

CZU 664.12.039

МИКРОВОЛНОВЫЕ МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ДЛЯ ТОЧНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ В СВЕКЛОСАХАРНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

В. В. ЛИСОВСКИЙ

Белорусский государственный аграрно-технический университет

Abstract. This paper describes the results of microwave methods and equipment elaboration for continuous control of moisture in sugar-beet production and other products during the technological processes of their production. The dielectric properties of these materials and technological requirements determined the choice of investigation methods.

Key words: Moisture, Microwave methods, Resonator transformers, Sugar-beet production.

ВВЕДЕНИЕ

Технологические процессы производства сахара и ряда 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 микроволновых (СВЧ) методов.

Резонаторные преобразователи обычно основаны на изменении добротности Q или ухода частоты Δf резонатора, частично заполненного влажным материалом (метод малых возмущений).

В работе рассмотрены основные микроволновые резонаторные методы измерения влажности, а также одно- и двухпараметрические измерительные преобразователи, основанные на этих методах.

МАТЕРИАЛ И МЕТОД

Получим общие соотношения связывающие резонаторные параметры преобразования и комплексную диэлектрическую проницаемость влагосодержащего материала ϵ^* . Примем, что резонаторная частота невозмущенного резонатора (в отсутствии образца) ω , а при наличии образца в резонаторе ω' ; изменение резонансной частоты объемного резонатора определяется выражением:

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

где \vec{E}_0 - вектор напряженности электрического поля,

V - объем резонатора.

Согласно (В. Бензарь, 1974) выполняется соотношение

$$\omega'' = \frac{\omega'}{2Q_{od}}, \quad (2)$$

где Q_{od} - ненагруженная добротность возмущенного резонатора.

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

С учетом сделанных замечаний - получаем выражения для ϵ'' и ϵ'

$$\varepsilon'' = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{Q_{cd}} - \frac{1}{Q_0} \right] \frac{\int_V |\bar{E}_0|^2 dV}{\int_{\Delta V} |\bar{E}_0|^2 dV}, \quad (3)$$

$$\varepsilon' = 1 + \frac{\Delta\omega}{\omega_0} \frac{\int_V |\bar{E}_0|^2 dV}{\int_{\Delta V} |\bar{E}_0|^2 dV}, \quad (4)$$

где Q_0 - ненагруженная добротностью невозмущенного резонатора.

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

Учитывая, что

$$Q^{-1} = Q_0^{-1} - Q_{nn}^{-1}, \quad (5)$$

где: Q_{nn} - внешняя добротность резонатора, которая не меняется при помещении образца влажного материала в резонатор, для E_{opt} получаем:

$$\varepsilon'' = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{Q_{Hd}} - \frac{1}{Q_H} \right] \frac{\int_V |\bar{E}_0|^2 dV}{\int_{\Delta V} |\bar{E}_0|^2 dV}. \quad (6)$$

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

$$\varepsilon' = 1 + 0,27 \frac{\Delta\omega}{\omega_0} \frac{a^2}{d^2 \left[1 + 1,2d^2/a^2 \right]}; \quad (7)$$

$$\varepsilon'' = 0,135 \left[\frac{1}{Q_{Hd}} - \frac{1}{Q_H} \right] a^2/d^2 \left[1 + 1,2d^2/a^2 \right], \quad (8)$$

где a - радиус резонатора,
 d - диаметр образца.

Принципиально, возможны два варианта включения резонаторов. В первом случае резонатор включается по проходной схеме и контролируется изменение переходного ослабления ΔN резонатора при внесении в его полость образца или смещение Δf от его резонансной частоты. Изменение ΔN можно контролировать двояко либо при выполнении условия резонанса, т.е. на частотах f_0 и f_1 , либо на одной частоте f_0 . В последнем случае условие резонанса не выполняется, однако повышается чувствительность метода к влагосодержанию. При включении резонатора на прохождение можно контролировать также фазовый сдвиг $\Delta\varphi$ резонатора до и после внесения в полость резонатора образца. Аналогичные измерения можно проводить при включении резонатора в режиме отражения. В этом случае переходное ослабление ΔN заменяется коэффициентом отражения $|\Gamma|$.

