

ТОЛСТЫХ Светлана Германовна

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА И УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ
КОЭФФИЦИЕНТА ДИФФУЗИИ ВЛАГИ
В КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛАХ**

Специальность 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тамбов 2004

Работа выполнена на кафедре «Автоматизированные системы и приборы» Тамбовского государственного технического университета.

Научный руководитель
номарев Сергей Васильевич

доктор технических наук, профессор

По-

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Рудобаишта Станислав Павлович

кандидат технических наук
Федюнин Павел Александрович

Ведущая организация: Орловский государственный технический университет, г. Орел

Защита диссертации состоится 23 декабря 2004 г. в 12 ч 00 мин на заседании диссертационного совета Д 212.260.01 Тамбовского государственного технического университета по адресу: 392000, г. Тамбов, ул. Советская, 106.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью, просим направлять по адресу: 392000, г. Тамбов, Советская, 106, ТГТУ, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.260.01.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2004 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

А.А. Чуриков

Подписано к печати 22.11.2004

Гарнитура Times New Roman. Формат 60 × 84/16. Бумага офсетная

Печать офсетная. Объем: 0,93 усл. печ. л.; 0,9 уч.-изд. л.

Тираж 100 экз. С. 811

Издательско-полиграфический центр ТГТУ
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Исследования в области тепло- и массообмена продолжают оставаться актуальными, и это связано с общими проблемами повышения эффективности различных производств. Возрастают требования к достоверности инженерных расчетов, сопряженных с необходимостью дальнейшего накопления и систематизации справочных данных по физическим свойствам материалов, используемых в технологических процессах. Знание физических констант является необходимым для расчетов технологических процессов и аппаратов.

Данная работа посвящена вопросам измерения коэффициента диффузии влаги в капиллярно-пористых материалах (КПМ). К настоящему времени известен ряд методов, основанных на исследовании стационарных и нестационарных режимов диффузии влаги в различных материалах. Для нахождения коэффициента диффузии влаги необходимо знать распределение влагосодержания в образце во времени и в пространстве.

При измерении коэффициента диффузии одними из наиболее распространенных методов определения влагосодержания исследуемого материала являются весовые методы. Недостатками использования данных методов при измерении коэффициента диффузии являются: 1) сложность точного поддержания заданных граничных условий на внешних поверхностях образцов в ходе эксперимента; 2) большая длительность активной стадии эксперимента.

Вышеперечисленные недостатки можно в значительной мере устранить, используя для измерения влагосодержания датчики локального влагосодержания.

К основным трудностям применения вышеуказанных датчиков относятся: 1) сложность и длительность получения градуировочных характеристик датчиков локального влагосодержания; 2) необходимость получения очередной новой градуировочной характеристики при переходе к каждому новому материалу.

Таким образом, разработка метода измерения коэффициента диффузии влаги в КПМ, свободного от перечисленных выше недостатков, является актуальной задачей.

Цель работы заключается в разработке метода и устройства, обеспечивающих повышение точности измерения коэффициента диффузии влаги в КПМ за счет исключения проблем градуировки датчика влагосодержания и уменьшения длительности активной стадии эксперимента при одновременном снижении требований к точности поддержания граничных условий на внешних поверхностях образцов.

Для достижения этой цели были поставлены и решены следующие задачи:

- разработана физическая модель метода измерения, основанного на регистрации момента времени наступления экстремального влагосодержания в одном из двух образцов, приводимых в плотный контакт;
- разработана математическая модель процесса переноса влаги в образцах исследуемого КПМ при проведении эксперимента по определению коэффициента диффузии;
- разработан алгоритм вычисления коэффициента диффузии по времени наступления экстремального влагосодержания;
- выявлены возможные причины возникновения погрешностей измерения и найдены пути их уменьшения;
- осуществлен выбор оптимальных режимных и конструктивных параметров метода и устройства;
- спроектировано и изготовлено устройство для измерения коэффициента диффузии в КПМ;
- проведены экспериментальные исследования.

Объектом исследования в данной работе является процесс распространения влаги в КПМ при плотном соприкосновении образцов в изотермических условиях.

В качестве **предмета исследования** рассматривается метод измерения коэффициента диффузии влаги в КПМ.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- разработана математическая модель двухэтапного процесса влагопереноса, пригодная для нахождения коэффициента диффузии влаги в КПМ по результатам эксперимента согласно предлагаемому методу;
- разработан метод измерения коэффициента диффузии влаги в КПМ, основанный на регистрации момента времени наступления экстремального влагосодержания в одном из образцов исследуемого материала, приводимого в плотное соприкосновение с другим образцом с повышенным или пониженным

влажностерержанием на первом этапе проведения эксперимента, а затем – на втором этапе – с третьим образцом, имеющим влажностерержание, идентичное первоначальному влажностерержанию первого образца;

- поставлена и решена многокритериальная задача метрологической оптимизации по совокупности критериев точности измерения коэффициента диффузии в КПМ по предлагаемому методу.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

- разработано устройство для измерения коэффициента диффузии влаги в КПМ, которое можно использовать в лабораторных и промышленных условиях;

- разработано программное обеспечение для проведения имитационных исследований в рамках разработанного метода и поиска новых его модификаций;

- с использованием разработанного метода для ряда древесных пород средней полосы России получены значения коэффициентов диффузии, которые могут быть использованы в научно-исследовательских и конструкционно-технологических расчетах;

- в сети Internet (<http://www.asp.tstu.ru/rus/drevesina/index.htm>) открыт интерактивный ресурс, предназначенный для обработки результатов эксперимента по измерению коэффициента диффузии влаги в КПМ в режиме on-line; созданы предпосылки к систематизации и накоплению информации по коэффициентам диффузии влаги в КПМ;

- метод измерения коэффициента диффузии влаги в КПМ принят к использованию для исследования процессов деформации и старения древесины в ЗАО «Орловский часовой завод» (г. Орел);

- метод измерения нашел применение в учебном процессе – в курсовом и дипломном проектировании на кафедре «Автоматизированные системы и приборы» в Тамбовском государственном техническом университете (ТГТУ).

