина является ценным сырьем для промышленного производства. Перечень направлений ее использования весьма широк: архитектура и строительство, мебельное и столярное производство, энергетика и лесохимия и т. д. Такому многоцелевому использованию древесины способствуют ее характеристики. Оценка эксплуатационных свойств древесины осуществляется на основании различных показателей: физических, механических, химических и др. Перечисленные показатели, как правило, имеют тесную взаимосвязь и используются для необходимых технологических расчетов различных процессов. Основным показателем, которым оперируют при проведении подавляющего большинства технологических расчетов, является плотность древесины [1, 2]. Поэтому актуальной задачей для науки и техники в современных условиях является разработка методов определения значения этого показателя с минимальными затратами времени и ресурсов, а также с максимально возможной точностью.

Существующие в настоящее время методы определения плотности древесины можно условно подразделить на косвенные и прямые.

Косвенные методы подразумевают определение плотности через взаимосвязанные с ней физико-механические показатели древесины. К дан-

ной категории относятся акустический (ультразвуковой), радиационный, микрофотометрический и метод сверления.

Акустический метод определения плотности древесины основан на ее связи со скоростью распространения ультразвуковых колебаний в исследуемом образце [4–10]. Данный метод используется при таможенном контроле [7], отборе лыжных заготовок [8], резонансной древесины [9], оценке состояния древесных конструкций [10] и др. Недостатками метода являются большие погрешности, обусловленные неоднородной структурой древесины вследствие растительного происхождения, наличием пороков, зависимостью от влажности.

При прохождении через древесину β -, γ - или рентгеновского излучения происходит ослабление их интенсивности в зависимости от плотности образца. Этот эффект заложен в основе *радиационного метода* [1, 11–15]. Устройства, использующие данное явление, применяются как стационарно в лабораториях, так и портативно непосредственно при исследованиях растущих деревьев или конструкций сооружений. К основному недостатку метода можно отнести высокую стоимость оборудования. Тем не менее в настоящее время он приобретает все большую популярность у исследователей.

Схожим по замыслу, но несколько отличающимся технически является *микрофотометрический метод* определения плотности древесины.

Суть метода заключается в регистрации диффузно отраженного света от микроучастка исследуемого образца [16, 17]. Соответственно, недостатки микрофотометрического метода такие же, как и у радиационного.

Метод определения плотности древесины и оценки ее качества, основанный на измерении сопротивления материала сверлению — *метод сверления* является одним из активно развивающихся в настоящее время [18–23]. В основе этого метода лежит связь параметров сопротивления сверлению материала и его плотности [20]. Из недостатков можно отметить ошибки, возникающие в процессе измерений нагрева бурового сверла и трения боковых поверхностей сверла о стенки отверстия, при наличии в древесине пороков, а также достаточно высокую стоимость оборудования.

Прямые методы основаны на измерениях массы, объема и веса исследуемых образцов древесины с последующим вычислением плотности. К данной группе относятся стереометрический, метод вытеснения воды, метод вытеснения ртути, метод гидростатического взвешивания, пикнометрический и т. д.

Стереометрический метод определения плотности древесины стандартизован [24] не только в России, но в других странах мира [25]. Для определения плотности древесины данным способом используются образцы в форме прямоугольной призмы размером 20×20×30 мм. Измеряются масса образцов, с точностью до 0,01–0,001 г, их размеры, с точностью до 0,1 мм. По отношению массы к объему образца вычисляют плотность. К недостаткам метода следует отнести искажение показателя из-за механических повреждений образцов, допущенных при их изготовлении.

Способ вытеснения воды основан на измерении объема воды, вытесненной погруженным в нее древесным образцом [1]. Исходя из массы образца и измеренного таким образом объема воды, вычисляют плотность древесины. Основным недостатком этого способа является непосредственный контакт древесины с водой, которую впитывает образец, вследствие чего изменяется его масса. Для устранения этого недостатка усовершенствованы соответствующие устройства, применяемые при работе с этим методом [26, 27].

В целях исключения изменения характеристик образца при контакте с водой достаточно часто пользуются несмачивающими древесину жидкостями. На этом базируется *метод вытеснения ртути* [28–30]. Техническое использование этого метода аналогично методу вытеснения воды. К недостаткам относят токсичность ртути, при работе с которой необходимо строго придерживаться правил техники безопасности.

Метод гидростатического взвешивания основан на законе Архимеда, согласно которому тело, погруженное в жидкость, теряет в весе столько, сколько весит вытесняемая жидкость [1, 31]. Для определения плотности данным методом образец древесины взвешивают сначала в воздухе, а затем в жидкости известной плотности, и по полученным результатам измерения вычисляют плотность по формуле

$$\rho_{\text{др}} = \frac{m_1}{m_1 - m_2}(\rho_{\text{ж}} - D) + D, \quad (1)$$

где $\rho_{\text{др}}$ — плотность древесины;

m_1 — масса гирь, уравнивающих тело в воздухе;

m_2 — масса гирь, уравнивающих тело в жидкости;

$\rho_{\text{ж}}$ — плотность жидкости, в которую погружают тело;

D — плотность воздуха.

Данный метод относится к числу наиболее надежных и точных методов определения плотности древесины.

Тем не менее наиболее точным методом определения плотности древесины из всех известных является *пикнометрический* [1, 32]. Цикл измерения плотности исследуемого образца включает в себя три взвешивания: 1) образца древесины в воздухе; 2) пикнометра, наполненного жидкостью известной плотности; 3) пикнометра, наполненного той же жидкостью с погруженным в нее телом. Причем в обоих последних случаях жидкость наливают до одного и того же уровня. После соответствующих процедур взвешивания осуществляют расчет плотности по формуле

$$\rho_{\text{др}} = \frac{M\rho_{\text{ж}} - (m_2 - m_1)D}{M - (m_1 - m_2)}, \quad (2)$$

где $\rho_{\text{др}}$ — плотность древесины;

M — масса гирь, уравнивающих образец в воздухе;

m_1 — масса гирь, уравнивающих пикнометр с жидкостью;

m_2 — масса гирь, уравнивающих пикнометр с жидкостью и погруженным в нее образцом;

$\rho_{\text{ж}}$ — плотность жидкости;

D — плотность воздуха.

