

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ЗЕРНА

МОРОЗОВ Сергей Михайлович, Московский государственный университет технологий и управления имени К.Г. Разумовского (Первый казачий университет)

КАЛИНИНА Марина Николаевна, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

В статье рассмотрены волноводные и резонаторные методы измерения диэлектрической проницаемости; показано, что диэлектрическая проницаемость в СВЧ-диапазоне является линейной функцией плотности зерна, а запредельный резонатор можно использовать для определения влажности движущегося зернового потока.

Введение. При рассмотрении волноводного и резонаторного методов измерения диэлектрической проницаемости, когда в зависимости от влажности зерна, находящегося в электромагнитном поле нагревающей системы или резонатора, находятся их характеристики – собственная частота и добротность, а также характеристики распространения волны – амплитуда, коэффициент отражения, фаза и другие, оказывается, что при измерении влажности на полученные результаты оказывают влияние такие неинформативные параметры, как изменение плотности зерна, следствием чего является существенное снижение точности измерений. Поэтому весьма важна разработка методов и средств влагометрии, обеспечивающих инвариантность результатов измерений к возмущающим факторам.

Цель исследования – определение колебательных характеристик резонатора представляет собой достаточно сложную задачу. Определение резонансной частоты проводится в общем случае приближенными методами, тем более, если определяемый параметр – влажность – изменяется.

Так, если в резонатор произвольной формы объемом V_0 , ограниченный идеально проводящей поверхностью S_0 , заполненный средой с параметрами ϵ_0, μ_0 , вносится другая среда с параметрами ϵ_a, μ_a и объемом $V \leq V_0$, относительное изменение собственной частоты определяется из выражения

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_0} = \frac{\int_{V_0} \left(\Delta\epsilon_a \dot{E} \dot{F}_0^{*} + \Delta\mu_a \dot{H} \dot{H}_0^{*} \right) dv}{\int_{V_0} \left(\epsilon_0 \dot{E} \dot{F}_0^{*} + \mu_0 \dot{H} \dot{H}_0^{*} \right) dv},$$

где $\Delta\epsilon_a = \epsilon_a - \epsilon_0$; $\Delta\mu_a = \mu_a - \mu_0$; \dot{E}_0^*, \dot{H}_0^* – векторы, комплексно сопряженные векторами электрической \dot{E}_0 и магнитной \dot{H}_0 напряженностей в объемном резонаторе объемом V_0 , ограниченном идеальной проводящей поверхностью S_0 и заполненном средой с параметрами ϵ_0, μ_0 ; ω_0 – собственная частота, соответствующая этому полю; \dot{E}, \dot{H} – векторы электрической и магнитной напряженностей в том же резонаторе, заполненном другой средой с параметрами ϵ_0, μ_0 ; ω_0 – собственная частота, соответствующая этому полю, $\Delta\omega = \omega - \omega_0$.

Добротность резонансной системы является характеристикой затухания электромагнитных колебаний в резонаторах. Само же затухание определяется потерями энергии в стенках резонатора и в среде, заполняющей резонатор. Комплексная диэлектрическая проницаемость $\epsilon = \epsilon' - i\epsilon''$. Диэлектрические потери можно характеризовать также тангенсом угла потерь $\text{tg}\delta = \epsilon''/\epsilon'$, учитывают потери в диэлектрике. Связь между проводимостью σ и диэлектрической проницаемостью среды ϵ_0 выражается формулой $\sigma = \omega\epsilon_0\epsilon''$.



Методика исследований. Известные методы измерения добротности, основанные на измерении коэффициента отражения при включении резонатора как оконечной нагрузки линии или коэффициентов отражения и передачи при включении резонатора в линию как проходного элемента, а затем последующего вычисления по соответствующим формулам трудно поддаются автоматизации. Предпочтителен метод, основанный на определении добротности по резонансной кривой, приближенно описываемый выражением

$$E_m / E_{\text{рез}} = 1 / \sqrt{1 + [2Q(f - f_0) / f_0]^2}$$

где E_m – амплитуда напряженности поля на частоте f ; $E_{\text{рез}}$ – амплитуда напряженности поля на резонансной частоте f_0 .

