

09;12

## Метод контроля влагосодержания при непосредственном сверхвысокочастотном нагреве

© А.В. Марков, Ю.П. Юленец

С.-Петербургский государственный технологический институт  
(технический университет)  
E-mail: julenez@yandex.ru

Поступило в Редакцию 7 июля 2004 г.

Рассмотрен метод контроля влагосодержания однородных (однослойных) и составных (двуслойных) материалов при непосредственном сверхвысокочастотном (СВЧ) нагреве. Метод предусматривает СВЧ-нагрев в течение короткого промежутка времени, измерение достигнутых значений температуры в толще материалов (числом, равным числу слоев), процедуру вычисления влагосодержаний с помощью зависимостей, учитывающих потери мощности падающей электромагнитной волны.

СВЧ-термообработка — наиболее эффективный способ борьбы с вредителями (грибки, жучки, термиты) в материалах строительных конструкций, так как позволяет вести нагрев не только на их поверхности, но и в глубине. Практическая реализация способа предусматривает применение лучевой СВЧ-камеры открытого типа [1,2]. Для того чтобы задать требуемый режим термообработки, необходимо в числе других параметров знать начальное влагосодержание материала. Методы измерения влагосодержаний однородных материалов достаточно разработаны [3–5]. Методов контроля влагосодержания неоднородных материалов, в частности двуслойных, и тем более материалов с неограниченным объемом (стены, перекрытия, перегородки, полы) не существует. Между тем закономерности СВЧ-нагрева позволяют предложить сравнительно простой метод косвенного контроля влагосодержания.

Будем считать, что в эффективной площади раскрыва рупорный излучатель генерирует плоскую электромагнитную (ЭМ) волну. Без учета влияния сушки уравнения для распределения температуры в двуслойном материале, облучаемом плоской ЭМ-волной при ее нор-

мальном падении на полупространство ( $x > 0$ ), имеют вид:

$$\frac{\partial T_1}{\partial \tau} = a_{T1} \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + \frac{p_1(x, W_1)}{c_1 \rho_1}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial \tau} = a_{T2} \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + \frac{p_2(x, W_1, W_2)}{c_2 \rho_2}. \quad (2)$$

Здесь  $T_1, T_2$  — локальные температуры слоев — от поверхности в глубь материала;  $x$  — координата;  $a_{T1}, a_{T2}$  — коэффициенты теплопроводности слоев;  $c_1, \rho_1, c_2, \rho_2$  — соответственно теплоемкости и плотности слоев;  $p_1, p_2$  — удельные мощности выделяющейся в слоях СВЧ-энергии.  $W_1, W_2$  — влагосодержания слоев материалов,  $\tau$  — время.

Краевые условия к (1), (2) имеют вид

$$T_1 = T_2 = T_0 \quad \text{при} \quad \tau = 0, \quad (3)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=\sigma_1} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x=\sigma_1}, \quad (4)$$

$$T_1 \Big|_{x=\sigma_1} = T_2 \Big|_{x=\sigma_1}, \quad (5)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=0} = k_0 (T_1 \Big|_{x=0} - t_{\text{sur}}), \quad (6)$$

где  $\sigma_1$  — толщина первого (внешнего) слоя,  $\lambda_1, \lambda_2$  — коэффициенты теплопроводности слоев,  $k_0$  — коэффициент теплоотдачи,  $t_{\text{sur}}$  — температура среды. Мощности, выделяющиеся в слоях, равны [6–8]:

$$p_1(x, W_1) = 2\alpha_1(W_1)p_{01}[1 - \gamma_1(W_1)] \exp[-2\alpha_1(W_1)x], \quad 0 \leq x \leq \sigma_1, \quad (7)$$

$$p_2(x, W_1, W_2) = 2\alpha_2(W_2)p_{02} \exp[-2\alpha_2(W_2)(x - \sigma_1)], \quad x > \sigma_1, \quad (8)$$

где  $\alpha_1, \alpha_2$  — коэффициенты затухания ЭМ-волны в первом и втором слоях,  $\gamma_1$  — коэффициент отражения ЭМ-волны от первого слоя;  $p_{01}, p_{02}$  — плотности потока падающей на слои СВЧ-энергии (мощности).