Несмотря на высокую точность, пикнометрический метод весьма трудоемок, поэтому используется в лабораторных условиях при необходимости определения плотности с максимальной точностью.

На практике достаточно часто требуется определить плотность древесины в полевых условиях, когда набор инструментов для этой задачи огра-

ничен. Из перечисленных методов определения плотности древесины практически ни один не подходит для решения данной задачи. В рамках настоящей статьи предлагается один из вариантов ее решения.

Цель работы

Цель работы — разработка метода определения плотности древесины в полевых условиях, обоснование его применимости на практике путем теоретических изысканий и проведения экспериментальных исследований.

Материалы и методы

Критический анализ способов определения плотности древесины в полевых условиях показал, что с технической точки зрения наиболее простым является метод, предусматривающий измерение длины образца, погружение его в жидкость, измерение высоты погружившейся в жидкость части образца и вычисление плотности по формуле

$$\rho_d = \frac{V_{\text{погр}}}{V_{\text{обр}}} \rho_{\text{ж}}, \quad (3)$$

которая для образца правильной призматической или цилиндрической формы (при погружении в воду, т. е. при $\rho_{\text{ж}} = 1 \text{ г/см}^3$) примет вид

$$\rho_d = \frac{H_{\text{погр}}}{H_{\text{обр}}}, \quad (4)$$

где ρ_d — плотность образца древесины;

$V_{\text{погр}}$ — объем погружившейся в жидкость части образца;

$V_{\text{обр}}$ — объем образца;

$\rho_{\text{ж}}$ — плотность жидкости;

$H_{\text{погр}}$ — высота погружившейся части образца;

$H_{\text{обр}}$ — высота образца.

К недостаткам данного метода относят большую погрешность измерений, поскольку при погружении в жидкость образец принимает горизонтальное положение.

Такой недостаток можно устранить с помощью прикрепления к торцевой поверхности одного из концов исследуемого образца древесины груза в виде металлического шарика, оснащенного иглой, которая одним концом жестко соединена с ним, а противоположным острым концом внедряется в тело образца на всю свою длину, перед погружением в жидкость известной плотности (рис. 1).

Согласно предложенному способу в работе [33], определение плотности древесины можно выполнить следующим образом. Первоначально изготавливают образец древесины l , например, размером $10 \times 10 \times 100 \text{ мм}$ (последнее измерение вдоль волокон древесины) или цилиндрической формы аналогичной длины. К торцевой поверхности одного из концов данного образца прикрепляют

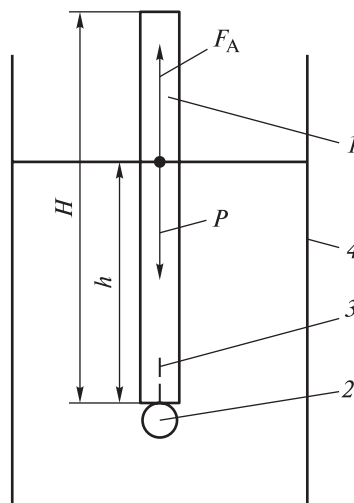


Рис. 1. Расчетная схема действия сил, действующих на образец в процессе измерения: 1 — образец древесины; 2 — металлический шарик; 3 — игла; 4 — сосуд с жидкостью

Fig. 1. Calculation scheme of the forces acting on the sample during in the measurement process: 1 — wood sample; 2 — metal ball; 3 — needle; 4 — vessel with liquid

металлический шарик 2, жестко соединенный с иглой 3, которая острым концом внедряется в тело образца l на всю свою длину. После помещения образца l с прикрепленным шариком 2 в емкость 4 с жидкостью известной плотности $\rho_{\text{ж}}$ измеряют глубину погружения h .

Математически проделанные операции имеют следующее обоснование. После помещения образца с прикрепленным шариком в емкость с жидкостью система образец — шарик принимает статичное вертикальное положение, что свидетельствует о равенстве выталкивающей (архимедовой) силы F_A и силы тяжести (веса) P .

Архимедова сила F_A будет складываться из двух составляющих, действующих на шарик $F_{A\text{ш}}$ и погруженную в жидкость часть образца $F_{A\text{д}}$

$$F_{A\text{ш}} = V_{\text{ш}} g \rho_{\text{ж}}, \quad (5)$$

$$F_{A\text{д}} = S h g \rho_{\text{ж}}, \quad (6)$$

где $V_{\text{ш}}$ — объем шарика;

g — ускорение свободного падения;

$\rho_{\text{ж}}$ — плотность жидкости;

S — площадь поперечного сечения образца;

h — глубина погружения образца.

Сила тяжести также будет складываться из двух составляющих, действующих на шарик — $P_{\text{ш}}$ и исследуемый образец — $P_{\text{д}}$:

$$P_{\text{ш}} = V_{\text{ш}} \rho_{\text{ш}} g, \quad (7)$$

$$P_{\text{д}} = S H \rho_{\text{д}} g, \quad (8)$$

где $\rho_{\text{ш}}$ — плотность шарика;

H — длина образца;

$\rho_{\text{д}}$ — плотность образца древесины.

