

**МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ДИФФУЗИИ ВЛАГИ
В ТОНКОЛИСТОВЫХ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ
МАТЕРИАЛАХ**

В данной работе рассматривается математическая основа метода измерения коэффициента диффузии влаги в тонколистовых капиллярно-пористых материалах (КПМ). В литературе [1] описан метод измерения коэффициента теплопроводности, сущность которого заключается в подаче мгновенного импульса теплоты и регистрации времени появления максимума температуры на заданном расстоянии r от точки подачи импульса. Этот подход можно применить для измерения коэффициента диффузии. При практическом проведении этого эксперимента на точность определения времени наступления максимума влияет «размытость» вершины отклика образца на импульсное воздействие, что вносит погрешность в определение времени наступления максимального влагосодержания на заданном расстоянии r . Данную проблему можно решить посредством использования не точки максимума, а промежуточной точки времени между началом эксперимента и максимальным значением влагосодержания. В данной статье приведено математическое описание метода, который позволяет определить коэффициент диффузии по координатам любой точки отклика и не требует градуировки датчика локального влагосодержания (достаточно только знать, что в измеряемом диапазоне влагосодержаний статическая характеристика датчика линейна).

При определенных допущениях математическая модель процесса диффузии в листе капиллярно-пористого материала запишется в виде:

$$\frac{\partial U(r, \tau)}{\partial r} = a_m \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{\partial U(r, \tau)}{\partial r} \right] + \frac{W}{\rho_0} \delta(x) \delta(\tau), \quad \tau > 0, \quad 0 \leq r < \infty; \quad (1)$$

$$U(r, 0) = U_0^H; \quad (2)$$

$$\frac{\partial U(0, \tau)}{\partial r} = 0; \quad (3)$$

$$U(\infty, \tau) = U_0^H, \quad (4)$$

где $U(r, \tau)$ – влагосодержание в плоскости с координатой r в момент времени τ ; a_m – искомый коэффициент диффузии; $\delta(x)$, $\delta(\tau)$ – дельта-функция Дирака; U_0^H – начальное влагосодержание в материале; ρ_0 – плотность сухого материала; W – количество введенной в образец влаги, приходящееся на единицу толщины листа КПМ.

Решение задачи (1) – (4) выглядит следующим образом [2]

$$U(r, \tau) = \frac{W}{4\pi a_m \rho_0 \tau} \exp\left[-\frac{r^2}{4a_m \tau}\right]. \quad (5)$$

Обозначим (рис. 1) координаты некоторой точки на зависимости влагосодержания от времени как (U', τ') , координаты точки максимума как (U_{\max}, τ_{\max}) , и введем соотношение

$$\alpha = \frac{U' - U_0^H}{U_{\max} - U_0^H}. \quad (6)$$

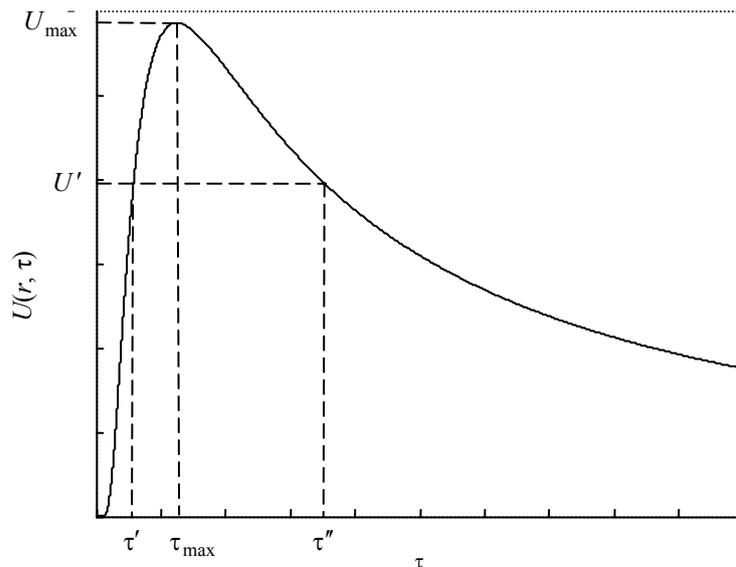


Рис. 1. Отклик образца на импульсное воздействие

При условии, что статическая характеристика датчика локального влагосодержания линейна $E = kU + b$, где E – выходной сигнал датчика локального влагосодержания, U – влагосодержание, то соотношение (6) можно записать следующим образом

