

УДК 543.275.1:631.03

*В. В. ЛИСОВСКИЙ*

## СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ЭКСПРЕССНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ

*Белорусский государственный аграрный технический университет*

*(Поступила в редакцию 27.02.2006)*

**Введение.** Возрастающие требования к качеству и конкурентоспособности отечественной сельскохозяйственной продукции выдвигают новые требования к приборам и устройствам экспрессного контроля влажности в большинстве технологических процессов. В современных технологических процессах АПК требуются универсальные приборы, контролирующие влажность широкого круга сельскохозяйственных материалов без дополнительной перестройки, с большой точностью измерения, возможностью контроля дополнительных параметров, например, температуры, натурального веса и др. На первый взгляд кажется, что эта задача легко осуществима, ведь появились недорогие и мощные микропроцессоры. Но на практике не все так просто. Так, наиболее популярные в недалеком прошлом емкостные влагомеры практически достигли пределов своих возможных метрологических характеристик. В то же время максимальный экономический эффект от автоматизации ряда технологических процессов достигается только при очень высокой точности контроля влажности. Так, например, в мукомольной промышленности ошибка в определении влажности зерна на доувлажнении перед помолом на 0,5% способна перевести всю партию муки из высшего сорта в первый, при снижении производительности оборудования и уменьшении выхода готовой продукции до 7%. Традиционные емкостные, а тем более кондуктометрические методы измерения влажности в потоке при этих условиях не могут обеспечить абсолютную погрешность измерения менее 1%.

Попытки совершенствования этих методов на базе многопараметрического контроля при существенном усложнении и удорожании устройств контроля зачастую приводят к тупиковому варианту. Математические аспекты многопараметрического контроля на основе емкостного метода измерений приведены в [1]. В этом случае предполагается решение системы до десятка и более уравнений (в зависимости от числа возмущающих воздействий), что для современной микропроцессорной техники совсем не сложно. Однако главной проблемой здесь является сложность и сама возможность составления системы уравнений. Даже в относительно простом случае измерения влажности при двух возмущающих параметрах (часто их называют мешающими факторами) и перекрытия всего диапазона контроля десятью значениями, для градуировки влагомера необходимо произвести  $10^2 = 10^3$  измерений, а с учетом других, как например, для зерновых: сорта, вида, типа, района произрастания, сроков уборки, климатических условий и др., этот процесс становится практически невыполнимым.

Применение в экспресс-влагометрии современных методов, например, «нечеткой логики» [2] или «искусственной нейронной сети» [3], требует глубокого знания электрофизических свойств данной системы либо сложного процесса обучения. Не отрицая перспективности этих направлений, следует отметить возможность дальнейшего совершенствования некоторых традиционных методов и, в первую очередь, сверхвысокочастотных (СВЧ). Выбор этого диапазона для целей точного контроля влажности диктуется как диэлектрическими свойствами самой воды, определяющими высокую чувствительность метода к содержанию влаги при минимальном влиянии так называемых «неинформативных» мешающих факторов, так и рядом других преимуществ: бес-

контактности, большой информационной емкости, экологической безопасности, возможности работы в условиях запыленности и др.

В настоящее время в нашей стране накоплен большой опыт по разработке, серийному производству и особенностям производственной эксплуатации широкого ряда лабораторных и поточных СВЧ-влажномеров для многих технологических процессов сельскохозяйственного производства [4].

### Сверхвысокочастотные методы измерения влажности

*Методы свободного пространства.* Эта группа методов основана на изменении характеристик электромагнитного поля, взаимодействующего с влажным материалом, который находится в свободном пространстве. Принципиально возможна регистрация потока электромагнитного излучения от влажного материала. В этой группе методов измерительными преобразователями являются различные антенны. Измеряемыми характеристиками (назовем их параметрами преобразования) могут быть: амплитуда прошедшей через влажный материал электромагнитной волны  $E$ , изменение фазы этой волны  $\varphi$ , коэффициент отражения электромагнитной волны от границы раздела сред «воздух – материал»  $\Gamma$ , плотность потока электромагнитного излучения влажного материала  $P$ . Взаимосвязь параметров преобразования с влажностью материала (за исключением последнего) выводится из линейной модели, впервые предложенной в работе [5].