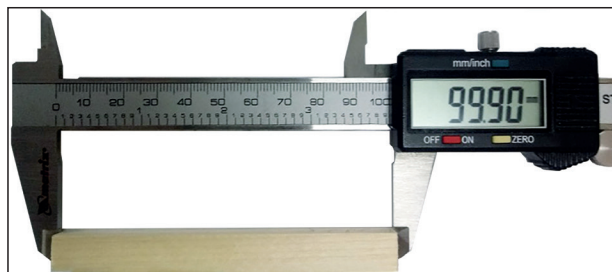


Рис. 2. Измерение геометрических размеров образцов
Fig. 2. Measurement geometric dimensions of samples



Рис. 3. Взвешивание образцов
Fig. 3. Weighing samples

Произведение SH представляет собой объем V_d исследуемого образца древесины — $SH = V_d$.

Из условия статичности системы приравняем сумму выражений (5) и (6) к сумме выражений (7) и (8)

$$V_{ш}g\rho_{ж} + Shg\rho_{ж} = V_{ш}\rho_{ш}g + SH\rho_d g. \quad (9)$$

После математических преобразований и решения уравнения (9) относительно плотности образца древесины ρ_d получаем

$$\rho_d = \frac{h}{H}\rho_{ж} - \frac{V_{ш}}{V_d}(\rho_{ш} - \rho_{ж}). \quad (10)$$

Применимость метода на практике оценивалась экспериментально путем сравнения результатов стереометрическим методом. Для этого были изготовлены образцы комнатно-сухой древесины девяти различных пород размером $10 \times 10 \times 100$ мм (последний размер — вдоль волокон) и взяты два оснащенных иглами стальных шарика диаметром 9,52 и 7,82 мм, массой 3,618 и 2,005 г, и объемом 451,76 и 250,39 мм³ соответственно.

Результаты и обсуждение

Первоначально с помощью штангенциркуля и весов у всех образцов были определены геометрические размеры (рис. 2) и масса (рис. 3).

В дальнейшем экспериментально определялась возможность обеспечения вертикального положения образца при погружении его в жидкость

(в настоящем случае в воду) с помощью крепления к одной из торцовых поверхностей образца металлического шарика. Для этого использовался стальной шарик с меньшими размерно-массовыми характеристиками. В ходе эксперимента определено, что для образцов некоторых пород древесины условие вертикального положения в воде не обеспечивается (рис. 4). Поэтому для таких образцов использовался шарик с большими размерно-массовыми характеристиками (рис. 5). Кроме того, визуально оценивалась плавучесть системы образец — шарик, подразумевающая неполное погружение в жидкость.

После выполненных подготовительных операций была проведена серия опытов с учетом указанных выше условий. Первоначально была рассчитана плотность образцов стереометрическим методом по формуле

$$\rho_d = \frac{m_d}{abH}, \quad (11)$$

где ρ_d — плотность образца древесины;

m_d — масса образца древесины;

a, b, H — соответственно толщина, ширина и длина образца древесины.

На следующем этапе определяли плотность по предложенному методу с учетом выражения (10), при этом глубину погружения образца h измерили штангенциркулем по длине смоченной части образца. Значение погрешности между значениями плотности, вычисленной различными методами, определяли по выражению

$$\Delta = \frac{\rho_{пм} - \rho_{см}}{\rho_{см}} 100 \%, \quad (12)$$

где Δ — значение погрешности;

$\rho_{пм}$ — плотность, определенная по предложенному методу;

$\rho_{см}$ — плотность, определенная по стереометрическому методу.

Полученные экспериментальные данные приведены в табл. 1. Положительное значение погрешности связано с тем, что проведение опытов по методу сопровождалось непосредственным контактом образцов с водой, что влекло за собой закономерное поглощение влаги древесиной и соответствующее увеличение массы образцов. Поэтому для обоснованного сравнения двух методов следует измерять массу образцов после проведения опытов с погружением в воду.

Отметим, что геометрические размеры образцов после непродолжительного пребывания их в воде, т. е. за время определения глубины погружения, существенным образом не изменяются. С учетом приведенных суждений и фактов результаты экспериментальных данных претерпят некоторые изменения (табл. 2).



Рис. 4. Положение образца при использовании меньшего шарика

Fig. 4. The sample position when using a smaller ball



Рис. 5. Положение образца при использовании большего шарика

Fig. 5. The sample position when using a larger ball

Т а б л и ц а 1

Определение плотности образцов стереометрическим и предложенным методами

Comparison the results of determining samples density by stereometric and proposed methods

Образец	Масса, г	Геометрические размеры образца, мм			Глубина погружения образца h , мм	Плотность по стереометрическому методу, кг/м ³	Плотность по предложенному методу, кг/м ³	Погрешность Δ , %
		a	b	H				
Береза	6,483	10,03	10,07	99,90	84,2	642,5	668,9	4,11
Бук	7,160	10,04	10,13	100,72	91,5	698,7	737,2	5,51
Дуб	6,272	9,95	10,14	100,50	81,5	618,6	637,9	3,12
Ель*	4,787	10,09	10,13	100,38	80,5	466,6	493,4	5,74
Липа	5,857	10,03	10,06	100,49	77,9	577,6	602,2	4,26
Лиственница	6,493	10,10	10,14	100,45	82,1	631,2	646,8	2,47
Осина*	5,005	9,98	10,04	100,31	82,9	498,0	513,4	3,09
Сосна*	4,096	10,05	10,06	100,27	73,8	404,0	423,7	4,88
Ясень	7,491	10,14	10,17	99,95	92,2	726,7	752,2	3,51

*Породы древесины, для опытов с которыми использовался шарик с большими размерно-массовыми характеристиками.

