

В животноводстве такой обмен информацией носит прикладной характер. Например, при изменении количества животных в помещении, оператор задает новую дозу корма, необходимого для животных, при этом не вставая с рабочего места. Это значительно увеличивает производительность труда оператора, уменьшает трудозатраты на производство животноводческой продукции, а следовательно, снижает себестоимость продукции животноводства. Кроме того, данный способ обмена данными может использоваться не только в животноводстве, но и в других областях сельского хозяйства.

## ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВОДЫ В ЗЕРНЕ НА СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТАХ

В.В. Лисовский, (БГАТУ), г. Минск

В настоящее время накоплен большой экспериментальный материал по исследованию диэлектрических характеристик влагосодержащего зерна в сверхвысокочастотном (СВЧ) диапазоне [1-5]. Попытки создания моделей таких материалов на базе известных формул смесей зачастую приводят к результатам плохо согласуемым с экспериментальными данными. Это объясняется сложностью учета диэлектрических свойств воды с различной энергией связи с материалом. Энергетическая или линейная модель влажного зерна [1,2], позволяет устранить этот недостаток.

Рассмотрим диэлектрические свойства воды в зерне, считая ее состоящей из влаги моносорбции, полисорбции и свободной. Влагу с большой энергией связи, т.е. влагу моносорбции, будем рассматривать в первом приближении как постоянную составляющую, диэлектрические свойства которой подробно рассмотрены в [1]. Диэлектрические характеристики свободной воды также хорошо известны [6] и проявляются они при достаточно большой влажности зерна, поэтому основное внимание уделим рассмотрению свойств воды полисорбции. Отметим сначала некоторые характерные экспериментальные данные, которые можно выделить на примере пшеницы [1, 2]:

- изотерма  $\alpha = f(W)$  содержит ярко выраженную точку сингулярности при  $W_{кр} = 10\%$ . Причем на длине волны 3 см  $W > W_{кр}$  наблюдается резкое повышение чувствительности коэффициента ослабления  $\alpha$  к влажности;

- производная  $\frac{\partial \alpha}{\partial Q}$  при  $W > W_{кр}$  отличается не больше чем на  $\pm 10\%$  от  $\alpha_{но}$  ( $\alpha_{но}$  – постоянная ослабления для чистой воды, а  $Q$  – объемная влажность, т.е количество воды в единице объема) на длине волны 3 см;

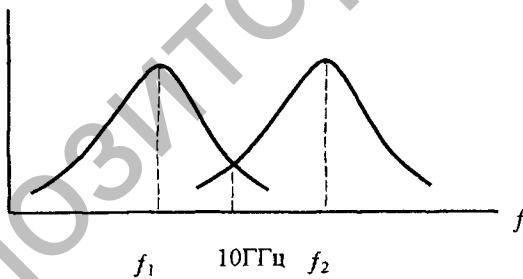
- производная  $\frac{\partial \alpha}{\partial T}$  является постоянной положительной величиной, зависящей от влажности на длине волны 3 см.

Первые два факта могут навести на мысль, что диэлектрические параметры воды полисорбции на длине волны 3 см равны диэлектрическим параметрам свободной воды. Это может быть в двух случаях: либо время диэлектрической релаксации свободной воды и воды полисорбции весьма близки, либо время релаксации воды полисорбции значительно больше времени

релаксации свободной воды и отстоит от времени  $\tau = \frac{3}{2\pi}$  приблизительно на столько, на сколько меньше время релаксации свободной воды времени  $\frac{3}{2\pi}$ .

В этом случае правая ветвь распределения  $\alpha(w)$  на длине волны 3 см приведет к такому значению постоянной затухания, как и для свободной воды.

