

ВИЗНАЧЕННЯ ВОЛОГОСТІ ЗЕРНА ЗА ЗАТУХАННЯМ НВЧ ПОТУЖНОСТІ

Досліджено залежність затухання НВЧ потужності в шарі зерна від його вологості. Показано, що ослаблення потужності залежить тільки від кількості води в одиниці об'єму зерна і не залежить від питомої ваги зерна. Наведені результати вимірювань підтверджують справедливості теоретичних розрахунків.

Вступ. Постановка проблеми. Волога є одним з основних компонентів більшості сільськогосподарських продуктів, яка визначає її якість [1, 2]. Вологість зерна, бавовни й інших продуктів є основним чинником, що визначає можливість тривалого зберігання без псування і втрат цих матеріалів. При переробці зерна від його вологості залежать опір подрібненню, отже, і питома витрата енергії й продуктивність млинового устаткування. Величина вологості зерна враховується при здачі та прийманні, оскільки від неї залежать його чиста вага і дійсна вартість.

Серед методів, що забезпечують швидке і точне вимірювання вологості зерна, особливий інтерес представляє безконтактний метод, в основі якого лежить визначення величини втрат потужності НВЧ, що пройшла через шар матеріалу [3, 4]. Ослаблення, що характеризує втрати НВЧ потужності є функцією електричних властивостей речовини [5, 6]. Ослаблення потужності НВЧ залежить не тільки від вологості, але і від питомої ваги зерна $d \in [\rho]$ [7], яка також є функцією вологості.

Аналізу залежності ослаблення від вологості зерна і впливу його питомої ваги і присвячена дана робота.

Викладення основного матеріалу. Найперспективнішими для вимірювання вологості зерна є прилади, засновані на використуванні техніки вимірювань діелектричних властивостей матеріалів на НВЧ [8]. Для шару зерна середньої і великої вологості ослаблення визначається таким виразом [9]:

$$N \approx 8,68\alpha t, \tag{1}$$

де N – ослаблення сигналу, дБ; α – втрати в шарі зерна, дБ/м; t – товщина шару зерна, м.

Для пасивного, лінійного, оборотного і симетричного чотириполюсника коефіцієнт пропускання (ослаблення) має такий вигляд [10]:

$$N = \frac{2Ze^{i\varphi_0}}{\left(+ Z^2 \overline{\text{sh}\Theta} + 2Zch\Theta \right)}, \tag{2}$$

де $\varphi_0 = \beta_0 t$; β_0 – хвильове число; Z – хвильовий опір хвилеводу; $\Theta = \gamma t$; γ – постійна розповсюдження, яка дорівнює:

$$\gamma = \alpha + i\beta_\epsilon, \tag{3}$$

де β_ϵ – хвильове число електромагнітної хвилі, що пройшла через шар зерна (t).

Величини α і β , що належать виразу (3), є дійсними і уявними складовими комплексної постійної розповсюдження γ і виражаються через діелектричні параметри речовини відомими формулами [9]:

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon' \left(\sqrt{1 + \text{tg}^2 \delta} - 1 \right) / 2}; \\ \beta &= \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon' \left(\sqrt{1 + \text{tg}^2 \delta} + 1 \right) / 2}, \end{aligned} \tag{4}$$

де λ – довжина хвилі; ϵ' – дійсна складова діелектричної проникності речовини; $\text{tg} \delta$ – тангенс кута діелектричних втрат матеріалу.

Виразимо дані величини α і β через діелектричні параметри і кількісний зміст компонентів, що належать зразку зерна. Для цього представимо зерно як систему, що складається з трьох складових: сухої речовини, води й повітря між зернами і позначимо їх як 1, 2 і 3.

