

**МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ  
МАССОПРОВОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ВОЛОКНИСТЫХ И ДРЕВЕСНО-ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**TECHNIQUE OF EXPERIMENTAL INVESTIGATION  
OF MASS CONDUCTIVITY CHARACTERISTICS  
OF FIBROUS AND WOOD-FIBER MATERIALS**

*С.В. ФЕДОСОВ, В.Г. КОТЛОВ, Р.М. АЛОЯН, М.В. БОЧКОВ, М.А. ИВАНОВА*  
*S.V. FEDOSOV, V.G. KOTLOV, R.M. ALOYAN, M.V. BOCHKOV, M.A. IVANOVA*

(Ивановский государственный политехнический университет,  
Поволжский государственный технологический университет)  
(Ivanovo State Polytechnical University,  
Volga State University of Technology)  
E-mail: fedosov-academic53@mail.ru

*В статье рассматривается процесс влагопереноса в волокнистых и древесно-волокнистых материалах. Предложена методика определения массопроводных характеристик для данных материалов. Представлены результаты экспериментального исследования влажности образца из древесины сосны. Приведена математическая модель, описывающая процесс переноса влаги внутри древесины. Полученные экспериментальные данные и разработанная математическая модель показывают возможность определения таких массопроводных характеристик, как коэффициент влагопроводности, максимальная гигроскопическая и равновесная влажность.*

*The paper studies the process of moisture content transfer in the fibrous and wood-fiber materials. The technique of determining of mass conductivity characteristics for these materials is proposed. The results of experimental studies of moisture content for the sample of pine wood are presented. A mathematical model describing the process of moisture transport within the wood is shown. The obtained experimental data and developed mathematical model indicate the possibility of determining such mass conductivity characteristics as moisture conductivity coefficient, maximum hygroscopic content and equilibrium moisture content.*

**Ключевые слова:** волокнистые материалы, древесина, коэффициент влагопроводности, максимальная гигроскопическая влажность, равновесная влажность.

**Keywords:** fibrous materials, wood, moisture conductivity coefficient, maximum hygroscopic content, equilibrium moisture content.

В настоящее время существует большое разнообразие строительных материалов, различающихся по происхождению, назначению, качеству и стоимости. "Классическими" строительными материалами являются бетон, сталь и древесина. С развитием науки и техники стали появляться новые конструкционные и технологиче-

ские материалы с улучшенными свойствами. Однако они не смогли полностью вытеснить применение основных материалов, в том числе применение древесины.

Древесина представляет собой экологически чистый волокнистый материал органического происхождения, стойкий к воздействию химически агрессивных сред

и обладающий хорошими теплоизоляционными свойствами [1]. Одним из наиболее важных физических свойств древесины является влажность, поскольку от нее зависят физико-механические свойства и качество древесины. Кроме того, взаимодействие древесины с водой определяет характер и закономерности процессов ее увлажнения и сушки, влажностных деформаций, замораживания и оттаивания, пропитки различными составами [2]. Для определения влажности обычно используют метод высушивания [3]. Данный метод позволяет достаточно точно рассчитать влажность древесины, но нужно учитывать, что процесс высушивания занимает весьма длительное время (8...10 ч). Значительно быстрее можно определить влажность древесины с помощью кондуктометрического электровлагомера, действие которого основано на зависимости электропроводности древесины от ее влажности [4]. Ниже показаны возможности прибора для исследования процесса влагопереноса при увлажнении образца из древесины. Для этих целей был изготовлен образец из древесины сосны в форме прямоугольной призмы с основанием  $45 \times 55$  мм и высотой