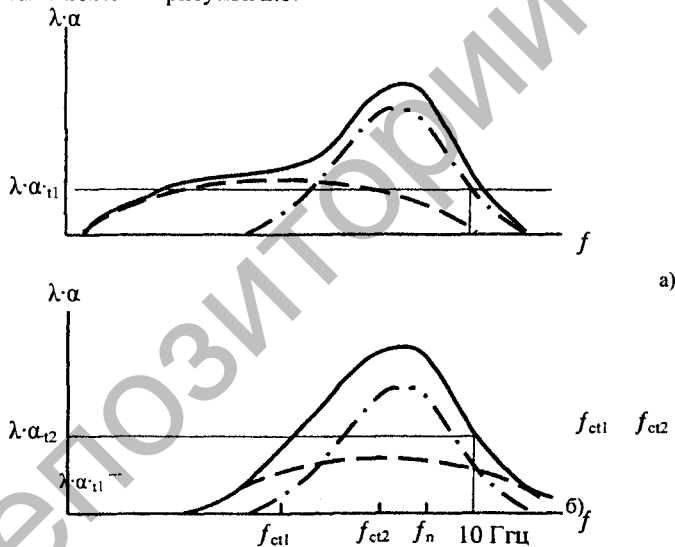
(см. рис. 1.). Очевидно, что в первом случае  $\frac{\partial \alpha}{\partial T}$  при  $W > W_{кр}$  приведет к отрицательной величине, что противоречит экспериментальным данным.



**Рисунок 1** – Две возможные ситуации расположения пика диэлектрической релаксации для воды полисорбции в зерне

С другой стороны, если принять вторую гипотезу то  $\frac{\partial \alpha}{\partial T} > 0$  и по мере увеличения влажности величина  $\frac{\partial \alpha}{\partial T}$ , как следует из линейной модели, будет возрастать, что также противоречит эксперименту.

Это противоречие, на наш взгляд, можно обойти, предположив, что время релаксации воды полисорбции соответствует второй гипотезе. Однако энергия активации для этой формы воды весьма мала (значительно меньше, чем для свободной воды), так что при увеличении температуры зерна время диэлектрической релаксации практически не изменится [1]. В этом случае при увеличении температуры зерна частота релаксации связанной воды будет значительно смещаться в более высокочастотную область, т.к. энергия активации для этой формы связи весьма велика ( $10 \div 15 \frac{\text{ккал}}{\text{моль}}$ ) [1]. Но так как при  $W > W_{\text{кр}}$  количество связанной воды всегда одинаково, то независимо от влажности, общее увеличение постоянной затухания при увеличении температуры на длине волны 3 см, не будет зависеть от влажности. Сказанное выше поясняет рисунок 2.б.



**Рисунок 2** – Расположение пиков диэлектрической релаксации для воды в зерне при температуре  $t_1$ (а) и  $t_2$ (б),  $t_2 > t_1$ . Штриховой линией показан пик диэлектрической релаксации для связанной воды, штрих пунктирной – для воды полисорбции, сплошной линией – суммарный пик.

$f_1$  и  $f_2$  резонансные частоты для связанной воды при температурах  $t_1$  и  $t_2$  соответственно.  $f_n$  – резонансная частота для воды полисорбции,  $\alpha_{11}$  и  $\alpha_{12}$  – постоянные затухания при температурах  $t_1$  и  $t_2$ .

Сделаем еще несколько замечаний. Не все мелкодисперсные материалы должны обнаруживать ярко выраженную точку сингулярности на диэлектрических изотермах. Действительно, если сам мелкодисперсный гетерогенный диэлектрик является смесью различных сухих фракций, неоднородных в отношении их способности сорбировать влагу, то переход от связанной влаги к влаге полисорбции будет происходить плавно по закону, близкому к предсказуемому формулой Бускера-Ивенса [1].

В этом случае следует ожидать, что  $\frac{\partial \alpha}{\partial T}$  будет зависеть от величины влажности, что экспериментально подтверждено для некоторых капиллярно-пористых материалов при больших влагосодержаниях [1 - 2].