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались:

- на Международной научно-технической конференции «Информационные технологии в проектировании микропроцессорных систем», Тамбов, сентябрь 2000 г.;

- на Четвертой международной теплофизической школе «Теплофизические измерения в начале XXI века», Тамбов, сентябрь 2001 г.;

- при проведении школы-семинара молодых ученых «Метрология, стандартизация, сертификация и управление качеством продукции», Тамбов, сентябрь 2003 г.;

- на Пятой международной теплофизической школе «Теплофизические измерения при контроле и управлении качеством», Тамбов, сентябрь 2004 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, пяти глав, заключения и ряда приложений. Общий объем диссертации 290 страниц, включая 150 страниц основного текста, 72 страниц приложений, 122 наименований списка литературы, 95 рисунков и 20 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы, раскрыты научная новизна и практическая ценность, приведены результаты апробации. Сформулированы результаты исследований, выносимые на защиту.

В первой главе приведен обзор существующих методов измерения коэффициента диффузии влаги в КПМ, обсуждены их недостатки, сформулирована основная идея разработки; приведен обзор известных к настоящему моменту методов измерения влажностерержания, среди которых, в качестве базового, выбран подход, основанный на использовании гальванопар Zn–Cu (проф. П.С. Беляев с соавторами). Сделан вывод о необходимости разработки нового метода измерения коэффициента диффузии влаги в КПМ, в котором будут учтены недостатки существующих методов.

Достоинство нового метода состоит в том, что монотонная зависимость влажностерержания от потенциала гальванопары позволяет обойтись без градуировки датчика влажностерержания.

Основная идея метода состоит в поиске момента времени наступления экстремального влажностерержания в исследуемом образце, по которому вычисляется коэффициент диффузии влаги в КПМ.

В итогах первой главы, на основе проведенного исследования литературных источников, источников информации из сети Internet и главной идеи метода, поставлены задачи исследования. Представлена поточная диаграмма исследования, согласно которой проводились все работы по диссертации.

Во второй главе рассмотрены теоретические основы предлагаемого метода.

Разработана физическая модель измерительного устройства. Для измерения коэффициента диффузии требуется изготовить три одинаковых образца в виде параллелепипедов из исследуемого материала,

и они нумеруются как образцы № 1, № 2 и № 3. Размеры образцов выбираются достаточными, чтобы, с позиций математического моделирования, в ходе эксперимента их можно было считать полубесконечными телами.

На рис. 1 изображена схема проведения эксперимента по определению коэффициента диффузии в КПМ.

В образцах, приводимых в соприкосновение, как показано на рис. 1, необходимо установить разные значения влагосодержания. Для этой цели используются эксикаторы: увлажняющий, куда помещается образец № 1, и осушающий – образцы № 2 и № 3. Нам важно, чтобы к моменту проведения эксперимента распределение влаги в образцах стало равномерным. Перед помещением в эксикатор, все поверхности образцов, кроме поверхности, вступающей в контакт, изолируются от проникновения влаги.

В образце № 2, перед помещением его в осушающий эксикатор, заранее высверливаются два отверстия. В них вставляются электроды, сделанные из цинка и меди. Длительность пребывания образцов древесины в эксикаторах должна быть достаточной для того, чтобы влага равномерно распределилась по образцам.

На первом этапе приводят в плотное соприкосновение первую пару образцов: № 1 и № 2. Увлажненный образец (№ 1) должен иметь опору, а на сухой (№ 2) надо воздействовать силой, прижимая его к образцу № 1. Давление должно регулироваться с помощью специального прижимного