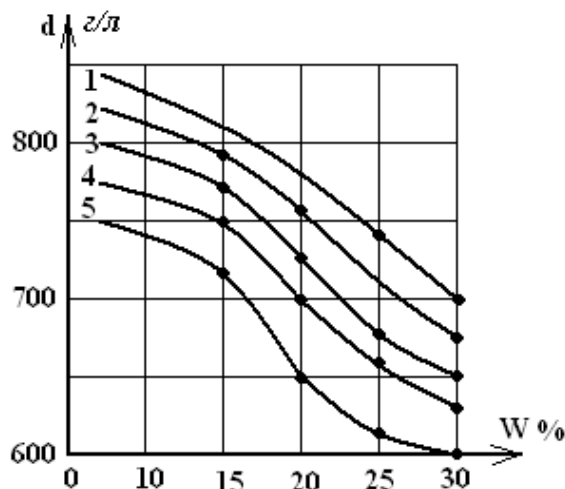


Рис. 1. Залежності $d = f(W)$

Фізико-хімічні властивості сухої речовини зерна різні для кожного виду, типу і сорту. Проте ці відмінності не істотні, оскільки вони виражаються в різному значенні електричних параметрів зерна ε' і $\operatorname{tg} \delta$. На рисунку 1 наведено залежність ваги зерна (d) від вологості (W) для різних зразків пшениці. Представлені дані показують, що зі збільшенням величини вологості W , питома вага d зменшується. Такий хід залежності $d = f(W)$ дозволяє припустити, що збільшення об'ємної частки води в одиниці об'єму зразка відбувається за рахунок зменшення змісту сухої речовини, причому питома вага сухої речовини більше питомої ваги води. Це дозволяє розглядати зразок зерна, що займає об'єм ν , як гетерогенну матричну систему з двох компонентів, в якій зв'язною матрицею є вся маса вологих зерен, а включеннями – повітря між ними.

Діелектрична проникність такої системи з рівномірно розподіленими включеннями еліпсоїдної форми при будь-якій їх концентрації можна представити в такому вигляді [11]:

$$\varepsilon = \varepsilon_{12} \left(1 + \frac{1}{\frac{1 - q_3}{3q_3} + \frac{1}{\varepsilon_3 - \varepsilon_{12}}} \right), \quad (5)$$

де ε_{12} і ε_3 – комплексні діелектричні проникності вологого зерна і повітря; q_3 – відносний об'ємний вміст включень повітря в частках одиниці.

Для визначення діелектричної проникності вологого зерна ε_{12} розглянемо його в об'ємі ν_M , який утворюється сумою об'ємів всіх зерен зразка. Хоча всередині кожного зерна частинки сухої речовини і води можливо утворюють якісь регулярні структури, проте в цілому таку систему можна розглядати, як статистичну суміш також двох компонентів, діелектрична проникність якої визначається виразом [11]:

$$\varepsilon_{12} = A + \sqrt{A^2 + \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{2}}; \quad (6)$$

$$A = \frac{(\varphi_2 - 1)(\varepsilon_2 - \varepsilon_1) + \varepsilon_1}{4},$$

де ε_1 і ε_2 – комплексні діелектричні проникності сухої речовини зерен і води; φ_2 – відносний об'ємний вміст води в частках одиниці.

Визначимо величини q_3 і φ_2 , що належать виразам (5) і (6). Оскільки зразок зерна розглядається як суміш трьох компонентів, то:

$$\sum_{i=1}^3 \nu_i = \nu, \quad (7)$$

де v_j – об'єм, який займає відповідний компонент ($j = 1, 2, 3$ і відповідає наданий вище за нумерацію компонентів).

Припустимо, що густина упаковки сухого зерна відповідає теоретичній густині для еліпсоїдів обертання [11] і:

$$\frac{v_i^0}{v} = \frac{\pi}{3\sqrt{2}}, \quad (8)$$

де v_i^0 – сумарний об'єм всіх сухих зерен.