На рис.3 представлено условное изображение влажного мелкодисперсного капиллярно-пористого материала в виде слоистой (линейной) модели, где эквивалентный слой, соответствующий объему пор, занимаемых водой, также состоит из трех компонентов (влаги моно-, полисорбции и свободной).

Введем основные параметры, характеризующие влажный материал, которые понадобятся при рассмотрении математической модели диэлектрической проницаемости:

1. Насыпная плотность влажного и сухого материала

$$\rho = \frac{P}{V}; \quad \rho_c = \frac{P - P_n}{V} = (1 - W) \rho, \quad (1)$$

где:  $P$  – вес влажного материала;

$P_n$  – вес воды;

$V$  – объем, занимаемый влажным материалом;

$W$  – весовая влажность.

2. Объемная влажность

$$Q = \frac{P_n}{\rho_n V} = \frac{\rho}{\rho_n} W = \frac{\rho_c W}{\rho_n (1 - W)} \quad (2)$$

В соответствии с [1] комплексная диэлектрическая проницаемость для линейной модели находится как

$$\sqrt{\varepsilon^*} = \sqrt{\varepsilon_n^* q_n} + \sqrt{\varepsilon_c^* q_c} + \sqrt{\varepsilon_v^* q_v}, \quad (3)$$

где: символы Н, С, В означают соответственно воду, сухой материал и воздух.

Так как

$$\operatorname{Im} \varepsilon_c^* = 0, \quad (4)$$

$$\operatorname{Im} \varepsilon_v^* = 0, \quad \operatorname{Re} \varepsilon_v^* = 1, \quad (5)$$

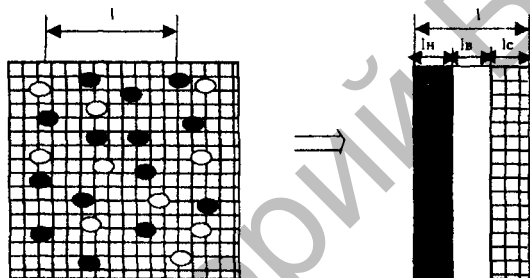
и кроме того,

$$q_n = Q, \quad (6)$$

$$q_c = \Phi, \quad (7)$$

и окончательно получаем:

$$\sqrt{\varepsilon^*} - 1 = Q(\sqrt{\varepsilon_n^*} - 1) + \Phi(\sqrt{\varepsilon_c} - 1). \quad (8)$$



**Рисунок 3** – Условное изображение влажного гетерогенного диэлектрика в приближении линейной модели.

⊕ – сухой материал; ● – поры заполненные водой; ○ – пустые поры.

Расчеты будем проводить (пренебрегая потерями в сухом материале и воздухе ввиду их малости) на основании следующих выражений:

При  $W < W_{кр}$  (имеется только вода с большой энергией связи)

$$\alpha = \alpha_{nc} \frac{\rho_0}{\rho_n} \Phi \frac{W}{1 - W}, \quad (9)$$

$$\beta = \beta_0 + \Phi(\beta_c - \beta_0) + \frac{\rho_0 W}{\rho_n (1 - W)} \Phi(\beta_{nc} - \beta_0). \quad (10)$$

При  $W > W_{кр}$  (добавляется полисорбции и свободная)

$$\alpha = \Phi \frac{\rho_0}{\rho_n} \left[ \frac{W}{(1-W)} \alpha_{no} + \frac{\mu S_{yo}}{N_n \sigma} \alpha_{max} f_1(\alpha_m - \alpha_{no}) + \frac{W_{sp}}{1-W_{sp}} (\alpha_{nc} - \alpha_{no}) \right], \quad (11)$$

$$\beta = \beta_0 + \Phi \left\{ \frac{\rho_0}{\rho_n} \left[ \frac{W}{1-W} (\beta_{no} - \beta_0) + \frac{\mu S_{yo}}{N_n \sigma} \alpha_{max} f_1(\beta_{mn} - \beta_{no}) + \frac{W_{sp}}{1-W_{sp}} (\beta_{nc} - \beta_{no}) \right] + \beta_c - \beta_0 \right\}. \quad (12)$$

