

Способ измерения объема и определения плотности пористых материалов

Рен.Х. Гайнуллин^{1а}, Риш.Х. Гайнуллин^{1б}, Е.М. Цветкова^{1с}, М.И. Голубев^{2д}, А.А. Цуркан^{1е}

¹ Поволжский государственный технологический университет, Ленина, 3, Йошкар-Ола, Россия

² Мытищинский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, 1-я Институтская, 1, Мытищи, Россия

^а gainyllinrh@yandex.ru, ^б rishat_000@mail.ru, ^с Ekaterinadudina@mail.ru, ^д mgolubev@mgul.ac.ru, ^е vkirove.2015@gmail.com

^а <https://orcid.org/0000-0002-2492-8861>, ^б <https://orcid.org/0000-0003-2219-2413>,

^с <https://orcid.org/0000-0002-5664-5866>, ^д <https://orcid.org/0000-0002-7693-8818>

Статья поступила 18.03.2021, принята 25.03.2021

В статье приведен краткий обзор способов определения плотности клеточных стенок (истинной плотности) древесины. Установлено, что все методы определения плотности клеточных стенок древесины делятся на прямые и косвенные. К прямым относятся метод суспензий, метод ртутной порометрии и метод пикнометрии, к косвенным - оптический (планиметрический) метод. Из перечисленных методов наибольшее распространение получил пикнометрический метод с использованием гелия. Критический анализ и пересмотр пикнометрического метода позволил предложить альтернативный метод определения истинной плотности (плотности клеточных стенок) древесины в среде атмосферного воздуха и обосновать его теоретически. Предложенный способ $\int \rho \, dV$ осуществлять измерение объема и определение плотности пористых тел неправильной геометрической формы при функционировании пневматической системы и в режиме вакуума и в режиме избыточного давления. Теоретические изыскания и соответствующие математические преобразования позволили получить формулы для определения объема $V_t = V_c \left(1 - \frac{\Delta V_1}{\Delta V_2}\right)$ и плотности $\rho = \frac{m}{V_c \left(1 - \frac{\Delta V_1}{\Delta V_2}\right)}$ пористых тел, одинаково справедливые для случаев разрежения и избыточного давления, где V_t – искомый объем тела, V_c – объем каждого сосуда, ΔV_1 – величина изменения объема воздуха в сосуде для проб, ΔV_2 – величина изменения объема воздуха в измерительном сосуде, ρ и m – соответственно плотность и масса исследуемого образца.

Ключевые слова: древесина, пористые материалы, истинный объем, истинная плотность, измерение.

Method for measuring volume and determining density of porous materials

Ren.Kh. Gainullin^{1а}, Rish.Kh. Gainullin^{1б}, Е.М. Tsvetkova^{1с}, М.И. Golubev^{2д}, А.А. Tsurcan^{1е}

¹ Volga State University of Technology; 3, Lenin Sq., Yoshkar-Ola, Russia

² Mytishchi Branch of the Moscow State Technical University named after N.E. Bauman; 1, 1st Institutskaya St., Mytishchi, Russia

^а gainyllinrh@yandex.ru, ^б rishat_000@mail.ru, ^с Ekaterinadudina@mail.ru, ^д mgolubev@mgul.ac.ru, ^е vkirove.2015@gmail.com

^а <https://orcid.org/0000-0002-2492-8861>, ^б <https://orcid.org/0000-0003-2219-2413>,

^с <https://orcid.org/0000-0002-5664-5866>, ^д <https://orcid.org/0000-0002-7693-8818>