Оскільки збільшення змісту води в зерні відбувається за рахунок зменшення сухої речовини, то:

$$v_i^0 = v_1 + v_2. \quad (9)$$

З виразів (7) і (9) одержимо:

$$v_3 = v - v_i^0. \quad (10)$$

За визначенням:

$$q_i = \frac{v_i}{v}; \quad \sum_1^3 q_i = 1, \quad (11)$$

тоді з (8) і (10) маємо:

$$q_2 = 1 - \frac{\pi}{3\sqrt{2}}. \quad (12)$$

Аналогічно для об'єму v_m одержимо:

$$Q_i = \frac{v_i}{v_m}; \quad i = 1, 2; \quad \sum_1^2 Q_i = 1. \quad (13)$$

З виразів (9) і (13) слідує, що $v_m = v_i^0$, отже:

$$Q_2 = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} q_2. \quad (14)$$

На практиці звичайно відомий ваговий зміст компонентів (окрім повітря), що належить суміші, тому виразимо Q_2 через величини, що характеризують ваговий зміст води. Об'єм, займаний будь-яким компонентом, можна представити у вигляді:

$$v_i = \frac{P_i}{d_i}; \quad i = 1, 2; \quad \sum_1^2 P_i = P, \quad (15)$$

де P_i і P – вага і повна вага досліджуваного зразка зерна.

З цих виразів з урахуванням (14) одержимо:

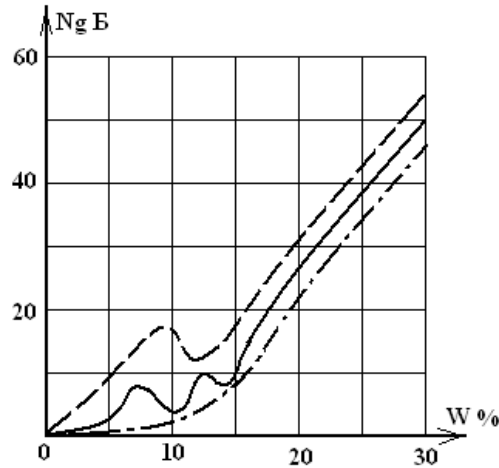
$$Q_2 = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \frac{W_2}{\gamma^2} d, \quad (16)$$

де $W_2 = \frac{P_2}{P}$ – відносний ваговий зміст води.

Таким чином, за допомогою виразів (2)–(6), (12) і (16) за відомими вологістю і питомою вагою зерна можна визначити ослаблення НВЧ потужності, що проходить через зразок вологого зерна.

Розрахунок затухання проводився для значень $\varepsilon_2 = 52$, $\text{tg} \delta = 0,6$ при товщині шару зерна $t = 10$ мм і довжині хвилі 3,5 см. Електричні параметри обезводненого помелу пшениці були виміряні в діапазоні частот 8–12,5 ГГц за допомогою панорамного вимірювача КСВН, причому для різної питомої ваги d ε' змінювалося в межах 2,8–3,2, а $\text{tg} \delta < 0,0014 \div 0,0018$. Вважаючи, що в смузї частот 8–12,5 ГГц суха речовина не дисперсна, при розрахунку затухання використовувалися значення $\varepsilon'_i = 3,0$ і $\text{tg} \delta_i = 0,0016$.

На рисунку 2 наведено графіки залежності ослаблення НВЧ потужності від вологості, розраховані з різним ступенем наближення за формулами (1) і (2). Як видно, залежність має коливання біля деякого середнього значення. Ці коливання пов'язані з впливом фазового кута при відбиттях хвилі всередині середовища від меж середовище–повітря.

Рис. 2. Залежність ослаблення N від вологості W

Оскільки ε_{12} виражається через комплексні ε_1 і ε_2 , то для зручності аналізу і розрахунку представимо вираз (5) у такому вигляді:

$$\varepsilon = \varepsilon' - itg\delta,$$

де $\varepsilon' = K_1\varepsilon'_{12} + K_2tg\varepsilon_{12}$;

$$tg\delta = \frac{K_1 + tg\delta_{12} - K_2\varepsilon'_{12}}{\varepsilon'};$$

$$K_1 = 1 + Q_2 \frac{\varepsilon'_3 - \varepsilon'_{12} \varepsilon'_3 + Q_3 - \varepsilon'_{12} \overline{tg^2\delta_{12}}}{\varepsilon'_3 + Q_3 - \varepsilon'_{12} \overline{tg^2\delta_{12}}};$$

