

АНАЛИЗ ИСТОЧНИКОВ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРЕНОСА ВЛАГИ В ТОНКОЛИСТОВЫХ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛАХ

С.Н. Мочалин

ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов

Рецензент д-р техн. наук, профессор С.В. Пономарев

Ключевые слова и фразы: анализ; источники погрешностей; коэффициент влагопроводности; коэффициент диффузии; метод измерения; плотность сухого материала.

Аннотация: Дан анализ основных источников погрешностей измерения характеристик влагопереноса, обусловленных неточностями определения физических величин, непосредственно измеряемых в процессе эксперимента, а также вызванных неполным соответствием используемой математической модели влагопереноса реальным физическим процессам, происходящим в исследуемом тонколистовом капиллярно-пористом материале в ходе эксперимента.

Введение

В статье [1] рассмотрены подходы к выбору оптимальных режимных параметров метода и рациональных конструктивных размеров устройства для измерения коэффициента диффузии a_m , плотности ρ_0 сухого материала и коэффициента влагопроводности $\lambda_m = a_m \rho_0$. Этот метод предусматривает выполнение следующих измерительных операций:

- 1) исследуемый тонколистовой капиллярно-пористый материал помещают между двумя пластинами измерительного устройства;
- 2) за счет прижимного устройства обеспечивают постоянную во всех экспериментах силу сжатия исследуемого материала и его хороший контакт с электродами гальванометрического первичного измерительного преобразователя (ПИП) влагосодержания;
- 3) непосредственно перед началом активной стадии эксперимента измеряют и регистрируют начальное значение влагосодержания U_0 образца с использованием гальванометрического ПИП;
- 4) в момент начала эксперимента через отверстие в верхней пластине шприцом-дозатором к исследуемому материалу подводят каплю воды заданного объема;

5) с постоянным шагом по времени регистрируют значения U_i ($i = 1, 2, \dots, n$) влагосодержания по сигналам ПИП влагосодержания;

6) после достижения и регистрации максимального значения U_{\max} сигнала ПИП влагосодержания, контролируют величину показателя

$$K = \frac{U_i - U_0}{U_{\max} - U_0};$$

7) активную стадию эксперимента прекращают после выполнения критерия окончания активной стадии эксперимента

$$K < \beta,$$

где β – заранее заданное значение из диапазона $0 < \beta < 1$;

8) искомые значения a_m , ρ_0 , λ_m характеристик переноса влаги вычисляют по зависимостям и алгоритмам, приведенным в статье [1].

Для успешной разработки метода и устройства необходимо выполнить анализ источников погрешностей измерения коэффициента диффузии a_m , коэффициента влагопроводности λ_m , а также плотности ρ_0 сухого исследуемого тонколистового капиллярно-пористого материала, результаты которого рассмотрены ниже. Эти источники погрешностей измерения следует разделить на две группы:

– обусловленные неточностями определения физических величин, непосредственно измеряемых в процессе эксперимента;

– вызванные неполным соответствием используемой математической модели влагопереноса реальным физическим процессом, происходящим в исследуемом тонколистовом капиллярно-пористом материале в ходе эксперимента.

1. Пути уменьшения влияния источников погрешностей измерений характеристик влагопереноса в тонколистовых капиллярно-пористых материалах, обусловленных неточностями измерений влагосодержания, мощности источника влаги, геометрических размеров и значений моментов времени

В формулы, представленные в статье [1], –

$$a_m = \frac{r^2}{4z'\tau'}; \quad (1)$$

$$\rho_0 = \frac{W\alpha}{\pi e r^2 [U(r, \tau'(\alpha)) - U_0]}; \quad (2)$$

$$\lambda_m = \frac{r^2}{4z'\tau'} \frac{W}{\pi e r^2 (U_{\max} - U_0)} = \frac{W}{4\pi e z'\tau' (U_{\max} - U_0)}, \quad (3)$$

используемые при вычислении искомых значений коэффициента диффузии a_m , плотности ρ_0 сухого исследуемого материала и коэффициента влагосодержания λ_m , в соответствии с рассматриваемым нами нестациона-

нарным методом «мгновенного» источника влаги, входят следующие физические величины:

$U_{\max}, U(r, \tau_i) = U_i$ – значения максимального влагосодержания и текущего влагосодержания в момент времени τ_i в сечении исследуемого материала на расстоянии r от начала координат $r = 0$, являющегося местом действия «мгновенного» источника влаги;