Мощность, падающая на второй слой, может быть вычислена по формуле

$$p_{02} = p_{01}[1 - \gamma_1(W_1)] \exp[-2\alpha_1(W_1)\sigma_1]. \quad (9)$$

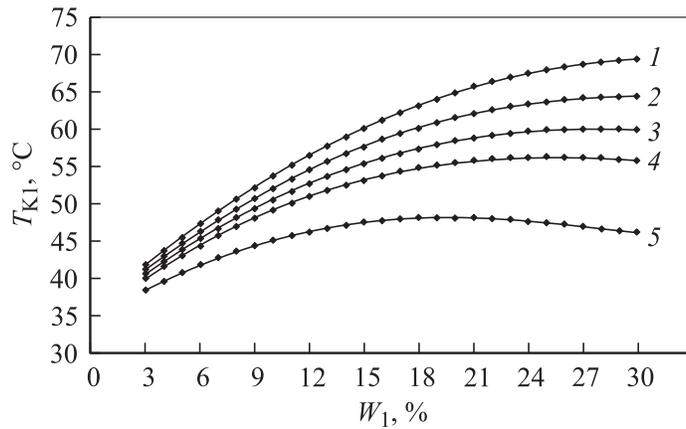
В случае скоростного СВЧ-нагрева в течение короткого промежутка времени распространением тепла внутри тела за счет теплопроводности можно пренебречь:  $\frac{\partial T}{\partial \tau} \gg a_T \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$ . Тогда скорости тепловыделения будут зависеть только от коэффициентов затухания и отражения (являющихся функциями от соответствующих влагосодержаний), а уравнения (1)–(4) решаются аналитически:

$$T_{K1}(W_1, x, \tau_{\text{rad.}}) = T_0 + \frac{2\alpha_1(W_1)p_{01}[1 - \gamma_1(W_1)]\tau_{\text{rad.}}}{c_1\rho_1} \exp[-2\alpha_1(W_1)x], \quad (10)$$

$$T_{K2}(W_2, x, \tau_{\text{rad.}}) = T_0 + \frac{2\alpha_2(W_2)p_{02}[1 - \gamma_2(W_1)]\tau_{\text{rad.}}}{c_2\rho_2} \times \exp[-2\alpha_2(W_2)(x - \sigma_1)]. \quad (11)$$

С помощью соотношений (10) и (11) при известных электрофизических свойствах слоев материалов (зависимостях  $\alpha(W)$  и  $\gamma(W)$ ) можно определить конечные (достигаемые за фиксированное время СВЧ-облучения  $\tau = \tau_{\text{rad.}}$  и на фиксированной глубине  $x$ ) значения температур  $T_{K1}$  и  $T_{K2}$ , которые будут различны для материалов различной влажности. Таким образом, метод определения влагосодержаний сводится к контрольному СВЧ-нагреву (облучению) двуслойного материала в течение короткого промежутка времени  $\tau_{\text{rad.}}$ , последующему (после отключения СВЧ-источника) измерению двух достигнутых значений температуры в толще слоев  $T_{K1}$  и  $T_{K2}$  и вычислению искомых величин  $W_1$  и  $W_2$  по формулам (10) и (11). Для исключения погрешности, обусловленной неравномерностью диаграммы направленности рупорного излучателя, измерения температур  $T_{K1}$  и  $T_{K2}$  следует производить в точках на глубине, проходящих через его ось симметрии. На рис. 1, 2 показаны примеры реализации изложенного метода.

Можно видеть, что при больших глубинах измерения зависимости  $W_1(T_{K1})$  и  $W_2(T_{K2})$  получаются неоднозначными. Действительно, с увеличением влагосодержания коэффициент затухания возрастает, а подводимая к толще материала мощность падает. Сначала (при малых влагосодержаниях) рост коэффициента затухания превалирует и температура материала во всей его глубине (толщине) возрастает. При больших влагосодержаниях все сильнее начинает сказываться эффект уменьшения подводимой к данной глубине (толще) материала