$$\alpha = \frac{E' - E_0^H}{E_{\max} - E_0^H}, \quad (7)$$

где E' – сигнал датчика локального влагосодержания, соответствующий влагосодержанию U' ; E_{\max} – сигнал датчика локального влагосодержания, соответствующий влагосодержанию U ; E_0^H – сигнал датчика локального влагосодержания, соответствующий влагосодержанию U_0^H .

Учитывая приведенные выше соотношения, а также то, что одному значению α соответствуют два момента времени τ' , τ'' (до и после максимума), формулы, выражающие зависимость коэффициента диффузии от времени τ' , τ'' и α , запишутся следующим образом:

$$a_m = \frac{r^2}{4z'\tau'}; \quad (8)$$

$$a_m = \frac{r^2}{4z''\tau''}, \quad (8a)$$

где r – координата размещения датчика локального влагосодержания; τ' , τ'' – моменты времени, соответствующие влагосодержанию U' – до наступления точки максимума (во время нарастания влагосодержания) и после (во время убывания влагосодержания), соответственно;

z' , z'' – соответственно больший и меньший корни уравнения

$$z \exp(1-z) = \alpha. \quad (9)$$

Среднеквадратическая погрешность косвенного измерения может быть определена по следующей формуле

$$\delta a_m = \sqrt{4\delta^2 r + \delta^2 \tau' + \left[\frac{1}{z(\alpha)} \frac{dz(\alpha)}{d\alpha} \alpha \right]^2 \delta^2 (U_{\max} - U_0) \left[\frac{1 + \alpha^2}{\alpha^2} \right]}, \quad (10)$$

где δr – относительная погрешность измерения координаты расположения датчика локального влагосодержания; $\delta \tau'$ – относительная погрешность измерения времени; $\delta(U_{\max} - U_0)$ – относительная погрешность датчика локального влагосодержания.

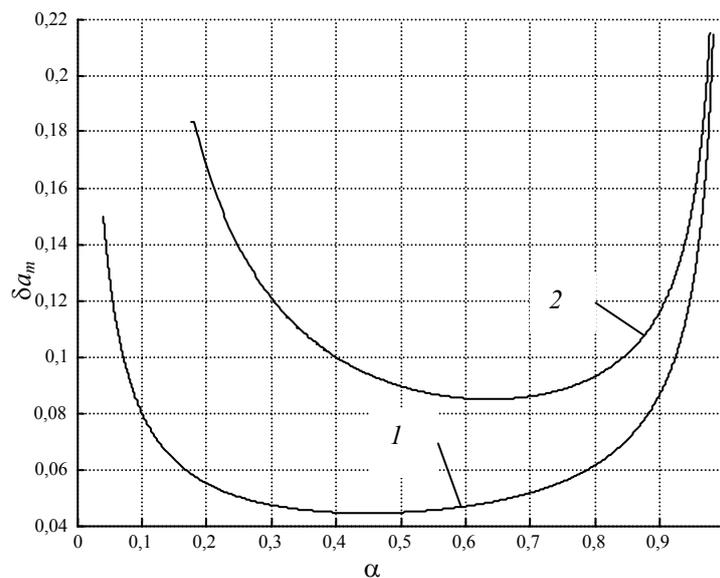


Рис. 2. Зависимость относительной погрешности определения коэффициента диффузии δa_m от значения величины α при использовании:

1 – формулы (8); 2 – формулы (8a)

Проведенные по модели (10) расчеты показали (см. рис. 2), что минимальная погрешность достигается в случае использования расчетной формулы (8) при значении $\alpha \approx 0,45$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пономарев, С.В. Теоретические и практические аспекты теплофизических измерений : монография : в 2 кн. / С.В. Пономарев, С.В. Мищенко, А.Г. Дивин. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2006. – Кн. 1. – 204 с.
2. Лыков, А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков. – М. : Высшая школа, 1967. – 600 с.