Переход от  $\alpha$ ,  $\beta$  к  $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$  и наоборот осуществляется по хорошо известным выражениям [1]:

$$\epsilon' = \beta^2 - \alpha^2 / \beta_0^2, \quad (13)$$

$$\epsilon'' = 2\alpha\beta / \beta_0^2. \quad (14)$$

Рассмотрим соотношение между влагой полисорбции и свободной воды в зерне. Отсутствие дополнительных точек сингулярности на диэлектрических изотермах зерновых культур указывает на то, что переход влаги из состояния полисорбции в состояние свободной воды происходит плавно по мере увлажнения материала. Поэтому для вычисления объемных концентраций воды полисорбции  $q_{np}$  и свободной  $q_{no}$  можно воспользоваться моделью Ивенса-Бускера [1], в которой предполагается, что скорость изменения данной формы влаги по мере увлажнения прямо пропорционально части сорбционного объема незанятой этой влагой. Следовательно, можно записать:

$$\frac{dq_{np}}{dQ} = 1 - \frac{q_{np}}{q_{npmax}}, \quad (15)$$

где:  $q_{npmax}$  – максимальная объемная концентрация влаги полисорбции.

Интегрируя (15) находим:

$$q_m = q_{mmax} \left( 1 - e^{-C \frac{Q}{q_{npmax}}} \right), \quad (16)$$

где:  $C$  – константа интегрирования.

Для нахождения  $C$  учтем, что при  $Q = Q_{sp}$ ,  $q_{np} = 0$

$$C = \frac{Q_{sp}}{q_{npmax}}$$

Следовательно,  $q_{npmax}$ . Таким образом,

$$q_m = q_{mmax} \left( 1 - e^{-\frac{Q_{sp} - Q}{q_{npmax}}} \right). \quad (17)$$

Однако, в таком виде уравнением (17) пользоваться неудобно, поскольку все объемные концентрации, входящие в него, зависят от коэффициента заполнения  $\Phi$ . В (17) должны входить параметры, которые характеризуют данный материал независимо от  $\Phi$ . Очевидно, что под  $q_{npmax}$  можно понимать

максимальное количество монослоев, которое образует влага полисорбции. Так как вес воды, адсорбированной на поверхности твердой фазы [1]:

$$P_H = \frac{S}{\sigma} a_m \frac{\mu}{N_0} = \frac{a_m \mu}{\sigma N_0} S_{уд} (1 - W) \quad (18)$$

где:  $\sigma$  – посадочное место одной молекулы воды на поверхности твердой фазы;

$S$  – общая поверхность материала, включая и поверхность твердой фазы;

$a_m$  – количество монослоев воды;

$\mu$  – грамм-молекулярный вес воды;

$N_0$  – число Авогадро;  $P$  – вес влажного материала;

с учетом (18), можно записать

$$q_{нп\max} = \frac{\mu \rho_0 S_{уд}}{N_A \rho_H \sigma} a_{\max} \Phi \quad (19)$$

где:  $a_{\max}$  – максимальное возможное количество монослоев воды, занимаемых влагой полисорбции в данном материале.

С другой стороны:

$$Q_{кр} = \frac{\rho_0}{\rho_H} \Phi \frac{W_{кр}}{1 - W_{кр}} \quad (20)$$

Таким образом, окончательно имеем:

$$q_{нп} = \Phi \frac{\rho_0 \mu S_{уд}}{\rho_H N_A \sigma} a_{\max} \left\{ 1 - \exp \left[ \frac{(W_{кр} - W) \sigma N_A}{(1 - W_{кр})(1 - W) \mu S_{уд} a_{\max}} \right] \right\} \quad (21)$$

Следовательно, функция

$$f_1(W, S_{уд}, a_{\max}) = 1 - \exp \left[ \frac{(W_{кр} - W) \sigma N_A}{(1 - W_{кр})(1 - W) \mu S_{уд} a_{\max}} \right] \quad (22)$$

характеризующая соотношение между влагой полисорбции и свободной влагой, не зависит от коэффициента заполнения  $\Phi$ .