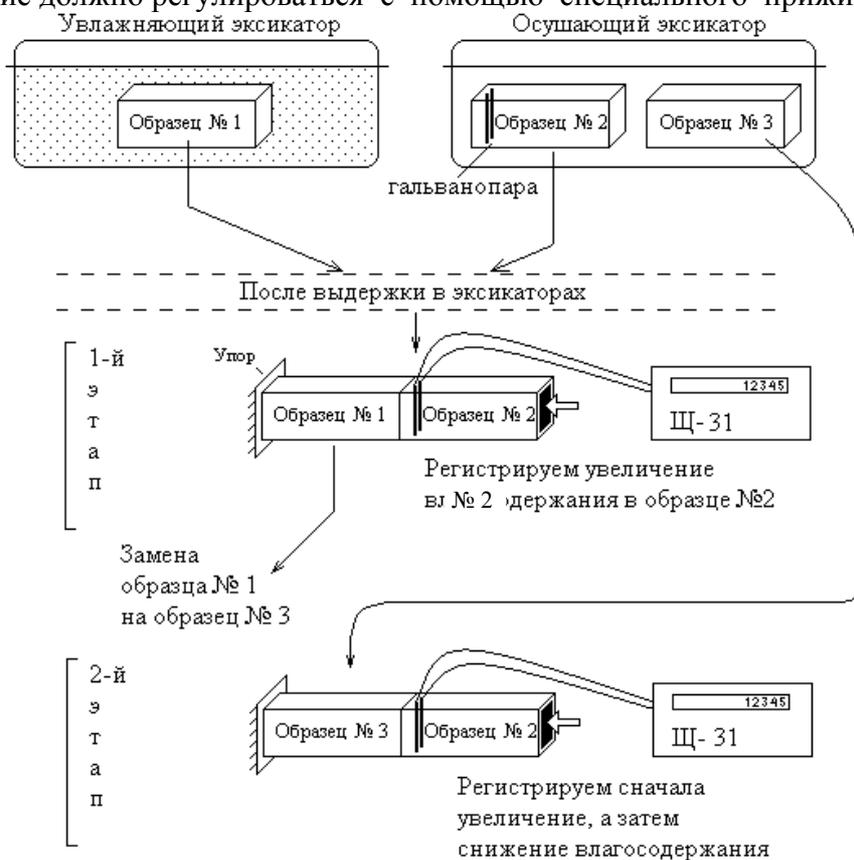


Рис. 1 Схема проведения эксперимента

устройства. В начале первого этапа электроды гальванопары подключаются на вход микровольтметра, и в образце № 2 регистрируется нарастание влагосодержания. С течением времени влага будет стремиться к перераспределению от более влажного образца к менее влажному образцу.

В конце первого этапа необходимо как можно быстрее заменить образец № 1 на образец № 3. Измерительное устройство, с конструктивных позиций, должно быть к этому приспособлено.

На втором этапе влага, накопленная в образце № 2, начинает диффундировать в образец № 3. Вторым этапом эксперимента можно считать законченным, когда влагосодержание U , регистрируемое на цифровом микровольтметре как потенциал датчика $E = E(U)$, станет равным значению, отмеченному в начале этапа (рис. 2).

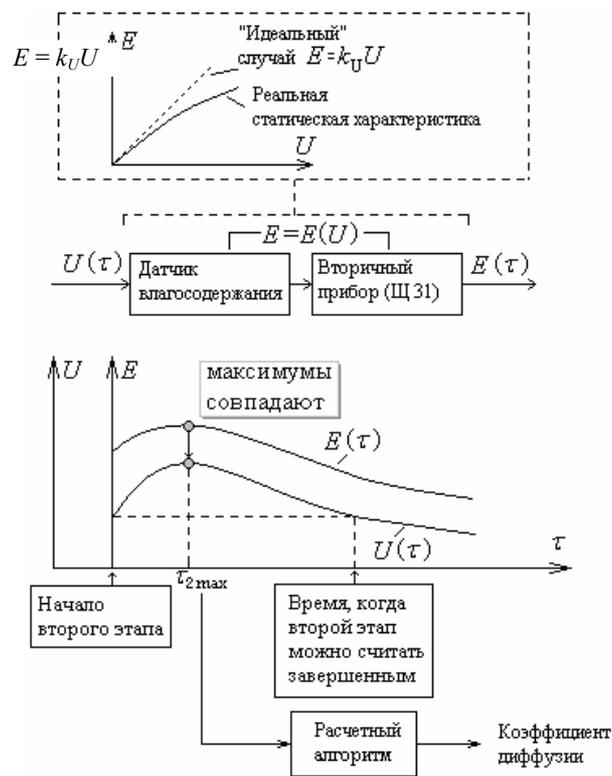


Рис. 2 Иллюстрация к проведению эксперимента

Как показано на рис.2, в соответствии с основной идеей метода, зависимость потенциала E гальванопары от влагосодержания U должна быть монотонной функцией. Для гальванопары Zn–Cu зависимость потенциала E от влагосодержания – монотонно возрастающая функция, а именно

$$\forall U^{(1)}, U^{(2)} \in [U_n, U_k]; \quad U^{(2)} > U^{(1)} : E(U^{(2)}) > E(U^{(1)}), \quad (1)$$

где $[U_n, U_k]$ – диапазон измерений влагосодержания.

Влагосодержание $U(\tau)$ преобразуется в сигнал $E(\tau)$. При выполнении условия монотонности (1) максимум $E(\tau)$ совпадает с максимумом $U(\tau)$ (рис. 2). Момент времени τ_{2max} , отсчитываемый от начала второго этапа, поступает на вход расчетного алгоритма, итогом работы которого является искомый коэффициент диффузии.

На основе физической модели разработана математическая модель процесса измерения. Допущения, принятые при ее разработке, таковы:

1 Продольные геометрические размеры параллелепипедов столь велики, что при проведении эксперимента каждый из них можно считать полубесконечным телом.

2 Перед началом эксперимента влага распределена по образцам равномерно.

3 Боковые поверхности образцов влагоизолированы – распределение влагосодержания в них можно рассматривать как одномерное.

4 Потенциал датчика (выходной сигнал первичного преобразователя) связан с влагосодержанием в образце № 2 монотонной зависимостью.

5 Образцы находятся в плотном контакте – настолько плотном, что диффузионным сопротивлением на поверхности их контакта можно пренебречь.

6 Образцы однородны по своему составу и свойствам.

7 Разность начальных влагосодержаний U_0, U_1 в исследуемых образцах настолько мала, что зависимостью коэффициента диффузии от влагосодержания в ходе каждого эксперимента можно пренебречь.

8 Эксперимент проводится при постоянной температуре.

