

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВЛАГОПЕРЕНОСА В ТОНКОЛИСТОВЫХ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛАХ МЕТОДОМ «МГНОВЕННОГО» ИСТОЧНИКА ВЛАГИ

С.Н. Мочалин, И.Н. Исаева, С.В. Пономарев

*Кафедра «Управление качеством и сертификация», ГОУ ВПО «ТГТУ»;
kafedra@asp.tstu.ru*

Ключевые слова и фразы: влагоперенос; влагосодержание исследуемого материала; коэффициент влагопроводности; коэффициент диффузии; относительные среднеквадратичные погрешности; плотность материала; тонколистовой капиллярно-пористый материал.

Аннотация: Предложены расчетные зависимости и алгоритмы для вычислений значений коэффициента диффузии влаги, плотности сухого материала и коэффициента влагопроводности тонколистового капиллярно-пористого материала. Разработанные математические модели погрешностей измерений использованы при определении оптимальных режимных параметров метода измерения и рациональных конструктивных размеров измерительного устройства для экспериментального измерения характеристик переноса влаги.

Введение

Целью данной работы является выбор оптимальных режимных параметров и конструктивных размеров устройства для проведения измерений коэффициента диффузии влаги a_m , плотности ρ_0 сухого материала и коэффициента влагопроводности λ_m тонколистового капиллярно-пористого материала методом «мгновенного» источника влаги.

1. Измерительное устройство и основные измерительные операции, осуществляемые при экспериментальном определении характеристик влагопереноса в тонколистовых капиллярно-пористых материалах

При измерении характеристик переноса влаги разработанным методом используют измерительное устройство (рис. 1), основой которого являются две пластины 1 и 2, между которыми размещают тонколистовой капиллярно-пористый материал 3.

В центре верхней пластины 1 просверлено отверстие 4, предназначенное для подведения необходимого количества влаги к исследуемому тонколистовому капиллярно-пористому материалу 3. На нижней поверхности верхней пластины 1 через специально просверленные небольшие отверстия установлены датчики влагосодержания в виде пары электродов, изготовленных из медной и оцинкованной проволочек. При этом возможны 3 варианта (I, II и III) выполнения этих электродов. В I варианте электроды 5 и 6 размещают вдоль одной окружности радиуса r так, чтобы расстояние между ближними концами этих электродов 5 и 6 было порядка 1...2 мм. Во II варианте основной электрод 7 размещают на окружности

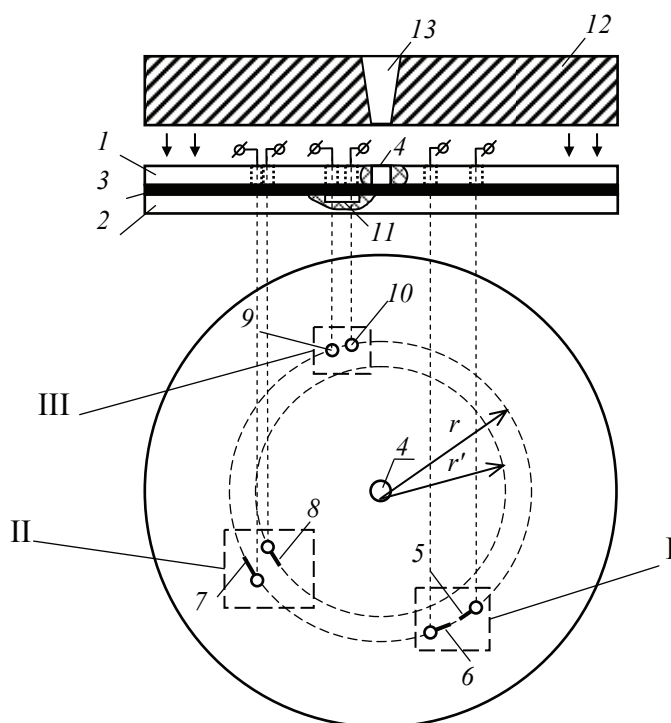


Рис. 1. Эскиз конструкции измерительного устройства ($r' = r - (1...2)$ мм)

радиуса r , а электрод 8 – на окружности радиуса $r' < r$, причем расстояние между электродами 7 и 8 также находятся в пределах 1...2 мм. В III варианте оба электрода 9 и 10 выполняют в виде иголок, размещенных на окружности радиуса r , причем при сборке измерительного устройства эти электроды-иголки прокалывают исследуемый материал 3, а заостренные концы электродов-иголок 9 и 10 входят в полость 11, профрезерованную со стороны верхней поверхности нижней пластины 2.

В процессе эксперимента обеспечивают хороший контакт верхней 1 и нижней 2 пластин с исследуемым материалом 3 за счет использования специального прижимающего механизма, который в простейшем случае может быть выполнен в виде груза 12, равномерно распределенного на верхней поверхности пластины 1.