Received 18.03.2021, accepted 25.03.2021

The article provides a brief overview of methods for determining the density of cell walls (true density) of wood. It is established that all methods for determining the density of wood cell walls are divided into direct and indirect. Direct methods include the suspension method, the mercury porometry method, and the pycnometry method, while indirect methods include the optical (planimetric) method. Of these methods, the most widespread is the pycnometric method using helium. A critical analysis and revision of the pycnometric method made it possible to propose an alternative method for determining the true density (density of cell walls) of wood in atmospheric air and to justify it theoretically. The proposed method allows measuring the volume and determining the density of porous bodies of irregular geometric shape when the pneumatic system operates both in the vacuum mode and in the overpressure mode. Theoretical studies and relevant mathematical transformation allowed us to obtain formulas for determining the volume $V_t = V_c \left(1 - \frac{\Delta V_1}{\Delta V_2}\right)$ and density $\rho = \frac{m}{V_c \left(1 - \frac{\Delta V_1}{\Delta V_2}\right)}$ porous bodies, equally valid for cases of rarefaction and overpressure, where V_t – is the volume of the test sample, V_c – the volume of each container, ΔV_1 – is the value of the change in the volume of air in the sample container, ΔV_2 – is the value of the change in the volume of air in the measuring container, ρ and m – are, respectively, the true density (the density of the cell walls) and the mass of the test sample.

Keywords: wood, porous materials, true volume, true density, measurement.

Введение. Из множества физико-механических характеристик древесины наиболее значимой является ее плотность [1]. Существуют следующие основные виды плотности древесины: средняя (табличная) плотность, плотность в абсолютно сухом состоянии, плотность клеточных стенок. В технологических расчетах и на практике, как правило, пользуются величиной средней плотности древесины. Следует отметить, что эта величина варьируется с большим разбросом в пределах не только одной конкретной породы, но и одного отдельно взятого дерева (лесоматериала) [2]. Это свидетельствует о том, что плотность клеточных стенок является наиболее точной мерой содержания древесного материала в объеме образца.

Методы определения плотности клеточных стенок древесины. Современной науке известны три прямых метода определения плотности клеточных стенок древесины: метод суспензий, метод ртутной порометрии, метод пикнометрии, и один косвенный – оптический (планиметрический) [3].

Первые работы по определению плотности клеточных стенок древесины методом суспензий относятся к концу 19-го, началу 20-го веков [4–6]. Сущность метода заключается в следующем. Образцы древесины, насыщенные водой, помещают в солевые растворы, плотность которых регулируется до того момента, пока образцы не будут находиться в растворе во взвешенном состоянии. Такое положение образцов говорит об одинаковой плотности солевого раствора и древесины, так по численному значению плотности раствора судят и о плотности древесины. Таким образом было установлено, что истинная плотность древесины составляет 1,4 – 1,56 г/см³ для различных пород.

В начале 20-го века широкое распространение получил метод пикнометрии (вытеснения) в различных средах. Средами для вытеснения, как правило, служили жидкости: вода, спирт, глицерин и др., а также газы: гелий, кислород, азот, водород [7–11].

Также к прямым методам определения плотности клеточных стенок древесины относится метод ртутной порометрии. Его сходство с методом пикнометрии заключается в вытеснении воздуха из пор древесины в

среде ртути, а отличительной особенностью является нагнетание в образец ртути под очень высоким давлением [12–14].

Следующим шагом со стороны исследователей в направлении разработок способов для определения плотности клеточных стенок древесины было применение оптических методов. Большой вклад в становление этого направления исследований стала работа [15], где изложены основные подходы метода планиметрического измерения объема клеточных стенок. Для реализации этого метода авторы делали тонкий срез древесины определенной толщины, а затем определяли его массу, объем и среднюю плотность. Увеличивая изображение пробы древесины микроскопом и накладывая полученное изображение на планиметр, исследователи определяли площадь клеточных стенок на площади всего среза. Численное значение плотности клеточных стенок определялось отношением средней плотности пробы древесины к процентному содержанию клеточных стенок в измеряемом образце [16–20].

Из перечисленных методов определения плотности клеточных оболочек древесины наибольшую популярность в настоящее время имеет метод газовой пикнометрии. Данный метод стандартизован в странах Евросоюза [21] и в России [22].

Метод газовой пикнометрии с использованием гелия в качестве среды вытеснения, наряду с достоинствами имеет также и недостатки. К ним можно отнести необходимость гелия требуемой чистоты и необходимость проведения многостадийной процедуры калибровки для определения объемов кювет сравнения и образца, осуществляемой при функционировании измерительной системы исключительно в режиме избыточного давления.

С целью устранения указанных недостатков коллективом авторов предложен альтернативный способ определения плотности клеточных стенок древесины [23], в основу которого заложена работа пневматической системы с атмосферным воздухом вместо гелия. На рис. 1 изображена принципиальная схема экспериментальной установки для осуществления предлагаемого способа.