Т а б л и ц а 2

Сравнение результатов определения плотности образцов стереометрическим и предложенным методами

Comparison the results of determining samples density by stereometric and proposed methods

Образец	Масса, г	Геометрические размеры образца, мм			Глубина погружения образца h , мм	Плотность по стереометрическому методу, кг/м ³	Плотность по предложенному методу, кг/м ³	Погрешность Δ , %
		a	b	H				
Береза	6,719	10,03	10,07	99,90	84,2	665,9	668,9	0,45
Бук	7,412	10,04	10,13	100,72	91,5	723,6	737,2	1,88
Дуб	6,466	9,95	10,14	100,50	81,5	637,7	637,9	0,03
Ель*	4,951	10,09	10,13	100,38	80,5	482,6	493,4	2,24
Липа	6,050	10,03	10,06	100,49	77,9	596,7	602,2	0,92
Лиственница	6,605	10,10	10,14	100,45	82,1	642,0	646,8	0,75
Осина*	5,155	9,98	10,04	100,31	83,1	512,9	513,4	0,10
Сосна*	4,230	10,05	10,06	100,27	73,8	417,3	423,7	1,53
Ясень	7,620	10,14	10,17	99,95	92,2	739,3	752,2	1,74

*Породы древесины, для опытов с которыми использовался шарик с большими размерно-массовыми характеристиками.

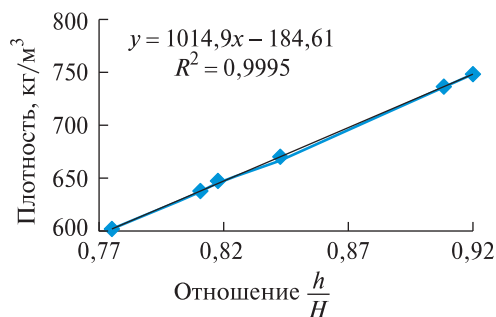


Рис. 6. Зависимость плотности образца древесины от отношения h/H при использовании меньшего шарика

Fig. 6. Graph and equation for determining the density of a sample using a small ball

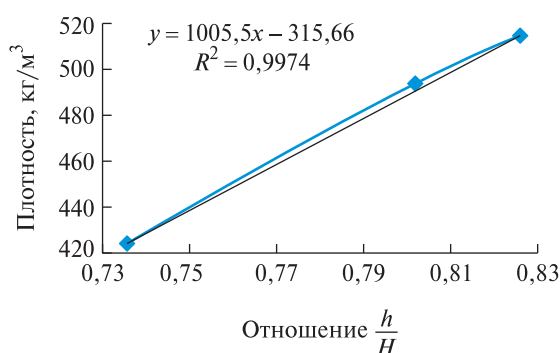


Рис. 7. Зависимость плотности образца древесины от отношения h/H при использовании большего шарика

Fig. 7. Graph and equation for determining sample density when using a larger ball

В целях облегчения применения метода с использованием различных шариков на практике можно воспользоваться иллюстративным материалом (рис. 6, 7).

По оси абсцисс на графиках (см. рис. 6, 7) отсчитывается отношение глубины погружения образца к его длине — h/H , а по оси ординат определяется соответствующая этому отношению плотность исследуемого образца ρ_d . Возможность использования этих графиков с уравнениями ограничивается геометрическими размерами образцов, составляющими $10 \times 10 \times 100$ мм. В случае использования образцов другого поперечного сечения и размеров графики будут описываться уравнениями, имеющими другие коэффициенты.

Чаще всего в полевых условиях образцы древесины имеют форму цилиндра, а не прямоугольной призмы, использованной в опытах. Тогда выражение (10) принимает вид

$$\rho_d = \frac{1}{H} \left(h \rho_{\text{ж}} - \frac{2d_{\text{ш}}^3}{3d_d^2} (\rho_{\text{ш}} - \rho_{\text{ж}}) \right), \quad (13)$$

где $d_{\text{ш}}$ — диаметр шарика;

d_d — диаметр образца древесины.

Для применения на практике предложенного метода целесообразно иметь набор шариков различных типоразмеров, отличающихся не только размерно-массовыми характеристиками, но и материалом, из которого они изготовлены. Кроме того, наиболее распространенной жидкостью, которую используют для различных опытов, является вода, плотность которой составляет около 1 г/см^3 . С учетом указанных допущений выражение (13) можно упростить до вида

$$\rho_d = \frac{1}{H} \left(h - \frac{N_x}{d_d^2} \right), \quad (14)$$

где $N_x = \frac{2}{3} d_{\text{ш}}^3 (\rho_{\text{ш}} - 1)$ — числовая характеристика (типоразмер) шарика, учитывающая его диаметр и материал, из которого он изготовлен.

Таким образом, для определения плотности древесного образца круглого сечения по выражению (14) необходима числовая характеристика шарика, а также требуется определение длины образца H , глубины его погружения h и диаметра d_d .

Из изложенного выше следует необходимость правильного подбора шарика. В данном случае важно соблюдать два основных условия (ограничения): 1) неполное погружение системы образец-шарик в жидкость, т. е. глубина погружения h должна быть меньше длины образца H ; 2) обеспечение вертикального расположения системы образец — шарик в жидкости во избежание всплывания образца (см. рис. 4).

Первое ограничение математически можно выразить неравенством, согласно которому плотность системы образец-шарик должна быть меньше плотности жидкости

$$\rho_{\text{ж}} > \frac{m_d + m_{\text{ш}}}{V_d + V_{\text{ш}}}. \quad (15)$$

С учетом допущения $\rho_{\text{ж}} = 1 \text{ г/см}^3$ выражение (15) можно упростить до вида

$$\frac{V_d + V_{\text{ш}}}{m_d + m_{\text{ш}}} > 1. \quad (16)$$

В табл. 3 приведены результаты расчетов соотношения (16) при использовании шариков различных размерно-массовых характеристик.

