

# ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ В ДИАПАЗОНЕ СВЧ

Морозов С.М.<sup>1</sup>, Кузьмин К.А.<sup>2</sup> Email: Morozov1793@scientifictext.ru

<sup>1</sup>Морозов Михаил Сергеевич – аспирант,

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва;

<sup>2</sup>Кузьмин Константин Анатольевич – кандидат педагогических наук, доцент,

кафедра естественнонаучных, технических дисциплин и информационных технологий,  
Смоленский областной казачий институт промышленных технологий и бизнеса (филиал)

Московский государственный университет технологий и управления им. Кирилла Григорьевича Разумовского  
(Первый Казачий университет), г. Вязьма

**Аннотация:** электромагнитные сверхвысокочастотные системы при взаимодействии с контролируемым объектом изменяют свои параметры. Они могут быть приняты в качестве измеряемых величин для определения свойств самого объекта. При измерении влажности сыпучих строительных материалов необходимо учитывать зависимости от этих характеристик, существующая связь которых может быть установлена несколькими способами. Метод СВЧ-поглощения, является в настоящее время одним из наиболее перспективных во влагометрии строительных материалов. Зная параметры сухого материала и измеряя отраженный СВЧ сигнал и плотность материала, можно однозначно определить влажность.

**Ключевые слова:** влажность, влагометрия, резонансная частота, поглощение, камера, стенд, аттенюатор, мощность, отражение, напряженность, структура, неравномерность, метод.

## FEATURES HUMIDITY MEASUREMENT OF LOOSE MATERIALS IN RANGE, MICROWAVE

Morozov S.M.<sup>1</sup>, Kuzmin K.A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Morozov Mikhail Sergeevich - postgraduate student,

National research center "Kurchatov Institute", Moscow;

<sup>2</sup>Kuzmin Konstantin Anatolyevich – candidate of pedagogical Sciences, associate Professor,

THE DEPARTMENT OF "NATURAL SCIENCES, TECHNICAL SCIENCES AND INFORMATION TECHNOLOGIES",  
SMOLENSK REGIONAL COSSACK INSTITUTE OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY AND BUSINESS (BRANCH)  
OF MOSCOW STATE UNIVERSITY OF TECHNOLOGIES AND MANAGEMENT NAMED AFTER KIRILL  
GRIGORIEVICH RAZUMOVSKY (FIRST COSSACK UNIVERSITY), VYAZMA

**Abstract:** electromagnetic microwave system in interaction with the controlled object changes its parameters. They can be taken as a measured value to determine the properties of the object itself. When measuring the moisture content of bulk building materials should be considered based on these characteristics, the existing linkage which can be installed in several ways. The method of microwave absorption, being currently one of the most promising moisture in building materials. Knowing the parameters of the dry material and measuring the reflected microwave signal and the density of the material, we can uniquely determine humidity.

**Keywords:** humidity, bloomeria, resonance frequency, absorption, camera, stand, attenuator, power, reflection, tension, structure, the unevenness, the method.

УДК 662.62:537.868

Для измерения влажности большое значение имеют виды и формы связи влаги с веществом, влияющие на свойства влагосодержащего материала. Сыпучие строительные материалы, с точки зрения электродинамики сверхвысоких частот, представляет собой диэлектрики, свойства которых можно охарактеризовать несколькими скалярными константами: относительная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_r$ , относительная магнитная проницаемость  $\mu_r$ , проводимость  $\sigma$ .

Величины  $\epsilon_r$ ,  $\mu_r$ ,  $\sigma$  преобразовывают электрические и магнитные поля в ток и индукцию:

$$\overline{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \overline{E}, \quad \overline{B} = \mu_0 \mu_r \overline{H}, \quad \overline{I} = \sigma \overline{E}.$$

В теории СВЧ колебаний константы материалов входят в уравнения, которым подчиняются процессы распространения электромагнитных волн, и в граничные условия, связывающие электромагнитные поля на границе раздела различных сред. Эти соотношения и могут быть положены в основу различных методов измерения требуемых констант материалов.

Электромагнитные сверхвысокочастотные системы при взаимодействии с контролируемым объектом изменяют свои параметры. Они могут быть приняты в качестве измеряемых величин для определения свойств самого объекта.

Выбор этих параметров определяется контролируемой величиной, характером объекта, метрологическими требованиями, условиями эксплуатации и пр. Многообразие параметров позволяет выбрать оптимальный для конкретной задачи и тем самым обеспечить эффективное техническое решение.

В электромагнитной системе можно указать следующие основные информативные параметры: основную резонансную частоту, добротность резонансной системы, коэффициент стоячей волны (КСВ), фазовый сдвиг, амплитуду, мощность падающей, отраженной или прошедшей волн; положение узла или пучности поля стоячей волны на фиксированной частоте генератора; частотный сдвиг частотно-модулированной падающей волны по отношению к отраженной волне, частотный сдвиг частоты отраженной или прошедшей волны по отношению к падающей.