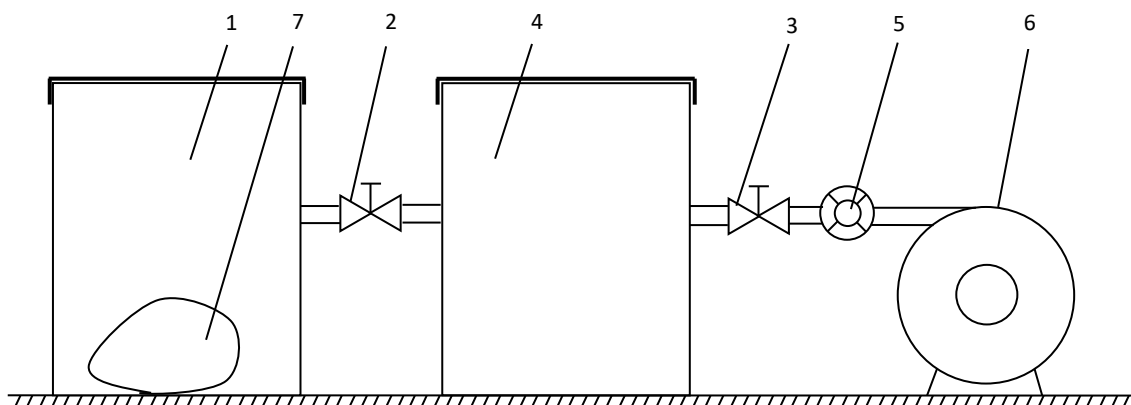


Рис. 1. Схема лабораторной установки: 1 – емкость для проб, 2,3 – вентили, 4 – измерительная емкость, 5 – счетчик расхода воздуха, 6 – пневмонасос, 7 – исследуемый образец

Предложенный способ измерения объема и определения плотности пористых объектов, например древесных образцов, воплощается при функционировании пневматической системы в двух режимах: вакуума и избыточного давления.

При работе пневматической системы в режиме разрежения измерение объема и определение плотности пористых тел осуществляется следующим образом. Взвешивают образец 7, определяя его массу m . Для измерения объема исследуемого образца V_t его помещают в сосуд для проб 1, при этом вентили 2 и 3 открыты, а в сосудах 1 и 4 установлено атмосферное давление P_{atm} . После этого включают насос 6, который в сосудах 1 и 4 создает разрежение величиной P_1 , и закрывают перепускной вентиль 3. После закрытия вентиля 2 открывают вентиль 3, в результате чего происходит перепуск воздуха из измерительного сосуда 4 и выравнивание давления с атмосферным. В это время расходомером 5 осуществляют измерение и фиксацию объема ΔV_2 воздуха, перемещающегося из атмосферы в измерительный сосуд 4. В дальнейшем при открытом вентиле 3 открывают вентиль 2 и с использованием расходомера 5 осуществляют измерение и фиксацию объема ΔV_1 воздуха, перемещающегося из атмосферы в сосуд для проб 1 через измерительный сосуд 4. С учетом постоянства температуры системы, ее состояние в сосудах 1 и 4 при атмосферном давлении P_{atm} и после удаления части воздуха можно отразить уравнениями, которые починаются закону Бойля-Мариотта:

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

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

где P_{atm} – величина атмосферного давления,

P_1 – величина разрежения в сосудах после удаления воздуха,

V_c – объем каждого сосуда,

V_t – искомый объем тела,

ΔV_1 – объем воздуха, удаленный из сосуда для проб,

ΔV_2 – объем воздуха, удаленный из измерительного сосуда.