Измерительные операции согласно предлагаемому методу осуществляют в основном в следующем порядке:

а) путем выдерживания исследуемого образца в эксикаторе (в который добавлено необходимое количество влаги) задают необходимое начальное влагосодержание U_0 каждого исследуемого образца;

б) после извлечения из эксикатора каждый образец взвешивают и регистрируют его массу M ;

в) образец исследуемого материала 3, имеющий начальное влагосодержание U_0 , размещают между верхней 1 и нижней 2 пластинами измерительного устройства;

г) за счет использования прижимного устройства создают постоянную для всех экспериментов силу, обеспечивающую хороший контакт медных и цинковых электродов 5 и 6 (либо 7 и 8, либо 9 и 10) датчика влагосодержания с исследуемым тонколистным капиллярно-пористым материалом 3;

д) до начала активной стадии эксперимента измеряют сигнал датчика влагосодержания; этот сигнал E_0 представляет собой электродвижущую силу, разви-

ваемую парой электродов 5 и 6 (либо 7 и 8, либо 9 и 10), и зависит от начального влагосодержания U_0 образца;

е) в момент начала активной стадии эксперимента через канал 13 в грузе 12 и отверстие 4 в центре верхней пластины 1 вводят заданное количество влаги (в виде капли воды из дозирующего шприца);

ж) на протяжении всей активной стадии эксперимента с заданным шагом во времени $\Delta\tau_{\text{ш}}$ в моменты времени $\tau_i = \tau_{i-1} + \Delta\tau_{\text{ш}}$ ($i = 1, 2, \dots, n$; $\tau_0 = 0$) измеряют и регистрируют значения E_i ($i = 1, 2, \dots, n$) сигнала датчика влагосодержания;

з) эксперимент прекращают в момент времени, когда сигнал E_i датчика влагосодержания снижается до величины

$$E_i \leq \beta (E_{\text{max}} - E_0) + E_0,$$

где E_{max} – максимальное значение сигнала датчика влагосодержания, достигнутое в ходе эксперимента в момент времени τ_{max} ; E_i – текущее значение сигнала датчика влагосодержания в момент времени τ_i ; β – заданное значение из диапазона $0 < \beta < 1$, принятое в качестве критерия окончания эксперимента;

и) искомое значение коэффициента диффузии влаги в тонколистовом капиллярно-пористом материале вычисляют на основе полученной в эксперименте первичной информации путем ее обработки по приведенным ниже зависимостям и алгоритмам.

2. Расчетные соотношения метода «мгновенного» источника влаги

Исходя из математической модели рассматриваемого метода, изложенной в [1], легко получается решение, имеющее вид

$$U(r, \tau) - U_0 = \frac{W}{4\pi\lambda_m\tau} \exp\left[-\frac{r^2}{4a_m\tau}\right], \quad (1)$$

где $U(r, \tau)$ – влагосодержание в цилиндрическом сечении исследуемого материала на расстоянии r (от места подвода влаги к образцу) в момент времени τ ; U_0 – начальное влагосодержание образца (в момент времени $\tau = 0$); W – мощность импульсного источника влаги, действовавшего в момент времени τ в начале координат $r = 0$, вычисляемая как отношение количества влаги (подведенного из шприца-дозатора) к толщине листа исследуемого образца капиллярно-пористого материала.

В работах [1, 2] показано, что определение коэффициента диффузии a_m можно осуществлять с использованием формулы

$$a_m = \frac{r^2}{4\tau_{\text{max}}}, \quad (2)$$

где τ_{max} – момент времени, в который достигается максимальное значение U_{max} влагосодержания.

Использование формулы (2) приводит к большим погрешностям, поскольку сложно достаточно точно определить значение момента времени τ_{max} . Попробуем определить такие моменты времени τ' и τ'' , используя которые можно минимизировать погрешность определения коэффициента диффузии.

Для этого измерим значения влагосодержания в точке с координатой r во времени τ и зарегистрируем эту кривую (рис. 2).

