

Если бы такая зависимость отсутствовала и  $\Phi$  оставая постоянным при любых влажностях, то зависимость  $\varepsilon$  от  $W$  при  $V \sim W > W_{кр}$  была бы степенной функцией 2-го порядка (т.к.  $\frac{W}{1-W} \sim W[1+W]$ ).

Таким образом, предлагаемая математическая модель диэлектрической проницаемости влажного зерна позволяет учитывать основные процессы физической адсорбции, предсказать два пика диэлектрической релаксации воды в зерне, объяснить ее аномальные свойства (положительный температурный коэффициент) и рассчитать зависимость комплексной диэлектрической проницаемости от влажности и температуры в сантиметровом диапазоне электромагнитных волн.

### Литература

1. Бензарь В.К. Техника СВЧ-влажнометрии.-Мн. Высшэйшая школа, 1974. - 352с.
2. Секанов Ю.П. Влажометрия сыпучих и волокнистых материалов. - М.: ВИМ, 2001.-190с.
3. Болдырев В.М. Патрушев В.Л. Результаты исследования влажностной зависимости диэлектрических параметров зерна сильных пшениц на СВЧ.- В сб.: Исследования по математике, физике и химии.- Саратов, 1978, -С.12-23.
4. Бородин И.Ф. и др. Методика исследования электрических свойств зерновой массы в диапазоне частот 0-10<sup>10</sup> Гц. Сборник научных трудов МИИСП.- М., 1976, -С.30-35.
5. Nelson, S. O., Dielectric properties of agricultural products — Measurements and applications. CEJDP Digest of Literature on Dielectrics, IEEE Trans. Elect. Insul., 1991, 26(5), 845-869.
6. Розенберг В.Н. Рассеяние и ослабление электромагнитного излучения атмосферными частицами.- Л.: Гидрометеоздат, 1972, -348с.

## РЕЗОНАТОРНЫЕ УСТРОЙСТВА КОНТРОЛЯ ВЛАЖНОСТИ ВЫСОКОГО КЛАССА ТОЧНОСТИ В ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЯХ АПК

Лисовский В.В., Булко М.И (БГАТУ) г. Минск

В большинстве энергоемких технологических процессах при производстве, переработке и хранении сельскохозяйственной продукции требуется экспрессный и точный контроль влажности. Широкое применение для

этих целей получили сверхвысокочастотные методы и приборы на их основе. Это объясняется целым рядом преимуществ микроволнового диапазона для целей влагометрии и, в первую очередь, возможностью создания необходимого в сельскохозяйственном производстве типажа экспресс-влагомеров высокого класса точности.

Технологические процессы производства сахара, сухого молока, казеина и некоторых других сыпучих сельскохозяйственных материалов требуют точного контроля влажности исходного сырья и готовой продукции в диапазоне малых и сверхмалых влагосодержаний, что возможно на основе применения резонаторных методов СВЧ-влагометрии.

Резонаторные преобразователи обычно основаны на измерении добротности  $Q$  или ухода частоты  $\Delta f$  резонатора, частично заполненного влажным материалом (метод малых возмущений).

Получим общие соотношения связывающие резонаторные параметры преобразования и комплексную диэлектрическую проницаемость влагосодержащего материала  $\epsilon^*$ . Примем, что резонаторная частота невозмущенного резонатора (в отсутствии образца)  $\omega_0$ , а при наличии образца в резонаторе  $\omega$ ; изменение резонансной частоты объемного резонатора определяется известным выражением [2]:

$$\frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} \approx - \frac{\int_V (\epsilon^* - 1) \bar{E}_0|^2 dV}{2 \int_V (\bar{E}_0)^2 dV} \quad (1)$$

где  $\bar{E}_0$  — вектор напряженности электрического поля,

$V$  — объем резонатора.

Известно также [2], что  $\omega'' = \omega' / 2Q_{od}$

где  $Q_{od}$  — ненагруженная добротность возмущенного резонатора.

