

**Лисовский В.В., к.т.н., Булко М.И.**  
*УО «Белорусский государственный аграрный технический университет», г. Минск, Республика Беларусь*

## **АВТОМАТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ВЛАЖНОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ СВЧ- АКУСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ**

**Аннотация.** Рассматривается автоматический контроль влажности сельскохозяйственных материалов СВЧ-акустическим методом.

Как правило в СВЧ-влажнометрии сельскохозяйственных материалов используют одно- и двухпараметровые методы измерения, ввиду их относительной простоты. Эти методы основаны на использовании одной или двух величин, характеризующих определенные параметры электромагнитного поля СВЧ, функционально связанные с влажностью материала.

В [1] было показано, что влажность  $W$ , коэффициент заполнения  $\Phi$ , температура  $T$  и концентрация солей  $C$  оказывают наиболее сильное влияние на диэлектрические характеристики влагосодержащих материалов. Тогда для нахождения влажности с учетом указанных параметров система уравнений запишется:

$$\begin{aligned}x_1 &= F_1(W, \Phi, T, C), \quad x_2 = F_2(W, \Phi, T, C) \\x_3 &= F_3(W, \Phi, T, C), \quad x_4 = F_4(W, \Phi, T, C)\end{aligned}\quad (1)$$

В таком виде эта система не имеет решения, т.к. нам известно только два независимых параметра преобразования - коэффициент затухания  $a$  (или  $\epsilon''$ ) и фазовая постоянная  $\beta$  (или  $\epsilon'$ ). В (1) можно убрать один параметр - концентрацию солей  $C$ , снизив его влияние на  $X$  до величин второго порядка малости соответствующим выбором частоты. Для крупнодисперсных влажных материалов закон изменения  $a$ ,  $\beta$ ,  $\epsilon''$  и  $\epsilon'$  от температуры известен. Анализ работ по СВЧ-влажнометрии, сделанный в [1] показывает, что коэффициент заполнения  $\Phi$  является наиболее значимым параметром, который относят к "мешающим факторам". Поэтому произведем комплексирование параметров  $a$  и  $\beta$  с целью получения параметра преобразования, независимого от  $\Phi$ . Сократив систему (1) до двух уравнений и подставив значения  $a$  и  $\beta$  из [1], получим

$$\alpha = \Phi \frac{\rho_0 W}{\rho_H (1-W)} x \alpha_H; \beta = \Phi \left[ \frac{\rho_0}{\rho_H} \frac{W}{(1-W)} (\beta_H - \beta_0) + (\beta_c - \beta_0) \right] \quad (2)$$

Эта система решается относительно  $W$  с исключением  $\Phi$

$$W = \left\{ 1 - \frac{\rho_0}{\rho_H} \left[ \frac{\beta_H - \beta_0}{\beta_c - \beta_0} - \frac{\alpha_H}{\alpha} \left( \frac{\beta - \beta_0}{\beta_c - \beta_0} \right) \right] \right\}^{-1} \quad (3)$$

Второй способ состоит в исключении  $\Phi$  из этих двух уравнений без выделения в явной форме  $W$ .

Поделив уравнение  $a$  на  $\beta$  в (8) приходим к  $A$ -параметру [2], независящему от коэффициента заполнения

$$A(W) = \frac{\alpha}{\beta_H - \beta_0} = \frac{\alpha_H(W)}{\beta_H(W) - \beta_0 + \frac{\rho_H}{\rho_0} (\beta_c - \beta_0) \left( \frac{1}{W} - 1 \right)} \quad (4)$$

Зависимости  $a_H(W)$  и  $\beta_H(W)$  отражают тот факт, что по мере увлажнения материала меняется количественное соотношение между различными формами влаги в материале.

В [1] показано, что с учетом связи между комплексной Диэлектрической проницаемостью влагосодержащего материала и коэффициентами  $a$  и  $\beta$  можно получить другую полезную для практических целей форму записи  $A$ -параметра:

$$A(W) = 0.5K\varepsilon''/\varepsilon' - 1, \quad (5)$$

Так как  $\varepsilon''$  и  $\varepsilon'$  являются функциями температуры, то и  $A(W)$  также зависит от температуры.

Если теперь поставить задачу комплексирования трех параметров, чтобы устранить влияние температуры, то на наш взгляд, решить эту задачу аналитически не представляется возможным, т.к. температура входит в выражения для  $\varepsilon''$  влажного материала в сложном виде.

Решение этой задачи состоит в минимизации степени влияния температуры на  $A$ -параметр, путем оптимизации частоты. На рис.1 приведены результаты расчета зависимости  $A$ -параметра от влажности для кварцевого песка различной плотности. Аналогичные зависимости получены авторами для чая и резаного табака, причем плотность (коэффициент заполнения) изменялась в 2,5-3 раза. Во всех трех случаях до определенной критической влажности наблюдалось отсутствие влияния плотности на результат измерения

влажности по  $A$ -параметру. В то же время при влажности больше некоторой критической наблюдалось резкое снижение чувствительности и неоднозначность в определении содержания влаги. Теоретическое объяснение этому факту дано в работе [2].

Как уже указывалось выше на параметр преобразования в СВЧ-методах в первую очередь оказывает влияние влажность и лишь затем плотность (коэффициент заполнения) и температура. Если влияние температуры можно уменьшить до допустимых классов точности прибора пределов, например, введением автоматической температурной коррекции, либо, как в случае с  $A$ -параметром выбором рабочей частоты, то влиянием переменной плотности, особенно при поточных измерениях, пренебречь невозможно.

