

ВИЗНАЧЕННЯ ВОЛОГОСТ ЗЕРНА ЗА ЗАТУХАННЯМ НВЧ ПОТУЖНОСТ

Досліджено залежність затухання НВЧ потужності в шар 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 – одним з основних компонентів більшості сільськогосподарських продуктів, яка визначає як стан [1, 2]. Вологість зерна, бавовни й інших продуктів – основним чинником, що визначає можливість тривалого зберігання без псування витрат цих матеріалів. При переробці зерна від його вологості залежать операції подрібнення, отже, питомі витрати енергії продуктивність млинового устаткування. Величина вологості зерна враховується при здачі та прийманні, оскільки від неї залежать його чиста вага і йсна вартість.

Серед методів, що забезпечують швидке і точне вимірювання вологості зерна, особливий інтерес представляє безконтактний метод, в основі якого лежить визначення величини витрати потужності НВЧ, що пройшла через шар матеріалу [3, 4]. Ослаблення, що характеризує втрати НВЧ потужності функцією електричних властивостей речовини [5, 6]. Ослаблення потужності НВЧ залежить не тільки від вологості, але і від питомої ваги зерна $d(\rho/\rho_0)$ [7], яка також функцією вологості.

Аналізуючи залежність ослаблення від вологості зерна впливу його питомої ваги присвячена дана робота.

Викладення основного матеріалу. Найперспективнішими для вимірювання вологості зерна прилади, засновані на використуванні техніки вимірювань електричних властивостей матеріалів на НВЧ [8]. Для шару зерна середньо великою вологістю ослаблення визначається таким виразом [9]:

$$N \approx 8,68\alpha t, \quad (1)$$

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

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

$$N = \frac{2Ze^{i\varphi_0}}{(1+Z^2)\operatorname{sh}\Theta + 2Z\operatorname{ch}\Theta}, \quad (2)$$

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

$$\gamma = \alpha + i\beta_\epsilon, \quad (3)$$

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

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

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon' \left(\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} - 1 \right) / 2};$$

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon' \left(\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} + 1 \right) / 2}, \quad (4)$$

де λ – довжина хвилі; ϵ' – дійсна складова діелектричної проникності речовини; $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс кута дисипації електричних витрат матеріалу.

Виразимо дан величини α β через д електричн параметри к льк сний зм ст компонент в, що належать зразку зерна. Для цього представимо зерно як систему, що склада ться з трьох складових: сухо речовини, води й пов трия м ж зернами позначимо х як 1, 2 3.

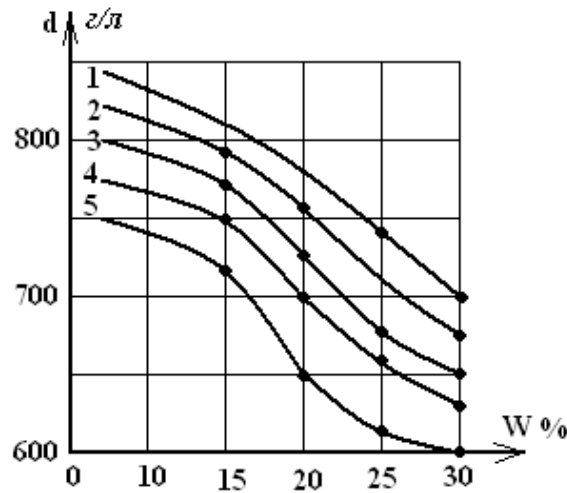


Рис. 1. Залежност $d = f(W)$

Ф зико-х м чн властивост сухо речовини зерна р зн для кожного виду, типу сорту. Проте ц в д м нност не стотн, оск льки вони виражаються в р зному значенн електричних параметр в зерна $\varepsilon' \quad \text{tg} \delta$. На рисунку 1 наведено залежн сть ваги зерна (d) в д вологост (W) для р зних зразк в пшениц. Представлен дан показують, що з зб льшенням величини вологост W , питома вага d зменщу ться. Такий х д залежност $d = f(W)$ дозволя припустити, що зб льшення об' мно частки води в одиниц об' му зразка в дбува ться за рахунок зменшення зм сту сухо речовини, причому питома вага сухо речовини б льше питома ваги води. Це дозволя розглядати зразок зерна, що займа об' м v , як гетерогенну матричну систему з двох компонент в, в як й зв'язною матрицею вся маса вологих зерен, а включеннями – пов трия м ж ними.

Д електрична проникн сть тако системи з р вном рно розпод леними включеннями ел псо дно форми при будь-як й х концентрац можна представити в такому вигляд [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} ε_3 – комплексн д електричн проникност вологого зерна пов трия; q_3 – в дносний об' мний в м ст включень пов трия в частках одиниц.