В заключение рассчитаем диэлектрические характеристики модели пшеницы, приняв следующие величины:

$$\rho_0 = 1,2 \frac{\Gamma}{\text{см}}; S_{уд} = 220 \frac{\text{М}^2}{2}; a_{\max} = 100; W_{кр} = 0,1; \varepsilon_{н\text{ос}} = \varepsilon_{н\text{ис}} = \varepsilon_{н\text{ис}} = 5,1;$$

$$\varepsilon_{н\text{с}}(T = 20^\circ \text{C}) = 60; \varepsilon_{н\text{ис}} = \varepsilon_{н\text{ос}} = 80,4; \lambda_{н\text{ст}} = 377 \text{ см}, \lambda_{н\text{ит}} = 9,5 \text{ см},$$

$$\lambda_{н\text{ит}} = 1,79 \text{ см}, \Delta H_{н\text{с}} = 15 \frac{\text{ккал}}{\text{моль}}; \Delta H_{н\text{ит}} = 1 \frac{\text{ккал}}{\text{моль}}; \Delta H_{н\text{о}} = 4,6 \frac{\text{ккал}}{\text{моль}}.$$

Для параметра распределения  $\alpha$  выберем следующие величины  $\alpha_{нс} = 0.5$ ;  $\alpha_{нт} = 0.3$ ;  $\alpha_{но} = 0$ .

При расчетах принималось, что коэффициент заполнения изменяется с влажностью. Такое явление действительно имеет место, так как по мере увлажнения зерно набухает, а также меняется коэффициент трения между зернами. На основании собственных измерений и литературных данных, приведенных в работах 1 - 5 рассчитаны средние значения коэффициентов заполнения  $\Phi$  в зависимости от влажности. Обобщенные результаты сведены в таблицу 1:

Таблица 1. Среднее значение коэффициента заполнения  $\Phi$  в функции влажности  $W$

W	8%	12%	16%	20%	24%	28%	32%	36%
$\Phi$	0,60	0,54	0,50	0,44	0,43	0,41	0,39	0,37

Эти значения были выбраны при расчетах диэлектрических свойств модели влажной пшеницы. На рис.4 и 5 представлены теоретические зависимости  $\epsilon'(W)$  и  $\epsilon''(W)$  для рассмотренной модели пшеницы.

В связи с тем, что коэффициент поглощения с уменьшением длины волны возрастает ввиду наличия волнового множителя  $\lambda/2\pi$ , то для возможности сравнения на различных частотах строились зависимости действительной  $n$  и мнимой  $\kappa$  от влажности, которые определяются выражениями

$$\kappa = \lambda/2\pi \cdot \alpha, \quad (7)$$

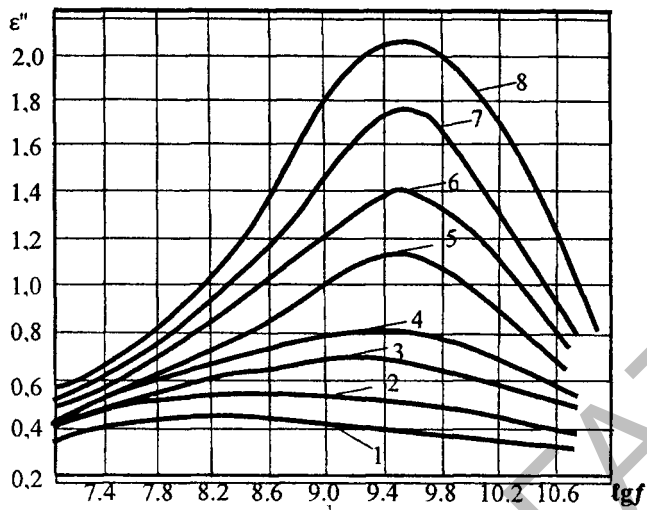
$$n = \lambda/2\pi \cdot \beta, \quad (8)$$

Очевидно, что  $\kappa$  и  $n$  зависят от частоты исключительно за счет дисперсионных свойств влажного материала.