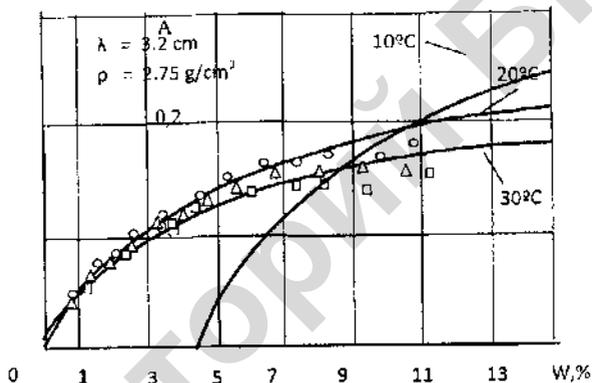


Рис.1 Зависимость  $A$ -параметра для кварцевого песка от влажности и температуры на длине волны  $\lambda = 3,2$  см. Результаты эксперимента: o -  $\rho_0 = 2,75 \text{ g/cm}^3$ ;  $\Delta$  -  $\rho_0 = 2,47 \text{ g/cm}^3$ ;  $\square$  -  $\rho_0 = 2,28 \text{ g/cm}^3$

Частично эта задача решается в двухпараметровых СВЧ-методах, а также при измерении  $A$ -,  $B$ - и  $C$ -параметров, теоретически зависящих только от влажности (при автоматической температурной коррекции) [1]. Однако, в ряде случаев наблюдается неоднозначность в определении влажности материалов переменной плотности по  $A$ -параметру, особенно в области высоких влагосодержаний [1-3]. Попытки применения комбинированного амплитудно-фазового метода, а также других СВЧ-методов на основе измерения  $B$ - и  $C$ -параметров также не всегда позволяют существенно повысить точность измерений влажности материала в по-

токе при значительных колебаниях его плотности. Например, в случаях поточных измерений влажности табака, чая, хлопка и подобных материалов.

В то же время результаты исследования ультразвукового метода измерения влажности твердых сыпучих материалов [4], что стало возможным с разработкой при участии авторов пьезокерамических приемников-излучателей для газовой среды, показали возможность создания акустических влагомеров. Причем в отличие от СВЧ-методов чувствительность к изменению плотности у акустических методов оказалась на порядок выше чем чувствительность к влажности. Это обстоятельство подсказало идею создания комбинированного СВЧ-акустического метода измерения влажности материалов переменной плотности.

Сущность предлагаемого способа заключается в измерении влажности табака на основе резонаторного двухпараметрового метода с коррекцией по плотности, путем введения коэффициентов  $\kappa_1$  и  $\kappa_2$ , получаемых на основе измерения амплитуды  $\Delta U$  и фазы  $\Delta \varphi$  акустической волны, прошедшей через данный материал.

Т.е. фактически мы должны решить систему как минимум трех уравнений с тремя неизвестными:  $\Delta N = \varphi_1(W, \Phi, t)$ ,  $\Delta f = \varphi_2(W, \Phi, t)$ ,  $\Delta U = \varphi_3(W, \Phi, t)$ , а также  $\Delta \tau = \varphi_4(W, \Phi, t)$ . Последнее выражение вносит структурную избыточность, что позволяет дополнительно повысить достоверность измерений. В [4] приведено выражение, связывающее четыре измеряемых параметра с влажностью материала  $W$ . Оно позволяет избавиться от необходимости решения системы уравнений со структурной избыточностью:

$$W = F \left[ \frac{\exp\left(\frac{\Delta N \ln U_0 / U_1 k_1}{8,686}\right) - 1}{\Delta f} \tau_0 / \tau_1 k_2 \right] \quad (6)$$

где  $F$  - обратная функция от измеряемых параметров, связанных с влажностью;

$\Delta N$  - переходное ослабление резонатора, дБ;

$U_0$  - амплитуда напряжения зондирующего импульса пьезоприемника в отсутствие материала, мВ;

$U_1$  - амплитуда напряжения зондирующего импульса пьезоприемника прошедшего через материал, мВ;

$\tau_0$  - время прохождения зондирующего импульса в отсутствие материала, мс;

$\tau_1$  - время прохождения зондирующего импульса с материалом в резонаторе, мс;

$\Delta f$  - смещение частоты резонатора, ГГц;

$\kappa_1$  и  $\kappa_2$  - коэффициенты, являющиеся константами для данного материала.

Реализован данный способ измерения в резонаторном СВЧ-влажномере табака, основанном на измерении  $A$ -параметра [4]. Причем в диапазоне влажности табака 8...12% коррекция на изменение плотности от  $0,2\text{г/см}^3$  до  $0,5\text{г/см}^3$  не требуется. При больших влажностях вносится дополнительная коррекция на изменение плотности путем измерения параметров акустической волны прошедшей через материал. Абсолютная погрешность измерения влажности при этом не превышала 0,5%.

Выводы:

Комбинированные СВЧ-акустические методы позволяют существенно повысить точность измерения влажности материалов переменной плотности при непрерывном и дискретном контроле.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лисовский В.В. «Теория и практика сверхвысокочастотного контроля влажности сельскохозяйственных материалов» - Минск: БГАТУ, 2005.-292с.

2. Igor Renhart, Boris Tsentsiper, Dielectric Properties of Bulk Materials and Restrictions to the Application of Two-Parameter Microwave Aquametry. 6Th International Conference on «Elektromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances». -Weimar, Germany, 2005 -pp. 481-488.

3. Lisovsky, V. The Automatic Control of Moisture in Agricultural Products by Methods of Microwave Aquametry / V. Lisovsky // Measurement Science and Technology - 18 (2007).- pp. 1016-1021.

4. Лисовский В.В. Положительное решение на выдачу патента РБ по заявке на изобретение № а20090332 от 27.01.2011г. «Способ измерения влажности материалов переменной плотности».