100 мм вдоль волокон. На одной из поверхностей высверлены отверстия диаметром 2,5 мм и глубиной 18 мм через каждые 10 мм по высоте образца для игл влагомера. Для возникновения процесса влагопереноса и для того, чтобы исключить прямое намокание образца при помещении его непосредственно в воду, дополнительно был изготовлен образец из древесины сосны также в форме прямоугольной призмы, но меньшего размера (сечением  $35 \times 45$  мм и высотой вдоль волокон 20 мм). Данный образец закрепляли в таре с водой. После того как малый образец полностью намокал, сверху помещали подготовленный образец с отверстиями. Схема экспериментальной установки показана на рис. 1 (1 – исследуемый образец, 2 – места установки игл влагомера, 3 – влажный образец, 4 – емкость с водой). Через определенные промежутки времени с помощью влагомера Hydromette НТ 85 (GANN, Германия), оснащенного двумя иглами, проводили замеры влажности древесины через каждые 10 мм по высоте образца. Результаты замеров влажности древесины на расстояниях 10...90 мм от низа образца показаны на рис. 2.

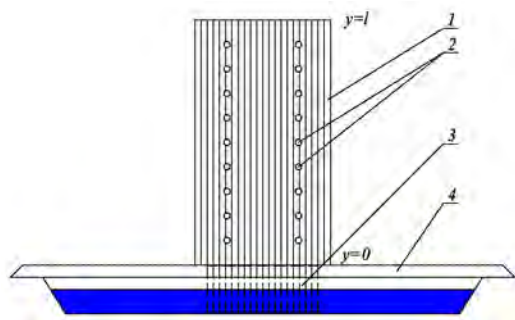


Рис. 1

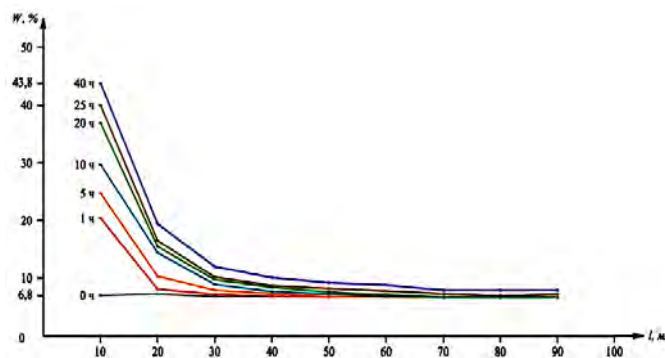


Рис. 2

На основании показаний температуры и относительной влажности воздуха внутри помещения определяли равновесную влажность образца по диаграмме Н.Н. Чулицкого [5], которая составила 9,2%. Первоначальная влажность образца, определенная с помощью влагомера, была ниже данного значения, что возможно, учитывая размеры образца [6]. Это значение составляло:  $W_p = 6,8\%$ .

После того как образец помещали на мокрую древесину, начинался процесс переноса влаги снизу вверх вдоль образца. Сначала влагой стали заполняться пустоты древесины, после чего вода начинала проникать и в стенки клеток. Предельное количество воды, которое может поглотить древесина, складывается из максимального количества связанной и свободной влаги. Наибольшее количество связанной влаги

определяется точкой насыщения волокон, а количество свободной влаги зависит от объема пустот. Четкой границы между рассматриваемыми фракциями воды провести невозможно [2], поэтому вопрос о том, какое количество связанной и свободной влаги впитал в себя образец, в данной работе не рассматривался.

За 10 ч влагопереноса образец увлажнился до 30% на расстоянии 10 мм от низа. Известно, что данная величина характеризует предел гигроскопичности. При комнатных условиях предел насыщения клеточных стенок практически равен пределу гигроскопичности [4]. Согласно инструкции к прибору известно, что за пределами точки насыщения волокон измерения, сделанные влагомером, теряют в точности. Максимальное наблюдаемое нами значение влажности составило 43,8% (0,438 кг влаги / кг сухого) на расстоянии 10 мм от низа, что произошло через 40 ч после начала проведения испытания. Дальнейшие показатели влажности были существенно ниже. Это значение и было принято в качестве максимального гигроскопического –  $W_{\text{мг}}$ .