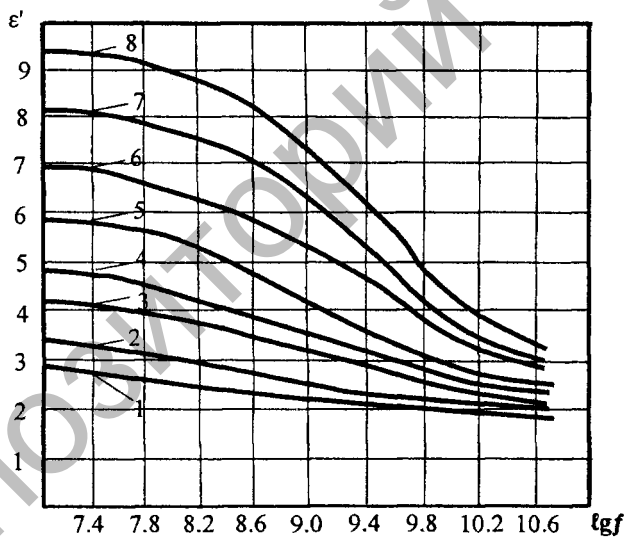
На графиках, приведенных на рисунках 6 и 7 видны характерные изломы на зависимостях  $\kappa$  от влажности на всех длинах волн. Интересно, что производная  $\frac{\partial \kappa}{\partial W}$  возрастает при  $\lambda < 20 \text{ см}$  при переходе через  $W_{кр}$  и убывает при  $\lambda > 20 \text{ см}$ .

Этот характерный факт, который следует из наших теоретических положений. Он требует экспериментального подтверждения. Изменения  $n$  от влажности происходит более плавно и излом отчетливо заметен только на длине волны 2 см. Отметим, что линейная зависимость между  $\kappa$  и  $W$  является следствием убывания коэффициента заполнения  $\Phi$  с ростом влагосодержания.

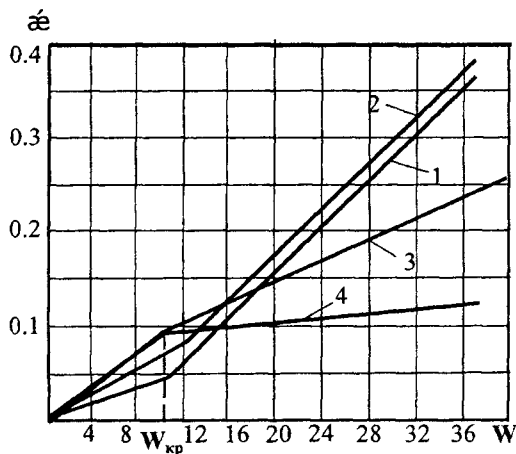




**Рисунок 4** – Расчетные зависимости  $\epsilon''$  от частоты при различных влагосодержаниях для модели пшеницы при  $t = 20$  °C. 1 –  $W = 8\%$ ; 2 –  $W = 12\%$ ; 3 –  $W = 16\%$ ; 4 –  $W = 20\%$ ; 5 –  $W = 24\%$ ; 6 –  $W = 28\%$ ; 7 –  $W = 32\%$ ; 8 –  $W = 36\%$ .