Для резонаторов с высокой добротностью  $\omega_0'' \ll \omega_0'$ . Кроме того, в методе малых возмущений  $\frac{\omega' - \omega_0'}{\omega_0'} \ll 1$ . С учетом сделанных замечаний — получаем

выражения для  $\epsilon''$  и  $\epsilon'$

$$\epsilon'' = \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{Q_{od}} - \frac{1}{Q_0} \right] \frac{\int_V |\bar{E}_0|^2 dV}{\int_V |\bar{E}_0|^2 dV} \quad (2)$$

$$\epsilon' = 1 + \frac{\Delta\omega}{\omega_0} \frac{\int_V |\vec{E}_0|^2 dV}{\int_{\Delta V} |\vec{E}_0|^2 dV} \quad (3)$$

В реальных условиях объемный резонатор всегда связан с фидерной системой СВЧ -тракта влагомера, поэтому контролируется обычно ненагруженная добротность  $Q_H$  объемного резонатора. Учитывая, что

$$Q_H^{-1} = Q_0^{-1} - Q_{\infty}^{-1} \quad \text{для } \epsilon'' \text{ получаем:}$$

$$\epsilon'' = \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{Q_{Hd}} - \frac{1}{Q_H} \right] \frac{\int_V |\vec{E}_0|^2 dV}{\int_{\Delta V} |\vec{E}_0|^2 dV} \quad (4)$$

Для цилиндрических резонаторов с возбуждением на волне  $E_{010}$  приведенные соотношения будут иметь вид:

$$\epsilon' = 1 + 0,27 \frac{\Delta\omega}{\omega_0} \frac{a^2}{d^2 [1 + 1,2d^2/a^2]} \quad (5)$$

$$\epsilon'' = 0,135 \left[ \frac{1}{Q_{Hd}} - \frac{1}{Q_H} \right] a^2/d^2 [1 + 1,2d^2/a^2] \quad (6)$$

где  $a$  — радиус резонатора,

$d$  — диаметр образца.

Рассмотрим параметр преобразования при включении резонатора по проходной схеме. При таком включении резонатор имеет два элемента связи (на входе и на выходе). В этом случае переходное ослабление резонатора будет задаваться выражением [2]:

$$\Delta N = N_1 - N_0 = 20 \lg \frac{Q_{HO}}{Q_{Hd}} = 8,686 \ln \left( 1 + \frac{2Q_{HO}}{B} \epsilon'' \right) \quad (7)$$

где  $B$  — коэффициент, зависящий от типа резонатора.

Для нахождения связи между  $\Delta N$  и  $W$  воспользуемся линейной моделью, при этом учтем, что в диапазоне малых и сверхмалых влагосодержаний  $\epsilon_c''$  собственно сухого материала может оказаться сравнимым с  $\epsilon_n''$  вызванным водой в образце:

$$\frac{\pi}{\lambda} \frac{\epsilon_n''}{\sqrt{\epsilon_n}} \Phi \frac{\rho_c}{\rho_H} W + \frac{\pi}{\lambda} \frac{\epsilon_c''}{\sqrt{\epsilon_c}} \Phi = \frac{\pi}{\lambda} \frac{\epsilon''}{\sqrt{\epsilon''}}, \text{ откуда находим} \quad (8)$$

$$\epsilon'' = \Phi \left( \frac{\rho_c}{\rho_H} \frac{\epsilon_n''}{\sqrt{\epsilon_n}} W + \frac{\epsilon_c''}{\sqrt{\epsilon_c}} \right) \left[ \Phi (\sqrt{\epsilon_c''} - 1) + 1 \right] \quad (9)$$

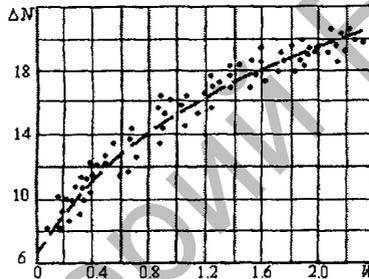
При выводе (9) было принято во внимание, что при  $W \ll 1$ ,

$$1 + \Phi(\sqrt{\varepsilon'_c} - 1) \left\} \Phi \frac{\rho_0}{\rho_H} \frac{W}{1-W} (\sqrt{\varepsilon'_c} - 1) \right.$$

