

MICROWAVE METHODS AND INSTRUMENTS FOR EXACT MEASUREMENT OF MOISTURE AT PRODUCTION OF SUGAR FROM SUGAR-BEETS

Summary

This paper describes the results of elaboration microwave moisture meter for continuous control of moisture of sugar and other products in technological processes of their production. Dielectric properties of these materials and technological requirements are determining the choice of investigation methods.

МИКРОВОЛНОВЫЕ МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ДЛЯ ТОЧНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ В СВЕКЛОСАХАРНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

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 измерении 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 отсутствие образца) ω_0 , а при наличии образца в резонаторе ω ; изменение резонансной частоты объемного резонатора определяется выражением [1]:

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

где:

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

V - объем резонатора.

Согласно [2] выполняется соотношение

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

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 ϵ'' и ϵ' :

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

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

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

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

где: $Q_{вн}$ - внешняя добротность резонатора, которая не меняется при помещении образца влажного материала в резонатор, для E_{010} получаем:

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

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

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

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

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 [3]:. 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 включений 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 [3]:

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

где:

B – 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_H'' вызванным водой в образце. Полагая, что мнимая часть диэлектрической проницаемости влагосодержающего материала равна ε'' , а действительная ε' в рамках линейной модели можно записать;

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

где:

Φ - коэффициент заполнения,

ρ_c, ρ_H - плотность сухого материала и воды, откуда находим:

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

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

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

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

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

Параметр преобразования Δf в рамках линейной модели имеет вид:

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

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 A -параметра [4]:

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

где:

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

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:

$$k_1 = k_0 / 2Q_{HO}.$$

На основе этого алгоритма построены принципиальные схемы СВЧ-влагомеров сахара и продуктов свеклосахарного производства, а также табака, чая, сухого молока, казеина 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_{HO} , измеренная по известной методике оказалась равной 2400, а начальное ослабление 23 дБ [5]. Из приведенных зависимостей следует хорошее совпадение экспериментальных данных с теоретическими рассчитанными по выражению (12).

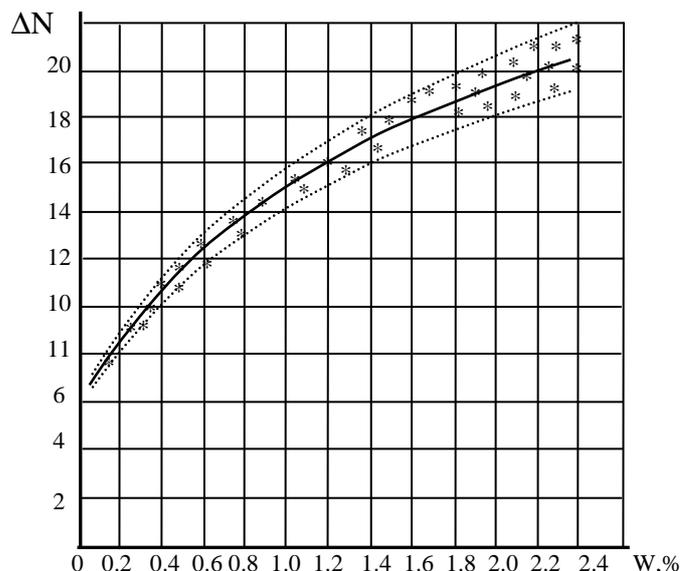


Рис. 1. Зависимость переходного ослабления ΔN объемного резонатора типа E_{010} от влагосодержания кварцевого песка на частоте 1,4 ГГц. Сплошной линией показана расчетная кривая

Fig. 1. Dependence of temporary fall of the voluminal resonator parameter ΔN of type E_{010} from moisture of quartz sand at frequencies 1,4 GHz. Continuous line – curve according to results of calculations

a)

