



ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ КЛЕТОЧНЫХ СТЕНОК ДРЕВЕСИНЫ И ДРУГИХ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ГАЗОВОЙ ПИКНОМЕТРИИ В СРЕДЕ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА

Ренат Х. Гайнуллин¹ ✉, gainyllinrh@yandex.ru, 0000-0002-2492-8861

Альбина В. Сафина², alb_saf@mail.ru, 0000-0002-7344-9242

Ришат Х. Гайнуллин¹, rishat_000@mail.ru, 0000-0003-2219-2413

Екатерина М. Цветкова¹, Ekaterinadudina@mail.ru, 0000-0002-5664-5866

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

²ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», ул. К. Маркса, 68, 420015, г. Казань, Российская Федерация

В статье приведены аналитические и экспериментальные исследования по определению плотности клеточных стенок древесины и других пористых материалов. Из литературных источников выявлено четыре основных метода определения плотности клеточных стенок древесины и пористых материалов. Из них три прямых метода: суспензий, ртутной порометрии и пикнометрии, и один косвенный – оптический (планиметрический). Наиболее распространенным из перечисленных является метод газовой пикнометрии в среде гелия. По результатам критического анализа предложен метод измерения объема и определения плотности клеточных стенок древесины и пористых материалов в среде атмосферного воздуха, обоснованный теоретически и не противоречащий основным постулатам и законам термодинамики. Экспериментальным путем определена функциональная пригодность предложенного метода, а также высокая степень достоверности получаемых результатов. С использованием разработанной экспериментальной установки измерены объемы и определены плотности клеточных стенок разных пород древесины и других пористых материалов при различных режимах функционирования системы. Наименьшие значения плотности получены при избыточном давлении + 70 кПа, наибольшие – при разрежении – 90кПа. Отклонения в результатах между наибольшим и наименьшим значениями плотности составили соответственно: ель – 7,02%, осина – 4,12%, термомодифицированная (ТМ) липа – 2,95 %, гниль сосны – 4,93 %, чага – 5,12 %, кора сосны – 5,27 %, березовый древесный уголь – 14,6 %.

Ключевые слова: древесина, плотность клеточных стенок древесины и пористых материалов, объем пористого тела, газовая пикнометрия, атмосферный воздух

Благодарности: Авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Гайнуллин Рен. Х. Определение плотности клеточных стенок древесины и других пористых материалов методом газовой пикнометрии в среде атмосферного воздуха / Рен. Х. Гайнуллин, А. В. Сафина, Риш. Х. Гайнуллин, Е. М. Цветкова // Лесотехнический журнал. – 2021. – Т. 11. – № 3 (43). – С. 74–85. – Библиогр.: с. 82–85 (24 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.3/6>.

Поступила: 22.04.2021 **Принята к публикации:** 25.06.2021 **Опубликована онлайн:** 01.07.2021

DETERMINATION OF THE CELL WALLS DENSITY OF THE WOOD AND OTHER POROUS MATERIALS BY GAS PYCNOMETRY IN ATMOSPHERIC AIR

Renat Kh. Gainullin¹ ✉, gainyllinrh@yandex.ru,  0000-0002-2492-8861

Albina V. Safina², alb_saf@mail.ru,  0000-0002-7344-9242

Rishat Kh. Gainullin¹, rishat_000@mail.ru,  0000-0003-2219-2413

Ekaterina M. Tsvetkova¹, Ekaterinadudina@mail.ru,  0000-0002-5664-5866

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

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

Abstract

The article presents analytical and experimental studies to determine the density of the wood cell walls and other porous materials. From the literature, four main methods have been identified for determining the density of the cell walls of wood and porous materials. Of these, there are three direct methods: suspensions, mercury porosimetry and pycnometry, and one indirect - optical (planimetric). Helium gas pycnometry method is the most common of these ones. Based on the results of the critical analysis, a method for measuring the volume and determining the density of the cell walls of wood and porous materials in the atmosphere of atmospheric air was proposed. The method was theoretically substantiated and does not contradict the basic postulates and laws of thermodynamics. The functional suitability of the proposed method, as well as a high degree of reliability of the results obtained, has been determined experimentally. Volumes and densities of the cell walls of various wood species and other porous materials were measured under various modes of the system functioning using the developed experimental installation. The lowest density values were obtained at an overpressure of +70 kPa, the highest were seen at a vacuum of -90 kPa. The deviations in the results between the highest and lowest density values were, respectively: spruce – 7.02%, aspen – 4.12%, thermally modified (TM) linden – 2.95%, pine rot – 4.93%, shelf fungus – 5.12%, pine bark – 5.27%, birch charcoal – 14.6%.

Keywords: wood, density of wood cell walls and porous materials, volume of a porous body, gas pycnometry, atmospheric air

Acknowledgments: The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

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

For citation: Gainullin Ren. Kh., Safina A. V., Gainullin Rish. Kh., Tsvetkova E. M. (2021) Determination of the cell walls density of the wood and other porous materials by gas pycnometry in atmospheric air. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forest Engineering journal], Vol. 11, No. 3 (43), pp. 74-85 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.3/6>.

Received: 22.04.2021 **Accepted for publication:** 25.06.2021 **Published online:** 01.07.2021

Введение

Все материалы, используемые человеком в быту, имеют различные физико-механические характеристики. Наиболее часто используемой величиной является плотность ввиду ее универсальности. Однако значение плотности для одного и того же материала может изменяться в больших диапа-

зонах. Особенно это свойственно пористым материалам, плотность которых подразделяют на истинную и среднюю [1]. К пористым материалам также относится и древесина, которой свойственны различные виды плотности [2]. В практике технологических расчетов, как правило, пользуются величиной средней плотности древесины. Однако эта

величина изменяется в большом диапазоне не только в пределах одной определенной породы, но и одного дерева (лесоматериала) [3]. Это свидетельствует о том, что плотность клеточных стенок является наиболее точной мерой содержания древесного вещества в объеме материала.