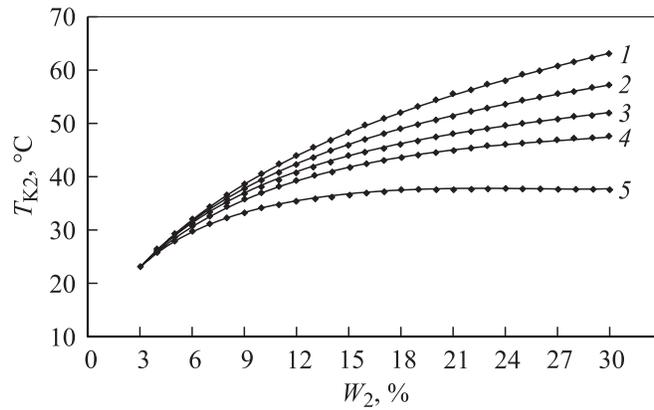


**Рис. 1.** Экспресс-оценка влагосодержания по достигнутому за контрольное время СВЧ-нагрева значению температуры  $T_{к1}$ . Двуслойная структура гипсовая штукатурка–кирпичная кладка : I слой (штукатурка),  $T = 20^\circ\text{C}$ ,  $\tau_{\text{rad.}} = 60 \text{ s}$ ,  $p_{01} = 70.4 \text{ kW/m}^2$  (локальное по оси симметрии рупорного излучателя значение потока мощности на поверхности облучаемого материала): 1 —  $x = 0$ , 2 —  $x = 5 \text{ mm}$ , 3 —  $x = 10 \text{ mm}$ , 4 —  $x = 15 \text{ mm}$ , 5 —  $x = 30 \text{ mm}$ . Примечание: влагосодержание рассчитано на массу абсолютно сухого материала.

СВЧ-энергии. Поскольку значительная доля СВЧ-энергии поглощается уже в поверхностных слоях материала, рост температуры на больших глубинах замедляется (рис. 1, кривые 4, 5; рис. 2, кривая 5). Учитывая известные трудности точного определения коэффициента теплоотдачи, измерение достигнутых значений температуры в рамках описанного метода следует производить на небольшом заглублении от поверхностей слоев.

Для выбора параметра  $\tau_{\text{rad.}}$  воспользуемся условием адиабатического приближения, когда распространением тепла внутри тела за счет теплопроводности можно пренебречь. Условие применимости адиабатического приближения имеет вид:  $\frac{\partial T}{\partial \tau} \gg a_T \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$  или, согласно [6]:

$$\tau_{\text{rad.}} \ll \frac{1}{4\alpha^2 a_T}. \quad (12)$$

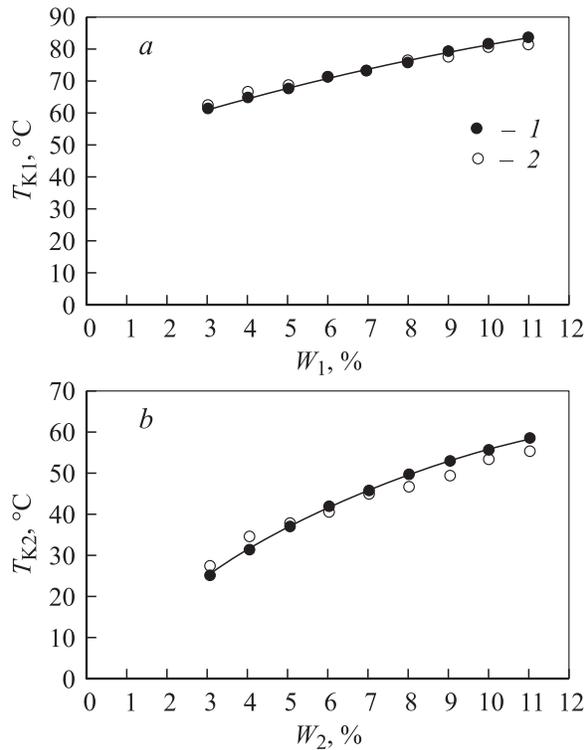


**Рис. 2.** Экспресс-оценка влагосодержания по достигнутому за контрольное время СВЧ-нагрева значению температуры  $T_{K2}$ . Двуслойная структура гипсовая штукатурка–кирпичная кладка : П слой (кирпич),  $T = 20^\circ\text{C}$ ,  $\tau_{\text{rad.}} = 60\text{ s}$ ,  $p_{01} = 70.4\text{ kW/m}^2$  (локальное по оси симметрии рупорного излучателя значение потока мощности на поверхности облучаемого материала):  $W = 10\%$ ,  $\sigma_1 = 35\text{ mm}$ : 1 —  $x = 35\text{ mm}$ , 2 —  $x = 40\text{ mm}$ , 3 —  $x = 45\text{ mm}$ , 4 —  $x = 50\text{ mm}$ , 5 —  $x = 65\text{ mm}$ . Примечание: влагосодержание рассчитано на массу абсолютно сухого материала.

