

## **РАДИОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОМПОНЕНТНОГО СОСТАВА МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ СМЕСЕЙ. ЧАСТЬ 1**

О.Н. Сухоручко, В.И. Луценко, А.П. Корецкий  
(Институт радиофизики и электроники НАН Украины, Харьков)

*Приведены результаты анализа радиофизических методов и экспериментальные данные по использованию аппаратуры сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн для определения процентного содержания компонент мелкодисперсных смесей на различных стадиях технологического процесса.*

*радиофизические методы, компонентный состав, мелкодисперсные смеси*

**Введение.** В технологическом цикле производства мелкодисперсных смесей требуется оперативный контроль компонентного состава на различных стадиях последовательности процесса. Обзор работ за последние годы показывает, что существует большое разнообразие методов и устройств для контроля качества смесей. Эти методы можно разделить на несколько основных групп: акустические, люминесцентные, флюоресцентные, ядерные методы с анализаторами  $\gamma$ -излучения, спектроскопические. Разработкой анализаторов занимаются зарубежные фирмы ФРГ, США, Японии, имеется ряд разработок в странах СНГ. В этих разработках, как правило, применяются последние достижения в ядерной физике, спектроскопии, акустике, рентгенокопии. Установки этого класса в условиях промышленного производства обеспечивают необходимую точность определения компонентного состава, однако представляют собой сложные технические устройства, имеют большое время анализа на промежуточных и конечных стадиях производства.

Для решения подобных задач могут эффективно применяться радиофизические способы с применением техники сверхвысоких частот (СВЧ). Имеются работы, проведенные в СНГ и за рубежом по использованию радиоволновых методов изучения различных технологических процессов, в которых определяются для жидких и твердых диэлектрических материалов такие параметры, как содержание влаги, однородность и расход в движущихся средах, количественное содержание компонент в смеси диэлектриков и ряд других параметров [1]. Учитывая то, что к настоящему времени в СВЧ диапазоне разработаны источники колебаний, элементная база, при-

ёмные устройства вплоть до волн с частотой 1000 ГГц, можно ориентироваться на их применение для ряда задач в интересах промышленных производств. Высокое разрешение в пространстве и большая информационная ёмкость коротковолновых диапазонов позволяет использовать их для определения компонентного состава мелкодисперсных смесей.

**Целью работы** является оценка принципиальной возможности определения процентного соотношения смесей, используемых при производстве цемента и состоящих из заданных компонентных материалов  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ .

**Обоснование методов исследований.** Рассмотрены следующие методы анализа: 1) радиоволновые методы измерений параметров; 2) магнитные измерения для  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

Применение радиоволновых методов в диапазоне сверхвысоких частот возможно с использованием различного типа резонансных систем чувствительными методами измерения частоты, фазы и амплитуды резонаторов, заполненных одним или смесью диэлектриков. Известно, что диэлектрическая проницаемость материала определяется соотношением Клаузиуса-Моссоти [2]

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = \frac{1}{3} N\alpha, \quad (1)$$

где  $n$  – показатель преломления;  $N$  – число атомов на единицу объема;  $\alpha$  – поляризуемость материала.

Для смеси компонент соотношение (1) приобретает вид

$$3 \left( \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right) = \sum N_i \alpha_i \beta_i, \quad (2)$$

где  $N_i$  – число атомов каждой компоненты в веществе;  $\alpha_i$  – поляризуемость;  $\beta_i$  – коэффициент взаимодействия между молекулами, причем  $\beta_1 = 1$  для материалов с  $\varepsilon = 2 \div 4$ .

Известно, что для резонаторов, заполненных диэлектриками, собственные частоты колебаний зависят от величины диэлектрической постоянной материала. Введение разного рода включений на фоне однородного материала будет приводить к изменению резонансной частоты, скорости распространения электромагнитной волны и затухания в заданном объёме [3].

Для этого можно использовать некоторые виды резонаторов, в частности прямоугольной, цилиндрической формы и открытые резонаторы.

Для резонаторов различной формы собственные частоты  $f_0$  определяются выражением

$$f_0 = \left( 1 / \sqrt{\varepsilon \mu} \right) \Psi, \quad (3)$$

где  $\epsilon$ ,  $\mu$  – диэлектрическая и магнитная проницаемость материала, находящегося внутри резонатора;  $\Psi$  – функция, зависящая от геометрических размеров и формы резонатора, причем для прямоугольного резонатора

$$\Psi = \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{c}\right)^2}, \quad (4)$$

где  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – геометрические размеры резонатора;  $m$ ,  $n$ ,  $p$  – целые числа.