Результаты экспериментальных исследований показаны на рис. 2 в виде кинетических кривых увлажнения образца. Математически процесс переноса влаги внутри древесины можно описать в виде следующей краевой задачи:

$$\frac{\partial W(y, \tau)}{\partial \tau} = k \frac{\partial^2 W(y, \tau)}{\partial y^2}; \tau \geq 0; 0 < y < \ell, \quad (1)$$

$$U(\bar{y}, Fo_m) = U_n \left[ (1 - \bar{y}) - \frac{2}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m} \sin(\pi m \bar{y}) \exp(-\pi^2 m^2 Fo_m) \right] + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \sin(\pi m \bar{y}) \int_0^1 U_0(\xi) \sin(\pi m \xi) d\xi \exp(-\pi^2 m^2 Fo_m). \quad (10)$$

Некоторые результаты расчета по выражению (10) для рассматриваемого образца древесины приведены на рис. 3 (динамика полей безразмерных влагосодержаний при значениях массообменного

$$W(y, \tau)|_{\tau=0} = W_0, \quad (2)$$

$$W(y, \tau)|_{y=0} = W_{\text{мг}}, \quad (3)$$

$$W(y, \tau)|_{y=\ell} = W_p, \quad (4)$$

где  $k$  – коэффициент влагопроводности,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $W_0$  – влажность образца по высоте в начальный момент времени,  $\text{кг}$  влаги /  $\text{кг}$  сухого;  $\ell$  – длина образца древесины,  $\text{м}$ ;  $y$  – текущая координата,  $\text{м}$ ;  $\tau$  – время,  $\text{с}$ .

Для упрощения введем в рассмотрение безразмерные переменные вида:

$$U(\bar{y}, Fo_m) = \frac{W(y, \tau) - W_p}{W_p}; \bar{y} = \frac{y}{\ell}; Fo_m = \frac{k\tau}{\ell^2}. \quad (5)$$

Перепишем краевую задачу (1)...(4) с учетом введенных переменных:

$$\frac{\partial U(\bar{y}, Fo_m)}{\partial Fo_m} = \frac{\partial^2 U(\bar{y}, Fo_m)}{\partial \bar{y}^2}; Fo_m \geq 0; 0 \leq \bar{y} \leq 1, \quad (6)$$

$$U(\bar{y}, Fo_m)|_{Fo_m=0} = U_0, \quad (7)$$

$$U(\bar{y}, Fo_m)|_{\bar{y}=0} = U_{\text{мг}}, \quad (8)$$

$$U(\bar{y}, Fo_m)|_{\bar{y}=1} = 0. \quad (9)$$

Опуская несложные, но громоздкие промежуточные выкладки, подробно изложенные в [7], приведем окончательное решение краевой задачи влагопроводности, полученное с помощью интегрального преобразования Лапласа:

критерия Фурье  $Fo_m$ : 1 – 0,006; 2 – 0,01; 3 – 0,015; 4 – 0,0215; 5 – 0,029; 6 – 0,0388; 7 – 0,052). Кривые рисунка иллюстрируют изменение влажности по координате  $\bar{y}$  в безразмерном виде.

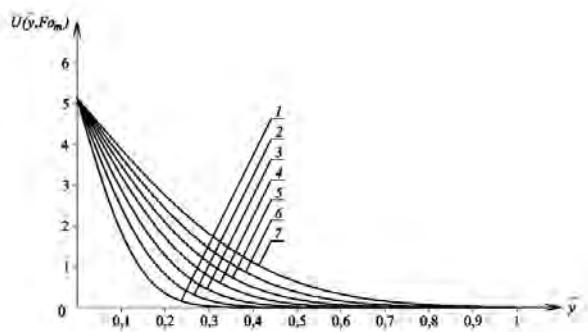


Рис. 3

Проведя эксперимент, мы получили значения влажности по высоте деревянного элемента в определенные периоды времени. По разработанной математической модели методом решения обратной задачи было определено значение коэффициента влагопроводности древесины по следующей формуле:

$$k = \frac{F_{0m} \ell^2}{\tau}. \quad (11)$$

В результате идентификации приведенной математической модели показано, что данные расчетов адекватны экспериментальным при значении коэффициента влагопроводности  $k = 3,85 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2 / \text{с}$ .