Одним из самых первых способов по определению истинной плотности (плотности клеточных стенок) древесины является метод суспензий [4–6]. Согласно этому методу подготовленные образцы древесины помещают в растворы различных солей. После насыщения древесины происходит регулировка плотности раствора таким образом, чтобы образцы находились во взвешенном состоянии, что свидетельствует о равной плотности раствора и образца древесины. Соответственно, по численному значению плотности раствора судят о плотности древесины. В результате проведенных экспериментальных исследований вышеуказанными авторами значения плотности древесины составили $1,4 - 1,56 \text{ г/см}^3$ в зависимости от породы. Необходимо отметить, что данный метод занимает значительное количество времени и очень трудоемок, поэтому в настоящее время практически не используется.

В начале XX столетия с бурным развитием физики для определения плотности материалов начали применять метод пикнометрии, сущность которого заключается в том, что тело, погруженное в какую-либо среду, вытесняет из нее объем, равный объему тела. В качестве среды для вытеснения использовались жидкости (вода, спирт, бензин, толуол и т.д.) и газы (гелий, кислород, азот, водород и др.) [7–11]. Численные значения плотности, полученные методом пикнометрии, изменялись в зависимости от применяемой среды. Так, плотность, определенная в воде и жидкостях, составила в среднем $1,54 \text{ г/см}^3$, а в среде газов – $1,46 \text{ г/см}^3$.

Схожим по замыслу, но отличающимся по исполнению является еще один способ определения плотности клеточных стенок древесины – метод ртутной порометрии. В данном случае в поры древесины под большим давлением нагнетается ртуть [12–14]. Плотность, определенная таким методом, составляет около $1,46 \text{ г/см}^3$. Широкому распространению данного метода мешают токсичность

самой ртути и невозможность дальнейшего использования для исследований образцов древесины, как и в случае с методом суспензий, ввиду содержания в них солей или ртути.

Перечисленные выше методы определения плотности клеточных стенок древесины относятся к прямым, кроме них существует еще один косвенный – оптический (планиметрический) метод. Сущность метода заключается в определении значения плотности клеточных стенок по отношению плотности всего объема древесины и процентного содержания клеточных стенок в измеряемом образце. С целью осуществления данного метода делается микросрез древесины, определяется его масса, размеры и средняя плотность. Затем увеличивается его изображение микроскопом и с помощью планиметра определяется площадь, которую занимают клеточные стенки на площади всего среза [15–19]. Согласно полученным экспериментальным данным, плотность клеточных стенок, определенная планиметрическим способом, составила $1,02-1,30 \text{ г/см}^3$ для разных пород древесины. В настоящее время данный метод совершенствуется благодаря внедрению методов рентгенографии и магнитно-резонансной томографии [20] для получения изображения микросреза древесины.

Из перечисленных методов определения плотности клеточных стенок древесины в настоящее время наиболее распространенным является метод газовой пикнометрии в среде гелия [21], который стандартизован в странах Евросоюза [22] и в России [23]. Данный метод кроме достоинств имеет и недостатки, к которым можно отнести необходимость гелия требуемой чистоты и необходимость проведения многостадийной процедуры калибровки для определения объемов цилиндров сравнения и образца, которая осуществляется только при работе измерительной пневмосистемы в режиме избыточного давления.

В настоящее время к области изучения плотности клеточных стенок (истинной плотности) древесины исследователи проявляют все меньший интерес. Это связано, в первую очередь, со сложностью разработки новых методик определения плотности клеточных стенок древесины. Вторым немаловажным фактором является то, что уже накоплен

определенный объем знаний об этой величине. Тем не менее, современной науке неизвестны диапазоны изменения плотности клеточных стенок для различных пород древесины, а также других пористых материалов растительного происхождения. Настоящая статья направлена на устранение указанных пробелов в этой области знаний, поэтому является актуальной.

Материалы и методы

С целью устранения указанных недостатков в существующих методах коллективом авторов предложен альтернативный способ определения плотности клеточных стенок древесины [24], в основу которого заложена работа пневматической системы с атмосферным воздухом вместо гелия. Для проведения экспериментальных исследований была разработана установка (рис. 1), состоящая из двух одинаковых по емкости цилиндров *1,2*, кранов *3,4,5,6*, пневмонасоса *7* с манометром *8* и перепускным клапаном *9*, цилиндра *10* с водой, соединенного с установкой прозрачным трубопроводом *11* со шкалой *12*. По данному способу измерение объема и определение плотности пористых тел, например древесины, может осуществляться при работе измерительной системы в режиме разрежения и режиме избыточного давления.

В режиме вакуума работа установки осуществляется следующим образом. Взвешенный на весах образец *13* помещают в цилиндр для проб *1*, при этом краны *3,4,5,6* открыты, а в цилиндрах *1* и *2* установлено атмосферное давление P_{atm} . После этого закрывают кран *5* и включают пневмонасос *7*, который создает вакуум величиной P_1 в цилиндрах *1* и *2*, регистрируемый манометром *8*. После создания требуемой величины вакуума закрывают кран *6*, а затем краны *3* и *4*, при этом давление в пневмонасосе *7* уравнивают с атмосферным с помощью перепускного клапана *9*. После последовательного открывания кранов *5* и *3* за счет разрежения происходит изменение высоты водяного столба Δh_1 в прозрачном трубопроводе *11*, фиксируемое по шкале *12*. Затем открывают кран *6*, а кран *3* закрывают, тем самым в системе измерения вновь устанавливается атмосферное давление, а водяной столб приходит в исходное положение. После этого вновь закрывают вентиль *6* и открывают вентиль *4*,

при этом за счет разрежения вода из цилиндра *10* перемещается по прозрачному трубопроводу *11*, где с помощью шкалы *12* фиксируют изменение высоты водяного столба Δh_2 . Открыванием вентилей *3,4,5,6* и перепускного клапана измерительную систему приводят в исходное нулевое положение.