Комбинируя (8) и (9) получаем для параметра преобразования  $\Delta N$  следующее соотношение :

$$\Delta N = 8,686 \ln \left[ 1 + \frac{2Q_{H0}}{B} \Phi \left( \frac{\rho_c \varepsilon'_H}{\rho_H \sqrt{\varepsilon'_H}} W + \frac{\varepsilon'_c}{\sqrt{\varepsilon'_c}} \right) \right] \left[ \Phi(\sqrt{\varepsilon'_c} + 1) \right] \quad (10)$$

Результаты экспериментальной проверки полученных соотношений для модельных материалов в диапазоне малых влагосодержаний приведены в [3]. Для резонатора с размерами  $a = 84$  мм;  $d = 8,2$  мм на частоте 1,4 ГГц нагруженная добротность  $Q_{H0}$ , измеренная по известной методике [1] оказалась равной 2400, а начальное ослабление 23 дБ. Из приведенных зависимостей следует хорошее совпадение экспериментальных данных с теоретическими рассчитанными по выражению (10).



**Рисунок 1** – Зависимость переходного ослабления  $\Delta N$  объемного резонатора на волне типа  $E_{010}$  от влажности кварцевого песка на частоте 1,4 ГГц; кривая - - расчет

Параметр преобразования  $\Delta f$  в рамках линейной модели имеет вид:

$$\Delta f = \frac{f_0}{B} \left\{ \left[ \Phi \frac{\rho_0}{\rho_H} \frac{W}{1-W} (\sqrt{\varepsilon'_c} - 1) + \Phi(\sqrt{\varepsilon'_c} - 1) + 1 \right]^2 - 1 \right\}. \quad (11)$$

Рассмотренный метод основан на измерении только одного параметра, связанного с  $\varepsilon'$  ( $W$ ,  $\Phi$ ) либо  $\varepsilon''$  ( $W$ ,  $\Phi$ ). Исключить влияние коэффициента заполнения  $\Phi$  можно не выделяя в явном виде влажность материала  $W$ , введением так называемого А-параметра [3]:

$$A(W) = k \frac{\varepsilon''}{\varepsilon' - 1}, \quad (12)$$

$$\text{где } k = \frac{1 + \sqrt{\epsilon'}}{\sqrt{\epsilon'}} = 1 + 2 \text{ (при изменении } \epsilon' \text{ от 1 до } \infty \text{)}$$

Измеряя переходное ослабление  $\Delta N$  резонатора и уход его резонансной частоты  $\Delta f$ , что не вызывает принципиальных трудностей в технической реализации, получаем алгоритм определения влажности, свободный от влияния коэффициента заполнения  $\Phi$ :

$$A(W) = k_1 \frac{\exp(\Delta N / 8.686) - 1}{\Delta f}, \quad (13)$$

$$\text{где } k_1 = k_0 \frac{f_0}{2Q_{H0}}.$$

На основе этого алгоритма построены принципиальные схемы СВЧ-влажномеров табака, чая, продуктов свеклосахарного производства, сухого молока и казеина.

Диэлектрические свойства исходных компонентов при производстве сахара и сухого молока диктуют применение как весьма чувствительных методов, так и обязательного контроля двух параметров, связанных с  $\epsilon'$  и  $\epsilon''$  этих материалов. Этим условиям удовлетворяет резонаторный двухпараметрический метод и модификации серийных приборов семейства «Микрорадар 114» производства ООО «Микрорадар-сервис». Производство сухого молока в настоящее время основано на высушивании исходного сырья в распылительных сушилках, причем влажность в этих процессах является фактором, определяющим качество готового продукта.

Технологический процесс получения сухого молока предполагает контроль влажности в нескольких точках:

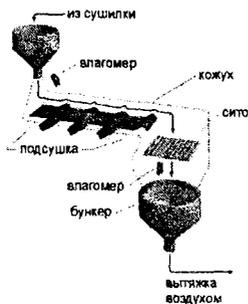
- на выходе продукта из конвекционного сушильного агрегата;
- после вибросита перед подачей готового продукта на расфасовку.