$$K_2 = \frac{Q_3^2 tg\delta_{12}}{\varepsilon'_3 + Q_3 - \varepsilon'_{12} \overline{tg^2\delta_{12}} + tg^2\delta_{12}};$$

$$Q_3 = \frac{3q_3}{1 - q_3},$$

а формула (6) набуде вигляду:

$$\varepsilon_{12} = \varepsilon'_{12} - itg\delta_{12};$$

$$\varepsilon'_{12} = A_1 + \sqrt{\frac{a}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{b}{a}\right)^2} + 1};$$

$$tg\delta_{12} = B_1 + \sqrt{\frac{a}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{b}{a}\right)^2} - 1};$$

$$a = \left(A_1^2 - B_1^2 \right) \frac{\varepsilon'_1 \varepsilon'_2}{2} \left(-tg\delta_1 tg\delta_2 \right) \approx \left(A_1^2 - B_1^2 \right) \frac{\varepsilon'_1 \varepsilon'_2}{2};$$

$$b = 2A_1B_1 + \frac{\varepsilon'_1 \varepsilon'_2}{2} \left(tg\delta_1 + tg\delta_2 \right) \approx 2A_1B_1 + \frac{\varepsilon'_1 \varepsilon'_2}{2} tg\delta_2;$$

$$A_1 = \frac{\left(Q_2 - 1 \right) \left(\varepsilon'_2 - \varepsilon'_1 \right) \varepsilon'_1}{4};$$

$$B_1 = \frac{\left(Q_2 - 1 \right) \left(\varepsilon'_2 tg\delta_2 - \varepsilon'_1 tg\delta_1 \right) + \varepsilon'_1 tg\delta_1}{4} \approx \frac{\left(Q_2 - 1 \right) \varepsilon'_2 tg\delta_2}{4}.$$

Результати розрахунку і експериментальні дані для трьох зразків пшениці (рис. 1), відмінних питомою вагою зерна при однаковій вологості наведено на рисунку 3. З нього видно, що розглянутий метод розрахунку достатньо добре узгоджується з експериментальними даними. Відхилення розрахункової залежності від експериментальної при вологості 5–30 % не перевищує $\pm 1,5\%$.

Відхилення при вологості до 10 % можливо через те, що дана формула (6) належить до гетерогенної системи і в ній не враховано вплив форм і видів зв'язку води з речовиною зерна на результуючу діелектричну проникність.

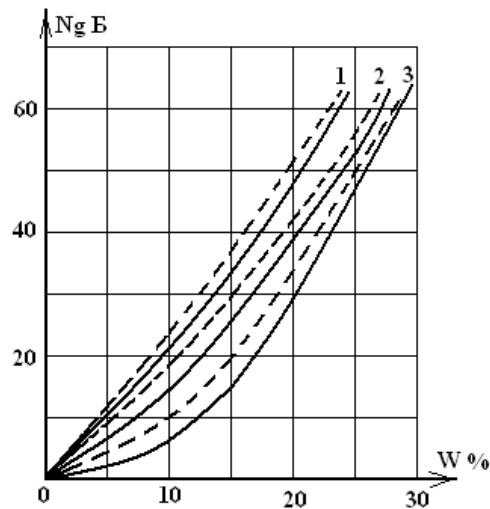


Рис. 3. Залежність ослаблення N від вологості для трьох зразків пшениці (1 – $d = 785$ а/ё ; 2 – $d = 750$ а/ё ; 3 – $d = 700$ а/ё ; – розрахунок; --- експеримент)

Частина води в зерні може мати складні зв'язки, що утримують її в протеїні. Ці зв'язки обмежують рухливість диполів води, а отже зменшують втрати. Вплив зв'язків сильніше виявляється при невеликих вологостях, коли ослаблення визначається втратами в зв'язаній воді і в сухій речовині.