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]:

$$\Delta N = N_1 - N_0 = 20 \lg \frac{Q_{HO}}{Q_{Hd}} = 8,686 \ln \left(1 + \frac{2Q_{HO}}{B} \varepsilon'' \right), \quad (9)$$

где В – для цилиндрического резонатора находим из выражения:

$$B = 0,27 \frac{a^2}{d^2 \left(1 + 1,2 \frac{d^2}{a^2} \right)}$$

Для нахождения связи между ΔN и W воспользуемся линейной моделью, при этом учтем, что в диапазоне малых и сверхмалых влагосодержаний ε_c'' собственно сухого материала может оказаться сравнимым с ε_n'' вызванным водой в образце. Полагая, что мнимая часть диэлектрической проницаемости влагосодержающего материала равна ε'' , а действительная ε' в рамках линейной модели можно записать

$$\frac{\pi}{\lambda} \frac{\varepsilon_n''}{\sqrt{\varepsilon_n}} \Phi \frac{\rho_c}{\rho_n} W + \frac{\pi}{\lambda} \frac{\varepsilon_c''}{\sqrt{\varepsilon_c}} \Phi = \frac{\pi}{\lambda} \frac{\varepsilon''}{\sqrt{\varepsilon'}}, \quad (10)$$

где Φ - коэффициент заполнения,

ρ_c, ρ_n - плотность сухого материала и воды, откуда находим

$$\varepsilon'' = \Phi \left(\frac{\rho_c}{\rho_n} \frac{\varepsilon_n''}{\sqrt{\varepsilon_n}} W + \frac{\varepsilon_c''}{\sqrt{\varepsilon_c}} \right) \left[\Phi (\sqrt{\varepsilon_c'} - 1) + 1 \right] \quad (11)$$

При выводе (11) было принято во внимание, что при $W \ll 1$

$$1 + \Phi (\sqrt{\varepsilon_c'} - 1) \approx \Phi \frac{\rho_0}{\rho_n} \frac{W}{1-W} (\sqrt{\varepsilon_c'} - 1).$$

Комбинируя (9) и (11) получаем для параметра преобразования ΔN :

$$\Delta N = 8,686 \ln \left[1 + \frac{2Q_{H0}}{B} \Phi \left(\frac{\rho_c \varepsilon_n''}{\rho_n \sqrt{\varepsilon_n}} W + \frac{\varepsilon_c''}{\sqrt{\varepsilon_c}} \right) \left[\Phi (\sqrt{\varepsilon_c'} + 1) \right] \right]. \quad (12)$$

Параметр преобразования Δf в рамках линейной модели имеет вид:

$$\Delta f = \frac{f_0}{B} \left\{ \left[\Phi \frac{\rho_0}{\rho_n} \frac{W}{1-W} (\sqrt{\varepsilon_n'} - 1) + \Phi (\sqrt{\varepsilon_c'} - 1) + 1 \right]^2 - 1 \right\}. \quad (13)$$

Рассмотренные методы основаны на измерении только одного параметра, связанного с ε' (W, Φ) либо ε'' (W, Φ). Исключить влияние коэффициента заполнения Φ можно не выделяя в явном виде влажность материала W , введением так называемого А-параметра [3]:

$$A(W) = k \frac{\varepsilon''}{\varepsilon' - 1}, \quad (14)$$

где $k = \frac{1 + \sqrt{\varepsilon_c'}}{\sqrt{\varepsilon_c'}} = 1 \div 2$ (при изменении ε_c' от 1 до ∞)

Измеряя переходное ослабление ΔN резонатора и уход его резонансной частоты Δf , что не вызывает принципиальных трудностей в технической реализации, получаем алгоритм определения влажности, свободный от влияния коэффициента заполнения Φ :

$$A(W) = k_1 \frac{\exp(\Delta N / 8.686) - 1}{\Delta f}, \quad (15)$$

где $k_1 = k_0 / 2Q_{10}$.

На основе этого алгоритма построены принципиальные схемы СВЧ-влажномеров сахара и продуктов свеклосахарного производства, а также табака, чая, сухого молока, казенна и некоторых других сельскохозяйственных материалов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

На рис. 1 представлены экспериментальные зависимости $\Delta N(W)$ для кварцевого песка в диапазоне малых влагосодержаний. На этом же рисунке нанесена теоретическая зависимость. Экспериментальные значения для $\Delta N(W)$ были получены в резонаторе с размерами $a = 84$ мм; $d = 8,2$ мм на частоте 1,4 ГГц. Нагруженная добротность Q_{10} , измеренная по известной методике (В. Бензарь, 1974) оказалась равной 2400, а начальное ослабление 23 дБ. Из приведенных зависимостей следует хорошее совпадение экспериментальных данных с теоретическими рассчитанными по выраж. (12).