W – мощность (действующего в точке $r = 0$ в момент времени $\tau = 0$) «мгновенного» источника влаги;

r – значение расстояния от начала координат ($r = 0$) до сечения, в котором осуществляется измерение влагосодержаний U_i, U_{\max} ;

$\tau_{\max}, \tau', \tau''$ – значения моментов времени, входящие в расчетные формулы (1) – (3);

z' – бóльший по величине корень уравнения $z \cdot \exp(1 - z) = \alpha$, где $\alpha = (U(r, \tau) - U_0) / (U_{\max} - U_0)$.

Из полученных в статье [1] формул для вычисления относительных погрешностей $\delta a_m, \delta \rho_0, \delta \lambda_m$ измерения искомых характеристик влагопереноса a_m, ρ_0, λ_m следует, что результирующие относительные погрешности $\delta a_m, \delta \rho_0, \delta \lambda_m$ зависят от абсолютных погрешностей $\Delta U_{\max}, \Delta U_i, \Delta W, \Delta r, \Delta \tau_{\max}, \Delta \tau', \Delta \tau''$ и/или соответствующих относительных погрешностей $\delta U_{\max}, \delta U_i, \delta W, \delta r, \delta \tau_{\max}, \delta \tau', \delta \tau''$ непосредственно измеряемых физических величин $U_{\max}, U_i, W, r, \tau_{\max}, \tau', \tau''$.

Понятно, что абсолютные и относительные погрешности непосредственно измеряемых в ходе эксперимента физических величин $U_{\max}, U_i, W, r, \tau_{\max}, \tau', \tau''$ могут быть уменьшены за счет [2 – 4]:

1) снижения погрешностей первичных измерительных преобразований, например путем выбора наиболее точных из имеющихся (доступных) в настоящее время средств измерения;

2) принятия специальных мер, снижающих влияние внешних помех, например путем:

– использования электрических экранов, устраняющих влияние внешних электромагнитных наводок переменного тока;

– установки фильтров во входных цепях измерительных преобразователей и в каналах передачи информации;

3) использования программных средств статистической обработки результатов многократных измерений, что позволяет (в условиях действия помех и шумов) существенно повысить точность результатов измерений;

4) использования рациональных измерительных схем, позволяющих дополнительно уменьшить влияние абсолютных погрешностей непосредственно измеряемых физических величин на конечный результат экспериментального определения значений характеристик влагопереноса;

5) выбора рациональных вариантов организации процесса измерения и методов обработки первичной информации, например путем использования замены реальной нелинейной зависимости влагосодержания U от электрического сигнала E гальванометрического ПИП в виде

$$U = f(E) \quad (4)$$

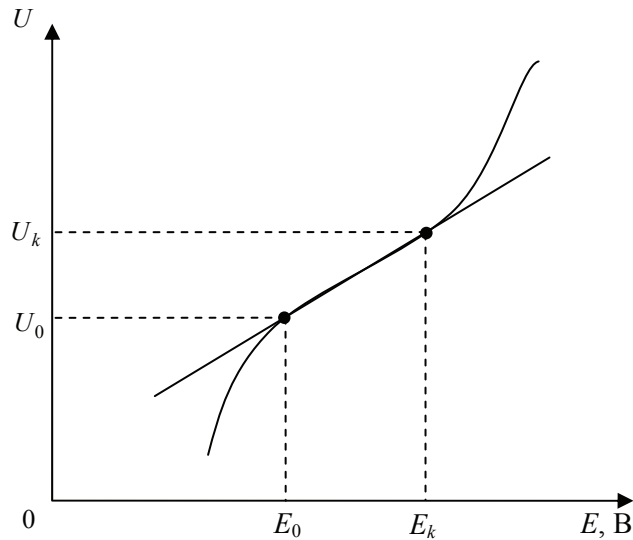


Рис. 1. Иллюстрация аппроксимации реальной характеристики ПИП $U = f(E)$ линейной зависимости $U - U_0 = k(E - E_0)$

на линейную аппроксимацию

$$U = U_0 + k(E - E_0), \quad (5)$$

где E, E_0 – сигналы гальванометрического ПИП при влажностях U, U_0 ; $k = \frac{U_k - U_0}{E_k - E_0}$ – коэффициент, вычисляемый по значениям координат двух точек (E_0, U_0) и (E_k, U_k) , соответствующих начальной и конечной точкам, используемым при линейной аппроксимации (рис. 1) исходной зависимости (4) линейной зависимостью (5).