В соответствии с этой моделью для коэффициентов затухания  $\alpha$  и фазы  $\beta$  можно записать

$$\alpha_{в.м} = \sum_{n=0}^i \alpha_i V_i, \quad (1)$$

$$\beta_{в.м} = \sum_{n=0}^i \beta_i V_i, \quad (2)$$

где  $\alpha_{в.м}$ ,  $\beta_{в.м}$  – постоянная затухания и фазовая постоянная влажного материала;  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$  – постоянные затухания и фазовые постоянные компонентов влажного материала;  $V_i$  – объемы  $i$ -х компонентов влажного материала.

Так как  $\alpha_{в} > \alpha_{с} > \alpha_0$ , где символы  $_{в,с}$  и  $_0$  обозначают воду, сухой материал и воздух, запишем

$$\alpha = \alpha_{в} \Phi \frac{W}{1-W} \frac{\rho_{с}}{\rho_{в}}, \quad (3)$$

$$\beta = \Phi \frac{W}{1-W} \frac{\rho_{с}}{\rho_{в}} (\beta_{в} - \beta_0) + \Phi (\beta_{с} - \beta_0) + \beta_0, \quad (4)$$

где  $W$  – влажность материала;  $\Phi$  – коэффициент заполнения;  $\rho_{с}$ ,  $\rho_{в}$  – плотность (натурный вес) сухого материала и воды.

Наиболее распространены методы затухания (амплитудные), основанные на измерении модуля коэффициента прохождения как функции влажности материала. Функция преобразования материала может быть представлена в виде матрицы рассеяния  $\|S\|$  симметричного пассивного четырехполюсника [5]:

$$\|S\| = \begin{vmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{vmatrix}. \quad (5)$$

Если четырехполюсник симметричный, то в общем виде все элементы матрицы рассеяния являются комплексными величинами, так что  $S_{11} = S_{22}$  и  $S_{21} = S_{12}$ .

$$S^*_{km} = |S_{km}| \exp i \varphi_{km}, \quad (6)$$

где  $|S_{km}|$  и  $\varphi_{km}$  – модуль и фаза элемента  $S_{km}$  матрицы.

В большинстве случаев измеряется модуль коэффициента прохождения, выраженный в децибелах:

$$N_1 = -20 \lg |S_{21}|. \quad (7)$$

В этом случае другие элементы матрицы рассеяния  $S_{km}$  не измеряются. Тогда ослабление электромагнитной энергии во влагосодержащем материале толщиной  $d$  будет определяться

$$N = 8,686 \alpha_v \Phi \frac{W}{1-W} \frac{\rho_c}{\rho_v} d. \quad (8)$$

С учетом того, что модуль коэффициента отражения равен [6]

$$\Gamma^2 = \frac{(\alpha_0 - \alpha_1)^2 + (\beta_0 - \beta_1)^2}{(\alpha_0 + \alpha_1)^2 + (\beta_0 + \beta_1)^2}, \quad (9)$$

запишем окончательное выражение для функции преобразования амплитудного метода

$$N = 8,686 \left[ \alpha_v \frac{W}{1-W} \Phi \frac{\rho_c}{\rho_v} d + \ln |\Gamma^2| \right]. \quad (10)$$

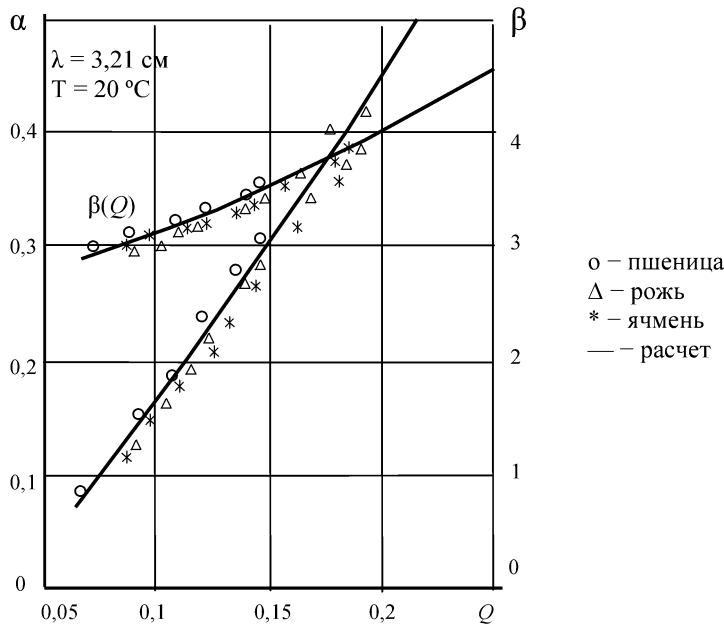


Рис. 1. Зависимость коэффициентов затухания  $\alpha$  и фазы  $\beta$  от объемной влажности  $Q$