## ВЫВОДЫ

Древесина является типичным коллоидным капиллярно-пористым телом, содержащим все формы связи влаги с материалом по классификации академика П.А. Ребиндера [8], [9]. Результаты экспериментальных исследований, полученные по предложенной методике, показывают возможность определения массопроводных характеристик древесно-волоконистых материалов (максимальной гигроскопической и равновесной влажности, коэффициента влагопроводности). Принципы описанной методики могут быть использованы для исследования массопроводных характеристик волоконистых, тканых и нетканых материалов не только для текстильной и легкой промышленности, но также пищевой, строительной и других.

1. *Бойтемиров Ф.А.* Конструкции из дерева и пластмасс. – М.: Изд. центр "Академия", 2013.

2. *Чудинов Б.С.* Вода в древесине. – Новосибирск: Изд-во Наука, 1984.

3. ГОСТ 16483.7–71. Древесина. Методы определения влажности. – М.: Стандартиформ, 2006.

4. *Уголев Б.Н.* Древесиноведение с основами лесного товароведения – Изд. 3-е, перераб. и доп. – М.: МГУЛ, 2001.

5. *Ванин С.И.* Древесиноведение. – 3-е изд. – М.-Л.: Гослесбумиздат, 1949.

6. *Ващев Н.В.* Влияние влажности воздуха и древесины на прочность клеевых соединений. – М.: Лесная промышленность, 1966.

7. *Федосов С.В., Котлов В.Г., Алоян Р.М., Ясинский Ф.Н., Бочков М.В.* Моделирование тепло-массопереноса в системе газ-твердое при нагельном соединении элементов деревянных конструкций. Ч. 3. Динамика и кинетика влагопереноса // Строительные материалы. – 2014, № 9. С. 63...69.

8. *Лыков А.В.* Явления переноса в капиллярно-пористых телах. – М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1954.

9. *Рудобахта С.П.* Массоперенос в системах с твердой фазой. – М.: Химия, 1980.

## REFERENCES

1. *Bojtemirov F.A.* Konstrukcii iz dereva i plastmass. – M.: Izd. centr "Akademija", 2013.

2. *Chudinov B.S.* Voda v drevesine. – Novosibirsk: Izd-vo Nauka, 1984.

3. GOST 16483.7–71. Drevesina. Metody opredelenija vlazhnosti. – M.: Standartinform, 2006.

4. *Ugolev B.N.* Drevesinovedenie s osnovami lesnogo tovarovedenijaju – Izd. 3-e, pererab. i dop. – M.: MGUL, 2001.

5. *Vanin S.I.* Drevesinovedenie. – 3-e izd. – M.-L.: Goslesbumizdat, 1949.

6. *Vashhev N.V.* Vlijanie vlazhnosti vozduha i drevesiny na prochnost' kleevykh soedinenij. – M.: Lesnaja promyshlennost', 1966.

7. *Fedosov S.V., Kotlov V.G., Alojjan R.M., Jasin-skij F.N., Bochkov M.V.* Modelirovanie tep-lomassoperenosa v sisteme gaz-tverdoe pri nagel'nom soedinenii jelementov derevjannykh konstrukcij. Ch. 3. Dinamika i kinetika vlagoperenosa // Stroitel'nye materijaly. – 2014, № 9. S. 63...69.

8. *Lykov A.V.* Javlenija perenosa v kapilljarno-poristykh telah. – M.: Gosudarstvennoe izdatel'stvo tehniko-teoreticheskoj literatury, 1954.

9. *Rudobashta S.P.* Massoperenos v sistemah s tverdoj fazoj. – M.: Himija, 1980.

Рекомендована кафедрой строительных конструкций о водоснабжения ПГТУ. Поступила 01.10.16.