Определение характеристик распространения волны в волноводе осуществляется следующим образом.

Если в волноводе распространяется волна, то комплексные амплитуды напряжения и тока в любом сечении передающей линии Z можно представить в следующем виде:

$$\dot{U}(Z) = \dot{U}_{\text{пад}} e^{-kz} + \dot{U}_{\text{отр}} e^{kz};$$

$$\dot{I}(Z) = \frac{\dot{U}_{\text{пад}}}{Z_0} e^{-kz} + \frac{\dot{U}_{\text{отр}}}{Z_0} e^{kz},$$

где $\dot{U}_{\text{пад}}$ и $\dot{U}_{\text{отр}}$ – амплитуды падающей и отражающей волн соответственно; Z_0 – волновое сопротивление, $Z_0 = \frac{\dot{U}_{\text{пад}}}{\dot{I}_{\text{пад}}}$.

Пусть на пути распространения электромагнитной волны в плоскости $Z = e$ волновода расположен некоторый элемент, отражение от которого характеризуется коэффициентом отражения Γ , который может быть равен:

$$\Gamma_z = \Gamma e^{-2ik(\ell-z)},$$

т.е. в идеальном волноводе модуль коэффициента отражения не меняется вдоль волновода и

$$|\Gamma_z| = |\Gamma_\ell| = |\Gamma|.$$

При этом максимумы амплитуды напряженности поля пропорциональны значению

суммы $1 + |\Gamma|$, а минимумы пропорциональны разности $1 - |\Gamma|$.

Отношение максимальной и минимальной амплитуд напряженности поля и определяют коэффициент стоячей волны КСВ:

$$КСВ = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}.$$

Простейший вариант схемы измерения КСВ включает в себя зонды, в которых амплитуды напряженности поля имеют максимальные и минимальные значения. И после детектирования сигналов с зондов берется их отношение.

Методы измерения диэлектрических констант материалов с помощью резонаторов имеют много общего с волноводными методами, т.к. резонаторы можно рассматривать как отрезки линий передач, в которых имеют место стоячие волны.

Резонаторные методы измерения параметров материалов основаны на изменении свойств колебательных систем при введении в них образцов исследуемого вещества [1, 3].

В диапазоне сверхвысоких частот с использованием резонатора измеряют его частоту и добротность при заполнении исследуемым веществом и свободном от него состоянии. Расчет параметров вещества проводится с помощью соотношений:

$$\varepsilon = \left(\frac{\omega_0}{\omega_\varepsilon} \right)^2; \quad \text{tg} \delta = \frac{1}{Q_\varepsilon} - \frac{1}{Q_0},$$

где $\omega_0, \omega_\varepsilon, Q_0, Q_\varepsilon$ – резонансные частоты и добротность пустого и заполненного исследуемым материалом резонатора.

Этот метод удобен для измерения параметров газа, жидкостей и сыпучих материалов. Недостаток состоит в следующем: если для данного вещества $\varepsilon \gg 1$, то при помещении его в резонатор частота существенно смещается, при этом изменяется собственная добротность, что приводит к большей погрешности при вычислении. Кроме того, практически трудно заполнить сыпучим диэлектрическим материалом всю внутреннюю полость резонатора так, чтобы не оставалось малых зазоров. Поэтому при измерении параметров сыпучих материалов следует применять другой метод,



закрывающийся в частичном заполнении объема резонатора.