Для визначення д електрично проникност вологого зерна ε_{12} розглянемо його в об' м v_m , який утворю ться сумою об' м в вс х зерен зразка. Хоча всередин кожного зерна частинки сухо речовини води можливо утворюють як сь регулярн структури, проте в ц лому таку систему можна розглядати, як статистичну сум ш також двох компонент в, д електрична проникн сть яко визнача ться виразом [11]:

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

$$A = \frac{(3\varphi_2 - 1)(\varepsilon_2 - \varepsilon_1) + \varepsilon_1}{4},$$

де ε_1 ε_2 – комплексн д електричн проникност сухо речовини зерен води; φ_2 – в дносний об' мний в м ст води в частках одиниц.

Визначимо величини q_3 q_2 , що належать виразам (5) (6). Оскільки зразок зерна розглядається як суміш трьох компонентів, то:

$$\sum_{i=1}^3 v_i = v, \quad (7)$$

де v_i – об'єм, який займає в дпов'язаний компонент ($i = 1, 2, 3$ – в дпов'язаний наданий вище за нумерацією компонентів).

Припустимо, що густина упаковки сухого зерна в дпов'язаний теоретичний густин для елпсодів обертанні [11] :

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

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) (9) одержимо:

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

За визначенням:

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

тоді з (8) (10) маємо:

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

Аналогічно для об'єму v_m одержимо:

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

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

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

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

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

де P_i P – вага – 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 $W_2 = \frac{P_2}{P}$ – в'язний ваговий зміст води.

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

Розрахунок затухання проводився для значень $\epsilon_2 = 52$, $\text{tg} \delta = 0,6$ при товщині шару зерна $t = 10$ мм довжини хвилі 3,5 см. Електричні параметри обезводненого помелу пшениць були виміряні в діапазоні частот 8–12,5 ГГц за допомогою панорамного вимірювача КСВН, причому для рідної питомої ваги d ϵ' змінювалося в межах 2,8–3,2, а $\text{tg} \delta < 0,0014 \div 0,0018$. Вважаючи, що в смузі частот 8–12,5 ГГц суха речовина не дисперсна, при розрахунку затухання використовувалися значення $\epsilon'_i = 3,0$ $\text{tg} \delta_i = 0,0016$. На рисунку 2 наведено графіки залежності

ослаблення НВЧ потужност в д вологост , розрахован з р зним ступенем наближення за формулами (1) (2). Як видно, залежн сть ма коливання б ля деякого середнього значення. Ц коливання пов'язан з впливом фазового кута при в дбиттях хвил всередин середовища в д меж середовище-пов тря.

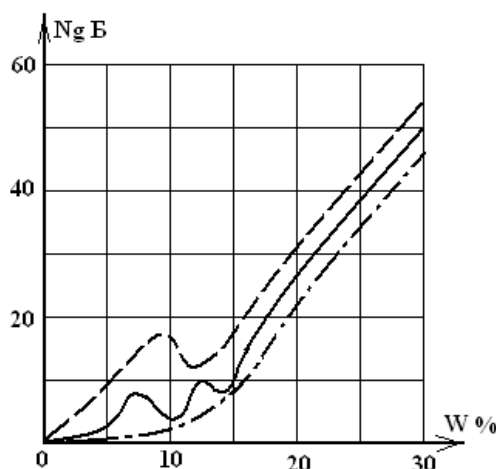


Рис. 2. Залежн сть ослаблення N в д вологост W

Оск льки ε_{12} виража ться через комплексн ε_1 ε_2 , то для зручност анал зу розрахунку представимо вираз (5) у такому вигляд :

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

де $\varepsilon' = K_1\varepsilon'_1 + K_2tg\varepsilon_{12}$;

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

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

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

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

а формула (6) набуде вигляду:

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

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

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

$$a = (A_1^2 - B_1^2) + \frac{\varepsilon'_1\varepsilon'_2}{2}(1 - tg\delta_1 tg\delta_2) \approx (A_1^2 - B_1^2) + \frac{\varepsilon'_1\varepsilon'_2}{2};$$

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

$$A_1 = \frac{(3Q_2 - 1)(\varepsilon'_2 - \varepsilon'_1) + \varepsilon'_1}{4};$$

$$B_1 = \frac{(3Q_2 - 1)(\varepsilon'_2 tg\delta_2 - \varepsilon'_1 tg\delta_1) + \varepsilon'_1 tg\delta_1}{4} \approx \frac{(3Q_2 - 1)\varepsilon'_2 tg\delta_2}{4}.$$

Результати розрахунку експериментальні дан для трьох зразків в пшениці (рис. 1), в даних питома вага 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, в ній не враховано вплив форм видів зв'язку води з речовиною зерна на результуючу діелектричну проникність.