В случае крупнодисперсных материалов  $\alpha_v$  соответствует значению для свободной воды. Для средне- и мелкодисперсных материалов его значение определяется экспериментальным либо расчетным путем как, например, в СВЧ-влажнометрии зерна (рис. 1). Расчетная характеристика, как видим, вполне удовлетворительно согласуется с экспериментом [4].

На основе этого алгоритма (10) работают серийные СВЧ-влажнометры «Микрорадар-113», предназначенные для автоматического контроля и управления процессом сушки зерна в диапазоне влажностей 10–25% с абсолютной погрешностью  $\pm 0,25\%$ .

Фазовые методы основаны на измерении фазового сдвига электромагнитной волны при прохождении ее через контролируемый материал. Алгоритм преобразования имеет вид [5]

$$\varphi_1 = \varphi_{21}^{(1)} - \varphi_{21}^{(0)}, \quad (11)$$

где  $\varphi_{21}^{(1)}$  – фаза  $S_{21}$  во влажном материале,  $\varphi_{21}^{(0)}$  – фаза  $S_{21}$  в отсутствие материала.

Параметр преобразования в фазовых методах находится как разность фаз  $\Delta\varphi$  между излучателем и приемником в отсутствие образца и с образцом

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi d_1 \Phi}{\lambda} \left[ \frac{\rho_c W}{\rho_v (1-W)} (\sqrt{\epsilon'_v - 1}) + (\sqrt{\epsilon'_c - 1}) \right]. \quad (12)$$

Следует отметить, что реализация (12) возможна при выполнении условия  $\Delta\varphi \leq \pi$ , что накладывает ограничения на использование этого параметра преобразования.

Параметром преобразования в отражательных методах является модуль коэффициента отражения  $|\Gamma|$  от поверхности влажного материала, который определяется выражением

$$|\Gamma| = (\sqrt{\varepsilon' - 1})(\sqrt{\varepsilon' + 1})^{-1}. \quad (13)$$

При этом, как правило, не учитывается изменение фазы коэффициента отражения  $\phi_{11}$  ввиду ее малости [5]. В сельскохозяйственном производстве метод нашел применение во влагометрии почв, а также в тех технологических процессах, когда доступ к контролируемому объекту возможен только с одной стороны [4].

*Методы локализованного поля.* В этой группе методов объект контроля помещается в отрезок регулярной линии передач (коаксиальной, волноводной, полосковой, двухпроводной и др.). При измерении влажности сыпучих или волокнистых материалов этот участок отделен от линии с двух сторон двумя радиопрозрачными вставкам, толщина которых должна быть кратной половине длины волны в диэлектрике, из которого сделаны вставки, в целях минимизации величины коэффициента отражения. Так же, как и в случае методов свободного пространства, получены выражения для измеряемых параметров прошедшей и отраженной электромагнитной вол-

ны, отличающиеся наличием коэффициента  $p = \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{кр}}\right)^2$ , где  $\lambda_{кр}$  – критическая длина волны в волноводе.

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

В [4] на основе линейной модели получены выражения, связывающие некоторые резонаторные параметры преобразования с влажностью материала.

Так, для параметра преобразования  $\Delta N$ :

$$\Delta N = 8,686 \ln \left[ 1 + \frac{2Q_{н0}}{B} \Phi \left( \frac{\rho_c \varepsilon_B''}{\rho_B \sqrt{\varepsilon_B'}} W + \frac{\varepsilon_c''}{\sqrt{\varepsilon_c'}} \right) \right] \left[ \Phi(\sqrt{\varepsilon_c'} + 1) \right], \quad (14)$$

где  $Q_{н0}$  – нагруженная добротность невозмущенного резонатора;  $B$  – конструктивный параметр, зависящий от размеров резонатора (рис. 2).