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

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

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

Приравнивая правые части уравнений (3), (4), и, решая относительно искомого объема тела V_t , получим уравнение для расчета объема исследуемого тела 7:

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

Используя известную величину объема сосуда V_c и измеренные величины ΔV_1 и ΔV_2 можно рассчитать объем исследуемого тела 7, в свою очередь плотность определится по формуле:

$$\rho = \frac{m}{V_c \left(1 - \frac{\Delta V_1}{\Delta V_2}\right)}. \quad (6)$$

При работе пневматической системы в режиме избыточного давления измерение объема и определение плотности пористых тел осуществляется следующим образом. Взвешивают образец 7, определяя его массу m . Для измерения объема исследуемого образца V_t его помещают в сосуд для проб 1, при этом вентили 2 и 3 открыты, а в сосудах 1 и 4 установлено атмосферное давление P_{atm} . После этого включают насос 6, который в сосудах 1 и 4 создает избыточное давление величиной P_2 , и закрывают перепускной вентиль 3. После закрытия вентиля 2 открывают вентиль 3, в результате чего происходит перепуск воздуха из измерительного сосуда 4 в атмосферу и выравнивание давления. В это время расходомером 5 осуществляют измерение и фиксацию объема ΔV_2 воздуха, перемещающегося из измерительного сосуда 4 в атмосферу. В дальнейшем при открытом вентиле 3 открывают вентиль 2 и с использованием расходомера 5 осуществляют измерение и фиксацию объема ΔV_1 воздуха, перемещающегося из сосуда для проб 1 в атмосферу через измерительный сосуд 4. С учетом постоянства температуры системы, ее состояние в сосудах 1 и 4 при атмосферном давлении P_{atm} и после создания избыточного давления можно отразить уравнениями, которые починаются закону Бойля-Мариотта:

$$P_{atm}(V_c - V_t) = P_2(V_c - V_t + \Delta V_1), \quad (7)$$

$$P_{atm}V_c = P_2(V_c + \Delta V_2), \quad (8)$$

где P_{atm} – величина атмосферного давления,

P_2 – величина избыточного давления в сосудах,

V_c – объем каждого сосуда,

V_t – 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 (7) и (8), получим:

$$P_{atm} = \frac{P_2(V_c - V_t + \Delta V_1)}{(V_c - V_t)}, \quad (9)$$

$$P_{atm} = \frac{P_2(V_c + \Delta V_2)}{V_c}. \quad (10)$$

Приравнивая правые части уравнений (9), (10), и, решая относительно искомого объема тела V_t , получим уравнение для расчета объема исследуемого тела 7:

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

Используя известную величину объема сосуда V_c и измеренные величины ΔV_1 и ΔV_2 можно рассчитать объем исследуемого тела 7, в свою очередь плотность определится по формуле:

$$\rho = \frac{m}{V_c \left(1 - \frac{\Delta V_1}{\Delta V_2}\right)}. \quad (12)$$

Приведенные теоретические изыскания показывают, что вышеописанный способ позволяет измерять объем и определять плотность клеточных оболочек пористых тел с использованием атмосферного воздуха. Достоверность измерений может быть подтверждена не

только при сравнении результатов, полученных при функционировании пневматической системы в различных режимах, но и при использовании других методов определения плотности клеточных оболочек древесины. Теоретическая часть предлагаемого метода существенно отличается от пикнометрического метода, а также не противоречит основным законам и постулатам физики.

Заключение

1. Выявлены три прямых метода определения истинной плотности (плотности клеточных оболочек) пористых тел (древесины) и один косвенный. Прямые: метод сус-

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

2. Наибольшее распространение получил метод пикнометрии в различных средах (жидкостях и газах).

3. Достоинства и недостатки метода газовой пикнометрии в среде гелия позволяют совершенствовать методы и устройства для определения истинной плотности (плотности клеточных оболочек) древесины.

4. Предложенный метод имеет теоретическое обоснование, не противоречащее основным законам и постулатам физики.