Як видно з рисунка 3, зерно з меншою питомою вагою вносить і менше затухання, тобто при вимірюваннях матиме місце систематична погрішність, знак якої визначиться знаком різниці d зерна, за яким проводилося калібрування і d зерна, що вимірюється. Питома вага зерна змінюється в широких межах і залежить не тільки від виду зерна, але від його типу і сорту всередині даного виду, а також від кліматичних і ґрунтових умов. Для обліку погрішності необхідно проводити калібрування установки для вимірювань за зразками зерна, що мають при однаковій вологості різну питому вагу d по всьому інтервалу можливих його змін.

В даному випадку ми досліджували залежність ослаблення потужності НВЧ (N) від вологості зерна, тобто:

$$N = f(W_2) \quad (19)$$

Розглядаючи вираз (16), можна помітити, що добуток $W_2 t$ не що інше, як кількість води в одиниці об'єму. Позначивши кількість води в одиниці об'єму через $d_0 = W_2 t$, функцію (19) запишемо у вигляді:

$$N = f(d_0) \quad (20)$$

тобто ослаблення потужності НВЧ в зерні від кількості води залежить тільки від кількості води в ньому і не залежить від питомої ваги зерна.

На рисунку 4 показано залежність ослаблення потужності НВЧ від кількості води в одиниці об'єму зерна. Як слід було чекати, замість трьох залежностей (рис. 3), в якій d зерна є параметром, отримали одну.

Очевидно, що, якщо розрахункові залежності $N = f(W_2)$ відрізнялися від експериментальних не більше ніж на $\pm 1,5$ %, то і розрахункова залежність $N = f(d_0)$ також відрізнятиметься від експериментальної, побудованої в координатах N , d_0 , не більше ніж на $\pm 1,5$ %.

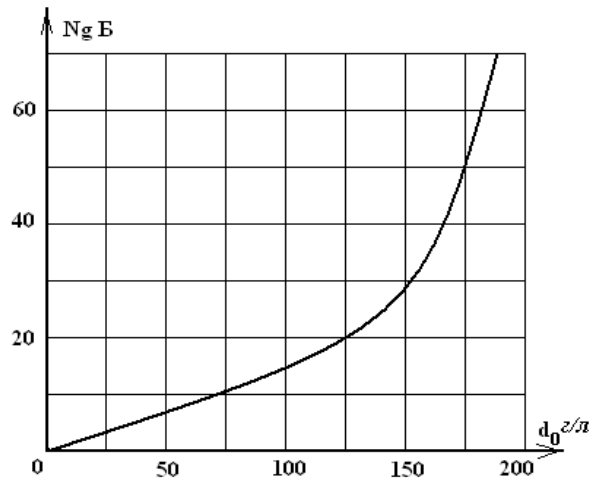


Рис. 4. Залежність ослаблення $N = f(d_0)$ від кількості води

Таким чином, якщо прокалібрувати прилад, залежно від кількості води в одиниці об'єму зерна α_0 , то його покази N не залежатимуть від питомої густини зерна. Такий метод вимірювання дозволяє усунути розглянуті вище недоліки, що виникають як при вимірюванні зразка, що займає постійний об'єм, так і при вимірюванні зразка, що має постійну вагу. Застосування даного методу дозволяє за допомогою вологоміра НВЧ проводити пряме вимірювання вологості зерна.

Висновки. Дослідження залежності ослаблення потужності НВЧ від вологості зерна і порівняння з експериментальними вимірюваннями дало такі результати:

- отримані аналітичні вирази для розрахунку залежності ослаблення потужності НВЧ від вологості зерна в інтервалі від 5 до 30 % дають результати, які співпадають з експериментальними даними з погрешністю не більш $\pm 1,5$ % абсолютного значення вологості;
- величина ослаблення визначається в основному втратами у воді (18) і практично не залежить від втрат у сухій речовині зерна;
- величина ослаблення залежить тільки від кількості води в одиниці зерна і не залежить від питомої густини зерна.