Из данных табл. 3 следует, что значение соотношения (16) численно меньше единицы, что свидетельствует о полном погружении в жидкость системы образец — шарик. Это справедливо при использовании большего шарика для образцов из бука и ясеня. Кроме того, значения соотношения близкие к единице (образцы березы, дуба, лиственницы) доставляют неудобства при определении глубины погружения h образца, так как при

Т а б л и ц а 3

Значения соотношения $\frac{V_d + V_{ш}}{m_d + m_{ш}}$ при использовании различных шариков по породам древесины

The value of the ratio $\frac{V_d + V_{ш}}{m_d + m_{ш}}$ when using different balls by wood species

Образец	Масса, г	Геометрические размеры образца, мм			Соотношение $\frac{V_d + V_{ш}}{m_d + m_{ш}}$ при использовании меньшего шарика	Соотношение $\frac{V_d + V_{ш}}{m_d + m_{ш}}$ при использовании большего шарика
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>H</i>		
Береза	6,483	10,03	10,07	99,90	1,218	1,044
Бук	7,160	10,04	10,13	100,72	1,145	0,992
Дуб	6,272	9,95	10,14	100,50	1,255	1,071
Ель	4,787	10,09	10,13	100,38	1,547	1,274
Липа	5,857	10,03	10,06	100,49	1,322	1,118
Лиственница	6,493	10,10	10,14	100,45	1,240	1,062
Осина	5,005	9,98	10,04	100,31	1,470	1,218
Сосна	4,096	10,05	10,06	100,27	1,703	1,373
Ясень	7,491	10,14	10,17	99,95	1,112	0,968

нахождении в жидкости (в воде) древесина впитывает воду и, соответственно, увеличивается масса образца, что в конечном итоге приводит к еще большему снижению значения соотношения (16). В данном случае наиболее подходящим значением соотношения является значение от 1,1 и более.

Для выполнения условия вертикального расположения системы образец — шарик в жидкости невозможно привести какое-либо однозначное уравнение или неравенство. Считаем допустимым сравнение экспериментальных данных с соотношением (16). При использовании меньшего шарика, во время постановки экспериментов для образцов из ели, осины и сосны они всплывали, т. е. система образец — шарик принимала горизонтальное положение на поверхности жидкости. Из расчетов, приведенных в табл. 3, соотношение (16) для указанных пород превышает значение 1,4. Предположительно данная величина является некоторой переходной величиной, при которой начинается всплытие системы образец — шарик. В соответствии с приведенными ограничениями примечательно, что для определения плотности образца из древесины липы, согласно соотношению (16), можно использовать оба шарика. Проведенные эксперименты подтвердили приведенные суждения и расчеты.

Выводы

1. Предложен метод определения плотности древесины, позволяющий сократить время измерения. Согласно методу перед погружением в жидкость известной плотности к торцевой поверхности одного из концов исследуемого образца древесины прикрепляется груз в виде металлического шарика, обеспечивающий вертикальность расположения образца в жидкости во время осуществления измерений.

2. С использованием законов физики приведено теоретическое обоснование применимости метода на практике. За основу принята статичность системы образец-шарик, которая обеспечивается равнодействующей сил тяжести и Архимеда.

3. Экспериментально проверена работоспособность и пригодность метода для использования на практике. С использованием изготовленных образцов различных пород древесины проведены лабораторные исследования с последующим определением плотности образцов. Погрешность определения величины плотности при сравнении со стереометрическим методом составила не более 3 %.

4. С использованием аналитико-экспериментального метода и математического аппарата определены условия подбора шарика для исследований таким образом, чтобы происходило неполное погружение образца с одновременным обеспечением вертикального положения в среде жидкости.

Для этого получено соотношение $\frac{V_d + V_{ш}}{m_d + m_{ш}}$, справедливое для водной среды, которое имеет рациональный диапазон 1,1–1,4.

5. На практике могут быть использованы образцы различных видов сечения, не изменяющиеся по длине. Для применения в полевых условиях целесообразно иметь набор шариков различных типоразмеров, отличающихся не только размерно-массовыми характеристиками, но и материалом, из которого они изготовлены.

Список литературы

- [1] Полубояринов О.И. Плотность древесины. М.: Лесная пром-сть, 1976. 160 с.
- [2] Федорков А.Л. Оценка качественных признаков древесины в селекционных программах (краткий обзор