Сначала резонатор без используемого материала при помощи поршня настраивают на заданную частоту и измеряют его добротность Q_0 , а затем внутрь резонатора помещают материалы и снова добиваются резонанса, после этого измеряют добротность Q_ϵ и длину волны l_1 . Общая добротность резонатора с учетом потерь в диэлектрике будет равна:

$$Q_\epsilon = \frac{1}{\frac{1}{Q_d} - \frac{1}{Q_0}}.$$

В резонаторных методах достаточно просто реализуются схемы, в которых диэлектрические трубопроводы с контролируемыми веществами пропускаются через сквозные отверстия в стенах полостей объемных резонаторов.

Если стенки не препятствуют прохождению контролируемого вещества по трубопроводу, то такие конструкции объемных проточных резонаторов могут быть применены для измерения в потоках. При этом полость резонатора не ограничена полностью замкнутой металлической поверхностью, но, тем не менее, резонатор может иметь высокую добротность [2].

В этом случае применяют различные отражатели для волн соответствующих типов, располагая в двух сечениях трубопровода поперек него металлические решетки. Форма и расположение тонких проводников в решетках соответствуют силовым линиям электрического поля в поперечной к оси трубопровода плоскости «удерживаемого» типа колебаний в волноводном резонаторе, ограниченном внутренней поверхностью трубопровода и указанными поляризационными решетками.

На рис. 1, а показан объемный резонатор такого типа. При рабочих колебаниях типа H_{11n} экспериментально установлено, что нужно от 3 до 7 тонких (диаметром 1 мм) проводников в каждой решетке для получения сигнала достаточного для дальнейшего преобразования амплитуды.

Другой подход к построению объемных резонаторов открытого типа связан с использованием торцевых отражающих элементов в виде запердельных волноводов для тех собственных частот, на которых возбуждаются проточные резонаторы [6]. Их называют открытыми предельными резонаторами. Например, две тонкие металлические пластины 6 и 7 (рис. 1, б), диаметрально и одинаковым образом расположенные в трубопроводе 4 на некотором расстоянии друг от друга вдоль его длины, являются хорошими отражателями для волн типа H_{11} с соответствующим расположением их силовых линий на частотах, меньших критических частот возбуждения волноводов с сечением, равным половине поперечного сечения основного волновода. Вследствие этого на колебаниях типа H_{11n} трубопровод на участке между пластинами 6 и 7 является открытым предельным резонатором с высокой добротностью. Известны различные конструкции отражателей, применяемых в резонаторах открытого типа [4].

Известно, что влагосодержание определяется как отношение массы воды M_b к массе $M_b + M_o$ образца исследуемого вещества (m_o – масса обезвоженного образца) может быть представлено в виде дроби:

$$W = \frac{M_b}{M_b + M_o} = \frac{\frac{M_b}{V_o}}{\frac{M_b}{V_o} + \frac{M_o}{V_o}} = \frac{m_b}{m_b + m_o},$$

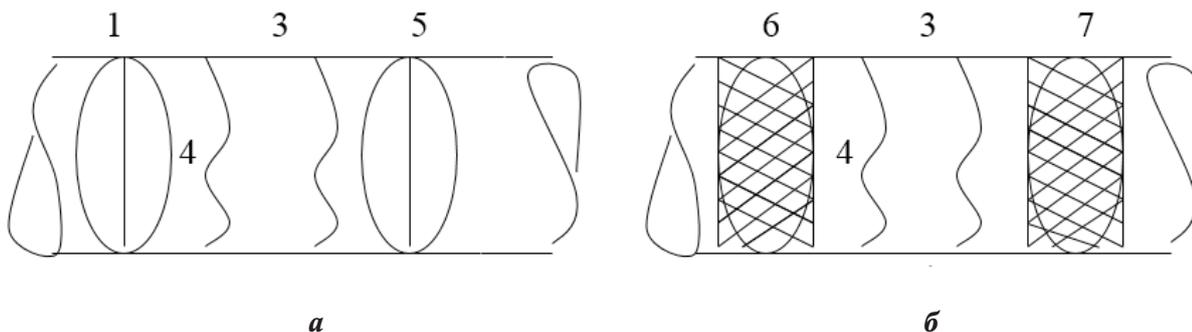


Рис. 1. Волновые резонаторы с торцевыми «поляризационными» решетками (а) и торцевыми отражающими пластинами (б)





где V_0 – объем влажного образца, $m_\epsilon = \frac{M_\epsilon}{V_0}$ и $m_0 = \frac{M_0}{V_0}$ – характеристики единичного объема.