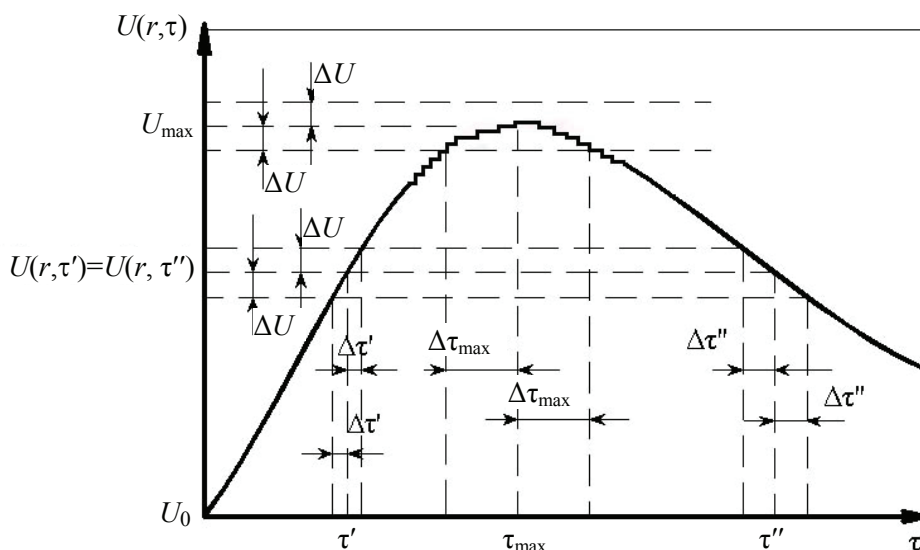


Рис. 2. Изменение во времени τ влагосодержания $[U(r, \tau) - U_0]$ в точке с координатой r и иллюстрация непостоянства абсолютной погрешности $\Delta \tau$ определения моментов времени в ходе эксперимента при постоянной абсолютной погрешности ΔU измерения влагосодержания

Введем безразмерную переменную $z = \frac{r^2}{4a_m \tau}$. Если принять, что величина начального влагосодержания $U_0 \neq 0$, то решение (1) примет вид

$$U(r, \tau) - U_0 = \frac{Wr^2}{r^2 4\pi a_m \rho_0 \tau} \exp\left[-\frac{r^2}{4a_m \tau}\right] = \frac{W}{r^2 \pi \rho_0} z \exp[-z] = U(r, z) - U_0, \quad (3)$$

где $\rho_0 = \frac{\lambda_m}{a_m}$ – плотность абсолютно сухого исследуемого материала.

Введем переменный параметр

$$\alpha = \frac{U(r, \tau) - U_0}{U_{\max} - U_0}, \quad (4)$$

где U_0 – начальное влагосодержание исследуемого материала, условно принимаемое за начало шкалы влагосодержания в каждом эксперименте; U_{\max} – максимальное значение влагосодержания $U(r, \tau_{\max})$, достигаемое в ходе эксперимента в сечении радиуса r образца в момент времени τ_{\max} .

Запишем решение (3) для моментов времени $\tau' = \tau'(\alpha)$ и τ_{\max} :

$$U(r, \tau') - U_0 = \frac{W}{\pi r^2 \rho_0} z(\tau'(\alpha)) \exp[-z(\tau'(\alpha))], \quad (3a)$$

$$U_{\max} - U_0 = \frac{W}{\pi r^2 \rho_0} z(\tau_{\max}) \exp[-z(\tau_{\max})] = \frac{W}{\pi r^2 \rho_0 e}, \quad (3b)$$

где принято во внимание, что согласно [3] максимальное значение влагосодержания U_{\max} достигается при $z(\tau_{\max}) = 1$.

Поделив (3а) на (3b), получим

$$\alpha = \frac{U(r, \tau'(\alpha)) - U_0}{U_{\max} - U_0} = e z(\tau'(\alpha)) \exp[-z(\tau'(\alpha))]. \quad (4a)$$

Преобразовав выражение (4а) с учетом того, что $e \exp(z) = \exp(1-z)$, получим уравнение

$$z \exp(1-z) = \alpha. \quad (5)$$

Обозначим $z' = z(\tau'(\alpha))$ и $z'' = z(\tau''(\alpha))$ соответственно бóльший и меньший корни уравнения (5). После преобразований легко получаем формулы для вычисления искомого коэффициента диффузии a_m по экспериментально измеренным моментам времени τ' и τ'' :

$$\text{из } z' = z(\tau'(\alpha)) = \frac{r^2}{4a_m \tau'} \text{ следует, что } a_m = \frac{r^2}{4z' \tau'}; \quad (6)$$

$$\text{из } z'' = z(\tau''(\alpha)) = \frac{r^2}{4a_m \tau''} \text{ следует, что } a_m = \frac{r^2}{4z'' \tau''}, \quad (6a)$$

где τ' и τ'' – меньший и бóльший моменты времени, соответствующие бóльшему z' и меньшему z'' корням уравнения (5), при которых достигается заданное значение параметра α , определенное формулой (4).