- современной литературы) // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 4. С. 30–35.
DOI: 10.18698/2542-1468-2023-4-30-35
- [3] Chauhan S.S., Aggarwal P. Segregation of *Eucalyptus tereticornis* Sm. clones for properties relevant to solid wood products // Annals of Forest Science, 2011, v. 68, pp. 511–521. <https://doi.org/10.1007/s13595-011-0053-7>
 - [4] Симоненко А.А., Коварская Е.З. Определение плотности древесины с применением низкочастотного ультразвукового метода // Наука и бизнес: пути развития, 2013. № 11(29). С. 44–50.
 - [5] Beall F. Overview of the use of ultrasonic technologies in research on wood properties // Wood Science and Technology, 2002, v. 36, pp. 197–212. <https://doi.org/10.1007/s00226-002-0138-4>
 - [6] Fundova I. Quantitative Genetics of Wood Quality Traits in Scots Pine. PhD Thesis // Acta Universitatis Agriculturae Sueciae, 2020, no. 9, p. 59.
 - [7] Афонин Д.Н. Методы определения плотности лесоматериалов при таможенном контроле // Бюллетень инновационных технологий, 2022. Т. 6. № 4(24). С. 49–52.
 - [8] Колесникова А.А., Федорова А.А., Мазуркин П.М. Ультразвуковые испытания древесины лыжных заготовок // Современные наукоемкие технологии, 2011. № 6. С. 46–52.
 - [9] Bucur V. A Review on Acoustics of Wood as a Tool for Quality Assessment // Forests, 2023, no. 14, p. 1545. <https://doi.org/10.3390/f14081545>
 - [10] Федосенко И.Г., Чесновский Е.В., Мазаник Н.В. Разработка неразрушающего метода оценки состояния древесины конструкций исторических памятников // Труды БГТУ, 2017. № 2. С. 273–278.
 - [11] Decoux V. Relationships between the intra-ring wood density assessed by X-ray densitometry and optical anatomical measurements in conifers. Consequences for the cell wall apparent density determination // Annals of forest science, 2004, no. 61, pp. 251–262. <https://doi.org/10.1051/forest:2004018>
 - [12] Macedo A., Vaz C.M.P., Pereira J.C.D., Naime J.M., Cruvinel P.E., Crestana S. Wood density determination by X- and Gamma-Ray tomography // Holzforschung, 2002, no. 56(5), pp. 535–540. <https://doi.org/10.1515/HF.2002.082>
 - [13] Freyburger C., Longuetaud F., Mothe F. Measuring wood density by means of X-ray computer tomography // Annals of forest science, 2009, v. 66, p. 804. <https://doi.org/10.1051/forest/2009071>
 - [14] Cherelli S. Nonconventional approach to evaluate the quality of heartwood and sapwood // Proceedings: 20th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium. General Technical Report FPL-GTR-249. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2017, pp. 517–529.
 - [15] Bouffier C., Charlot A., Raffin L. Can wood density be efficiently selected at early stage in maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.)? // Annals of Forest Science, 2008, v. 65, pp. 106–108.
 - [16] Silkin P.P., Kiryanov A.V., Krusic P.J., Ekimov M.V., Barinov V.V., Büntgen U. A new approach to measuring tree-ring density parameters // J. Sib. Fed. Univ. Biol., 2022, 15(4), pp. 441–455. <https://doi.org/10.17516/1997-1389-0397>
 - [17] Терсков И.А., Ваганов Е.А., Спилов В.В. Новые методы изучения распределения пористости и плотности древесины внутри годовичных слоев // Известия Сибирского отделения Академии наук СССР, серия биологических наук, 1972. Вып. 3 (15). С. 115–120.
 - [18] 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. US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. Madison, WI, 2005, 78 p.
 - [19] Ceraldi C., Mormone V., Russo Ermolli E. Resistographic inspection of ancient timber structures for the evaluation of mechanical characteristics // Mat. Struct., 2001, v. 34, pp. 59–64. <https://doi.org/10.1007/BF02482201>
 - [20] Шарапов Е.С. Совершенствование методов и средств квазинеразрушающего контроля физико-механических свойств древесины и древесных материалов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.05. Архангельск, 2020. 280 с.
 - [21] Schimleck L., Dahlen J., Apiolaza L., Downes G., Emms G., Evans R., Moore J., Pâques L., Bulcke J., Wang X. Non-destructive evaluation techniques and what they tell us about wood property variation // Forests, 2019, v. 10, pp. 1–50. <https://doi.org/10.3390/f10090728>
 - [22] Fundova I., Funda T., Wu H.X. Non-destructive wood density assessment of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) using Resistograph and Pilodyn // PLoS ONE, 2018, v. 13, no. 9, pp. 1–16. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0204518>
 - [23] Шарапов Е.С., Чернов В.Ю. Обоснование конструкции устройства для исследования свойств древесины сверлением // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии, 2011. № 195. С. 134–141.
 - [24] ГОСТ 16483.1-84 (СТ СЭВ 388-76) Древесина. Метод определения плотности. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200008349> (дата обращения 22.11.2023).
 - [25] ISO 13061-2:2014 Physical and mechanical properties of wood. Test methods for small clear wood specimens. Part 2: Determination of density for physical and mechanical tests. URL: <https://www.iso.org/standard/60064.html> (дата обращения 22.11.2023).
 - [26] Гайнуллин Рен. X., Цветкова Е.М., Гайнуллин Риш. X. Устройство для измерения объемов образцов древесины. Пат. № 2741900 РФ, МПК G01F 17/00, заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет», № 2020125362; заявл. 30.07.2020; опубл. 29.01.2021, бюл. № 4.
 - [27] Гайнуллин Рен. X., Сафин Р.Р., Гайнуллин Риш. X., Исмаилов Л.Ю., Цветкова Е.М. Устройство для измерения объемов тел. Пат. № 2779771 Российская Федерация, МПК G01F 17/00, заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет», № 2022110569; заявл. 19.04.2022; опубл. 13.09.2022, бюл. № 26.
 - [28] Уголев Б.Н. Древесиноведение. М.: Лесная пром-сть, 1975. 321 с.
 - [29] Vieilledent G., Fischer F.J., Chave J., Guibal D., Langbour P., Gérard J. New formula and conversion factor to compute basic wood density of tree species using a global wood technology database // American J. of Botany, 2018, v. 105(10), pp. 1653–1661. <https://doi.org/10.1002/ajb2.1175>
 - [30] Williamson G.B., Wiemann M.C. Measuring Wood Specific Gravity Correctly // American J. of Botany, 2010, v. 97, pp. 519–524. <http://dx.doi.org/10.3732/ajb.0900243>
 - [31] Гаузер С.И., Кивилис С.С., Осокина А.П., Павловский А.Н. Измерение массы, объема и плотности. М.: Издательство стандартов, 1972. 623 с.
 - [32] Marianne L. Harder Pycnometer method for obtaining wood and bark chip densities., Appleton, Wisconsin: The institute of paper chemistry, 1975, v. 21, pp. 1–4.
 - [33] Гайнуллин Рен. X., Гайнуллин Риш. X., Цветкова Е.М., Миронов П.И., Романов А.В. Способ определения плотности древесины. Пат. № 2805371 РФ, МПК G01N 9/10 /, заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет», № 2023116488; заявл. 22.06.2023; опубл. 16.10.2023, бюл. № 29.