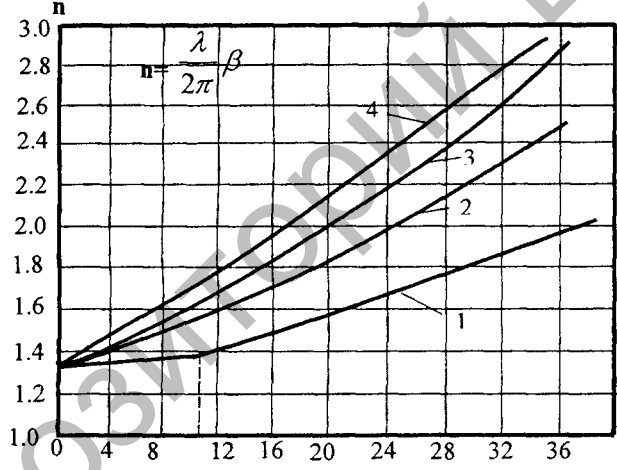


**Рисунок 5** – Расчетные зависимости  $\epsilon'$  от частоты при различных влагосодержаниях для модели пшеницы при  $t = 20$  °C. Обозначения кривых см. рис. 4.



**Рисунок 6** – Расчетные зависимости мнимой части коэффициента преломления  $\alpha$  от влагосодержания на различных длинах волн  $\lambda$  при  $t = 20^\circ\text{C}$ .  $\lambda = 2\text{см}$ ;

2 –  $\lambda = 10\text{см}$ ; 3 –  $\lambda = 50\text{см}$ ; 4 –  $\lambda = 30\text{см}$ .



**Рисунок 7** – Расчетные зависимости действительной части коэффициента преломления  $n$  от влагосодержания на различных длинах волн  $\lambda$  при  $t = 20^\circ\text{C}$ . Обозначения кривых см. рис.6.

Если бы такая зависимость отсутствовала и  $\Phi$  оставая постоянным при любых влажностях, то зависимость  $\varepsilon$  от  $W$  при  $V \sim W > W_{кр}$  была бы степенной функцией 2-го порядка (т.к.  $\frac{W}{1-W} \sim W[1+W]$ ).

Таким образом, предлагаемая математическая модель диэлектрической проницаемости влажного зерна позволяет учитывать основные процессы физической адсорбции, предсказать два пика диэлектрической релаксации воды в зерне, объяснить ее аномальные свойства (положительный температурный коэффициент) и рассчитать зависимость комплексной диэлектрической проницаемости от влажности и температуры в сантиметровом диапазоне электромагнитных волн.

### Литература

1. Бензарь В.К. Техника СВЧ-влажнометрии.-Мн. Высшэйшая школа, 1974. - 352с.
2. Секанов Ю.П. Влажометрия сыпучих и волокнистых материалов. - М.: ВИМ, 2001.-190с.
3. Болдырев В.М. Патрушев В.Л. Результаты исследования влажностной зависимости диэлектрических параметров зерна сильных пшениц на СВЧ.- В сб.: Исследования по математике, физике и химии.- Саратов, 1978, -С.12-23.
4. Бородин И.Ф. и др. Методика исследования электрических свойств зерновой массы в диапазоне частот 0-10<sup>10</sup> Гц. Сборник научных трудов МИИСП.- М., 1976, -С.30-35.
5. Nelson, S. O., Dielectric properties of agricultural products — Measurements and applications. CEJDP Digest of Literature on Dielectrics, IEEE Trans. Elect. Insul., 1991, 26(5), 845-869.
6. Розенберг В.Н. Рассеяние и ослабление электромагнитного излучения атмосферными частицами.- Л.: Гидрометеоздат, 1972, -348с.

## РЕЗОНАТОРНЫЕ УСТРОЙСТВА КОНТРОЛЯ ВЛАЖНОСТИ ВЫСОКОГО КЛАССА ТОЧНОСТИ В ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЯХ АПК

Лисовский В.В., Булко М.И (БГАТУ) г. Минск

В большинстве энергоемких технологических процессах при производстве, переработке и хранении сельскохозяйственной продукции требуется экспрессный и точный контроль влажности. Широкое применение для