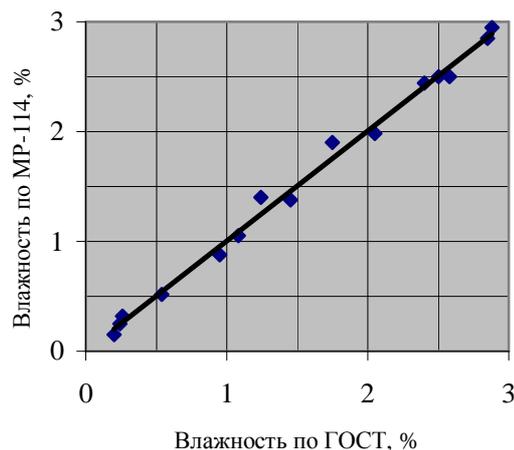
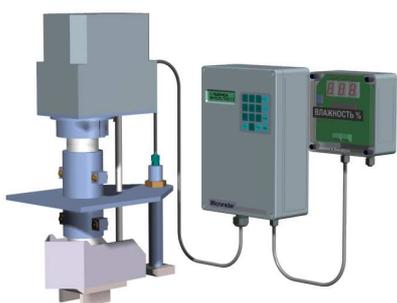


Рис. 3. Градуировочная зависимость «Микрорадар-114» для сахара

Fig. 3. Characterization of moisture meter on example of sugar

b)

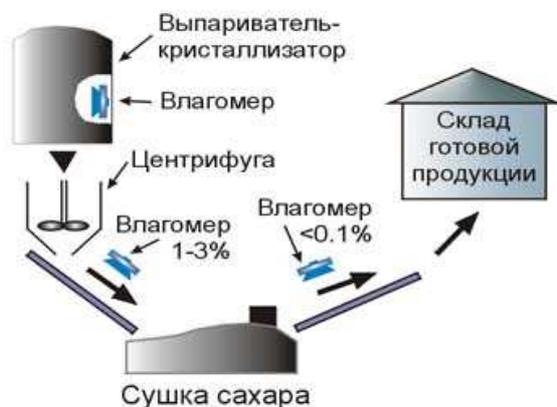


Рис. 2. Внешний вид «Микрорадар-114»(a) и варианты его установки в технологической линии производства сахара (b)

Fig. 2. View of the device „Mikroradar-114” (a) and variants of its locations in technological line of sugar production (b)

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 модификация серийных приборов семейства «Микрорадар 114» производства ООО «Микрорадар-сервис», г. Минск [6].

Установка резонаторного СВЧ-влагомера «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 «МР-114». Абсолютная погрешность измерения влажности готового сахара не более $\pm 0,1\%$.

Более высокую точность измерения влажности сахара в указанном диапазоне можно получить применяя лабораторный резонаторный влагомер сыпучих сельскохозяйственных материалов «Микро-радар-101.2», абсолютная погрешность которого при данных условиях не превышает $\pm 0,03\%$. Это позволяет использовать его как образцовое средство при градуировке и поверке 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 [5, 6].

Библиография

- [1] Брандт А.А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах.- М.: Физматгиз, 1963. - 403с.
- [2] Бензарь В.К. Техника СВЧ-влагометрии. – Мн. Вышэйшая школа, 1974. – 352с.
- [3] Теория и практика экспрессного контроля влажности твёрдых и жидких материалов. Кричевский Е.С., Бензарь В.К., Венедиктов Н.В. и др.: под общ. ред. Е.С. Кричевского.- М.: Энергия, 1980.- 240с.
- [4] Ценципер Б.Л. Инвариантные параметры в СВЧ-влагометрии. //Методы и средства автоматического управления и контроля в сельскохозяйственном производстве, - Горки, 1995. - С. 78-87.
- [5] 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. pp.375 – 383.
- [6] 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.
- [7] Лисовский В.В. Теория и практика сверхвысокочастотного контроля влажности сельскохозяйственных материалов. – Минск, БГАТУ, 2005.- 292с.
- [8] Pyszczeppow M. A., Tanaś W. Оптимизация информационной чувствительности ёмкостных электродных электронагревателей – датчиков. Lublin, WAR, 2000, s. 151-153. Materiały międzynarodowej konferencji – XXX lat WTR AR Lublin.