

УДК 621.365.55

*И.Л. Бошкова, Т.Ю. Дементьева, Е.В. Георгиев, Е.Н. Колобков*

Учебно-научный институт холода, криотехнологий и экоэнергетики им. В.С. Мартыновского ОНАПТ, ул. Дворянская, 1/3, г. Одесса, 65082.

**ИЗМЕРЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАСТИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

*Изучены особенности резонансного метода для исследования полярных диэлектриков в микроволновом электромагнитном поле частотой 2450 МГц. Проведены измерения резонансной частоты и добротности резонатора без диэлектрического образца (растительный материал) и с образцом, помещенным в резонатор. По полученным значениям резонансных частот и добротности рассчитаны диэлектрические характеристики влажного растительного материала. Определено влияние температуры материала и его плотности на относительную диэлектрическую проницаемость  $\epsilon'$ , тангенс угла потерь  $\text{tg}\delta$  и коэффициент потерь  $\epsilon''$ .*

**Ключевые слова:** диэлектрические характеристики – сантиметровой диапазон – растительный материал – резонансный метод – температура – плотность.

*The features of the resonance method for the study of polar dielectrics in the microwave electromagnetic field frequency of 2450 MHz were studied. The measurements of the resonance frequency and the quality factor of the dielectric resonator without a sample (plant material), and the sample placed in the cavity performed. According to the obtained values of the resonant frequency and the quality factor calculated dielectric properties of wet plant material. The influence of the temperature of the material and its density on the relative dielectric constant  $\epsilon'$ , loss tangent  $\text{tg}\delta$  and loss factor  $\epsilon''$  was determined.*

**Key words:** dielectric properties – microwave frequencies – the plant material – the resonance method – temperature – density.

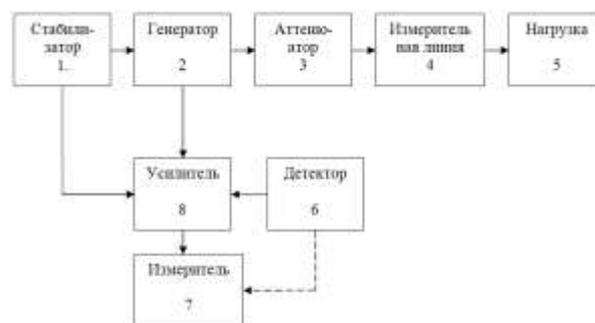
**I. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ**

В последние десятилетия наблюдается рост интереса к применению в промышленности диэлектрического нагрева материалов – в процессах сушки, дезинсекции, дезинфекции, биостимуляции, разогрева. Диэлектрический нагрев основан на смещении зарядов и связанных с ними молекул при воздействии на вещество переменного электромагнитного поля [1, стр. 9], что обуславливает объемный нагрев материала, благодаря чему исключается либо существенно ограничивается необходимость применения промежуточного агента (теплоносителя) и интенсифицируются процессы переноса теплоты и массы. Для оценки теплового эффекта взаимодействия микроволнового поля с материалом часто нужны знания диэлектрических характеристик, таких как относительная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon'$ , тангенс угла потерь  $\text{tg}\delta$  и коэффициент потерь  $\epsilon'' = \epsilon' \cdot \text{tg}\delta$ . Целью работы являлось определение диэлектрических характеристик растительного материала, предназначенного для экстрагирования или сушки. Подобные исследования приводятся в работах, проводимых под руководством проф. Нельсона [2,3,4], сведения о которых служили отправной точкой при составлении методик и обработки результатов, однако непосредственно применить их не представлялось возможным из-за отсутствия аналогичной номенклатурной базы и ограниченным количеством данных по интересующим нас материа-

лам. Задачами работы являлись: разработка измерительной схемы и функциональной схемы установки, разработка методики измерения диэлектрических характеристик, проведение измерений и анализ результатов.

**II. СХЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК**

Структурная измерительная схема приведена на рисунке 1.