В силу принятых допущений, математическая модель диффузии влаги на первом этапе эксперимента записывается в виде линейного уравнения диффузии

$$\frac{\partial U_1(\tau_1, x)}{\partial \tau_1} = a_m \frac{\partial^2 U_1(\tau_1, x)}{\partial x^2}, \quad \tau_1 \geq 0, \quad -\infty < x < +\infty, \quad (2)$$

с начальным условием

$$U_1(0, x) = \begin{cases} U_1, & -\infty < x \leq 0; \\ U_0, & 0 < x < +\infty, \end{cases} \quad (3)$$

где $U_1(\tau_1, x)$ – влагосодержание в сечении x в момент времени τ_1 ; a_m – искомый коэффициент диффузии; τ_1 – время, отсчитываемое с момента начала первого этапа; x – пространственная координата, отсчитываемая от поверхности соприкосновения образцов; U_0, U_1 – начальные влагосодержания, соответственно, в образце № 2 ($0 < x < +\infty$) и в образце № 1 ($-\infty < x < 0$). Задача (2), (3) имеет аналитическое решение:

$$U_1(\tau_1, x) = U_c + (U_0 - U_c) \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{a_m \tau_1}} \right), \quad -\infty < x < +\infty, \quad U_c = \frac{U_0 + U_1}{2}. \quad (4)$$

На втором этапе эксперимента математическая модель имеет вид

$$\frac{\partial U_2(\tau_2, x)}{\partial \tau_2} = a_m \frac{\partial^2 U_2(\tau_2, x)}{\partial x^2}, \quad \tau_2 \geq 0, \quad -\infty < x < +\infty, \quad (5)$$

с начальным распределением влагосодержания в образцах № 2 и № 3

$$U_2(0, x) \equiv U_1(\tau_{1k}, x) = \begin{cases} U_c + (U_0 - U_c) \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{a_m \tau_{1k}}} \right), & 0 < x < +\infty; \\ U_0, & -\infty < x < 0, \end{cases} \quad (6)$$

где τ_2 – текущее время, отсчитываемое с момента начала второго этапа; τ_{1k} – время окончания первого этапа; $U_2(\tau_2, x)$ – влагосодержание в образце № 2. Решение задачи (5), (6) было получено в виде

$$U_2(\tau_2, x) = \frac{1}{4} \left[(U_1 - U_0) \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{a_m \tau_2}} \right) + 3U_0 + U_1 \right] + \frac{U_0 - U_1}{2\sqrt{\pi}} \int_{\frac{x}{2\sqrt{a_m \tau_2}}}^{\infty} e^{-u^2} \operatorname{erf} \left(\frac{x + 2u\sqrt{a_m \tau_2}}{2\sqrt{a_m \tau_{1k}}} \right) du. \quad (7)$$

В безразмерном виде решение задачи (5) – (6) имеет вид

$$\theta(\text{Fo}_2; \text{Fo}_{1k}) = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{1}{2\sqrt{\text{Fo}_2}} \right) \right] - \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{\frac{1}{2\sqrt{\text{Fo}_2}}}^{\infty} \operatorname{erf} \left[\frac{1}{2\sqrt{\text{Fo}_{1k}}} (1 + 2u\sqrt{\text{Fo}_2}) \right] e^{-u^2} du, \quad (8)$$

где $\theta(\text{Fo}_2; \text{Fo}_{1k}) = \frac{U_2 \left(\text{Fo}_2 \frac{x^2}{a_m}, x; \text{Fo}_{1k} \frac{x^2}{a_m} \right) - U_0}{U_c - U_0}$ – безразмерное влагосодержание; $\text{Fo}_2 = a_m \tau_2 / x^2$ – безразмерное время (число Фурье); $\text{Fo}_{1k} = a_m \tau_{1k} / x^2$ – безразмерная длительность первого этапа (конечное значение числа Фурье для первого этапа).

Для нахождения коэффициента диффузии по времени наступления максимального влагосодержания было выведено следующее уравнение

$$\sqrt{\pi} \exp\left(\frac{\tau_{1k}}{4Fo_{2\max}(\tau_{2\max} + \tau_{1k})}\right) \left[1 + \operatorname{erf}\left(\frac{1}{2Fo_{2\max}} \sqrt{\frac{Fo_{2\max} \tau_{1k}}{\tau_{2\max} + \tau_{1k}}}\right)\right] - \sqrt{\frac{\tau_{2\max} + \tau_{1k}}{\tau_{2\max}}} \left[\sqrt{\pi} \frac{\tau_{2\max} + \tau_{1k}}{\tau_{2\max}} + 2\right] = 0.$$

Уравнение (9) решается численно относительно $Fo_{2\max}$. Коэффициент диффузии вычисляется по формуле $a_m = x^2 Fo_{2\max} / \tau_{2\max}$.

В третьей главе приводится анализ возможных причин возникновения погрешностей измерения коэффициента диффузии влаги в КПМ, и выводятся расчетные зависимости для их оценки. Анализ погрешностей измерения начинается с предположения, что измерительное устройство соответствует физической модели измерений, т.е. требования полубесконечности образцов и равномерности распределения влаги по образцам считаются выполненными. Рассмотрен ряд физических аспектов подготовки образцов, в частности обработка поверхностей соприкосновения.

Приняв за основу математическую модель процесса измерений, можно утверждать, что в разрабатываемом методе результирующая погрешность измерения коэффициента диффузии обусловлена следующими причинами:

- 1) погрешность $\Delta\tau_{1k}$ измерения длительности первого этапа τ_{1k} , возникающая при замене образцов в промежутке между этапами эксперимента;
- 2) погрешность Δx измерения координаты x при установке датчика влаги в образец № 2;
- 3) погрешность $\Delta\tau_{2\max}$ определения момента времени $\tau_{2\max}$, соответствующего максимальному влагосодержанию в образце № 2 на втором этапе.