Применение Микрорадар 114 для автоматизации технологического процесса сушки молока позволяет управлять работой конвекционных сушилок и поддерживать влажность в необходимых пределах. Пересушка продукта ведет к распаду белков и ухудшению качества сухого молока при значительном перерасходе тепловой энергии, недосушка также влияет как на качество так и на снижение срока хранения.

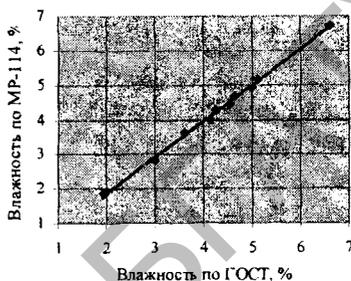
Внешний вид одного из вариантов датчика и технологическая схема процесса с вариантами установки прибора приведены на рис. 2.

Диапазон измерения влажности сухого молока 2-7%. Основная абсолютная погрешность измерения в этом диапазоне  $\Delta W \leq 0,3\%$ . Градуировочная зависимость для сухого молока приведена на рис.2б.

Установка резонаторного СВЧ-влажмера МР-114 для непрерывного контроля влажности в свеклосахарном производстве также возможна в различных точках технологической линии (рис.3), что позволит автоматизировать основные технологические процессы изготовления сахара.

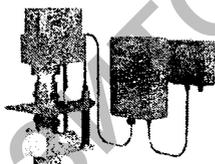


а)

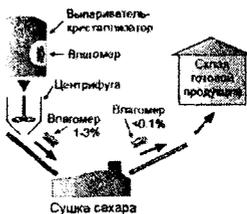


б)

**Рисунок 2** – Варианты установки влагомера «Микрорадар-114» в различных точках технологического процесса производства сухого молока (а) и его градуировочная зависимость (б)



а)



б)

**Рисунок 3** – Внешний вид «Микрорадар-114»(а) и варианты его установки в технологической линии производства сахара (б).

### Выводы

Применение двухпараметровых методов в СВЧ-влажметрии сыпучих сельскохозяйственных материалов позволяет существенно повысить точность измерения влажности за счет учета влияния плотности (коэффициента

заполнения), указанные методы, однако, эффективны при сравнительно небольших колебаниях плотности (в пределах 2,5 – 3 раза) и относительно узком диапазоне изменения влагосодержания. Дальнейшее повышение точности измерения влажности возможно за счет комбинации СВЧ-методов с другими физическими, например СВЧ-акустическим [3].

#### Литература

1. Бензарь В.К. Техника СВЧ-влагометрии. – Мн. Вышэйшая школа, 1974. – 352с.
2. Renhart, I.: The Control of Moisture of Rocks by Methods of Microwave Aquametry. 4<sup>th</sup> International Conference on “Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances”, Weimar, 2001, pp.372-379.
3. Lisovsky V.V. Automatic Control of Moisture in Agricultural Products by Methods of Microwave Aquametry. 6<sup>th</sup> International Conference on “Elektromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances”. Weimar, Germany, 2005. pp.375 – 383.

### **КОНТРОЛЬ ВЛАЖНОСТИ СЫПУЧИХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДАМИ СВЧ-ВЛАГОМЕТРИИ**

Лисовский В.В., Булко М.И., Матвеевко В.В., (БГАТУ) г. Минск

Проблема повышения конкурентоспособности сельскохозяйственного сырья и продуктов переработки становится все более острой для отечественных товаропроизводителей.

Влажность является тем ключевым параметром, от достоверности которого во многом зависит решение задачи максимального снижения себестоимости производства продукции, при сохранении ее высокого качества и оптимальной производительности оборудования.

Соблюдение технологической дисциплины при производстве и переработке сельскохозяйственной продукции базируется на получении своевременной и достоверной информации о ходе производственных процессов, в том числе и о влажности контролируемого материала

Принятая в настоящее время методология системного подхода к разработке влагометрических систем для сельскохозяйственного производства предполагает наличие четырех типов приборов экспрессного контроля влажности с различными метрологическими характеристиками [1], причем сверхвысокочастотные (СВЧ) влагомеры целесообразно применять в качестве лабораторных и поточных в тех случаях, когда требуется высокая точность