Для вычисления плотности ρ_0 сухого исследуемого материала на основе зависимости (3а) легко получается формула

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

которая с учетом (4а) принимает вид

$$\rho_0 = \frac{W \alpha}{\pi e r^2 [U(r, \tau'(\alpha)) - U_0]}, \quad (7)$$

а при $\alpha = 1$

$$\rho_0 = \frac{W}{\pi e r^2 [U_{\max} - U_0]}. \quad (7a)$$

Отметим, что для вычисления коэффициента влагопроводности $\lambda_m = a_m \rho_0$ можно воспользоваться формулами:

$$\lambda_m = \frac{r^2}{4z' \tau'} \frac{W}{\pi e r^2 (U_{\max} - U_0)} = \frac{W}{4\pi e z' \tau' (U_{\max} - U_0)}, \quad (8)$$

$$\lambda_m = \frac{r^2}{4z'' \tau''} \frac{W}{\pi e r^2 (U_{\max} - U_0)} = \frac{W}{4\pi e z'' \tau'' (U_{\max} - U_0)}. \quad (8a)$$

3. Вывод соотношений для вычисления погрешностей

По методике, описанной в [3, 4], легко получить выражения для вычисления погрешностей для случая определения (вычисления) коэффициента диффузии по формулам (6) и (6а).

На основании (6) получено следующее выражение

$$\delta a_m = \sqrt{4(\delta r)^2 + (\delta z')^2 + (\delta \tau')^2}, \quad (9)$$

где $\delta a = \frac{\Delta a}{a}$ – среднеквадратическая оценка относительной погрешности измерения

коэффициента диффузии; $\delta r = \frac{\Delta r}{r}$ – относительная погрешность определения расстояния r между началом координат (местом ввода влаги из шприца-дозатора) и измерителем влагосодержания; $\delta z' = \frac{\Delta z'}{z'}$ – относительная погрешность определения

величины z' ; $\delta \tau' = \frac{\Delta \tau'}{\tau'}$ – относительная погрешность определения момента времени τ' ; Δa_m , Δr , $\Delta z'$, $\Delta \tau'$ – абсолютные погрешности измерения (определения) величин a_m , r , z' и τ' .

Определим составляющую погрешности $\delta z'$

$$\delta z' \approx \frac{dz}{z} = \frac{1}{z} \frac{dz}{d\alpha} d\alpha \approx \frac{1}{z} \frac{dz}{d\alpha} \Delta \alpha.$$

Аналогично определим абсолютную погрешность $\Delta \alpha$ по методике, изложенной в работах [3, 4]. Учитывая, что α рассчитывается по формуле (4), получаем

$$\Delta \alpha = \alpha \sqrt{\delta^2 (U - U_0) + \delta^2 (U_{\max} - U_0)}, \quad (10)$$

$$\delta(U - U_0) = \frac{\Delta(U - U_0)}{U - U_0}, \quad \delta(U_{\max} - U_0) = \frac{\Delta(U_{\max} - U_0)}{U_{\max} - U_0} - \text{относительные погрешности измерений разностей влагосодержаний } (U - U_0) \text{ и } (U_{\max} - U_0).$$

Предполагая, что $\Delta(U - U_0) = \Delta(U_{\max} - U_0) = \Delta U$, после преобразования (10) получаем

$$\Delta \alpha = \alpha \delta(U_{\max} - U_0) \sqrt{\frac{1}{\alpha^2} + 1}, \quad (11)$$

откуда следует

$$\delta z' = \frac{1}{z'(\alpha)} \frac{dz'(\alpha)}{d\alpha} \alpha \delta U_{\max} \sqrt{\frac{1}{\alpha^2} + 1},$$

где $\delta U_{\max} \equiv \delta(U_{\max} - U_0)$.

Повторив вышеизложенное, легко получаем, что

$$\delta z'' = \frac{1}{z''(\alpha)} \frac{dz''(\alpha)}{d\alpha} \alpha \delta U_{\max} \sqrt{\frac{1}{\alpha^2} + 1}.$$

Определим входящую в (9) составляющую $\delta\tau'$, поскольку ясно, что эта составляющая не представляет собой просто число, а изменяется во времени при постоянной абсолютной погрешности ΔU измерения влагосодержания.

Погрешности определения моментов времени τ_{\max} , τ' и τ'' связаны не только непосредственно с измерением времени. Из представленного на рис. 2 графика видно, что в реальных условиях эксперимента пик на кривой, соответствующий максимуму влагосодержания, заметно зашумлен и поэтому несколько размыт. Если определение значения максимального значения влагосодержания U_{\max} можно провести достаточно точно, то соответствующий момент времени τ_{\max} определяется с заметно бóльшей абсолютной погрешностью $\Delta\tau_{\max}$, чем погрешности $\Delta\tau'$ и $\Delta\tau''$ определения моментов времени τ' и τ'' .