При измерении влажности сыпучих строительных материалов необходимо учитывать зависимости от этих характеристик, существующая связь которых может быть установлена несколькими способами.

Один из них - моделирование влажного материала трехслойной системой - сухое вещество, слой влаги, слой воздуха [1]. Объемная концентрация данного компонента определяет толщину каждого слоя.

Влажность материала относится к числу тех параметров, для измерения которых радиоволновые методы получили наибольшее развитие и практическое применение, благодаря высокой чувствительности радиоволновых влагомеров в диапазоне сверхвысоких частот. Возможность применения СВЧ методов для влагометрии основана на отличии комплексной диэлектрической проницаемости воды и содержащих ее веществ. Широко распространены методы измерения по поглощению электромагнитной энергии в диапазоне сверхвысоких частот по схемам «на прохождение» или «на отражение». Кроме этих методов возможны также фазовые методы, основанные на измерении фазового сдвига волны зависящего от влагосодержания при её взаимодействии с влажным материалом. Известны и другие методы измерения в свободном пространстве.

Влажность сыпучих материалов относится к числу тех параметров, для измерения которых радиоволновые методы получили наибольшее развитие и практическое применение, благодаря высокой чувствительности радиоволновых влагомеров в диапазоне сверхвысоких частот. Возможность применения СВЧ методов для влагометрии основана на отличии комплексной диэлектрической проницаемости воды и содержащих ее веществ.

Широко распространены методы измерения по поглощению электромагнитной энергии в диапазоне сверхвысоких частот по схемам «на прохождение» или «на отражение». Кроме этих методов возможны также фазовые методы, основанные на измерении фазового сдвига волны зависящего от влагосодержания при её взаимодействии с влажным материалом. Известны и другие методы измерения в свободном пространстве, например, по изменению угла Брюстера, в зависимости от влажности материала при отражении или прохождении через его слой, в частности при наклонном зондировании слоя сыпучих и др.

Рассмотрим подробнее методы, нашедшие применение при влагометрии сыпучих строительных материалов. На рисунке 1 представлена простейшая схема установки для исследования метода СВЧ поглощения. СВЧ колебания от генератора СВЧ 1 по волноводу 2 поступают на передающую антенну 3, откуда, пройдя через влажный материал 4 и частично поглотившись находящейся в нём водой, попадают на приёмную антенну 5, откуда по волноводу 6 проходят через атеннуатор 7 (устройство, позволяющее вносить строго определенное затухание в сигнал, служащий для непосредственного ослабления) и после детектирования детектором 8 через усилитель 9 регистрируется индикатором 10 [2].

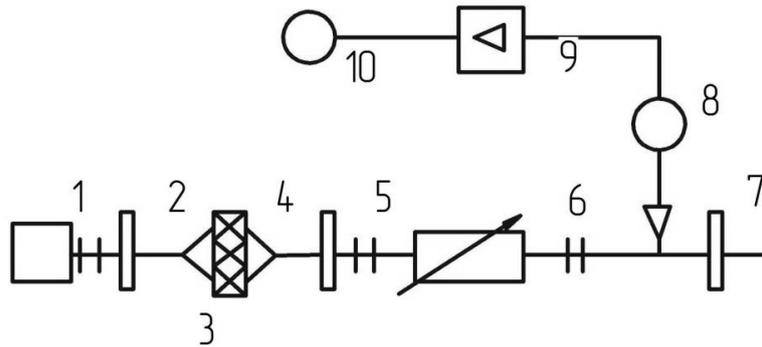


Рис. 1. Схема установки для исследования метода СВЧ-поглощения

При такой схеме измерения, ослабление, измеренное аттенуатором, является функцией влажности материала. Величину затухания во влажном материале можно определять по формуле:

$$N_{\Sigma} = 8,68(\alpha_2 \ell + \Gamma_{12}), \quad (1)$$

где  $\Gamma_{12} = \frac{(\alpha_1 - \alpha_2)^2 + (\beta_1 - \beta_2)^2}{(\alpha_1 + \alpha_2)^2 + (\beta_1 + \beta_2)^2}$ ,  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  - постоянные затухания среды и зерна,  $\beta_1$  и  $\beta_2$  - фазовые постоянные среды и материала.

Для измерения затухания СВЧ - энергии в строительных материалах выбор оборудования и сечения волноводов обуславливается определенным частотным диапазоном [3]. Это связано с тем, что для целей влагометрии используется достаточно узкий диапазон: от 2 до 4 см, на который приходится пик поглощения колебаний СВЧ энергии молекулами воды, а значит, в этом диапазоне можно получить максимальную чувствительность по измеряемому параметру.

Метод СВЧ-поглощения, являясь в настоящее время одним из наиболее перспективных во влагометрии строительных материалов, позволяет решать большинство задач, возникающих при автоматизации различных технологических процессов.