2. Пути уменьшения влияния источников погрешностей измерений искомых характеристик влагопереноса, обусловленных неполным соответствием используемой математической модели реальным физическим процессам

Расчетные зависимости (1) – (3), используемые в нашей работе при вычислении искомых значений a_m, ρ_0, λ_m по экспериментальным данным, были получены на основе использования математической модели в виде краевой задачи влагопереноса и ее аналитического решения

$$U(r, \tau) = \frac{W}{4\pi\lambda_m\tau} \exp\left[-\frac{r^2}{4a_m\tau}\right]. \quad (6)$$

В настоящее время это решение (6) большинством специалистов считается достаточно точным, и поэтому было положено в основу выполненных нами исследований. Однако для правильного осуществления измерительных операций разработанного нами метода измерения и для выбора рациональных конструктивных размеров измерительного устройства необходимо принять во внимание возможное неполное соответствие математической модели и его решения (6) реальным процессам влагопереноса, происходящим в ходе эксперимента в исследуемом тонколистном капиллярно-пористом материале.

2.1. Влияние конечной длительности промежутка времени, в течение которого к исследуемому материалу подводится влага в начале активной стадии эксперимента

Решение (6) предполагает, что в начальный момент времени $\tau = 0$ в точке $r = 0$ в исследуемом материале должен подействовать мгновенный источник влаги. Это означает, что конечное количество влаги W должно выделиться в единице толщины образца за очень короткий промежуток времени $0 < \tau < \tau_{и}$ ($\tau_{и} \rightarrow 0$) в очень узкой области образца $0 < r < r_{и}$ ($r_{и} \rightarrow 0$). В действительности, влага подводится к образцу исследуемого материала за конечный промежуток времени $0 \leq \tau \leq \tau_{и}$ в соизмеримой с радиусом отверстия области $0 \leq r \leq r_{и}$, где $r_{и} = d/2$, d – диаметр отверстия.

Теоретические и экспериментальные исследования метода «мгновенного» источника тепла, результаты которых приведены в [5], свидетельствуют о том, что при $\tau_{и}/\tau_{\max} < 0,1$ дополнительные погрешности, обусловленные конечной длительностью действия внутреннего источника тепла, являются достаточно малыми. На основании того, что положенные в основу данной работы постановка краевой задачи и ее решение (6) по форме являются аналогичными постановке краевой задачи и ее решения для метода «мгновенного» источника тепла [2, 4, 5], можно утверждать, что для уменьшения влияния конечной длительности промежутка времени, в течение которого влага (вода) вводится в исследуемый образец, необходимо обеспечить, чтобы величина $\tau_{и}$ не превышала 5 % от времени τ_{\max} достижения максимального влагосодержания, то есть должно быть

$$\tau_{и} \leq 0,05\tau_{\max} . \quad (7)$$

Аналогично, желательно, чтобы радиус $r_{и}$ круга, в пределах которого влага (капля воды) вводится в образец исследуемого материала, был бы в пределах

$$r_{и} \leq 0,1r , \quad (8)$$

где r – расстояние от центра отверстия (радиуса $r_{и} = d/2$) до цилиндрического сечения, в котором осуществляется измерение влагосодержания исследуемого материала гальванометрическим первичным измерительным преобразователем.

2.2. Влияние возможного искажения процессов массопереноса как из-за повышения плотности исследуемого материала, так и из-за проявления капиллярных эффектов в пространстве между верхней и нижней пластинами измерительного устройства

При создании слишком больших усилий, прижимающих верхнюю и нижнюю пластины к исследуемому материалу, существует опасность, что этот капиллярно-пористый материал будет очень сильно сжат, что приведет к следующим последствиям:

– плотность ρ исследуемого материала и плотность ρ_0 абсолютно сухого материала будут заметно увеличены до значений ρ_1 и ρ_{01} , что приведет к тому, что вместо исходного материала с плотностями ρ и ρ_0 в процессе эксперимента будет изучаться видоизмененный (сжатый) материал с повышенными значениями $\rho_1 > \rho$ и $\rho_{01} > \rho_0$; результаты таких измерений не будут представлять практической ценности для дальнейшего исследования;

– кроме того, при сильном сближении верхней и нижней пластин происходит не только повышение значений плотностей ρ и ρ_0 , но может и появиться опасность проявления дополнительных капиллярных эффектов, искажающих процессы влагопереноса в исследуемом капиллярно-пористом материале.