Выполненные действия имеют следующее теоретическое толкование. С учетом постоянства температуры системы, ее состояние в цилиндрах *1,2* при атмосферном давлении P_{atm} и после создания вакуума P_1 можно отразить уравнениями, которые подчиняются закону Бойля-Мариотта:

$$P_{atm}(V_c - V_m) = P_1(V_c - V_m - \Delta V_1), \quad (1)$$

$$P_{atm}V_c = P_1(V_c - \Delta V_2), \quad (2)$$

где P_{atm} – численное значение атмосферного давления,

P_1 – численное значение вакуума в цилиндрах после удаления воздуха,

V_c – объем каждого цилиндра,

V_m – искомый объем тела,

ΔV_1 – объем воздуха, удаленный из цилиндра для проб,

ΔV_2 – объем воздуха, удаленный из измерительного цилиндра.

Выражая P_{atm} из (1) и (2), получим соответственно

$$P_{atm} = \frac{P_1(V_c - V_m - \Delta V_1)}{(V_c - V_m)}, \quad (3)$$

$$P_{atm} = \frac{P_1(V_c - \Delta V_2)}{V_c}. \quad (4)$$

Приравняв правые части уравнений (3), (4) и решая относительно искомого объема тела V_m , получим

$$V_m = V_c \left(1 - \frac{\Delta V_1}{\Delta V_2}\right). \quad (5)$$

В режиме избыточного давления работа установки осуществляется следующим образом. Взвешенный на весах образец *13* помещают в цилиндр для проб *1*, при этом краны *3,4,5,6* открыты, а в цилиндрах *1* и *2* установлено атмосферное давление P_{atm} . После этого закрывают кран *5* и включают пневмонасос *7*, который создает избыточное давление P_2 в цилиндрах *1* и *2*, регистрируемое манометром *8*. После создания требуемой величины избыточного давления, закрывают кран *6*, а следом краны *3* и *4*, при этом давление в пневмонасосе *7* уравнивают с атмосферным с помощью перепускного клапана *9*. После последовательного от-

крывания кранов 5 и 3 за счет избыточного давления происходит изменение высоты водяного столба Δh_1 в прозрачном трубопроводе 11, фиксируемое по шкале 12. Затем открывают кран 6, а кран 3 закрывают, тем самым в системе измерения вновь устанавливается атмосферное давление, а водяной

столб приходит в исходное нулевое положение. После этого вновь закрывают кран 6 и открывают кран 4, при этом за счет избыточного давления вода из цилиндра 10 перемещается по прозрачному трубопроводу 11, где с помощью шкалы 12 фиксируют изменение высоты водяного столба ΔV_2 .

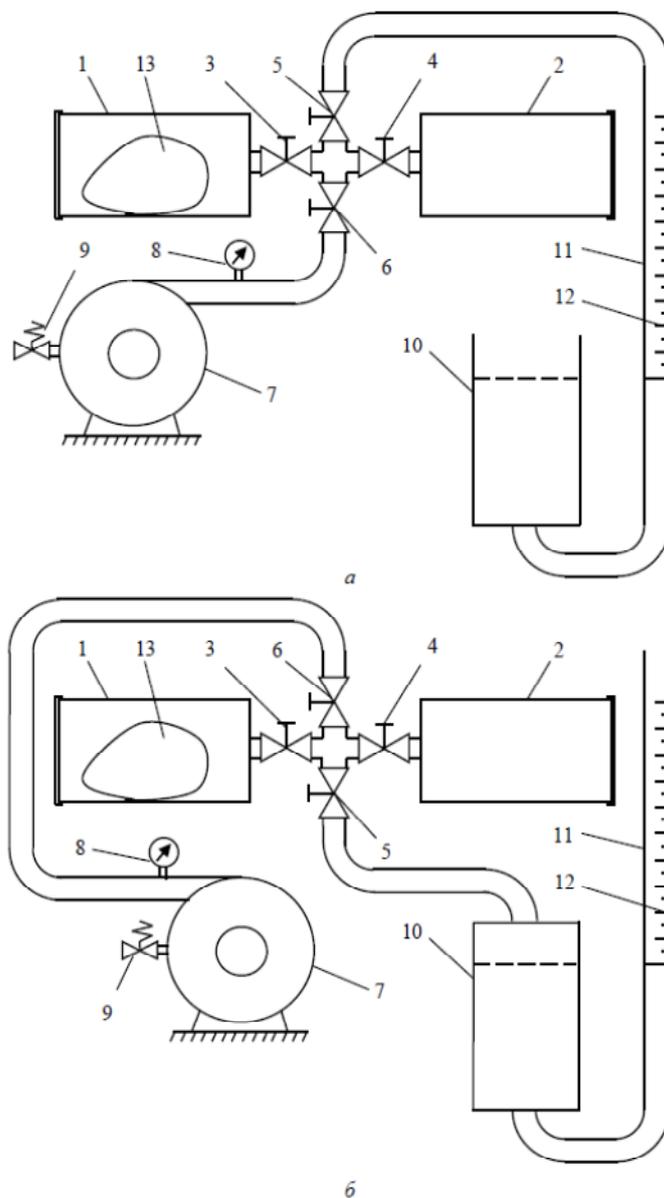


Рисунок 1. Схема экспериментальной установки: а – при функционировании в режиме вакуума, б – при функционировании в режиме избыточного давления: 1 – цилиндр для проб, 2 – измерительный цилиндр, 3,4,5,6 – краны, 7 – пневмонасос, 8 – манометр, 9 – перепускной клапан, 10 – цилиндр с водой, 11 – прозрачный трубопровод, 12 – шкала, 13 – исследуемый образец

Figure 1. Scheme of the experimental setup: a – in the operation of vacuum, b – in the operation of pressure: 1 – cylinder for samples, 2 – measuring cylinder, 3,4,5,6 – cranes, 7 – pneumatic pump, 8 – gauge, 9 – bypass valve, 10 – cylinder with water, 11 – transparent tubing, 12 – scale, 13 – the sample

Источник: собственные разработки авторов
Source: authors' own developments

Открыванием вентилей 3,4,5,6 и перепускного клапана измерительную систему приводят в исходное положение.