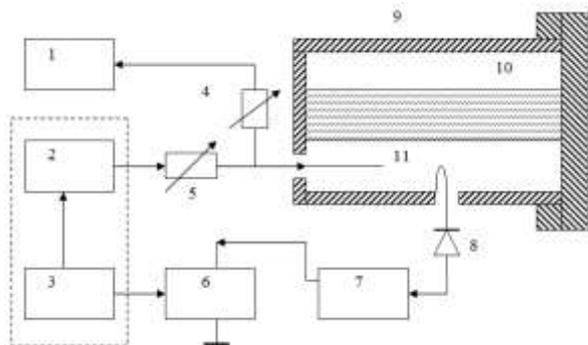
**Рисунок 1** – Структурная измерительная схема измерения диэлектрических характеристик  
1 – стабилизатор питания, 2 – генератор с рабочей частотой 2450 МГц (Г4-9), 3 – аттенюатор Д5-17, 4 – измерительная линия, 5 – нагрузка: блок с образцом материала, 6 – детектор Э9-11, 7 – измеритель: осциллограф С1-54, 8 – усилитель УЗ-7А

Для определения значений  $\varepsilon'$  и  $\varepsilon''$  растительного материала применен резонансный метод, основная идея которого состоит в определении резонансной частоты и добротности резонатора сначала без диэлектрического образца, а затем с образцом, помещенным в резонатор [5, стр. 89]. Поскольку в наших исследованиях микроволнового нагрева применяются магнетроны с частотой генерации микроволнового поля  $f = 2450$  МГц, измерения этих характеристик должны проводиться на волнах сантиметрового диапазона.

Выбор типов приборов определялся частотным диапазоном, для которого измеряются величины  $\varepsilon'$  и  $\varepsilon''$ .

Значения  $\varepsilon''$  и  $tg\delta$  зависят от температуры субстрата, влажности, насыпной плотности, состава, содержания добавок. Для определения значений этих величин в субстрате при влажности от 60% до 85% проводились измерения резонансной частоты и добротности специального резонатора с образцом субстрата и без него, с последующими вычислениями  $\varepsilon''$  и  $tg\delta$ .

Схема, приведенная на рисунке 2, предусматривает наблюдение на экране осциллографа резонансные кривые резонатора с образцом растительного материала и без него. При этом ординаты кривых пропорциональны мощности возбуждаемых МВ колебаний, а абсциссы соответствуют линейному масштабу изменения резонансных частот.



**Рисунок 2** – Функциональная схема установки для определения  $\varepsilon''$  и  $tg\delta$ : 1 – частотомер ЧЗ-19, 2-3 – МВ генератор, 4,5 – аттенюаторы Д5-17, 6 – осциллограф С1-54, 7 – усилитель УЗ-7А, 8 – термосторная головка Э7-11 (детектор), 9 – цилиндрический резонатор диаметром  $D$  и длиной  $L$ , 10 – тонкостенная трубка из кварцевого стекла, толщиной 1 мм и диаметром 40 мм, 11 – зонд для возбуждения резонатора (длина зонда  $l_1 = \lambda/4 = 30$  мм), сечение – 3 мм, смещение от оси (продольной) резонатора  $h = 3,5-3,8$  см.

Резонатор возбуждается от клистронного МВ генератора с помощью зонда 11. Частота генератора модулируется пилообразным напряжением, которое одновременно подается на горизонтальные пластины осциллографа 6. К его вертикальным пластинам подводится сигнал, снимаемый с детекторной головки 8, который усиливается усилителем 7. Частотомер 1 служит для настройки

генератора на рабочую частоту, аттенюаторы 4 и 5 – для регулирования мощности генератора в необходимых пределах. Измерение изменения резонансных частот более точно производится с помощью частотомера 1.

### III. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Для вычисления диэлектрической проницаемости образца  $\varepsilon'$  с учетом того, что диаметр резонатора  $D$  намного больше диаметра тонкостенной кварцевой трубки с образцом субстрата  $d$ , а длина диэлектрического стержня равна длине резонатора, существует зависимость [5, стр.76]:

$$\varepsilon' = 1 + 0,54 \left( \frac{D}{d} \right)^2 \frac{f_1 - f_0}{f_0},$$

где  $f_0$  - собственная резонансная частота резонатора,  $f_1$  - резонансная частота нагруженного резонатора (при заполнении трубки растительным материалом), Гц. Значения резонансных частот  $f_0$  и  $f_1$  определяются с помощью электронно-счетного частотомера Ч2-9А по резонансным кривым на осциллографе.