Для предотвращения рассматриваемых в данном п. 2.2 последствий влияния повышения плотности и проявления дополнительных капиллярных эффектов, необходимо предусмотреть, чтобы пластины измерительного устройства имели достаточно большую и постоянную площадь поверхностей, соприкасающихся с исследуемым материалом, а сила давления (обеспечивающая прижатие этих пластин к исследуемому материалу) должна быть относительно небольшой и оставаться одной и той же в каждом эксперименте.

2.3. Влияние искажения процессов влагопереноса из-за опасности появления дополнительного переноса влаги за счет перепада гидростатического давления, возникающего в начале активной стадии эксперимента вблизи места подвода капли воды через отверстие в верхней пластине измерительного устройства

Рассмотренные в статье [1] математическая модель и ее решение (6) принимают во внимание перенос влаги только за счет диффузии под действием потенциала массопереноса, обусловленного градиентом концентрации влаги. Однако из публикаций академика А.В. Лыкова [7, 8] известно, что перенос влаги в капиллярно-пористых материалах может происходить под действием других потенциалов, в том числе за счет градиента давления. В частности, такой градиент (перепад) давления может возникать в исследуемом материале в начале активной стадии эксперимента в непосредственной близости от отверстия, через которое с помощью шприца-дозатора подводится капля воды.

Для уменьшения влияния этого эффекта надо использовать такую конструкцию измерительного устройства, которая позволит минимизиро-

вать величину перепада гидростатического давления в отверстии измерительного устройства. Желательно, чтобы максимальная величина действующего даже в начальный момент времени перепада гидростатического давления не превышала 3...5 мм вод. ст.

2.4. Влияние конечной скорости распространения влаги в капиллярно-пористом материале, не соответствующее предсказываемому уравнением Фика парадоксу о бесконечной скорости распространения потенциала влагопереноса

Еще в XIX столетии немецкий математик Георг Фридрих Бернхард Риман при изучении теплового состояния тел показал, что форма изотермических поверхностей определяется не граничными и начальными условиями, а видом дифференциального уравнения теплопроводности [9]. Применительно к краевым задачам теплопроводности Б. Риманом был предложен способ построения дифференциальных операторов, которые содержат производные по времени любого порядка [9].

Эта работа Б. Римана прошла незамеченной для многих исследователей. Только в XX веке ряд исследователей, в том числе академик А.В. Лыков и другие ученые, стали обращать внимание на некоторые парадоксы в решениях классического уравнения теплопроводности. В частности, из классического уравнения теплопроводности Фурье следует парадокс о бесконечной скорости распространения теплоты в веществе [7, 9]. Устранить этот парадокс о бесконечной скорости распространения теплоты позволяют:

- гипотеза о релаксации теплового потока, приводящая к уравнению теплопроводности гиперболического типа [2 – 4];
- гипотеза о нелинейной модели теплопроводности [9];
- гипотеза о тепловой памяти материала [9].

Принимая во внимание, что используемые в данной работе математическая модель влагопереноса в виде краевой задачи влагопроводности и ее решение (6) с математической точки зрения являются аналогами (совпадают по форме записи) известных постановок краевых задач теплопроводности, становится понятно, что как для краевой задачи влагопроводности, так и для ее решения (6) характерен парадокс о бесконечной скорости распространения влаги в капиллярно-пористом материале. Однако из физических соображений ясно, что скорость распространения влаги в капиллярно-пористых материалах является величиной конечной.

В связи с изложенным выше, одним из дополнительных источников погрешностей измерений характеристик влагопереноса может являться не учет конечной скорости распространения влаги в исследуемом капиллярно-пористом материале. Особенно существенным должно быть проявление рассматриваемого в данном п. 2.4 эффекта в случае, когда расстояние r от места подвода влаги (в виде капли из шприца-дозатора) до места измерения реакции исследуемого материала (в виде изменения влагосодержания) будет очень велико (метры, дециметры или сантиметры).