Отношение среднего потока энергии, отраженного от поверхности, к подающему потоку определяется соотношением:

$$\frac{P_{omp}}{P_{nad}} = \frac{(\beta - \beta_0)^2 + \alpha^2}{(\beta + \beta_1)^2 + \alpha^2} \quad (2)$$

где  $\alpha$ , - коэффициент ослабления  $\beta$  - волнового числа влажного материала с влажностью  $W$ ,  $\beta_0$  - волновое число в пустом пространстве.

Оценивая величины, входящие в последние соотношения, например, на длине волны  $\lambda = 3$  см, зная параметры сухого материала и измеряя отраженный СВЧ сигнал и плотность материала, можно однозначно определить влажность.

Этого недостатка лишен метод измерения по отражению электромагнитных волн от поверхности влажного материала.

Отношение среднего потока энергии, отраженного от поверхности, к подающему потоку определяется соотношением (3):

$$\frac{P_{omp}}{P_{nad}} = \frac{(\beta - \beta_0)^2 + \alpha^2}{(\beta + \beta_1)^2 + \alpha^2} \quad (3)$$

где  $\alpha$ , - коэффициент ослабления  $\beta$  - волновое число влажного материала с влажностью  $W$ ,  $\beta_0$  - волновое число в пустом пространстве.

Полученное выражение для влажности имеет вид:

$$W = \frac{\sqrt{\frac{P_{omp}}{P_{nad}}} \frac{\beta_0}{\rho_c} + \sqrt{\frac{P_{omp}}{P_{nad}}} \frac{2\beta_0}{\rho} + \frac{\beta_c - \beta_0}{\rho_c}}{\beta_B \left( 1 - \sqrt{\frac{P_{omp}}{P_{nad}}} \right)} \quad (4)$$

где  $\rho$  - плотность материала,  $\beta_c$  - волновое число сухого материала,  $\rho_c$  - плотность сухого материала,  $\beta_B$  - волновое число для воды.

Оценивая величины, входящие в последние соотношения, на длине волны 3 см, отметим, что на этой длине волны волновое число  $\beta_c$  имеет для большинства диэлектриков величину  $1,5 \div 2\beta_0$ ,  $\beta_B = 17, \beta_0 = 2$ . Зная параметры сухого материала и измеряя отраженный СВЧ сигнал и плотность материала, можно однозначно определить влажность. На рисунке 2 представлена общая схема влагомера, работающего по этому методу.

Устройство работает следующим образом: СВЧ мощность генератора поступает на материал. Отраженный сигнал на детектор, напряжение которого усиливается усилителем и поступает на логарифмический аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Код АЦП, соответствующий логарифму напряжения на детекторе, поступает на блок цифрового интегрирования, где в зависимости от размера материала выбирается время интегрирования [4]. Сигнал плотномера и описываемого устройства поступает на ЭВМ, где вычисляется влажность материала.

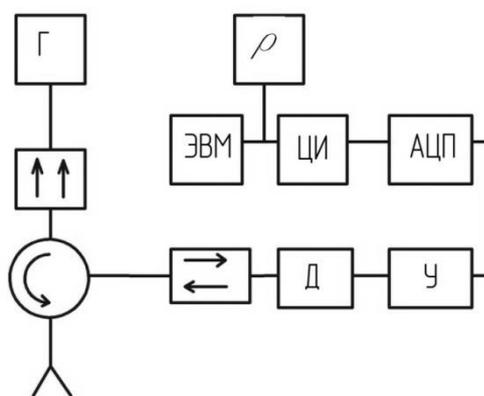


Рис. 2. Блок-схема влагомера, работающего по методу отражения:

Г - генератор СВЧ, Д - детекторный диод, У - усилитель, АЦП - аналого-цифровой преобразователь; ЦИ - цифровой интегратор, ρ - блок измерения плотности

Устройство работает следующим образом: СВЧ мощность генератора поступает на материал. Отраженный сигнал на детектор, напряжение которого усиливается усилителем и поступает на логарифмический аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Код АЦП, соответствующий логарифму напряжения на детекторе, поступает на блок цифрового интегрирования, где в зависимости от размера материала выбирается время интегрирования. Сигнал плотномера и описываемого устройства поступает на ПК, где вычисляется влажность материала.

Таким образом показана возможность непрерывного контроля влажности при помощи СВЧ генератора по отражению электромагнитных волн от поверхности влажного материала.

#### Список литературы / References

1. Морозов М.С., Морозов С.М., Реут В.А. Микроволновая установка сушки зерна. // Молодой ученый. № 30 (134), 2016.
2. Морозов М.С., Морозов С.М., Реут В.А. Автоматизированная система контроля влажности зерна. // Вестник науки и образования, 2017. № 3 (27). Том 1.
3. Реут В.А., Грызов Е.В., Корольков В.Г. Имитационная модель системы управления температурой в туннельных печах при производстве корундовых изделий. // Естественные и математические науки в современном мире. № 16. С. 60 – 66, 2014.
4. Реут В.А., Морозов С.М. Твердофазное избирательное окисление никелевых жаропрочных сплавов. // Наука и образование сегодня. № 1 (12), 2017.