Список використаної літератури:

1. Мелкумян В.Е. Обеспечение единства измерений влажности твердых материалов / В.Е. Мелкумян. – М. : ВНИИКИ, 1975. – 120 с.
2. Буртовой Д.П. Применение открытого цилиндрического предельного резонатора для исследования диэлектрических свойств вещества / Д.П. Буртовой, В.Л. Мироненко, А.И. Терещенко // Изв. вузов СССР. Радиоэлектроника. – 1970. – Т. XIII, № 9. – С. 1085–1091.
3. Кричевский Е.С. Высокочастотный контроль влажности при обогащении полезных ископаемых / Е.С. Кричевский. – М. : Недра, 1972. – 238 с.
4. Кричевский Е.С. Контроль влажности твердых и сыпучих материалов / Е.С. Кричевский, А.Г. Волченко, С.С. Галушкин. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 305 с.
5. Лисовский В.В. Теория и практика НВЧ контроля влажности сельскохозяйственных материалов / В.В. Лисовский. – Минск : ГТТУ, 2005. – 175 с.
6. Викторов В.А. Радиоволновые измерения параметров технологических процессов / В.А. Викторов, Б.В. Лункин, А.С. Совлуков. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 206 с.
7. Федоткин И.М. Физико-технические основы влагометрии в пищевой промышленности / И.М. Федоткин, В.П. Клочков. – К. : Техника, 1974. – 152 с.
8. Бензарь В.К. Техника СВЧ влагометрии / В.К. Бензарь. – Минск : Высшая школа, 1974. – 185 с.
9. Митрохин В.Н. Электродинамика и распространение радиоволн / В.Н. Митрохин. – М. : Рудомино, 2010. – 210 с.
10. Бенедицький В.Б. Радіохвильовий метод вимірювання вологості матеріалів / В.Б. Бенедицький, Л.Ю. Козак, А.В. Яворська // Вісник ЖДТУ. – № 4 (59). – Житомир, 2011. – С. 32–41.
11. Сканава Г.И. Физика диэлектриков / Г.И. Сканава. – М. ; Л. : ГИТТЛ, 1949. – 290 с.

БЕНЕДИЦЬКИЙ Василь Борисович – старший викладач кафедри радіотехніки та телекомунікацій Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

– радіохвильові методи вимірювання.

КОЗАК Лілія Юріївна – аспірант кафедри радіотехніки та телекомунікацій Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- радіохвильові методи вимірювання;
- вимірювання вологості матеріалів.

МАНОЙЛОВ В'ячеслав Пилипович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри радіотехніки та телекомунікацій Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- прилади НВЧ та антени;
- біомедичні прилади та системи.

Тел.: (0412) 41–39–63.

Стаття надійшла до редакції 20.04.2012

Бенедицький В.Б., Козак Л.Ю., Манойлов В.П. Визначення вологості зерна по затуханню НВЧ потужності

Бенедицкий В.Б., Козак Л.Ю., Манойлов В.Ф. Определение влажности зерна по затуханию СВЧ мощности.

Beneditsky V.B., Kozak L.Yu., Manoylov V.P. Determination of grain humidity according to attenuation of microwave power.

УДК 621.317.533.275

Определение влажности зерна по затуханию СВЧ мощности / В.Б. Бенедицкий, Л.Ю. Козак, В.Ф. Манойлов

Исследована зависимость затухания СВЧ мощности в слое зерна от его влажности. Показано, что ослабление мощности зависит только от количества воды в единице объема зерна и не зависит от удельного веса зерна. Приведены результаты измерений, подтверждающие справедливость теоретических расчетов.

УДК 621.317.533.275

Determination of grain humidity according to attenuation of microwave power / V.B. Beneditsky, L.Yu. Kozak, V.P. Manoylov

Dependence of attenuation of microwave power in the layer of grain from its humidity is studied. It is shown that the attenuation of power depends only on the quantity of water in the unit of volume of grain and doesn't depend on specific gravity of grain. The results of measurements confirming justice of theoretical calculations are given.