Проведенные манипуляции имеют следующее теоретическое объяснение. С учетом постоянства температуры системы, ее состояние в сосудах 1,2 при атмосферном давлении P_{atm} и после создания избыточного давления P_2 можно отразить уравнениями, которые подчиняются закону Бойля-Мариотта:

$$P_{atm}(V_c - V_m) = P_2(V_c - V_m + \Delta V_1), \quad (6)$$

$$P_{atm}V_c = P_2(V_c + \Delta V_2), \quad (7)$$

где P_{atm} – величина атмосферного давления, P_2 – величина избыточного давления в сосудах,

V_c – объем каждого сосуда,

V_m – искомый объем тела,

ΔV_1 – объем воздуха, перемещенный из атмосферы в сосуд для проб,

ΔV_2 – объем воздуха, перемещенный из атмосферы в измерительный сосуд.

Выражая P_{atm} из (6) и (7), получим

$$P_{atm} = \frac{P_2(V_c - V_m + \Delta V_1)}{(V_c - V_m)}, \quad (8)$$

$$P_{atm} = \frac{P_2(V_c + \Delta V_2)}{V_c}. \quad (9)$$

Приравняв правые части уравнений (8), (9) и решая относительно искомого объема тела V_m , получим уравнение для расчета объема исследуемого тела:

$$V_m = V_c \left(1 - \frac{\Delta V_1}{\Delta V_2}\right). \quad (10)$$

В свою очередь плотность определится по формуле:

$$\rho = \frac{m}{V_c \left(1 - \frac{\Delta V_1}{\Delta V_2}\right)}. \quad (11)$$

С целью практического применения выражения (5) или (10) необходимы определенные пояснения.

Отношение $\frac{\Delta V_1}{\Delta V_2}$ при проведении экспериментальных исследований заменим отношением $\frac{\Delta h_1}{\Delta h_2}$, это объясняется выражением

$$\Delta V = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \Delta H, \quad (12)$$

где d – диаметр прозрачного трубопровода,

ΔH – изменение высоты водяного столба.

Примечательно, что при одной и той же величине вакуума (избыточного давления) объем удаляемого из цилиндров (перемещаемого из атмосферы в цилиндры) воздуха будет зависеть от объема исследуемого образца, то есть с увеличением объема исследуемого образца при $P_1 = const$ ($P_2 = const$) объем фактически удаляемого из цилиндров (перемещаемого из атмосферы в цилиндры) воздуха будет уменьшаться. Исходя из этих положений, требуется проведение тарировки установки. Кроме этого, для упрощения дальнейших расчетов следует освободиться от величины V_c . Для этого с учетом (12) выражения (5) и (10) можно представить в следующем виде:

$$\frac{\Delta h_1}{\Delta h_2} = 1 - \frac{V_m}{V_c}. \quad (13)$$

Для проведения экспериментальных исследований с целью измерения объема и определения плотности клеточных стенок были использованы образцы древесины из заболонной части различных пород, образец деструктивной гнили сосны II стадии, а также образцы других пористых материалов (рис. 2). Влажность образцов поддерживалась не более 5 %. Измерение массы каждого образца осуществлялось с помощью электронных весов Vibra с точностью до 0,001 г. Объем клеточных стенок каждого образца определялся 10-кратным измерением на лабораторной установке.



Рисунок 2. Образцы для экспериментальных исследований: верхний ряд (слева направо): ель, осина, термомодифицированная (ТМ) липа, гниль сосны; нижний ряд (слева направо): чага, кора сосны, березовый древесный уголь

Figure 2. Samples for experimental studies: top row (from left to right): spruce, aspen, thermomodified (TM) linden, pine rot; bottom row (from left to right): chaga, pine bark, charcoal

Источник: файл образцов авторов
Source: authors' sample file

Результаты и обсуждение

Для тарировки лабораторной установки в качестве эталонного тела V_m были использованы концевые меры длины различных объемов. Значения давлений при тарировке и постановке экспериментов составляли -90 кПа, -70 кПа, +70 кПа и +90 кПа. В результате были получены графики (рис. 3-6) тарировочной диаграммы, где по оси абсцисс находится отношение $\frac{\Delta h_1}{\Delta h_2}$, а по оси ординат – соответствующий этому отношению объем V_m .

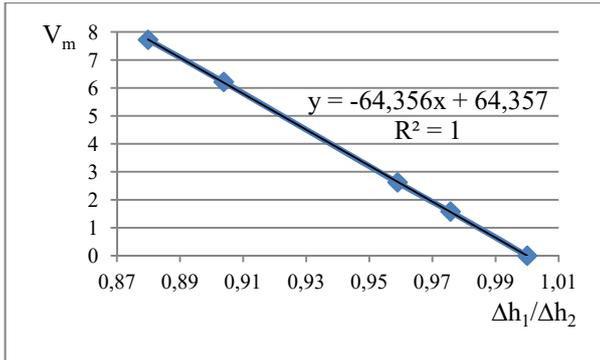


Рисунок 3. Тарировочный график при давлении -90 кПа

Figure 3. Calibration schedule at -90 kPa pressure
 Источник: результаты экспериментальных данных авторов
 Source: results of the authors' experimental data