Определение моментов времени τ' и τ'' осуществляется через определение влагосодержания, поэтому погрешность определения этих моментов времени можно выразить через погрешность определения влагосодержания. Учитывая, что

$$\frac{dU(r, \tau)}{d\tau} \approx \frac{\Delta U}{\Delta\tau}, \text{ получаем } \Delta\tau' \approx \frac{\Delta U}{\left(\frac{dU(\alpha)}{d\tau}\right)_{\tau'}}, \quad (12)$$

$$\Delta\tau'' \approx \frac{\Delta U}{\left(\frac{dU(\alpha)}{d\tau}\right)_{\tau''}}. \quad (12a)$$

Из формулы (12) следует, что абсолютная погрешность $\Delta\tau'$ определяется моментом времени τ' , зависит от абсолютной погрешности ΔU измерения влагосодержания $U(\alpha)$ и от производной $\frac{dU(\alpha)}{d\tau}$ в момент времени τ' . При этом значения производной $\frac{dU(\alpha)}{d\tau}$ и погрешности $\Delta\tau'(\alpha)$ зависят от выбора конкретного значе-

ния безразмерного параметра $\alpha = \frac{U(r, \tau') - U_0}{U_{\max} - U_0}$, представляющего собой отношения разностей влагосодержаний $(U(r, \tau') - U_0)$ и $(U_{\max} - U_0)$. Если предположить, что абсолютные погрешности измерения влагосодержаний $\Delta(U_{\max} - U_0) = \Delta(U - U_0) = \Delta U = \text{const}$ остаются постоянными, то с учетом (12) получим соотношения:

$$\frac{\Delta\tau'}{\tau'} = \delta\tau' = \frac{\Delta U}{\tau' \left(\frac{dU}{d\tau}\right)_{\tau'}} = \frac{(U_{\max} - U_0) \delta U_{\max}}{\tau' \left(\frac{dU(\alpha)}{d\tau}\right)_{\tau'}},$$

$$\frac{\Delta\tau''}{\tau''} = \delta\tau'' = \frac{\Delta U}{\tau'' \left(\frac{dU}{d\tau}\right)_{\tau''}} = \frac{(U_{\max} - U_0) \delta U_{\max}}{\tau'' \left(\frac{dU(\alpha)}{d\tau}\right)_{\tau''}},$$

где принято во внимание, что $\Delta U = (U_{\max} - U_0) \delta U_{\max}$.

Значения производных $\frac{\partial U(r, \tau)}{\partial \tau}$ для моментов времени τ' и τ'' :

$$\left. \frac{\partial[U(r, \tau) - U_0]}{\partial \tau} \right|_{\tau=\tau'} = \left[\frac{W}{r^2 \pi \rho_0} (1-z) \exp(-z) \right]_{\tau'} = \frac{W}{r^2 \pi \rho_0} (1-z'(\alpha)) \exp(-z'(\alpha));$$

$$\left. \frac{\partial[U(r, \tau) - U_0]}{\partial \tau} \right|_{\tau=\tau''} = \left[\frac{W}{r^2 \pi \rho_0} (1-z) \exp(-z) \right]_{\tau''} = \frac{W}{r^2 \pi \rho_0} (1-z''(\alpha)) \exp(-z''(\alpha)),$$

а для момента времени τ_{\max} , когда $z = 1$:

$$\left. \frac{\partial U(r, \tau)}{\partial \tau} \right|_{\tau=\tau_{\max}} = 0;$$

$$U_{\max} - U_0 = \frac{W}{\pi r^2 \rho_0 e}.$$

Проведем следующие преобразования:

$$\left. \frac{d[U(r, \tau) - U_0]}{d\tau} \right|_{\tau=\tau'} = \frac{W}{\pi r^2 \rho_0} [1 - z'(\alpha)] \exp[-z'(\alpha)];$$

$$\frac{U_{\max} - U_0}{\left(\left. \frac{d[U(r, \tau) - U_0]}{d\tau} \right) \right|_{\tau=\tau'}} = \frac{W \pi r^2 \rho_0}{e \pi r^2 \rho_0 W [1 - z'(\alpha)] \exp[-z'(\alpha)]} = \frac{1}{e [1 - z'(\alpha)] \exp[-z'(\alpha)]};$$

$$\frac{(U_{\max} - U_0) \delta U_{\max}}{\tau' \left(\left. \frac{\partial[U(r, \tau) - U_0]}{\partial \tau} \right) \right|_{\tau=\tau'}} = \frac{\delta U_{\max}}{\tau' e [1 - z'(\alpha)] \exp[-z'(\alpha)]}.$$

Действуя аналогично, получаем

$$\frac{(U_{\max} - U_0) \delta U_{\max}}{\tau'' \left(\left. \frac{\partial U(\alpha)}{\partial \tau} \right) \right|_{\tau=\tau''}} = \frac{\delta U_{\max}}{\tau'' e [1 - z''(\alpha)] \exp[-z''(\alpha)]}.$$