Литература

1. Уголев Б.Н. Древесиноведение с основами лесного товароведения. 2-е изд., перераб. М.: Лесная пром-сть, 1986. 368 с.
2. Полубояринов О.И. Плотность древесины. М.: Лесная пром-сть, 1976. 160 с.
3. Гайнуллин Рен.Х., Цветкова Е.М., Гайнуллин Риш.Х. К вопросу об истинной плотности древесины // Деревообрабатывающая пром-сть. 2020. № 2. С. 11-20.
4. Sachs J. Ueber die porosität des holzes // Botanisches Institut Würzburg. 1879. № 2. P. 291-332.
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.
7. Davidson G.F. The specific volume of cotton cellulose // Journal of the Textile Institute Transactions. 1927. № 18. P. 175-186.
8. Stamm A.J. Density of wood substance, adsorption by wood, and permeability of wood // Journal of Physical Chemistry. 1928. № XXXIII. P. 398-414.
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.
10. Christensen G.N., Hergt H.F. The apparent density of wood in non-swelling liquids // Holzforschung. 1968. № 22 (6). P. 165-170.
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.
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.
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.
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.
15. Jayme G., Krause T. Uber die packungsdichte der zellwände in laubhölzern // Holz roh-werkst. 1963. Bd. 21. P. 14-19.
16. Yiannos P.N. The apparent cell-wall density of wood and pulp fibers // Tappi. 1964. № 47. P. 468-471.
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.
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.
20. Тамби А.А., Теппоев А.В., Шимкевич Ю.А., Гальсман И.Е. Методика применения магнитно-резонансной томографии для оценки внутреннего строения и влажности круглых лесоматериалов // Изв. С.-Петербург. лесотехн. акад. 2013. № 203. С. 100-107.
21. ISO 12154:2014. Determination of density by volumetric displacement. Skeleton density by gas pycnometry (2014).
22. ГОСТ Р 57844-2017. Композиты. Определение плотности методом замещения - кажущаяся плотность, определенная газовой пикнометрией. Введ. 01.06.2018. М.: Стандартинформ, 2019. 11 с.
23. Гайнуллин Рен.Х., Цветкова Е.М., Гайнуллин Риш.Х., Федотова А.А., Воронцова В.В. Способ измерения объема и определения плотности пористых материалов: пат. 2744281 Рос. Федерация. № 2020124266; заявл. 22.07.2020; опубли. 04.03.2021, Бюл. № 7.

References

1. Ugolev B.N. Wood science with the basics of forest commodity science. 2-е изд., pererab. M.: Lesnaya prom-st', 1986. 368 p.
2. Poluboyarinov O.I. Wood density. M.: Lesnaya prom-st', 1976. 160 p.
3. Gajnullin Ren.H., Cvetkova E.M., Gajnullin Rish.H. The study of the real specific gravity of wood // Derevoobrabatvashaya promishlennost' (Woodworking industry). 2020. № 2. P. 11-20.
4. Sachs J. Ueber die porosität des holzes // Botanisches Institut Würzburg. 1879. № 2. P. 291-332.
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.
7. Davidson G.F. The specific volume of cotton cellulose // Journal of the Textile Institute Transactions. 1927. № 18. P. 175-186.
8. Stamm A.J. Density of wood substance, adsorption by wood, and permeability of wood // Journal of Physical Chemistry. 1928. № XXXIII. P. 398-414.
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.
10. Christensen G.N., Hergt H.F. The apparent density of wood in non-swelling liquids // Holzforschung. 1968. № 22 (6). P. 165-170.

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.
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.
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.
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.
15. Jayme G., Krause T. Über die packungsdichte der zellwände in laubhölzern // *Holz roh-werkst*. 1963. Bd. 21. P. 14-19.
16. Yiannos P.N. The apparent cell-wall density of wood and pulp fibers // *Tappi*. 1964. № 47. P. 468-471.
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.
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.
20. Tambi A.A., Teppoev A.V., SHimkevich YU.A., Gal'sman I.E. The method of using magnetic resonance imaging to assess the internal structure and humidity of round timber // *Izvestia SPbLTA*. 2013. № 203. P. 100-107.
21. ISO 12154:2014. Determination of density by volumetric displacement. Skeleton density by gas pycnometry (2014).
22. GOST R 57844-2017. Composites. Determination of density by volumetric displacement - skeleton density by gas pycnometry (2018). Vved. 01.06.2018. M.: Standartinform, 2019. 11 p.
23. Gajnullin Ren.H, Cvetkova E.M., Gajnullin Rish.H., Fedotova A.A., Voroncova V.V. Method for measuring volume and determining density of porous materials: pat. 2744281 Ros. Federaciya. № 2020124266; zayavl. 22.07.2020; opubl. 04.03.2021, Byul. № 7.