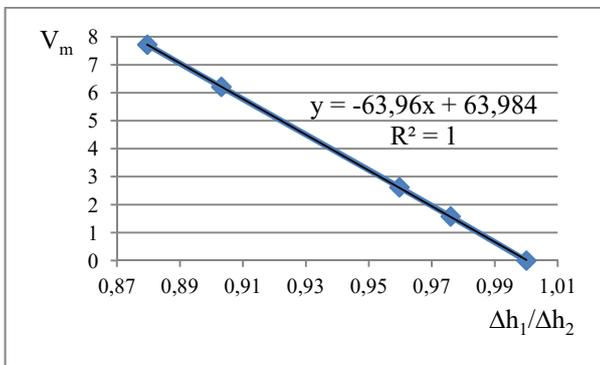


Рисунок 4. Тарировочный график при давлении -70 кПа

Figure 4. Calibration schedule at -70 kPa pressure
 Источник: результаты экспериментальных данных авторов
 Source: results of the authors' experimental data

Для удобства дальнейшего применения каждый из графиков тарировочной диаграммы охарактеризован уравнением типа

$$y = -kx + b, \quad (14)$$

где y – объем тела V_m ,

k и b – коэффициенты уравнения, полученные по результатам тарировки установки,
 x – отношение $\frac{\Delta h_1}{\Delta h_2}$.

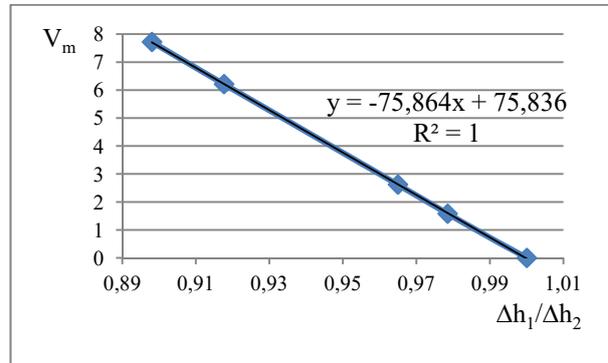


Рисунок 5. Тарировочный график при давлении +70 кПа

Figure 5. Calibration schedule at +70 kPa pressure
 Источник: результаты экспериментальных данных авторов
 Source: results of the authors' experimental data

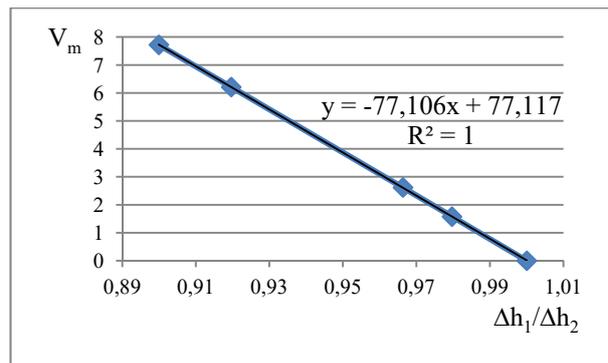


Рисунок 6. Тарировочный график при давлении +90 кПа

Figure 6. Calibration schedule at +90 kPa pressure
 Источник: результаты экспериментальных данных авторов
 Source: results of the authors' experimental data

Из выражения (14) очевидно, что первая точка тарировочных графиков будет иметь координаты $[1; 0]$, то есть когда $V_m = 0$, а отношение $\frac{\Delta h_1}{\Delta h_2} = 1$. Остальные точки определены координатами, зависящими от объема эталонных тел и соответствующих им отношений $\frac{\Delta h_1}{\Delta h_2}$. На графиках кроме уравнений также приведены коэффициенты достоверности аппроксимации. Величина $R^2 = 1$ свидетельствует об однозначной взаимосвязи между ве-

личинами V_m и $\frac{\Delta h_1}{\Delta h_2}$, а также о высокой достоверности результатов экспериментальных данных.

С учетом вышеизложенного, результаты экспериментальных данных плотности клеточных стенок образцов представлены в табл. 1-4.

Таблица 1
Результаты экспериментальных данных при давлении -90 кПа

Table 1
Results of experimental data at a pressure of -90 kPa

Образец Sample	Масса образца, г Sample weight, g	$\frac{\Delta h_1}{\Delta h_2}$	Объем клеточных стенок образца, см ³ Cell walls volume of the sample, cm ³	Плотность клеточных стенок образца, г/см ³ Cell walls density of the sample, g/cm ³
Ель Spruce	5,324	0,94421	3,592	1,482
Осина Aspen	6,052	0,93769	4,011	1,509
ТМ липа TM linden	3,169	0,95603	2,831	1,119
Гниль сосны Pine rot	2,953	0,96943	1,969	1,500
Чага Chaga	4,965	0,9459	3,483	1,425
Кора сосны Pine bark	4,309	0,9072	5,974	0,721
Березовый древесный уголь Birch charcoal	4,122	0,97384	1,685	2,446

Источник: собственные результаты авторов
Source: authors' own results

Таблица 2
Результаты экспериментальных данных при давлении -70 кПа

Table 2
Results of experimental data at a pressure of -70 kPa

Образец Sample	Масса образца, г Sample weight, g	$\frac{\Delta h_1}{\Delta h_2}$	Объем клеточных стенок образца, см ³ Cell walls volume of the sample, cm ³	Плотность клеточных стенок образца, г/см ³ Cell walls density of the sample, g/cm ³
Ель Spruce	5,324	0,94348	3,639	1,463
Осина Aspen	6,052	0,93707	4,049	1,495
ТМ липа TM linden	3,169	0,95477	2,917	1,086
Гниль сосны Pine rot	2,953	0,9694	1,981	1,491
Чага Chaga	4,965	0,94469	3,562	1,394
Кора сосны Pine bark	4,309	0,90289	6,235	0,691
Березовый древесный уголь Birch charcoal	4,122	0,97279	1,764	2,336