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

$$\Delta f = \frac{f_0}{B} \left\{ \left[ \Phi \frac{\rho_c}{\rho_B} \frac{W}{1-W} (\sqrt{\varepsilon_B'} - 1) + \Phi(\sqrt{\varepsilon_c'} - 1) + 1 \right]^2 - 1 \right\}. \quad (15)$$

Рассмотренные методы основаны 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  $A$ -параметра [4]:

$$A(W) = k \frac{\varepsilon''}{\varepsilon' - 1}, \quad (16)$$

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

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  $\Phi$ :

$$A(W) = k_1 \frac{\exp \frac{\Delta N}{8,686} - 1}{\Delta f}, \quad (17)$$

где  $k_1 = k_0 \frac{f_0}{2Q_{н0}}$ .

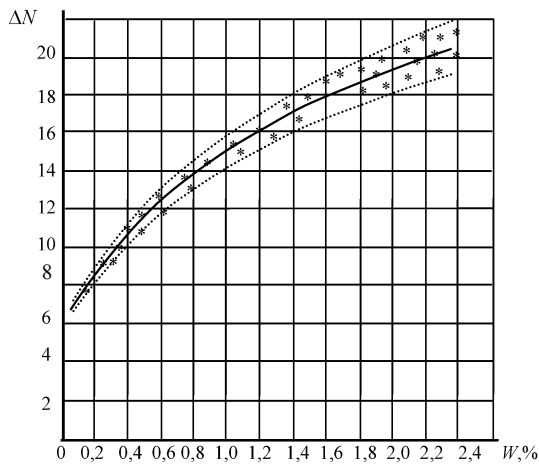


Рис. 2. Зависимость переходного ослабления  $\Delta N$  объемного резонатора типа  $E_{010}$  от влагосодержания кварцевого песка на частоте 1,4 ГГц (расчетная кривая показана сплошной линией)

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.

Так же, как и в свеклосахарном производстве 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. 3.

Прибор обеспечивает: 9 разных градуировок; усреднение результата; связь с компьютером в стандарте RS 485; возможность диагностики; стандартный токовый выход. Диапазон измерения влажности сухого молока 2–7%. Основная абсолютная погрешность измерения в этом диапазоне  $\Delta W \leq 0,3\%$ .

На основе этого алгоритма построены принципиальные схемы СВЧ-влажномеров табака, чая, продуктов свеклосахарного производства, сухого молока и казеина серии «Микрорадар-114» производства НПП «Микрорадар-сервис», г. Минск [7].

Установка резонаторного СВЧ-влажномера «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 влажномера после центрифугирования позволяет управлять работой и подавать на сушку сахар известной влажности. Применение влажномера на выходе сушильной установки дает возможность автоматизации этого технологического процесса.

Абсолютная погрешность измерения готового сахара не более  $\pm 0,03\%$  (в диапазоне изменения влажности 0 ÷ 3%).

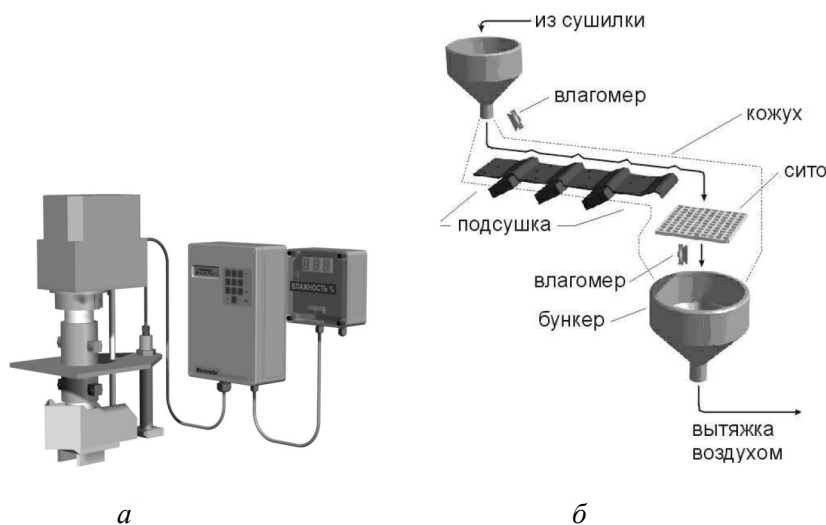


Рис. 3. СВЧ-влажномер «Микрорадар-114»: а – внешний вид; б – вариант установки его в технологической линии производство сухого молока