Тангенс угла потерь рассчитывался по формуле по формуле [5, стр.98]:

$$tg\delta = \frac{0,27}{\varepsilon'} \left( \frac{D}{d} \right)^2 \left( \frac{1}{Q_1} - \frac{1}{Q_0} \right),$$

где  $Q_0$  - собственная добротность резонатора,  $Q_1$  - нагруженная добротность резонатора (резонатор с заполненной трубкой субстратом). Значения добротностей  $Q_1$  и  $Q_0$  определяются расчетным путем. Для этого необходимо определить частоты, соответствующие половинному уровню резонансной кривой на экране осциллографа при нагруженном ( $f_1'$  и  $f_1''$ ) и незагруженном ( $f_0'$  и  $f_0''$ ) резонаторе с помощью частотомера Ч2-9А. Значения  $Q_1$  и  $Q_0$  получены из выражений:

$$Q_0 = \frac{f_0}{f_0' - f_0''}; \quad Q_1 = \frac{f_1}{f_1' - f_1''}$$

Для проведения экспериментов использовался солоmistый материал, предварительно нарезанный на фракции размером 20 – 30 мм и замоченный в течение суток в водопроводной воде при температуре 22 °С, после чего материал был отжат и его влажность доведена до  $72 \pm 1$  %. В таблице 1 представлены результаты исследования влияния температуры на диэлектрические характеристики. Для данных исследований цилиндрический резонатор предварительно помещался в термостат. Температура материала измерялась с помощью термометра, погрешность измерения температуры не превышала  $\pm 2$  °С. Плотность субстрата в резонаторе составляла 320 кг/м<sup>3</sup>, исходная влажность - 73%. Расчет диэлектрических характеристик проводился по приведенным выше формулам. Начальная температура материала  $t = 20$  °С.

**Таблиця 1** – Зависимость диэлектрических характеристик от температуры растительного материала

$t, ^\circ\text{C}$	20	30	40	45	60	65	70	75	80
$\varepsilon'$	38	37	35,5	33	28,8	25	24	23	22,5
$tg\delta$	0,33	0,37	0,43	0,4	0,39	0,39	0,38	0,38	0,37
$\varepsilon''$	12,54	13,69	15,26	13,2	11,23	9,75	9,12	8,74	8,33

Для исследования влияния плотности в образец загружался материал с различной массой, по которой определялась его плотность, для каждого значения проводились эксперименты по описанной выше методике. Температура материала во всех опытах была одинакова и соответствовала  $20^\circ\text{C}$ . Результаты опытов приведены в таблице 2.

**Таблиця 2** - Влияние плотности материала на диэлектрические характеристики

Плотность субстрата, $\text{кг/м}^3$	300	350	400	450
$tg\delta$	0,327	0,363	0,407	0,443
$\varepsilon'$	38,3	40,3	42,0	44,3
$\varepsilon''$	12,52	14,62	17,1	19,62

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Резонансный метод позволяет оперативно проводить диэлектрические измерения и определять величины диэлектрической проницаемости  $\varepsilon'$  и тангенса угла потерь  $tg\delta$  для слоя растительного материала различной плотности и при различной температуре. В исследуемом диапазоне температур (от  $20^\circ\text{C}$  до  $80^\circ\text{C}$ ) величина  $\varepsilon'$  монотонно снижалась, причем конечное значение уменьшилось на 41% по сравнению с начальным. Величина  $tg\delta$  менялась слабо и это изменение не носит регулярный характер. Изменение плотности материала при фиксированной температуре приводит к росту  $\varepsilon'$  и  $tg\delta$ , соответственно, значительному увеличению коэффициента потерь  $\varepsilon''$ . В свою очередь,

рост  $\varepsilon''$  приводит к пропорциональному увеличению мощности, выделяющейся в виде теплоты в единице объема. Таким образом, для повышения эффективности использования энергии микроволнового поля в процессах сушки или экстрагирования растительных материалов следует стремиться к увеличению плотности слоя.

Авторы выражают благодарность Панченко Геннадии Ивановичу, консультации с которым помогли в решении вопросов исследования диэлектрических характеристик и выборе аппаратуры.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Рогов И.А., Некрутман С.В., Лысов Г.В.** Техника сверхвысокочастотного нагрева пищевых продуктов. – М.: Легкая и пищевая промышленность. – 1981.
2. **Nelson S.O.** A System for Measuring Dielectric Properties at Frequencies from 8.2 to 12.4 GHz // J. of Transactions of the ASAE. – 1972. – Vol. 15, No.6. – P. 1094-1098.
3. **Nelson S.O.** Dielectric Properties Measurement Techniques and Applications // J. of Transactions of the ASAE. – 1999. – Vol. 42, No. 2. – P. 523-529.
4. **Nelson S.O.** Dielectric Properties of Agricultural Products and Some Applications // J. of Res. Agr. ENG. – 2008. – Vol. 54, No. 2. – P. 102-112.
5. **Брандт А.А.** Исследование диэлектриков на СВЧ. – М.: Физматиздат. – 1973.

Получена в редакции 07.03.2013, принята к печати 12.03.2013