Источник: собственные результаты авторов
Source: authors' own results

Таблица 3
Результаты экспериментальных данных при давлении +70 кПа

Table 3
Results of experimental data at a pressure of +70 kPa

Образец Sample	Масса образца, г Sample weight, g	$\frac{\Delta h_1}{\Delta h_2}$	Объем клеточных стенок образца, см ³ Cell walls volume of the sample, cm ³	Плотность клеточных стенок образца, г/см ³ Cell walls density of the sample, g/cm ³
Ель Spruce	5,324	0,94869	3,865	1,378
Осина Aspen	6,052	0,94451	4,182	1,447
ТМ липа TM linden	3,169	0,96159	2,886	1,098
Гниль сосны Pine rot	2,953	0,97253	2,056	1,436
Чага Chaga	4,965	0,95122	3,673	1,352
Кора сосны Pine bark	4,309	0,91649	6,307	0,683
Березовый древесный уголь Birch charcoal	4,122	0,97362	1,973	2,089

Источник: собственные результаты авторов
Source: authors' own results

Таблица 4
Результаты экспериментальных данных при давлении +90 кПа

Table 4
Results of experimental data at a pressure of +90 kPa

Образец Sample	Масса образца, г Sample weight, g	$\frac{\Delta h_1}{\Delta h_2}$	Объем клеточных стенок образца, см ³ Cell walls volume of the sample, cm ³	Плотность клеточных стенок образца, г/см ³ Cell walls density of the sample, g/cm ³
Ель Spruce	5,324	0,95121	3,773	1,411
Осина Aspen	6,052	0,94678	4,115	1,471
ТМ липа TM linden	3,169	0,9624	2,910	1,089
Гниль сосны Pine rot	2,953	0,97328	2,071	1,426
Чага Chaga	4,965	0,95255	3,670	1,353
Кора сосны Pine bark	4,309	0,91838	6,304	0,683
Березовый древесный уголь Birch charcoal	4,122	0,9747	1,962	2,101

Источник: собственные результаты авторов
Source: authors' own results

Выводы

Анализ литературных источников позволил выявить четыре основных метода определения плотности клеточных стенок древесины и пористых материалов. Из них три прямых метода: суспензий,

ртутной порометрии и пикнометрии, и один косвенный – оптический (планиметрический).

В настоящее время наиболее распространенным является метод газовой пикнометрии в среде гелия. С учетом всех его достоинств и недостатков продолжают развиваться разработки новых методов определения плотности клеточных стенок древесины и пористых материалов.

Предложен альтернативный авторский метод измерения объема и определения плотности клеточных стенок древесины и пористых материалов в среде атмосферного воздуха, обоснованный теоретически и не противоречащий основным постулатам и законам термодинамики.

Экспериментальным путем определена работоспособность предложенного метода, а также высокая степень достоверности получаемых результатов.

С использованием разработанной экспериментальной установки измерены объемы и определены плотности клеточных стенок разных пород древесины и других пористых материалов при различных режимах функционирования системы.

Наименьшие значения плотности получены при избыточном давлении +70 кПа, наибольшие – при разрежении -90кПа. Это связано с различиями в термодинамических процессах сжатия и разрежения воздуха. Разреженный воздух, по сравнению со сжатым, по свойствам больше приближен к идеальному газу. Также большую роль играет то, насколько проникает воздух в поры образцов при сжатии и разрежении. Отклонения в результатах между наибольшим и наименьшим значениями плотности клеточных стенок составили соответственно: ель – 7,02 %, осина – 4,12 %, ТМ липа – 2,95 %, гниль сосны – 4,93 %, чага – 5,12 %, кора сосны – 5,27 %, березовый древесный уголь – 14,6 %. Большое различие результатов древесного угля связано, вероятно, с его сорбционной способностью.

Необходимы дополнительные исследования в этой области с использованием образцов других пород древесины и пористых материалов, а также меньшего фракционного состава.

Необходимы мероприятия по оптимизации размеров сосудов установки и исследуемых образцов с использованием математического аппарата.

Список литературы

1. Руднов В. С. (и др.) Строительные материалы и изделия ; под общ. ред. доц., канд. техн. наук И.К. Доманской. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018. 203 с. ISBN 978-5-7996-2352-4.
2. Уголев Б. Н. Древесиноведение с основами лесного товароведения. 2-е изд., перераб. Москва : Лесная промышленность, 1986. 368 с.
3. Полубояринов О. И. Плотность древесины. Москва : Лесная промышленность, 1976. 160 с.
4. Sachs J. Ueber die porosität des holzes. Botanisches Institut Würzburg. 1879. № 2. P. 291-332. Режим доступа: <https://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=hvd.32044106324932&view=1up&seq=21>.
5. Hartig R. Ueber die vertheilung der organischen substanz, des wassers und luftraumes in den bäumen, und über die ursache der wasserbewegung in transpirirenden pflanzen. Untersuch. forstbot. inst. 1882. № 2. 112 p.
6. Dunlap F. Density of wood substance and porosity of wood. Journal of agricultural research. 1914. № II (6). P. 423-428. Режим доступа: <https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/pdf1914/dunla14a.pdf>.
7. Davidson G. F. The specific volume of cotton cellulose. Journal of the Textile Institute Transactions. 1927. № 18. P. 175-186. Режим доступа: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/19447022708661400>.
8. Stamm A. J. Density of wood substance, adsorption by wood, and permeability of wood. Journal of Physical Chemistry. 1928. № XXXIII. P. 398-414. Режим доступа: <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/j150297a008>.
9. Raczkowski J., Stempień C. Zur beziehung zwischen der rohdichte und der reindichte von hol. Holz als roh- und werkstoff. 1967. № 25. P. 380-383. Режим доступа: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02615729>.
10. Christensen G. N., Hergt H. F. The apparent density of wood in non-swelling liquids. Holzforschung. 1968. № 22(6). P. 165-170. Режим доступа: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/hfsg.1968.22.6.165/html>.