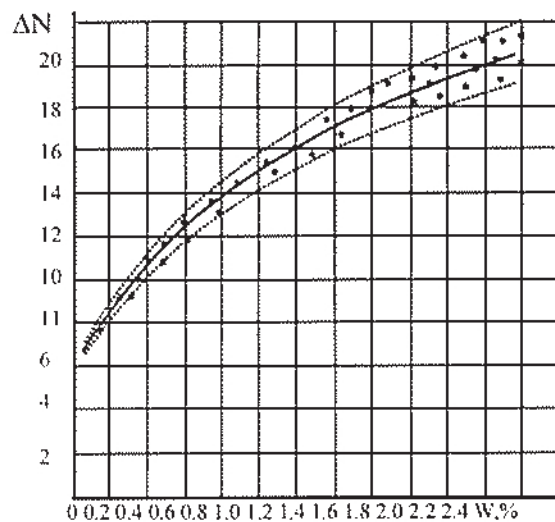


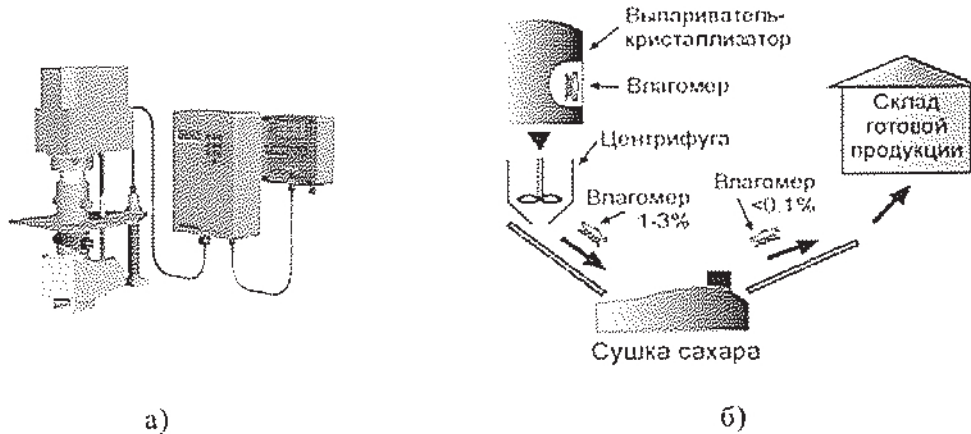
Рис. 1. Зависимость переходного ослабления ΔN объемного резонатора типа E_{010} от влагосодержания кварцевого песка на частоте 1,4 ГГц. Сплошной линией показана расчетная кривая

Диэлектрические свойства исходных компонентов при производстве сахара и продуктов свеклосахарного производства диктуют применение как весьма чувствительных методов, так и обязательного контроля двух параметров, связанных с ϵ' и ϵ'' этих материалов. Этим условиям удовлетворяет резонаторный двухпараметрический метод и модификации серийных приборов семейства «Микрорадар 114» производства ООО «Микрорадар-сервис», г.Минск.

Установка резонаторного СВЧ-влажмера «Микрорадар 114» для непрерывного контроля влажности в свеклосахарном производстве возможна в различных точках технологической линии, что позволит автоматизировать процесс уваривания утфеля на этапе кристаллизации в вакуум-аппаратах. Установка влагомера после центрифугирования позволяет управлять работой сушильных установок и подавать на сушку сахар известной влажности.

Применение влагомера на выходе сушильной установки дает возможность автоматизировать этот технологический процесс. На рис. 2. показан внешний вид одной из модификаций «Микрорадар 114» и варианты установки прибора в различных точках технологического процесса свеклосахарного производства.

На рис. 3. приведена градуировочная зависимость влагомера «MP-114». Абсолютная погрешность измерения влажности готового сахара не более $\pm 0,1\%$.



а) б)
Рис.2 Внешний вид «Микрорадар-114»(а) и варианты его установки в технологической линии производства сахара (б)

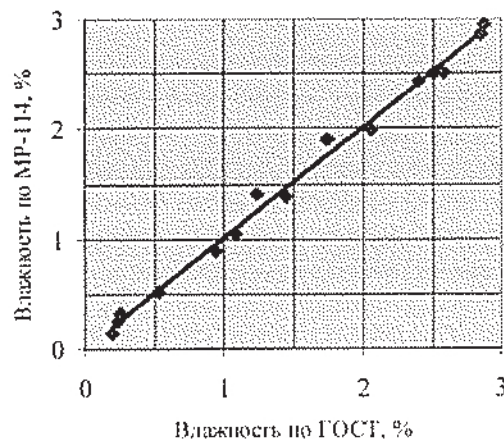


Рис.3. Градуировочная зависимость «Микрорадар-114» для сахара

Более высокую точность измерения влажности сахара в указанном диапазоне можно получить применяя лабораторный резонаторный влагомер сыпучих сельскохозяйственных материалов «Микрорадар-101.2», абсолютная погрешность которого при данных условиях не превышает $\pm 0,03\%$. Это позволит использовать его как образцовое средство при градуировке и проверке поточных влагомеров сахара и продуктов свеклосахарного производства.

ВЫВОДЫ

Применение двухпараметровых методов в микроволновой влагометрии 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 микроволновых методов с другими физическими, например СВЧ-акустическим (V. Lisovsky, 2005).

БИБЛИОГРАФИЯ

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

Data prezentării articolului - 05.11.2006