В итоге получаются следующие формулы для определения среднеквадратичных погрешностей измерения коэффициента диффузии:

$$(\delta a_m)' = \sqrt{4\delta^2 r + \left[\frac{\delta U_{\max}}{\tau' e [1 - z'(\alpha)] \exp[-z'(\alpha)]} \right]^2 + \left[\frac{1}{z'(\alpha)} \frac{dz'(\alpha)}{d\alpha} \alpha \right]^2 \left(1 + \frac{1}{\alpha^2} \right) \delta^2 U_{\max}};$$

$$(\delta a_m)'' = \sqrt{4\delta^2 r + \left[\frac{\delta U_{\max}}{\tau'' e [1 - z''(\alpha)] \exp[-z''(\alpha)]} \right]^2 + \left[\frac{1}{z''(\alpha)} \frac{dz''(\alpha)}{d\alpha} \alpha \right]^2 \left(1 + \frac{1}{\alpha^2} \right) \delta^2 U_{\max}}.$$

По аналогии с изложенным выше, на основе формулы (7) была получена зависимость для вычисления среднеквадратичной оценки относительной погрешности $\delta \rho_0$ измерения плотности ρ_0 сухого материала:

$$\delta(\rho_0) = \sqrt{\delta^2 W + 4\delta^2 r + \delta^2 \alpha + (\delta[U(r, \tau'(\alpha)) - U_0])^2}.$$

Принимая во внимание, что на основании (11) $\delta\alpha = \frac{\Delta\alpha}{\alpha} = \delta U_{\max} \sqrt{\frac{1}{\alpha^2} + 1}$, а

$\delta[U(r, \tau') - U_0] = \frac{\delta U_{\max}}{\alpha}$, получаем, что

$$\delta(\rho_0) = \sqrt{\delta^2 W + 4\delta^2 r + (\delta U_{\max})^2 \left(\frac{2}{\alpha^2} + 1 \right)},$$

где δW – относительная погрешность измерения мощности источника влаги W , которая мгновенно выделяется в единице толщины исследуемого материала в начальный момент времени $\tau = 0$; δU_{\max} – относительная погрешность измерения максимальной разности влагосодержаний ($U_{\max} - U_0$); δr – относительная погрешность измерения расстояния r между центром отверстия \varnothing (местом введения влаги) и измерителем влагосодержания (см. рис. 1).

4. Оценка погрешностей измерений

По полученным формулам были рассчитаны среднеквадратичные погрешности для различных значений α , W , r и выбраны оптимальные параметры, обеспечивающие наименьшую погрешность.

При выполнении расчетов были использованы следующие значения: $a_m = 5 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$; $\rho_0 = 300 \text{ кг/м}^3$; $W = 0,01 \text{ кг/м}$; $\Delta W = 0,0001 \text{ кг/м}$; $r = 4 \dots 6 \text{ мм}$; $\Delta r = 0,2 \text{ мм}$; $\Delta U_{\max} = 0,01 \text{ кг/кг}$. Пример зависимости среднеквадратичных погрешностей $\delta a'_m$, $\delta a''_m$, $\delta(\rho_0)$ от параметра α при $r = 4 \text{ мм}$ и $W = 0,01 \text{ кг/м}$ приведен на рис. 3.

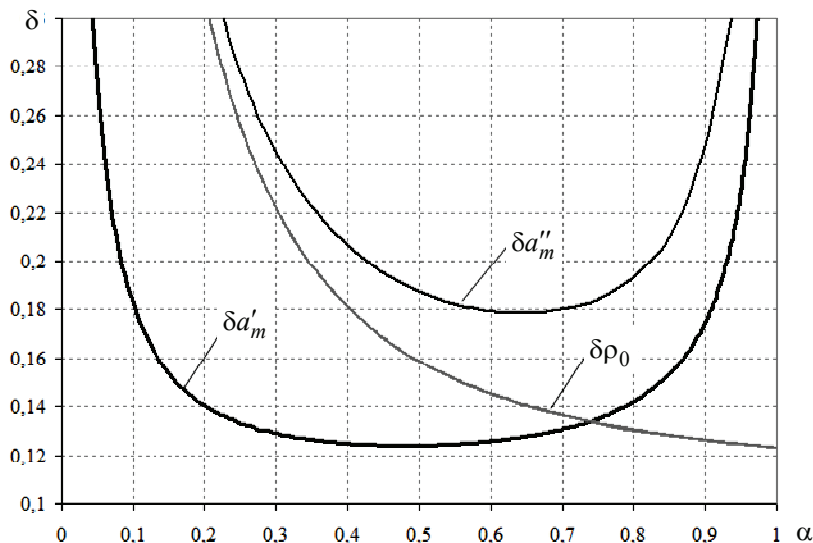


Рис. 3. Зависимость относительных погрешностей измерения коэффициента диффузии $\delta a'_m$, $\delta a''_m$ и относительных погрешностей измерения плотности сухого материала $\delta(\rho_0)$ от значения α для $W = 0,01 \text{ кг/м}$, $r = 4 \text{ мм}$