11. Tsoumis G., Passialis C. Effect of growth rate and abnormal growth on wood substance and cell wall density. *Wood science and technology*. 1977. № 11. P. 33-38. Режим доступа: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/BF00353599.pdf>.
12. Mcknight T. S., Marchessault R. H., Mason S. G. The distribution of pore sizes in wood-pulp fibres and paper. *Pulp and paper magazine of Canada*. 1958. № 59(2). P. 81-88. Режим доступа: <https://www.pulpandpapercanada.com/digital-edition#archives>.
13. Stayton C. L., Hart C. A. Determining pore size distribution in softwoods with a mercury porosimeter. *Forest products journal*. 1965. № 15(10). P. 435-440. Режим доступа: <https://forestprod.org/page/FPJ>.
14. Plötze M., Niemz P. Porosity and pore size distribution of different wood types as determined by mercury intrusion porosimetry. *European journal of wood and wood products*. 2010. № 69. P. 649-657. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-010-0504-0>.
15. Jayme G., Krause T. Über die packungsdichte der zellwände in laubhölzern. *Holz roh-werkst*. 1963. Bd. 21. P. 14-19. Режим доступа: <https://link.springer.com/article/10.1007%2FBF02605990?LI=true>.
16. Yiannos P. N. The apparent cell-wall density of wood and pulp fibers. *Tappi*. 1964. № 47. P. 468-471. Режим доступа: https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=The%20apparent%20cell-wall%20density%20of%20wood%20and%20pulp%20fibers&journal=Tappi&volume=47&issue=8&pages=468-471&publication_year=1964&author=Yiannos%20CPN.
17. Grzeczynski T., Rybarczyk W. Investigations on the relation between cell-wall density and wood density. *Prace instytutu technologii drewna*. 1972. № 19 (1/2). P. 165-183.
18. Quirk J. T. Cell-wall density of Douglas Fir by two optometric methods. *Wood fiber science*. 1984. № 16. P. 224-236. Режим доступа: <https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/813/813>.
19. Decoux V., Varcin E., Leban J.-M. 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. № 61. P. 251-262. DOI: <https://doi.org/10.1051/forest:2004018>.
20. Тамби А. А., Теппов А. В., Шимкевич Ю. А., Гальсман И. Е. Методика применения магнитно-резонансной томографии для оценки внутреннего строения и влажности круглых лесоматериалов. *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*. 2013. № 203. С. 100-107. Режим доступа: https://spbftu.ru/site/upload/201511041521_Tambi_2013.pdf.
21. Гайнуллин Рен. Х., Цветкова Е. М., Гайнуллин Риш. Х. К вопросу об истинной плотности древесины. *Деревообрабатывающая промышленность*. 2020. № 2. С. 11-20. Режим доступа: http://dop1952.ru/catalogue-statue_id-358.html.
22. ISO 12154:2014. Determination of density by volumetric displacement. Skeleton density by gas pycnometry. URL: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:12154:ed-1:v1:en> (дата обращения: 02.04.2021).
23. ГОСТ Р 57844-2017. Композиты. Определение плотности методом замещения – кажущаяся плотность, определенная газовой пикнометрией / Национальный стандарт Российской Федерации, ФГУП «Стандартинформ» (дата обращения: 02.04.2021).
24. Патент № 2744281 Российская Федерация, МПК G 01 F 17/00, G 01 N 9/26. Способ измерения объема и определения плотности пористых материалов: № 2020124266; заявл. 22.07.2020; опубл. 04.03.2021 / Рен. Х. Гайнуллин, Е. М. Цветкова, Риш. Х. Гайнуллин, А. А. Федотова, В. В. Воронцова; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ПГТУ». 7 с.

References

1. Rudnov V.S. *Stroitel'nye materialy i izdeliya* [Building materials and products]. Ekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta [Ekaterinburg: Ural State University Press], 2018. 203 p. (In Russian).
2. Ugolev B.N. *Drevesinovedenie s osnovami lesnogo tovarovedeniya* [Wood science with the basics of forest commodity science]. 2-e izd., pererab. M.: Lesnaya promyshlennost' [Moscow: Forest industry], 1986. 368 p. (In Russian).