Для оценки относительной погрешности измерений δa_m получены расчетные формулы, основанные на общих принципах оценки погрешностей косвенных измерений. Абсолютные погрешности непосредственно измеряемых величин $\Delta\tau_{1k}$ и Δx принимаются постоянными величинами, соответственно, 60 с и 0,25 мм, исходя из пробных экспериментов. Абсолютная погрешность $\Delta\tau_{2\max}$ – переменная величина,

зависящая от параметров эксперимента: $\Delta\tau_{2\max} = \sqrt{\varepsilon(2R - \varepsilon)}$, где $R = \left(\frac{\partial^2 U_2}{\partial \tau_2^2} \Big|_{\tau_2 = \tau_{2\max}}\right)^{-1}$ – радиус окружности, аппроксимирующей точку максимального влагосодержания; $\varepsilon = 10^{-n}$ – погрешность представления чисел на цифровом приборе; n – число верных десятичных разрядов на его дисплее. В расчетах использовались аналитические выражения частных производных расчетной зависимости от параметров эксперимента, полученные с помощью Maple-6.

При исследовании зависимости $\delta a_m = \delta a_m(\tau_{2\max}; \tau_{1k}, x)$ выявилась овражная полоса, при движении по которой погрешность δa_m снижается от 30 % почти до нуля. Если при выборе параметров эксперимента руководствоваться требованием минимизации погрешности δa_m , то: 1) область выбора приемлемых значений (в пределах этой овражной полосы) слишком узка, чтобы назначать параметры эксперимента «наугад»; 2) длительность первого этапа τ_{1k} , равно как и расстояние x , следует брать как можно более значительными. Было решено использовать зависимость $\delta a_m = \delta a_m(\tau_{2\max}; \tau_{1k}, x)$, полученную в данной главе, для оценки погрешности реального эксперимента.

В четвертой главе рассмотрены вопросы метрологической оптимизации.

Исследования, проведенные по математической модели, показали, что выбор параметров эксперимента далеко не тривиален. С одной стороны, вариации параметров эксперимента могут повлиять на характер поведения кривой отклика в окрестности максимального влагосодержания: максимум может быть излишне пологим, излишне острым, ранним, поздним и т.д. С другой стороны, исследование поведения относительной погрешности δa_m показали, что далеко не любые сочетания параметров τ_{1k} и x оказываются приемлемыми по точности измерений. Для проведения экспериментов необходимо сделать выбор τ_{1k} и x обоснованно, т.е. этап метрологической оптимизации необходим.

Рассмотрен ряд критериев оптимизации, предложенных в соответствии со спецификой метода измерений: 1) погрешность измерения, вычисляемая как среднеквадратичное отклонение коэффициента диффузии от эталонного значения по методу Монте-Карло; 2) метрологические критерии точности для косвенных измерений, основанных на регистрации времени наступления экстремального значения непосредственно измеряемой величины, а именно критерии информативности, наблюдаемости и сопоставимости времен. Решения частных задач оптимизации показали, что критерии являются сложно-

зависимыми и конкурирующими (табл. 1), и это послужило основанием к постановке и решению задачи многокритериальной оптимизации.

Для решения многокритериальной задачи оптимизации, постановка которой приведена в табл. 2, использовался метод равнообъемного заполнения пространства допустимых решений с последующим отсеком наименее перспективных вариантов.

В правой части табл. 2 графически проиллюстрирован смысл понятия «время эксперимента» τ_{exp} , использованного в постановке задачи многокритериальной оптимизации. Решение этой задачи проводилось для диапазона измерения коэффициента диффузии, свойственного древесным породам средней полосы России. Было получено пересечение областей Парето, где любая точка (τ_{1k}, x) по отношению к любой другой из этой области – равно приоритетная (рис. 3).

1 Критерии и результаты оптимизации при $a = 1 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$

Наименование	Формулы критериев	Результат оптимизации	
		$\tau_{1k}^*, \text{ с}$	$x^*, \text{ мм}$
Среднеквадратичное отклонение, вычисляемое по методу Монте-Карло	$\sigma_a = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\tilde{a}_m^{(i)} - \hat{a}_m)^2} \xrightarrow{\tau_{1k}, x} \min,$ $\tilde{a}_m^{(i)} = F(\tau_{2\max}, \tilde{\tau}_{1k}^{(i)}, \tilde{x}^{(i)}), \tilde{\tau}_{1k}^{(i)}, \tilde{x}^{(i)}$ <p>– элементы выборки нормально распределенных случайных чисел в количестве $N \gg 1$</p>	1049	1,84
Критерий информативности	$J(\tau_{1k}, x) = - \frac{\partial^2 \theta(\text{Fo}_2; \text{Fo}_{1k}(\tau_{1k}, x))}{\partial \text{Fo}_2^2} \Big _{\text{Fo}_2 = \text{Fo}_{2\max}} \times$ $\times \int_0^{\text{Fo}_{2\max}} [\theta(\xi; \text{Fo}_{1k}(\tau_{1k}, x)) - \theta(0; \text{Fo}_{1k}(\tau_{1k}, x))] d\xi \xrightarrow{\tau_{1k}, x} \max.$	1050	2,24
Критерий наблюдаемости	$S(\tau_{1k}, x) = - \frac{\partial^2 \theta(\text{Fo}_2; \text{Fo}_{1k}(\tau_{1k}, x))}{\partial \text{Fo}_2^2} \Big _{\text{Fo}_2 = \text{Fo}_{2\max}} \times$ $\times \min \{ [\theta(\text{Fo}_{2\max}; \text{Fo}_{1k}(\tau_{1k}, x)) - \theta(0; \text{Fo}_{1k}(\tau_{1k}, x))]^2, \text{Fo}_{2\max}^2 \} \xrightarrow{\tau_{1k}, x} \max$	675	2,25
Критерий сопоставимости времен	$E_S(\tau_{1k}, x) \equiv \frac{\tau_{2\max}(\tau_{1k}, x)}{\tau_{\text{exp}}(\tau_{1k}, x)} \times$ $\times \int_0^{a\tau_R/x^2} [\theta(\xi; \text{Fo}_{1k}(\tau_{1k}, x)) - \theta(0; \text{Fo}_{1k}(\tau_{1k}, x))] d\xi \xrightarrow{\tau_{1k}, x} \max$	750	2,23