Сведения об авторах

Гайнуллин Ренат Харисович✉ — канд. техн. наук, доцент кафедры деревообрабатывающих производств, ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет», gainyllinrh@yandex.ru

Гайнуллин Ришат Харисович — канд. техн. наук, доцент кафедры деревообрабатывающих производств, ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет», rishat_000@mail.ru

Цветкова Екатерина Михайловна — ст. преподаватель кафедры стандартизации, сертификации и товароведения, ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет», Ekaterinadudina@mail.ru

Сафин Руслан Рушанович — д-р техн. наук, профессор кафедры архитектуры и дизайна изделий из древесины, ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», cfaby@mail.ru

Поступила в редакцию 05.12.2023.

Одобрено после рецензирования 29.02.2024.

Принята к публикации 15.05.2024.

WOOD DENSITY DETERMINATION DEVELOPMENT AND JUSTIFICATION METHOD

Ren. H. Gainullin¹✉, Rish. H. Gainullin¹, E.M. Tsvetkova¹, R.R. Safin²

¹Volga State University of Technology, Lenin sq., 3, Yoshkar-Ola city, 424000, Russia

²Kazan National Research Technological University, K. Marks str., 68, Kazan city, 420015, Russia

gainyllinrh@yandex.ru

The article provides a brief overview of methods for determining the wood density, which according to the classification are divided into direct and indirect. A mathematically justified author's method for determining the wood density, taking into account the laws of physics, is proposed, which is a kind of water displacement method. Experimental studies have been conducted on nine types of wood, which have shown the efficiency and applicability of the method. The data obtained by the stereometric method were compared (the error value was less than 3 %). The conditions for selecting a load in the form of a ball for research are determined in such a way that incomplete immersion of the sample occurs while ensuring vertical position in a liquid medium. It is recommended to use the proposed method to determine the density of wood in the field conditions.

Keywords: wood density, methods for determining wood density, express method for determining wood density

Suggested citation: Gainullin Ren.H., Gainullin Rich.H., Tsvetkova E.M., Safin R.R. *Razrabotka i obosnovanie metoda opredeleniya plotnosti drevesiny* [Wood density determination development and justification method] // Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin, 2024, vol. 28, no. 4, pp. 147–156. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-4-147-156

References

- [1] Poluboiarinov O.I. *Plotnost' drevesiny* [Wood density]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' [Forest industry], 1976, 160 p.
- [2] Fedorkov A.L. *Otsenka kachestvennykh priznakov drevesiny v selektsionnykh programmakh (kratkiy obzor sovremennoy literatury)* [Wood quality estimation in tree breeding programmes (short literature review)]. Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin, 2023, vol. 27, no. 4, pp. 30–35. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-4-30-35
- [3] Chauhan S.S., Aggarwal P. Segregation of *Eucalyptus tereticornis* Sm. clones for properties relevant to solid wood products. *Annals of Forest Science*, 2011, v. 68, pp. 511–521. <https://doi.org/10.1007/s13595-011-0053-7>
- [4] Simonenko, A.A., Kovarskaia E.Z. *Opredelenie plotnosti drevesiny s primeneniem nizkochastotnogo ul'trazvukovogo metoda* [Determination of wood density using a low-frequency ultrasonic method]. *Nauka i biznes: puti razvitiya* [Science and business: ways of development], 2013, no. 11(29), pp. 44–50.
- [5] Beall F. Overview of the use of ultrasonic technologies in research on wood properties. *Wood Science and Technology*, 2002, v. 36, pp. 197–212. <https://doi.org/10.1007/s00226-002-0138-4>
- [6] Fundova I. Quantitative Genetics of Wood Quality Traits in Scots Pine. PhD Thesis. *Acta Universitatis Agriculturae Sueciae*, 2020, no. 9, p. 59.
- [7] Afonin D.N. *Metody opredeleniya plotnosti lesomaterialov pri tamozhennom kontrole* [Methods for determining the density of timber under customs control]. *Byulleten' innovatsionnykh tekhnologiy* [Bulletin of Innovative Technologies], 2022, v. 6, no. 4(24), pp. 49–52.
- [8] Kolesnikova A.A., Fedorova A.A., Mazurkin P.M. *Ul'trazvukovye ispytaniya drevesiny lyzhnykh zagotovok* [Ultrasonic testing of ski billet wood]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [Modern high-tech technologies], 2011, no. 6, pp. 46–52.
- [9] Bucur V. A Review on Acoustics of Wood as a Tool for Quality Assessment. *Forests*, 2023, no. 14, p. 1545. <https://doi.org/10.3390/f14081545>
- [10] Fedosenko I.G., Chesnovskiy E.V., Mazanik N.V. *Razrabotka nerazrushayushchego metoda ocenki sostoyaniya drevesiny konstruktsiy istoricheskikh pamyatnikov* [Development of a non-destructive method for assessing the condition of wood structures of historical monuments]. *Trudy BGTU* [The works of BSTU], 2017, no. 2, pp. 273–278.
- [11] Decoux V. Relationships between the intra-ring wood density assessed by X-ray densitometry and optical anatomical measurements in conifers. Consequences for the cell wall apparent density determination. *Annals of forest science*, 2004, no. 61, pp. 251–262. <https://doi.org/10.1051/forest:2004018>