Измеряемые величины амплитуды A и сдвига фаз ϕ представляются в виде линейных функций:

$$A = F_1(m_\epsilon, m_0); \quad \phi = F_2(m_\epsilon, m_0).$$

или

$$A = (am_\epsilon + bm_0)h; \quad \phi = (cm_\epsilon + dm_0)h,$$

т.к. на практике часто имеет место простейший вид аналитической зависимости – линейный.

Толщина слоя контролируемого вещества h из этих выражений будет равна

$$h = \frac{A}{am_\epsilon + bm_0} \quad \text{и} \quad h = \frac{\phi}{cm_\epsilon + dm_0},$$

т.е. из основного свойства пропорции получаем:

$$Acm_\epsilon + Adm_0 = \phi am_\epsilon + \phi bm_0,$$

где a, b, c, d – числовые коэффициенты для заполнения объема 1 см^3 конкретным веществом с определенными физическими свойствами.

После группировки относительно m_ϵ и m_0 получим:

$$m_\epsilon = \frac{Ad - \phi b}{\phi a - Ac} m_0, \quad m_\epsilon + m_0 = \frac{Ad - \phi b + \phi a - Ac}{\phi a - Ac}.$$

Подстановка в исходную формулу полученных данных приведет к доказательству независимости влагосодержания от толщины материала.

$$W = \frac{Ad - \phi b}{\phi a - Ac} \cdot \frac{Ad - \phi b + \phi a - Ac}{\phi a - Ac} = \frac{Ad - \phi b}{A(d - c) + \phi(a - b)}.$$

Наличие влаги в веществе отражается на значениях как действительной ϵ' , так и мнимой ϵ'' частей его диэлектрической проницаемости $\epsilon = \epsilon' - i\epsilon''$. В общем случае выразить ϵ в функции влагосодержания W и плотности ρ сухого вещества не удается.

Результаты исследований. Анализ многочисленных измерений влажности малоплотных и сжимаемых органических веществ приводит к выводу, что в СВЧ-диапазоне функции $\epsilon'(W, \rho) - 1$ и $\epsilon''(W, \rho)$ являются линейными функциями плотности в определенных, иногда достаточно широких диапазонах ее изменения. При более высоких плотностях и больших содержаниях влаги эти зависимости несколько отклоняются от линейных, но на практике функция

$$A(W) = \epsilon'(W, \rho) / \epsilon''(W, \rho)$$

практически не зависит от плотности и является функцией только влагосодержания. Это характерно для большинства применяемых веществ [5].

По функциям $\epsilon'(W)$ и $\epsilon''(W)$ в соответствии с формулой находим $A(W)$, не зависящее от плотности. Таким образом, путем измерения величин ϵ' и ϵ'' (или им адекватных) можно определить влагосодержание W зернового потока.

Большую точность и чувствительность обеспечивают резонаторные методы измерения влажности зерна в потоках. Достаточно просто реализуются схемы, в которых зерно по диэлектрическим трубопроводам пропускается через сквозные отверстия в стенках полостей объемных резонаторов (рис. 2).