Для цилиндрических резонаторов

$$\Psi = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{A_{nm}}{R}\right)^2 + \left(\frac{\rho\pi}{L}\right)^2}, \quad (5)$$

где  $A_{nm}$  – корни уравнений Бесселя;  $R$ ,  $L$  – геометрические размеры резонатора.

Из приведенных выражений (3) – (5) видно: для резонансного объема, заполненного диэлектриком, меняется его резонансная частота. Смещение же частоты, как видно из соотношения (3), определяется выражением

$$\frac{\Delta f}{f_0} = -\frac{1}{2} \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon_0}. \quad (6)$$

В технике частота, как физическая величина, измеряется наиболее точно, поэтому такой метод может быть использован при измерении свойств диэлектриков, в том числе и окислов.

**Основной материал исследований.** Для практической реализации рассмотренного метода необходимо построение схемы, включающей в себя источник СВЧ колебаний в сантиметровом или миллиметровом диапазоне, волноведущие системы в виде прямоугольных или цилиндрических волноводов, опорный канал с калиброванным по частоте и добротности резонатором, заполненным эталонным материалом.

Процесс измерения может быть непрерывным либо выборочным, измеряемая величина выводится в аналоговом, цифровом или частотном виде для обработки и управления технологическим процессом для дозирования компонентного состава.

Измерения производились на стандартном панорамном измерителе КСВН и ослабления типа P2-68. Блок-схема установки приведена на рис. 1.

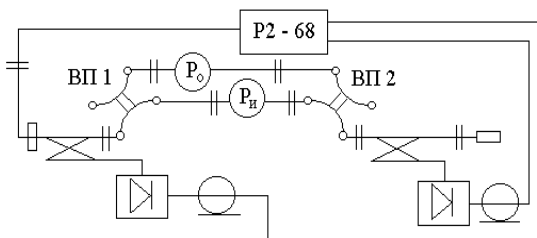


Рис. 1. Блок-схема установки для измерения процентного содержания  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в шликере

Генератор качающейся частоты совместно с индикатором, двумя направленными ответвителями с детекторными секциями и согласованной нагрузкой позволяют исследовать амплитудно-частотную характеристику исследуемого объекта в диапазоне частот (26 ÷ 37,5) ГГц.

В качестве исследуемого объекта использовался СВЧ резонатор ( $P_{и}$ ), заполненный исследуемыми веществами ( $CaCO_3$ ,  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ), а также их смесями в разных процентных соотношениях. В зависимости от заполнения и процентного содержания, резонансная частота резонатора изменялась в широких пределах.

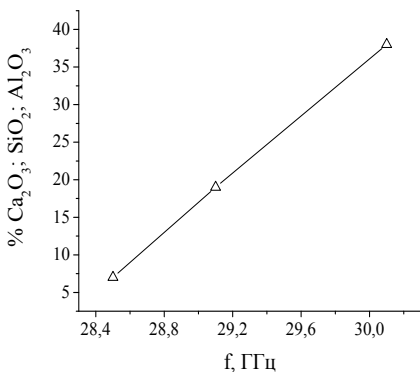
При измерении использовались два идентичных резонатора  $P_0$  (эталонный) и  $P_{и}$ . Волноводные переключатели (ВП1) и (ВП2) позволяют включать в измерительный тракт поочередно опорный резонатор  $P_0$  и измерительный резонатор  $P_{и}$ . Опорный резонатор заполнен чистым веществом ( $CaCO_3$ ,  $SiO_2$ ,

или  $Al_2O_3$ ), а измерительный резонатор – сырьём, содержащим смесь из этих элементов. По разности резонансных частот для  $P_0$  и  $P_{и}$  определяется процентное содержание интересующего элемента в сырье.

Исследования проводились на смесях  $CaCO_3$ ,  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$  в различных процентных соотношениях. На рис. 2 приведены экспериментальные данные ухода частоты в зависимости от процентного содержания элементов.

Характеристика имеет линейный характер и может использоваться для

Рис. 2. Экспериментальные данные ухода частоты в зависимости от процентного содержания элементов анализа компонентного состава исходного сырья при производстве цемента.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Викторов В.А., Лункин Б.В., Совлуков А.С. Радиоволновые измерения параметров технологических процессов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 208 с.
2. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Т. 7: Пер. с англ. – М.: Мир, 1966. – 290 с.
3. Никольский В.В. Теория электромагнитного поля. – М.: Высш. шк., 1964. – 384 с.

Поступила 1.02.2006

**Рецензент:** доктор физико-математических наук, ст. научный сотрудник В.К. Иванов, Институт радиофизики и электроники НАН Украины, Харьков.