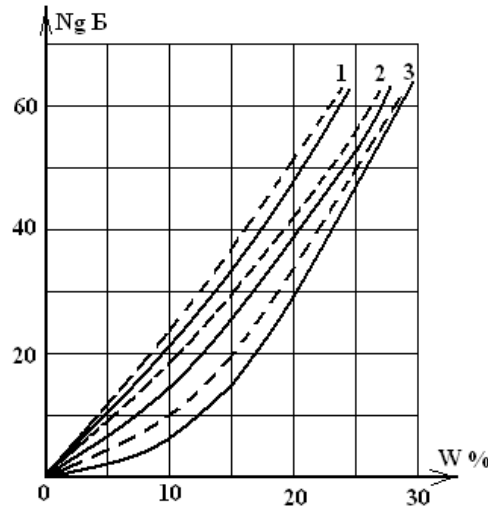


Рис. 3. Залежність ослаблення N від вологості для трьох зразків пшениці ($1-d = 785 \text{ г/л}$; $2-d = 750 \text{ г/л}$; $3-d = 700 \text{ г/л}$; — розрахунок; --- експеримент)

Частина води в зерні може мати складні зв'язки, що утримують впротекти. Ці зв'язки обмежують рухливий диполь в воді, а отже зменшують втрати. Вплив зв'язку в сильній мірі виявляється при невеликих вологостях, коли ослаблення визначається втратами в зв'язаній воді в сухій речовині.

Як видно з рисунка 3, зерно з меншою питома вагою вносить менше затухання, тобто при вимірюваннях матимемо систематичну погрешність, знак якої визначиться знаком різниці d зерна, за яким проводилося калібрування d зерна, що вимірюється. Питома вага зерна змінюється в широких межах залежить не тільки від виду зерна, але від його типу сорту всередині даного виду, а також від кліматичних умов. Для обліку погрешності 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, 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 параметром, отримали одну.

Очевидно, що, якщо розрахункову залежність $N = f(W_2)$ відзнялися від експериментальних не більше ніж на $\pm 1,5\%$, то розрахункова залежність $N = f(d_0)$ також

в д р знятиметься в д експериментально , побудовано в координатах N , α_0 , не б льше н ж на $\pm 1,5$ %.

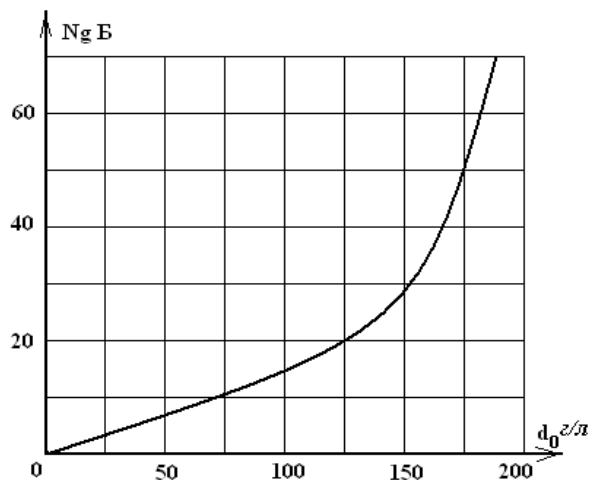


Рис. 4. Залежн сть ослаблення $[N = f(d_0)]$ в д к лькост води

Таким чином, якщо прокал брувати прилад, залежно в д к лькост води в одиниц об' му зерна α_0 , то його покази N не залежатимуть в д питомо густини зерна. Такий метод вим рювання дозволя усунути розглянут вище недол ки, що виникають як при вим рюванні зразка, що займа пост йний об' м, так при вим рюванні зразка, що ма пост йну вагу. Застосування даного методу дозволя за допомогою вологом ра НВЧ проводити пряме вим рювання вологост зерна.

Висновки. Досл дження залежност ослаблення потужност НВЧ в д вологост зерна пор вняння з експериментальними вим рюваннями дало так результати:

- отриман аналітичн вирази для розрахунку залежност ослаблення потужност НВЧ в д вологост зерна в нтервал в д 5 до 30 % дають результати, як сп впадають з експериментальними даними з погр шн стю не б льш $\pm 1,5$ % абсолютного значення вологост ;
- величина ослаблення визнача ться в основному втратами у вод (18) практично не залежить в д втрат у сух й речовин зерна;
- величина ослаблення залежить т льки в д к лькост води в одиниц зерна не залежить в д питомо густини зерна.

Список використано л тератури:

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. Рад охвильовий метод вимрювання вологост матер ал в / В.Б. Бенедицький, Л.Ю. Козак, А.В. Яворська // В сник 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 вимрювання.

КОЗАК Ля Юрвна – аспірант кафедри радіотехніки та телекомунікацій Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

– радіохвильові методи вимрювання;

– вимрювання вологост матер ал в.

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