Для того чтобы влиянием конечной скорости распространения влаги можно было пренебречь, достаточно использовать такую конструкцию измерительного устройства, при которой расстояние (от места подвода капли влаги до места измерения локального значения влагосодержания) не будет превышать величины порядка 5...10 мм.

2.5. Возможное неполное достижение равномерного распределения влагосодержания в исследуемом образце перед моментом начала активной стадии эксперимента

Положенная в основы разработанного в [1] метода измерения характеристик влагопереноса математическая модель, представленная в виде краевой задачи влагопроводности Фика, предполагает что непосредственно перед моментом начала активной стадии эксперимента в исследуемом образце должно быть достигнуто равномерное распределение влагосодержания.

Невыполнение этого предположения может привести к дополнительным погрешностям измерения коэффициента диффузии a_m , плотности ρ_0 абсолютно сухого материала и коэффициента влагопроводности $\lambda_m = a_m \rho_0$. Для уменьшения влияния таких дополнительных погрешностей можно использовать следующее:

– исследуемые образцы необходимо достаточно длительное время выдерживать в эксикаторе в атмосфере воздуха с необходимой относительной влажностью φ ; в результате во всем объеме исследуемого образца будет достигнуто равномерное постоянное начальное распределение влагосодержания U_0 ;

– после извлечения из эксикатора каждый образец исследуемого материала должен быть за минимальное возможное время размещен между пластинами измерительного устройства и сразу же должно быть обеспечено отсутствие массообмена этого образца с окружающей средой (за счет воздействия с постоянной силой в виде груза, размещенного на верхней поверхности пластины).

Заключение

Приведенные в статье результаты анализа и рекомендации по уменьшению влияния источников погрешностей измерений искомых характеристик влагопереноса используются при разработке конструкции измерительного устройства и порядка осуществления измерительных операций.

Список литературы

1. Мочалин, С.Н. Выбор оптимальных условий измерения характеристик влагопереноса в тонколистовых капиллярно-пористых материалах методом «мгновенного» источника влаги / С.Н. Мочалин, И.Н. Исаева, С.В. Пономарев // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2010. – Т. 16, № 3. – С. 533–544.

2. Пономарев, С.В. Теоретические и практические аспекты теплофизических измерений : монография. В 2 кн. Кн. 1 / С.В. Пономарев, С.В. Мищенко, А.Г. Дивин. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2006. – 204 с.
3. Пономарев, С.В. Теоретические и практические аспекты теплофизических измерений : монография. В 2 кн. Кн. 2 / С.В. Пономарев, С.В. Мищенко, А.Г. Дивин. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2006. – 216 с.
4. Пономарев, С.В. Теоретические и практические основы теплофизических измерений. / С.В. Пономарев, С.В. Мищенко, А.Г. Дивин, В.А. Вертоградский, А.А. Чуриков. – М. : Физматлит, 2008. – 408 с.
5. Шашков, А.Г. Методы определения теплопроводности и температуропроводности / А.Г. Шашков [и др.]. – М. : Энергия, 1973. – 336 с.
6. Беляев, П.С. Методы и устройства для контроля характеристик тепло- и массопереноса композиционных материалов : дис. ... д-ра техн. наук : 05.11.13 / Беляев Павел Серафимович. – Тамбов, 1998. – 537 с.
7. Лыков, А.В. Теория сушки / А.В. Лыков – М. : Энергия, 1968. – 472 с.
8. Рудобашта, С.П. Массоперенос в системах с твердой фазой / С.П. Рудобашта. – М. : Химия, 1980. – 248 с.
9. Шашков, А.Г. Волновые явления теплопроводности: системно-структурный подход / А.Г. Шашков, В.А. Бубнов, С.Ю. Яновский. – Минск : Навука і тэхніка, 1993. – 279 с.

Analysis of Error Measurements of Humid Transfer Characteristics in Thin Leaf Capillary Porous Materials

S.N. Mochalin

Tambov State Technical University, Tambov

Key words and phrases: analysis; error sources; humid conductivity coefficient; diffusion coefficient; measuring technique; dry material density.

Abstract: The paper analyzes the main sources of measurement errors of humid transfer characteristics determined by the errors in physical values measured in the course of the experiment and caused by the incomplete correspondence of the used mathematical model of humid transfer to real physical process taking place in the examined thin leaf capillary porous material.

© С.Н. Мочалин, 2010

ДЛЯ ЗАМЕТОК