Заметим, что условие (12) не зависит от вводимой мощности. Вклад слагаемого, ответственного за теплопроводность, будет менее 5%, если

$$\tau_{\text{rad.}} < \tau_{\text{max}} = \frac{0.05}{4\alpha^2 a_T}. \quad (13)$$

Например, для кирпичной кладки с влагосодержанием  $W = 15\%$  максимальное допустимое время облучения составляет  $\tau_{\text{max}} = 124\text{ s}$ . При уменьшении влагосодержания параметр  $\tau_{\text{max}}$  возрастает. Однако при больших временах облучения искажения в результате измерений может внести сушка, поскольку температура поверхности материала будет приближаться к  $100^\circ\text{C}$ . Так, при стандартных параметрах СВЧ-нагрева (удельной мощности  $p_{01} = 70.4\text{ kW/m}^2$ , соответствующей мощности генератора  $P = 0.75\text{ kW}$ , работающего на стандартной частоте  $f = 2450\text{ MHz}$ ) температура поверхности гипсовой штукатурки с влагосодержанием  $W = 15\%$  достигнет  $100^\circ\text{C}$  за время  $\tau_{\text{rad.}} = 120\text{ s}$ . Этот



**Рис. 3.** Экспресс-оценка влагосодержания методом СВЧ-нагрева (1) в сопоставлении с данными непосредственных измерений (2). Двуслойная структура гипсовая штукатурка–кирпичная кладка:  $T = 20^\circ\text{C}$ ,  $p_{01} = 70.4 \text{ kW/m}^2$ : *a* — штукатурка,  $x = 10 \text{ mm}$ ,  $\tau_{\text{rad.}} = 120 \text{ s}$ ; *b* — кирпичная кладка,  $\sigma_1 = 35 \text{ mm}$ ,  $x = 45 \text{ mm}$ ,  $\tau_{\text{rad.}} = 120 \text{ s}$ .

пример также показывает, что для материалов большой влажности время облучения не следует выбирать значительным.

С другой стороны, при малых временах облучения нагрев будет слабым и разница в достигнутых температурах материалов различной влажности окажется несущественной. Так, для двуслойной системы штукатурка–кирпичная кладка при той же мощности ( $p_{01} = 70.4 \text{ kW/m}^2$ ) и влагосодержании штукатурки  $W_1 = 10\%$  для вре-

мени  $\tau_{\text{rad.}} = 20$  с разница в достигнутых температурах второго слоя (кирпичной кладки), измеренных на глубине 10 мм от поверхности этого слоя и отличающихся по влажности друг от друга на 1%, составит всего 0.5 К.

Приведенные оценки показывают, что при практическом использовании метода контроля влагосодержания параметр  $\tau_{\text{rad}}$  можно определять из простого соотношения

$$\tau_{\text{rad.}} = 0.8 - 0.9\tau_{\text{max}}. \quad (14)$$

На рис. 3 значения влагосодержаний двухслойной структуры, полученные в соответствии с описанным методом, сопоставлены с результатами непосредственных измерений. Относительная среднеквадратичная погрешность метода не превышает 6.5%.

## Список литературы

- [1] СВЧ-энергетика / Под ред. Э. Окресса. М.: Мир, 1971. Т. 2. 312 с.
- [2] *Архангельский Ю.С.* СВЧ-электрометрия. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 1998. 408 с.
- [3] *Берлинер М.А.* Измерения влажности. М.: Энергия, 1973. 400 с.
- [4] *Беренцевейг Р.А., Шевченко В.В.* // Инженерно-физический журнал. 1968. Т. 14. № 6. С. 1079–1085.
- [5] *А.С. 324567 СССР МКИ<sup>3</sup> G01 N.* Устройство для контроля влажности в процессе сушки материалов / И.И. Девяткин и др.; Оpubл. Бюл. 1972. № 2.
- [6] *Рикенглаз Л.Э.* // Инженерно-физический журнал. 1971. Т. 27. № 6. С. 1061–1068.
- [7] *Диденко А.Н., Зверев Б.В.* СВЧ-энергетика. М.: Наука, 2000. 264 с.
- [8] *Марков А.В., Бубнов А.В.* // Материалы 16 Междун. научн. конф. „Математические методы в технике и технологиях (ММТТ-16)“. СПб: СПб госуд. технол. ин-т (техн. ун-т), 2003. Т. 10. Секц. 11. С. 83–84.