2 Многокритериальная оптимизация

Постановка задачи	Пояснение
$\begin{cases} \sigma_a(\tau_{1k}, x) \xrightarrow{\tau_{1k}, x} \min, \\ -J(\tau_{1k}, x) \xrightarrow{\tau_{1k}, x} \min, \\ -S(\tau_{1k}, x) \xrightarrow{\tau_{1k}, x} \min, \\ -E_S(\tau_{1k}, x) \xrightarrow{\tau_{1k}, x} \min, \\ \tau_{\text{exp}}(\tau_{1k}, x) \leq \tau_{\text{exp}, \max}, \\ \tau_{1k, \min} \leq \tau_{1k} \leq \tau_{1k, \max}, \\ x_{\min} \leq x \leq x_{\max}. \end{cases}$	<p>τ_{exp} – время проведения эксперимента</p>

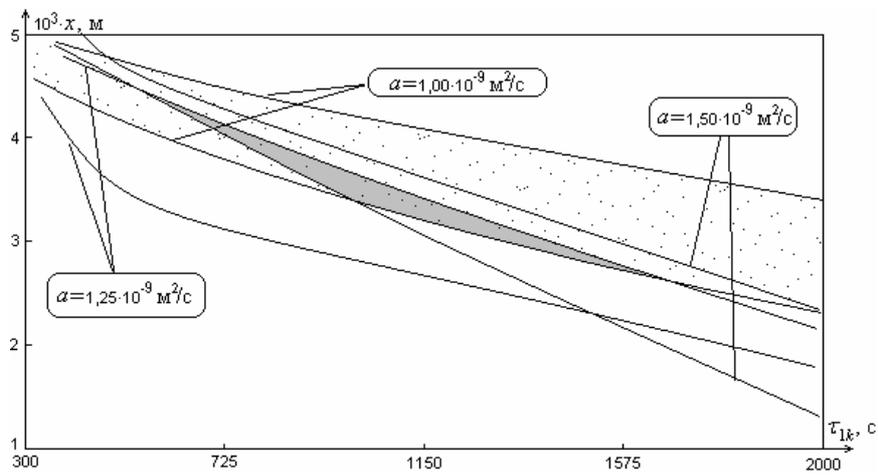


Рис. 3 Результаты оптимизации для $\alpha \in [1,0 \cdot 10^{-9} \dots 1,5 \cdot 10^{-9}] \text{ м}^2/\text{с}$,
 $\tau_{\text{exp, max}} = 3 \cdot 24 \cdot 3600 \text{ с}$, $\tau_{1k, \text{min}} = 300 \text{ с}$, $\tau_{1k, \text{max}} = 2000 \text{ с}$, $x_{\text{min}} = 1 \text{ мм}$, $x_{\text{max}} = 5 \text{ мм}$

В пятой главе рассмотрены практически вопросы измерения коэффициента диффузии в КПМ по предлагаемому методу и выбор размеров образцов из дерева.

Для обеспечения полубесконечности образцов учитывался диапазон возможного изменения коэффициента диффузии древесных пород средней полосы: $10^{-11} \dots 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$. В итоге был выбран размер параллелепипедов:

$3 \times 3 \text{ см}$ – для торцевого соединения и 4 см для направления вектора движущих сил диффузии. На основе полученных размеров образцов и всей предшествующей работы была сначала разработана принципиальная схема устройства (рис. 4) для измерения коэффициента диффузии, а затем – машиностроительный чертеж и конструкция.

При вращении шестерни 8, установленной на стойке 17, рейка 7 со штоком перемещаются вниз и сжимают пружину 9, зафиксированную в корпусе 15. Корпус 15 неподвижно закреплен на рычаге 2, поэтому усилие сжатия пружины передается рычагу. Величину усилия показывает стрелка, соединенная с пружиной, на шкале 11. Усилие передается образцам путем давления на них площадки 5. Оно фиксируется винтом 16, который стопорит вращение шестерни 8 и, соответственно, перемещение рейки 7 со штоком. После снятия нагрузки, при вращении шестерни в обратном направлении, рычаг 7 со штоком поднимается вверх. Рычаг 2 с корпусом 15 можно приподнять и вынуть (или, наоборот, вставить) образцы 12, 13 (в контексте физической модели эксперимента элемент 13 соответствует образцу № 2 с гальванопарой 14).