Как видно из графиков, приведенных на рис. 3, оптимальные значения α (для измерения коэффициента диффузии a_m) находятся в диапазоне 0,4...0,6. После проведения более точных расчетов при изменении α с шагом 0,01 были определены минимальные значения погрешностей и соответствующие им значения α : $(\delta a_m)' = 12,4\%$ при $\alpha' = 0,48$ и $(\delta a_m)'' = 18,0\%$ при $\alpha'' = 0,64$.

Из рис. 3 видно, что значения относительных погрешностей $\delta a_m''$ измеренного коэффициента диффузии a_m при его вычислении по большему моменту времени τ'' оказывается заметно выше по сравнению со значениями $\delta a_m'$ в случае вычисления коэффициента диффузии по величине меньшего момента времени τ' .

Это объясняется тем, что абсолютная погрешность $\Delta \tau'' \approx \frac{\Delta U}{\left(\frac{dU(\alpha)}{d\tau}\right)_{\tau''}}$ определения

момента времени τ'' оказывается значительно больше абсолютной погрешности $\Delta \tau' \approx \frac{\Delta U}{\left(\frac{dU(\alpha)}{d\tau}\right)_{\tau'}}$, так как производная $\left(\frac{dU(\alpha)}{d\tau}\right)_{\tau''}$ при $\tau'' > \tau_{\max}$ заметно меньше

производной $\left(\frac{dU(\alpha)}{d\tau}\right)_{\tau'}$ при $\tau' > \tau_{\max}$, что вытекает из формул (12), (12а) и из характера изменения влагосодержания во времени (см. рис. 2).

Понятно, что от использования большего по величине момента времени τ'' следует отказаться, а при вычислении коэффициента диффузии при обработке экспериментальных данных надо использовать меньшее значение момента времени τ' , соответствующее оптимальному значению параметра $\alpha \approx 0,48$.

В процессе выполнения данного исследования стало очевидно, что наряду с выбором оптимального значения параметра $\alpha = \alpha_{\text{опт}} = 0,48$, следует определить

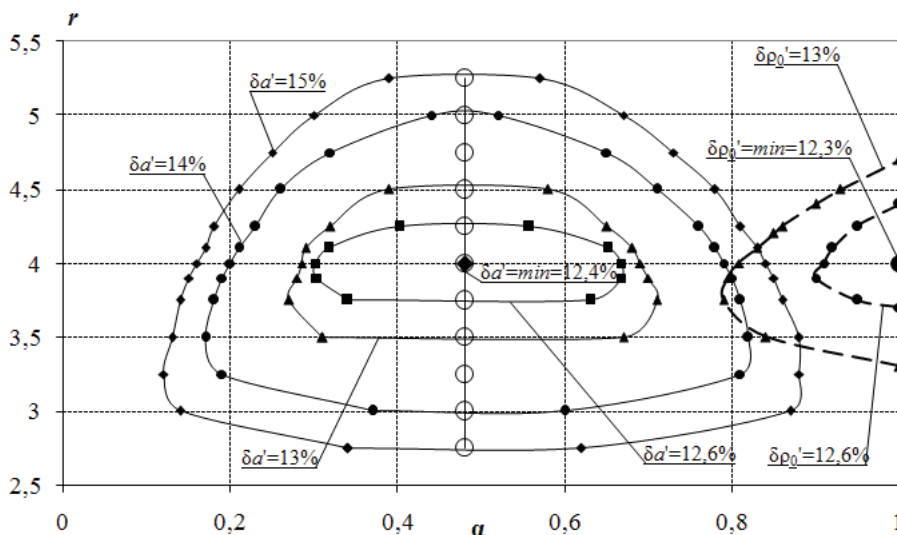


Рис. 4. Линии равного уровня погрешностей измерения коэффициента диффузии a_m и плотности сухого материала ρ_0 (при использовании метода «мгновенного» источника влаги)

величину расстояния r , при котором погрешность измерения коэффициента диффузии будет минимальной. В рамках этой части данного исследования были рассчитаны значения погрешностей измерения коэффициента диффузии при значениях расстояния r из диапазона $2 \text{ мм} \leq r \leq 6 \text{ мм}$.

В результате были построены линии равных уровней погрешностей измерения коэффициента диффузии a_m и плотности сухого материала ρ_0 , представленные на рис. 4.