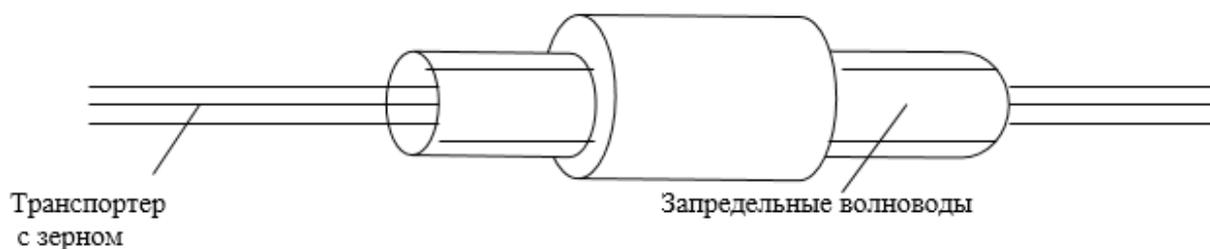


Рис. 2. Объемный запредельный резонатор

Заключение. Метод реализуется при применении, так называемого, запердельного резонатора с высокой добротностью (около 3000), которая при заполнении исследуемым материалом может уменьшиться на порядок. Задаем время с помощью ПК таким образом, что часть потока зерна на транспортере полностью пересекла объем резонатора. По уходу резонансной частоты определяется влажность соотношением, в котором коэффициент В подбирается эмпирически с учетом диэлектрической проницаемости транспортной ленты, толщины насыпи зерна и ряда других факторов. На применении запердельного резонатора основан метод измерения влажности движущегося зернового потока устройством.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузьмин К.А., Морозов С.М. Определение структуры измерительных стенов СВЧ-установки для сушки и обжига строительного кирпича // Инженерный вестник Дона. – 2018. – № 2. – С. 60–69.

2. Кузьмин К.А., Морозов С.М. Определение оптимальных режимов работы СВЧ-установки для сушки и обжига строительного кирпича // Инженерный вестник Дона. – 2018. – № 3. – С. 75–83.

6. Morozov S., Kuzmin K., Makarov G. Neural network principle of implementation of digital filters // MATEC Web Conf. – №193. 2018. С. 102–115.

4. Расчет параметров и характеристик СВЧ установки сушки и обжига кирпича

пича / С.М. Морозов [и др.] // Бюллетень строительной техники (БСТ). – 2018. – № 9. – С. 37–49.

5. Электродинамическое моделирование СВЧ-установки сушки и обжига строительного кирпича / С.М. Морозов [и др.] // Бюллетень строительной техники (БСТ). – 2018. – № 9. – С. 62.

3. Разработка исходных концепций метрологического обеспечения измерительных и расчетных операций при автоматизации измерений / С.М. Морозов [и др.] // Аграрный научный журнал. – 2019. – № 4. – С. 87–89.

Морозов Сергей Михайлович, канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой «Естественно-научные, технические дисциплины и информационные технологии», Московский государственный университет технологий и управления имени К.Г. Разумовского (Первый казачий университет). Россия.

215100, Смоленская обл., г. Вязьма, ул. Ленина, 77.

Тел.: (48131) 6-18-66.

Калинина Марина Николаевна, старший преподаватель кафедры «Инженерные изыскания и геоэкология», Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Россия.

129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26.

Тел.: (495) 781-80-07.

Ключевые слова: резонатор; волновод; частота; добротность; амплитуда; напряженность; затухание; диэлектрическая проницаемость; диэлектрик; передающая линия; тип колебания; влагосодержание; сдвиг фаз.

ELECTROMAGNETIC METHODS FOR DETERMINING GRAIN HUMIDITY

Morozov Sergey Mikhaylovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, head of the chair “Science and Technical Disciplines and Information Technology”, K.G. Razumovsky Moscow State University of Technologies and Management (the First Cossack University), Russia.

Kalinina Marina Nikolaevna, Senior Teacher of the chair “Engineering Surveys and Geoecology”, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Russia.

Keywords: resonator; waveguide; frequency; quality factor; amplitude; tension; attenuation; dielectric constant;

dielectric; transmission line; type of oscillation; moisture content; phase shift.

The article considers the waveguide and resonator methods for measuring the dielectric constant. It is shown that the dielectric constant in the microwave range is a linear function of grain density, and the transverse resonator can be used to determine the moisture content of a moving grain flow.