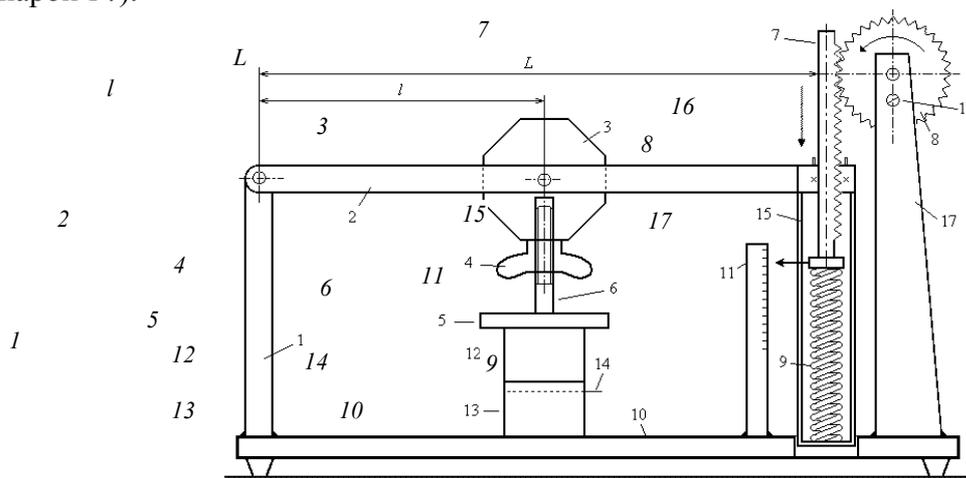


Рис. 4 Принципиальная схема измерительного устройства

Следует отметить, что сила, действующая на образцы, равна удвоенной силе, показанной на шкале 11 стрелкой, так как $L = 2l$. В середине подвижного кронштейна 2 находится специальная шестиугольная шайба 3, которая может свободно вращаться вокруг своей оси. Толщина шайбы должна быть достаточной для размещения в ней винтового соединения с осью 6, посредством которой прижимное усилие

передается на площадку 5 и на систему образцов 12, 13. Гайка 4 позволяет регулировать расстояние от нижней плоскости площадки 5 до основания 10 и, тем самым, использовать измерительное устройство для образцов разных размеров.

На этапе определения длительности подготовки образцов (породы: осина, сосна, ива, береза и дуб) использовались контрольные образцы с двумя гальванопарами по торцам, каждая на расстоянии 3 мм от поверхности (сечения А и Б); к воздействию окружающей среды была открыта только одна поверхность, остальные – изолированы (рис. 5).

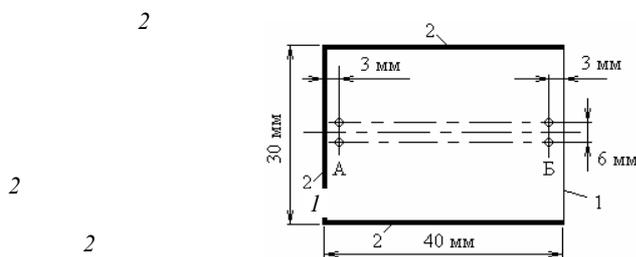


Рис. 5 Контрольные образцы:

1 – открытая поверхность; 2 – влагоизолированная поверхность

Измерения проводились при температуре 18...20 °С с использованием микровольтметра Щ-31. В табл. 3 приводятся экспериментальные данные, полученные, в частности, при сушке образцов. В качестве примера, на рис. 6, а приводятся кривые для сушки образцов из осины, а на рис. 6, б – для увлажнения образцов из дуба.

Анализ данных, продемонстрированных в табл. 3 и рис. 6, позволил установить, что приемлемой длительностью выдержки образцов в эксикаторах как при сушке, так и при увлажнении можно считать 10 недель.

3 Экспериментальные данные: $E(A)$ и $E(B)$ – потенциалы гальванопар в сечениях А и Б, мВ

Время, неделя	Порода дерева									
	Осина		Сосна		Ива		Береза		Дуб	
	$E(A)$	$E(B)$	$E(A)$	$E(B)$	$E(A)$	$E(B)$	$E(A)$	$E(B)$	$E(A)$	$E(B)$
1	0,1240	0,1240	0,1192	0,1190	0,1591	0,1589	0,1755	0,1745	0,1276	0,1273
2	0,1240	0,0880	0,1161	0,0950	0,1493	0,1106	0,1746	0,0880	0,1275	0,0980
3	0,1142	0,0456	0,1022	0,0555	0,1242	0,0556	0,1528	0,0486	0,1107	0,0763
4	0,0962	0,0056	0,0649	0,0051	0,1025	0,0085	0,1123	0,0456	0,1079	0,0568
5	0,0069	0,0020	0,0363	0,0027	0,0039	0,0030	0,0653	0,0320	0,0807	0,0499
6	0,0030	0,0020	0,0042	0,0026	0,0025	0,0031	0,0099	0,0220	0,0353	0,0345
7	0,0023	0,0022	0,0035	0,0029	0,0023	0,0023	0,0055	0,0069	0,0303	0,0352
8	0,0023	0,0020	0,0035	0,0026	0,0023	0,0025	0,0056	0,0063	0,0289	0,0320

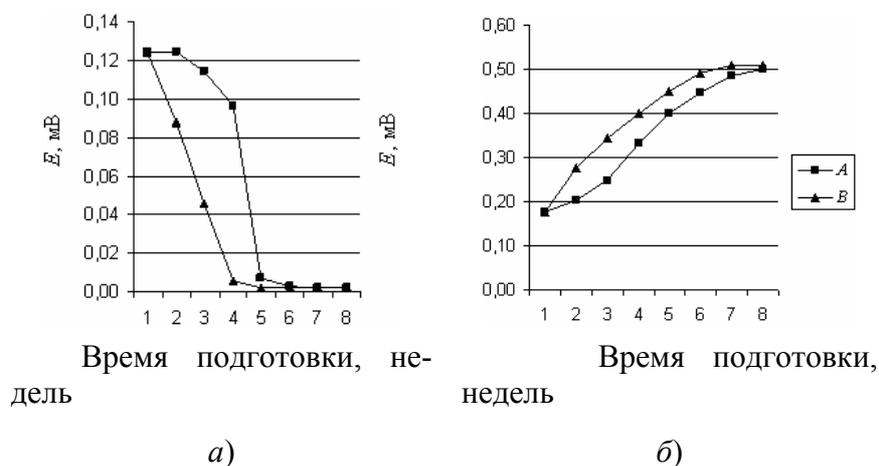


Рис. 6 Примеры диаграмм:

a – сушка осины; *б* – увлажнение березы

4 Результаты обработки экспериментальных данных

Порода	τ_{1k} , с	x , мм	τ_{2max} , с	$a \cdot 10^9$, M^2/c	δa , %
Осина	2400	5	360	6,16	15,3
Сосна	2100	5	540	5,11	17,4
Ива	2700	4	960	2,03	15,4
Береза	3600	4	1800	1,23	12,8
Дуб	3600	4	2100	1,12	15,6