- [12] Macedo A., Vaz C.M.P., Pereira J.C.D., Naime J.M., Cruvinel P.E., Crestana S. Wood density determination by X- and Gamma-Ray tomography. *Holzforschung*, 2002, no. 56(5), pp. 535–540. <https://doi.org/10.1515/HF.2002.082>
- [13] Freyburger C., Longuetaud F., Mothe F. Measuring wood density by means of X-ray computer tomography. *Annals of forest science*, 2009, v. 66, p. 804. <https://doi.org/10.1051/forest/2009071>
- [14] Cherelli S. Nonconventional approach to evaluate the quality of heartwood and sapwood. *Proceedings: 20th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium. General Technical Report FPL-GTR-249*. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2017, pp. 517–529.
- [15] Bouffier C., Charlot A., Raffin L. Can wood density be efficiently selected at early stage in maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.)? *Annals of Forest Science*, 2008, v. 65, pp. 106–108.
- [16] Silkin P.P., Kirdyanov A.V., Krusic P.J., Ekimov M.V., Barinov V.V., Büntgen U. A new approach to measuring tree-ring density parameters. *J. Sib. Fed. Univ. Biol.*, 2022, 15(4), pp. 441–455. <https://doi.org/10.17516/1997-1389-0397>
- [17] Terskov I.A., Vaganov E.A., Spirov V.V. *Novye metody izucheniya raspredeleniya poristosti i plotnosti drevesiny vnutri godichnykh sloev* [New methods for studying the distribution of porosity and density of wood inside annual layers]. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Akademii nauk SSSR, seriya biologicheskikh nauk* [Proceedings of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences, series of biological Sciences], 1972, v. 3 (15), pp. 115–120.
- [18] 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. US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, WI, 2005, 78 p.
- [19] Ceraldi C., Mormone V., Russo Ermolli E. Resistographic inspection of ancient timber structures for the evaluation of mechanical characteristics. *Mat. Struct.*, 2001, v. 34, pp. 59–64. <https://doi.org/10.1007/BF02482201>
- [20] Sharapov E.S. *Sovershenstvovanie metodov i sredstv kvazinerazrushayushchego kontrolya fiziko-mekhanicheskikh svoystv drevesiny i drevesnykh materialov* [Improvement of methods and means of quasi-destructive control of physical and mechanical properties of wood and wood materials]. Dis. Dr. Sci. (Tech.), 05.21.05. Arhangel'sk, 2020, 280 p.
- [21] Schimleck L., Dahlen J., Apiolaza L., Downes G., Emms G., Evans R., Moore J., Pâques L., Bulcke J., Wang X. Non-destructive evaluation techniques and what they tell us about wood property variation. *Forests*, 2019, v. 10, pp. 1–50. <https://doi.org/10.3390/f10090728>
- [22] Fundova I., Funda T., Wu H.X. Non-destructive wood density assessment of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) using Resistograph and Pilodyn. *PLoS ONE*, 2018, v. 13, no. 9, pp. 1–16. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0204518>
- [23] Sharapov E.S., Chernov V.Yu. *Obosnovanie konstruktivnogo ustroystva dlya issledovaniya svoystv drevesiny sverleniem* [Justification of the design of a device for studying the properties of wood by drilling]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii* [News of the St. Petersburg Forestry Academy], 2011, no. 195, pp. 134–141.
- [24] GOST 16483.1–84 (ST SEV 388-76) *Drevesina. Metod opredeleniya plotnosti* [Wood. Density determination method]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200008349> (accessed 22.11.2023).
- [25] ISO 13061-2:2014 Physical and mechanical properties of wood. Test methods for small clear wood specimens. Part 2: Determination of density for physical and mechanical tests. Available at: <https://www.iso.org/standard/60064.html> (accessed 22.11.2023).
- [26] Gainullin Ren. Kh., Tsvetkova E.M., Gainullin Rish. Kh. *Ustroystvo dlya izmereniya ob'emov obrabotkov drevesiny* [A device for measuring the volume of wood samples]. Patent № 2741900 Russian Federation, MPK G01F 17/00, Volga State University of Technology, 2021.
- [27] Gainullin Ren. Kh., Safin R.R., Gainullin Rish. Kh., Ismailov L.U., Tsvetkova E.M. *Ustroystvo dlya izmereniya ob'emov tel* [A device for measuring the volume of bodies]. Patent № 2779771 Russian Federation, MPK G01F 17/00, Volga State University of Technology, 2022.
- [28] Ugolev B.N. *Drevesinovedenie* [Wood science]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' [Forest industry], 1975, 321 p.
- [29] Vieilledent G., Fischer F.J., Chave J., Guibal D., Langbour P., Gérard J. New formula and conversion factor to compute basic wood density of tree species using a global wood technology database. *American J. of Botany*, 2018, v. 105(10), pp. 1653–1661. <https://doi.org/10.1002/ajb2.1175>
- [30] Williamson G.B., Wiemann M.C. Measuring Wood Specific Gravity Correctly. *American J. of Botany*, 2010, v. 97, pp. 519–524. <http://dx.doi.org/10.3732/ajb.0900243>
- [31] Gauzner S.I., Kivilis S.S., Osokina A.P., Pavlovskii A.N. *Izmerenie massy, ob'yoma i plotnosti* [Measurement of mass, volume and density]. Moscow: Izd-vo Standartov [Publishing House of Standards], 1972, 623 p.
- [32] Marianne L. Harder Pycnometer method for obtaining wood and bark chip densities., Appleton, Wisconsin: The institute of paper chemistry, 1975, v. 21, pp. 1–4.
- [33] Gainullin Ren. Kh., Gainullin Rish. Kh., Tsvetkova E.M., Mironov P.I., Romanov A.V. *Sposob opredeleniya plotnosti drevesiny* [Method for determining the density of wood]. Patent № 2805371 Russian Federation, MPK G01N 9/10, Volga State University of Technology, 2023.

Authors' information

Gainullin Renat Harisovich ✉ — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Department of Woodworking Industries, Volga State University of Technology, gainullinrh@yandex.ru

Gainullin Rishat Harisovich — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Department of Woodworking Industries, Volga State University of Technology, rishat_000@mail.ru

Tsvetkova Ekaterina Mihailovna — Senior Lecturer of the Department of Standardization, Certification and Merchandising, Volga State University of Technology, Ekaterinadudina@mail.ru

Safin Ruslan Rushanovich – Dr. Sci. (Tech.), Professor of the Department of Architecture and Design of Wood Products, Kazan National Research Technological University, cfaby@mail.ru

Received 05.12.2023.

Approved after review 29.02.2024.

Accepted for publication 15.05.2024.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

The authors declare that there is no conflict of interest