Заключение

Из материалов, изложенных в данной статье, следует, что минимальное значение относительных среднеквадратичных погрешностей δa_m измерения коэффициента диффузии достигается при $\alpha = 0,48$, $r = 4 \text{ мм}$, приемлемые значения погрешностей имеют место при $0,3 < \alpha < 0,65$; $3,75 \text{ мм} < r < 4,25 \text{ мм}$.

Для минимизации среднеквадратичных погрешностей $\delta \rho_0$ измерения плотности ρ_0 сухого материала ее нужно измерять в тот момент времени, когда влагосодержание достигает максимума, то есть при $\alpha = 1$. Тогда при $W = 0,01 \text{ кг/м}$; $r = 4 \text{ мм}$ и $\Delta r = 0,2 \text{ мм}$; $\Delta U_{\max} = 0,01 \text{ кг/кг}$; $\Delta W = 0,0001 \text{ кг/м}$, получаем $\delta \rho_{0\min} = 12,3 \%$ при $\alpha_{\text{опт}} = 1$ и $r_{\text{опт}} = 4 \text{ мм}$.

Список литературы

1. Мочалин, С.Н. Математическая модель экспрессного метода измерения коэффициента диффузии влаги в капиллярно-пористых материалах / С.Н. Мочалин // Теплофизика в энергосбережении и управлении качеством : материалы шестой междунар. теплофиз. школы : в 2 ч / Тамб. гос. техн. ун-т. – Тамбов, 2007. – Ч. II. – С. 160–161.
2. Мочалин, С.Н. К вопросу о выборе оптимальных режимных параметров метода измерения коэффициента диффузии влаги в тонколистовых капиллярно-пористых материалах / С.Н. Мочалин, С.В. Пономарев // Междунар. науч.-техн. семинар «Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов» : материалы семинара / Федер. агентство по образованию, ГОУ ВПО «Воронеж. гос. лесотехн. акад.». – Воронеж, 2010. – С. 63–67.
3. Теоретические и практические основы теплофизических измерений / С.В. Пономарев [и др.] ; под ред. С.В. Пономарева. – М. : Физматлит, 2008. – 408 с.
4. 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.

The Choice of Optimal Measuring Conditions of Moisture Transfer in Thin Sheet Capillary Porous Materials by the Technique of “Prompt” Moisture Source

S.N. Mochalin, I.N. Isaeva, S.V. Ponomarev

Department “Quality Management and Certification”, TSTU

Key words and phrases: moisture transfer; moisture content of the examined material; moisture transfer coefficient; diffusion coefficient; relative mean-square errors; material density; thin sheet capillary porous material.

Abstract: The paper offers the calculations, dependencies and algorithms for computation of moisture diffusion coefficient in a thin sheet capillary porous material. The mathematical models of measuring errors are used to determine of the optimal mode parameters for the measuring technique and rational design sizes of the device for moisture transfer characteristics measurement.

Auswahl der optimalen Bedingungen der Messung der Charakteristiken der Feuchteübertragung in den feinen kapillarporösen Stoffen durch die Methode der “augenblicklichen” Feuchtigkeitsquelle

Zusammenfassung: Es sind die berechneten Abhängigkeiten und die Algorithmen für die Berechnung der Werte des Koeffizientes der Feuchtigkeitsdiffusion, der Dichte des Trockenstoffes und des Koeffizientes der Feuchteleitfähigkeit des feinen kapillarporösen Stoffes vorgeschlagen. Die erarbeiteten matematischen Modelle der Meßfehler wurden bei der Bestimmung der optimalen Regimeparameter der Meßmethode und der rationalen Konstruktionsgrößen der Meßeinrichtung für die experimentellen Messung der Charakteristiken der Feuchteübertragung verwendet.

Choix des conditions optimales de la mesure des caractéristiques du transfert de la chaleur dans les tôles fines capillaires et poreuses par la méthode de la source «instantanée» de l'humidité

Résumé: Sont proposés les calculs, les dépendances et les algorithmes pour la mesure de la grandeur du coefficient de la diffusion de l'humidité dans une tôle fine capillaire et poreuse. Les modèles mathématiques des erreurs des mesures élaborés sont utilisés lors de la définition des régimes optimaux des paramètres de régime de la méthode de mesure et des dimensions rationnelles de construction du dispositif pour la mesure des caractéristiques du transfert de la chaleur.

Авторы: *Мочалин Сергей Николаевич* – аспирант кафедры «Управление качеством и сертификация»; *Исаева Ирина Николаевна* – аспирант кафедры «Управление качеством и сертификация»; *Пономарев Сергей Васильевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Управление качеством и сертификация», ГОУ ВПО «ТГТУ».

Рецензент: *Коновалов Виктор Иванович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Химическая инженерия», ГОУ ВПО «ТГТУ».