**Заключение.** Анализируя рассмотренные методы, отметим следующее: хотя самым простым является метод поглощения, ему присущи и недостатки – велико влияние температуры и плотности на параметр преобразования. В низкочастотной части СВЧ-диапазона существенное влияние оказывают растворенные соли.

Самым неблагоприятным случаем для метода поглощения является контроль влажности таких материалов, у которых знак температурной ошибки зависит от влагосодержания. Если для дискретных влагомеров это затруднение удастся обойти, то для поточных приходится сужать динамический диапазон по влажности, что не всегда удобно.

По сравнению с методом поглощения влияние температуры материала в фазовых методах на параметр преобразования значительно меньше. Для всех видов материала он имеет положительный температурный коэффициент с малой крутизной, вследствие чего значительно упрощаются схемы температурной коррекции. Метод отражения применяется в тех случаях, когда по технологическим требованиям необходим односторонний контакт с контролируемым материалом. Однако чувствительность его значительно ниже, чем для первых двух методов и снижается при больших влажностях.

Применение резонаторных методов дает хорошие результаты, однако ограничено областью малых влагосодержаний.

Следующую группу образуют методы СВЧ-влагометрии, основанные на измерении комплексных параметров преобразования. В большинстве случаев измеряется модуль и фаза одного из коэффициентов рассеяния либо двух резонаторных параметров.

Применение двухпараметровых методов в СВЧ-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 раз) и относительно узком диапазоне изменения влагосодержания. Дальнейшее повышение точности измерения влажности возможно за счет комбинации СВЧ-методов с другими физическими, например СВЧ-акустическим [4].

Описанные выше методы СВЧ-влагометрии могут реализовываться в двух возможных влагометрических системах – активной и пассивной. В активных системах заполненный измерительный преобразователь объединен воедино с генератором СВЧ таким образом, что частота и уровень мощности СВЧ-генератора зависят от параметров заполненного измерительного преобразователя и таким образом могут быть связаны с влажностью материала [5].

## Литература

1. J a c h o w i c z R. S. Moisture Content Measurements in Solids-Limitations and Improvements with Modern Technology. Third workshop on «Elektromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances». Athens, USA, 1999. P. 32–41.
2. B a r t l y P. G., N e l s o n S. O., M c C l e n d o n R. W., T r a b e l s i S. Determination of Moisture Content in Wheat Using an Artificial Neural Network. Third workshop on «Elektromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances». Athens, USA, 1999. P. 74–78.
3. A l i p p i C., F e r r e r o A., P i n r i V. Artificial Intelligence for Instruments and Measurement Applications. IEEE Instr. & Meas. Magazine. Vol. 47, N. 1. 1998.
4. Б е н з а р ь В. К. Техника СВЧ-влагометрии. Мн., 1974.
5. Л и с о в с к и й В. В. Теория и практика сверхвысокочастотного контроля влажности сельскохозяйственных материалов. Мн., 2005.
6. Г у б к и н Л. Н. Физика диэлектриков. Теория электрической поляризации в постоянном и переменном электрическом поле. М., 1971.
7. R e n h a r t I. The Control of Moisture of Rocks by Methods of Microwave Aquametry. 4<sup>th</sup> International Conference on «Elektromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances». Weimar, 2001. P. 372–379.

*V. V. LISOVSKI*

## UP-TO-DATE METHODS OF EXPRESS MEASUREMENT OF THE MOISTURE CONTENT OF AGRICULTURAL MATERIALS

### Summary

The article discusses the most frequently used express – methods of measuring the moisture content of agricultural materials. Emphasis is laid on the influence of a number of factors which hamper the measuring precision as well as on the long-term efficiency of these methods from the point of obtaining maximum precision in moisture content measurements. The article also analyzes a possibility of implementing these methods to control and manage various technological processes in agroindustrial complexes.