В табл. 4 приведены результаты измерения коэффициентов диффузии для тех же пород, что и в табл. 3.

Различия в погрешностях δa объясняются тем, что в оценивании погрешностей участвуют величины τ_{1k} и x , а они были в разных экспериментах различны.

Результаты экспериментальных исследований продемонстрировали:

- 1) сопоставимость полученных коэффициентов диффузии с диапазонами, известными из предшествующих исследований;
- 2) работоспособность предлагаемого метода.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1 Разработан метод измерения коэффициента диффузии влаги в КПМ, основанный на измерении времени наступления максимального влагосодержания в одном из образцов при их попеременном плотном соприкосновении, что позволило исключить проблемы градуировки датчика влагосодержания и уменьшить длительность активной стадии эксперимента при одновременном снижении требований к точности поддержания граничных условий на внешних поверхностях образцов.

2 Разработана математическая модель измерений, позволяющая найти коэффициент диффузии влаги в КПМ по времени наступления максимального влагосодержания.

3 Проведена метрологическая оптимизация параметров эксперимента с целью повышения точности измерения коэффициента диффузии в КПМ.

4 По результатам метрологической оптимизации и на основе имитационного моделирования процесса диффузии влаги в КПМ разработана принципиальная схема, а затем разработано и изготовлено устройство для измерения в соответствии с предложенным методом.

5 С использованием результатов оптимизации проведена серия экспериментов по определению коэффициентов диффузии влаги в образцах из осины, сосны, ивы, березы и дуба.

6 В сети Internet открыт интерактивный ресурс, предназначенный для обработки результатов эксперимента по измерению коэффициента диффузии влаги в КПМ в режиме on-line; созданы предпосылки к систематизации и накоплению информации по коэффициентам диффузии влаги в КПМ с использованием разработанного метода.

Материалы диссертации отражены в следующих публикациях:

1 Мищенко С.В., Пономарев С.В., Толстых С.Г. Проектирование устройства для измерения коэффициента диффузии: этап имитационного моделирования // Междунар. науч.-техн. конф. «Информационные технологии в проектировании микропроцессорных систем» ИТ ПМПС-2000: Тез. докл. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2000. С. 77 – 79.

2 Толстых С.Г. Математическая модель метода измерения коэффициента диффузии // Труды ТГТУ: Сб. науч. ст. молодых ученых и студентов. 2001. Вып. 8. С. 3 – 11.

3 Толстых С.Г., Пономарев С.В. Математическое моделирование процесса измерения коэффициента диффузии влаги в капиллярно-пористых материалах. М., 2004. Деп. в ВИНТИ 21.04.04, № 669 – В2004.

4 Толстых С.Г., Пономарев С.В. Оценка погрешности измерения коэффициента диффузии в капиллярно-пористых материалах. М., 2004. Деп. в ВИНТИ 21.04.04, № 670 – В2004.

5 Мищенко С.В., Пономарев С.В., Толстых С.Г., Толстых С.С. К вопросу о погрешностях измерения коэффициента диффузии пористых материалов // Вестник ТГТУ. 2003, Т.9, № 2. С. 150 – 165.

6 Толстых С.Г., Толстых С.С., Пономарев С.В. Метрологическая оптимизация параметров эксперимента по определению коэффициента диффузии влаги в капиллярно-пористых материалах. М., 2004. Деп. в ВИНТИ 21.04.04, № 667 – В2004.

7 Толстых С.Г., Пономарев С.В. Об эксперименте по измерению коэффициента диффузии влаги в образцах из дерева // Труды ТГТУ: Сб. науч. ст. молодых ученых и студентов. Тамбов, 2004. Вып. 15. С. 126 – 130.

8 Толстых С.Г., Пономарев С.В. Обзор методов измерения коэффициента диффузии влаги в капиллярно-пористых материалах. М., 2004. Деп. в ВИНТИ 21.04.04, № 668 – В2004.

9 Пономарев С.В., Толстых С.Г. О погрешности измерения коэффициента диффузии капиллярно-пористых материалов // Теплофизические измерения в начале XXI века: Тез. докл. Четвертой междунар. теплофизической школы (24 – 28 сентября 2001 г.). Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2001. Ч. 1. С. 169 – 170.

10 Толстых С.Г. К вопросу о выборе оптимальных конструктивных и режимных параметров измерения коэффициента диффузии влаги в пористых материалах // Метрология, стандартизация, сертификация и управление качеством продукции: Программа, материалы школы-семинара молодых ученых. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2003. С. 135.

11 Пономарев С.В., Толстых С.Г., Беляев М.П. Метод и устройство для измерения коэффициента диффузии влаги капиллярно-пористых и дисперсных материалах // Теплофизические измерения при контроле и управлении качеством: Материалы Пятой междунар. теплофизической школы. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004. С. 220 – 222.