3. Poluboiarinov O. I. Plotnost' drevesiny [Wood density]. M.: Lesnaya promyshlennost' [Moscow: Forest industry], 1976. 160 p. (In Russian).
4. Sachs J. Ueber die porosität des holzes // Botanisches Institut Würzburg. 1879. № 2. P. 291-332. Available at: <https://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=hvd.32044106324932&view=1up&seq=21> (accessed: 02.04.2021).
5. Hartig R. Ueber die vertheilung der organischen substanz, des wassers und luftraumes in den bäumen, und über die ursache der wasserbewegung in transpirirenden pflanzen. Untersuch. forstbot. inst. 1882. № 2. 112 p.
6. Dunlap F. Density of wood substance and porosity of wood. Journal of agricultural research. 1914. № II(6). P. 423-428. Available at: <https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/pdf1914/dunla14a.pdf> (accessed: 02.04.2021).
7. Davidson G.F. The specific volume of cotton cellulose. Journal of the Textile Institute Transactions. 1927. № 18. P. 175-186. Available at: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/19447022708661400> (accessed: 02.04.2021).
8. Stamm A.J. Density of wood substance, adsorption by wood, and permeability of wood. Journal of Physical Chemistry. 1928. № XXXIII. P. 398-414. Available at: <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/j150297a008> (accessed: 02.04.2021).
9. Raczkowski J., Stempień C. Zur beziehung zwischen der rohdichte und der reindichte von holz. Holz als roh- und werkstoff. 1967. № 25. P. 380-383. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02615729> (accessed: 02.04.2021).
10. Christensen G. N., Hergt H.F. The apparent density of wood in non-swelling liquids. Holzforschung. 1968. № 22(6). P. 165-170. Available at: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/hfsg.1968.22.6.165/html> (accessed: 02.04.2021).
11. Tsoumis G., Passialis C. Effect of growth rate and abnormal growth on wood substance and cell wall density. Wood science and technology. 1977. № 11. P. 33-38. Available at: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/BF00353599.pdf> (accessed: 02.04.2021).
12. Mcknight T.S., Marchessault R.H., Mason S.G. The distribution of pore sizes in wood-pulp fibres and paper. Pulp and paper magazine of Canada. 1958. № 59(2). P. 81-88. Available at: <https://www.pulpandpapercanada.com/digital-edition#archives> (accessed: 02.04.2021).
13. Stayton C.L., Hart C.A. Determining pore size distribution in softwoods with a mercury porosimeter. Forest products journal. 1965. № 15(10). P. 435-440. Available at: <https://forestprod.org/page/FPJ> (accessed: 02.04.2021).
14. Plötze M., Niemz P. Porosity and pore size distribution of different wood types as determined by mercury intrusion porosimetry. European journal of wood and wood products. 2010. № 69. P. 649-657. <https://doi.org/10.1007/s00107-010-0504-0>.
15. Jayme G., Krause T. Uber die packungsdichte der zellwände in laubhölzern. Holz roh-werkst. 1963. Bd. 21. P. 14-19. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007%2FBF02605990?LI=true> (accessed: 02.04.2021).
16. Yiannos P.N. The apparent cell-wall density of wood and pulp fibers. Tappi. 1964. № 47. P. 468-471. Available at: https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=The%20apparent%20cell-wall%20density%20of%20wood%20and%20pulp%20fibers&journal=Tappi&volume=47&issue=8&pages=468-471&publication_year=1964&author=Yiannos%20CPN (accessed: 02.04.2021).
17. Grzeczynski T., Rybarczyk W. Investigations on the relation between cell-wall density and wood density. Prace instytutu technologii drewna. 1972. № 19(1/2). P. 165-183.
18. Quirk J.T. Cell-wall density of Douglas Fir by two optometric methods. Wood fiber science. 1984. № 16. P. 224-236. Available at: <https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/813/813> (accessed: 02.04.2021).
19. Decoux V., Varcin E., Leban J.-M. 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. № 61. P. 251-262. <https://doi.org/10.1051/forest:2004018>.
20. Tambi A.A., Teppoev A.V., Shimkevich U.A., Gal'sman I.E. *Metodika primeneniya magnitno-rezonansnoj tomografii dlya ocenki vnutrennego stroeniya i vlazhnosti kruglyh lesomaterial* [The method of using magnetic resonance imaging to assess the internal structure and humidity of round timber]. Izvestiya Sankt-Peterburgskoj

lesotekhnicheskoy akademii [Proceedings of the St. Petersburg Forestry Academy]. 2013. № 203. P. 100-107 (In Russian). Available at: https://spbftu.ru/site/upload/201511041521_Tambi_2013.pdf (accessed: 02.04.2021).

21. Gainullin Ren. Kh., Tsvetkova E. M., Gainullin Rish. Kh. *K voprosu ob istinnoj plotnosti drevesiny* [The study of the real specific gravity of wood]. *Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost'* [Woodworking industry]. 2020. № 2. P. 11-20 (In Russian). Available at: http://dop1952.ru/catalogue-statue_id-358.html (accessed: 02.04.2021).

22. ISO 12154:2014. Determination of density by volumetric displacement. Skeleton density by gas pycnometry (2014).

23. GOST R 57844-2017. Kompozity. Opredelenie plotnosti metodom zameshcheniya – kazhushchayasya plotnost', opredelennaya gazovoj piknometrij [Composites. Determination of density by volumetric displacement – skeleton density by gas pycnometry]. Nacional'nyj standart Rossijskoj Federacii. Moskva: Standartinform (In Russian).

24. Gainullin Ren. Kh., Tsvetkova E. M., Gainullin Rish. Kh., Fedotova A. A., Vorontsova V. V. Sposob izmereniya ob'ema i opredeleniya plotnosti poristykh materialov [Method for measuring volume and determining density of porous materials]. Patent RF, no. 2744281, 2021 (In Russian).

Сведения об авторах

✉ *Гайнуллин Ренат Харисович* – кандидат технических наук, доцент кафедры деревообрабатывающих производств ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет», пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола, Российская Федерация, 424000, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2492-8861>, e-mail: gainylinrh@yandex.ru.

Сафина Альбина Валерьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры архитектуры и дизайна изделий из древесины ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», ул. К. Маркса, д. 68, г. Казань, Российская Федерация, 420015, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7344-9242>, e-mail: alb_saf@mail.ru.

Гайнуллин Ришат Харисович – кандидат технических наук, доцент кафедры деревообрабатывающих производств ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет», пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола, Российская Федерация, 424000, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2219-2413>, e-mail: rishat_000@mail.ru.

Цветкова Екатерина Михайловна – старший преподаватель кафедры стандартизации, сертификации и товароведения ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет», пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола, Российская Федерация, 424000, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5664-5866>, e-mail: Ekaterinadudina@mail.ru.

Information about the authors

✉ *Gainullin Renat Kharisovich* – PhD (Engineering), Associate Professor of the Department of Woodworking Industries, Volga State University of Technology, Lenin sq., 3, Yoshkar-Ola, Russian Federation, 424000, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2492-8861>, e-mail: gainylinrh@yandex.ru.

Safina Al'bina Valer'evna – PhD (Engineering), Associate Professor of the Department of Architecture and Design of Wood Products, Kazan National Research Technological University, K. Marks str., 68, Kazan, Russian Federation, 420015, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7344-9242>, e-mail: alb_saf@mail.ru.

Gainullin Rishat Kharisovich – PhD (Engineering), Associate Professor of the Department of Woodworking Industries, Volga State University of Technology, Lenin sq., 3, Yoshkar-Ola, Russian Federation, 424000, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2219-2413>, e-mail: rishat_000@mail.ru.

Tsvetkova Ekaterina Mihailovna – senior lecturer of the Department of Standardization, Certification and Merchandising, Volga State University of Technology, Lenin sq., 3, Yoshkar-Ola, Russian Federation, 424000, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5664-5866>, e-mail: Ekaterinadudina@mail.ru.

✉ - Для контактов/Corresponding author