

УДК: 537.226.047.46

## ДОСЛІДЖЕННЯ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР

Панченко Г.І., Бошкова І.Л., канд. техн. наук, доцент, Волгушева Н.В., канд. техн. наук, асистент  
Одеська державна академія холоду, м. Одеса

*Експериментально визначені діелектричні характеристики пшениці м'яких і твердих сортів залежно від вологовмісту шару для частоти електромагнітного поля 2450 МГц. Досліджено процес поглинання мікрохвильової енергії в шарі зерна й визначено глибину проникнення.*

*Dielectric characteristics of wheat of soft and firm grades depending on moisture content a layer for frequency of an electromagnetic field of 2450 MHz are experimentally defined. Process of absorption of microwave energy in a layer of grain is investigated and depth of penetration is defined.*

Ключові слова: коефіцієнт діелектричної проникності, кут втрат, глибина проникнення, пшениця

### Вступ

Для сушіння органічних дисперсних матеріалів перспективним є застосування комбінованих способів на основі кондуктивного, конвективного й мікрохвильового підведення теплоти [1,2]. Обґрунтованість потреби розвитку мікрохвильових сушарок пов'язана з необхідністю вирішення проблеми удосконалення нових технологій сушіння, які здатні забезпечити економію енерговитрат, одержання продукції з необхідною якістю та скорочення тривалості процесу. Підґрунтям для конструювання нового обладнання є аналітичні залежності для розрахунку температури й вологовмісту дисперсного матеріалу в процесі сушіння. Для розрахунку сушарок, які використовують мікрохвильовий підігрів, необхідні дані по діелектричним властивостям шару зерна, що пов'язано з потребою визначення глибини проникнення мікрохвильової енергії. В даний час дослідженням діелектричних властивостей матеріалів приділяється достатньо багато уваги, що пов'язано в першу чергу з методами визначення вологовмісту, які ґрунтуються на використанні мікрохвильових (МХ) технологій [3,4,5]. Однак в останні роки дослідженню діелектричних властивостей зернових не приділяється достатня увага. Метою даної роботи є визначення діелектричних властивостей пшениці твердих та м'яких сортів при різному вологовмісті та розрахунок глибини поглинання шару пшениці.

### Результати роботи та їх аналіз

При взаємодії змінного електричного поля мікрохвильової частоти з діелектричним матеріалом відбувається його нагрівання внаслідок діелектричних витрат. Теплота перетворення  $P$  пропорційна значенню коефіцієнта (фактора) діелектричних витрат  $\varepsilon'' = \varepsilon' \cdot \operatorname{tg} \delta$ , частоті поля  $f$  й напрузі електричного поля в продукті  $E$  [6].

$$P = 0,556 \cdot 10^{-10} \varepsilon'' \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot E \cdot f, \text{ Вт/м}^3 \quad (1)$$

Частота поля  $f$  є величиною фіксованої й визначається технічними характеристиками генераторів, що випускаються. У промисловості випускаються магнетрони з частотою генерації 2450 МГц і 915 МГц. Найбільш доступними магнетронами є ті, що генерують частоту 2450 МГц. Крім того, збільшення частоти коливань підвищує швидкість нагрівання діелектричних матеріалів.

Напруженість електричного поля в продукті  $E$  не може бути розрахована аналітично, однак її значення визначається масою матеріалу й характеристиками МХ камери, тому експериментальне дослідження дозволяє виявити умови, при яких значення  $E$  в сукупності з іншими характеристиками процесу дадуть оптимальний ефект для даного процесу.

Залежність (1) відображає той факт, що ефективність перетворення енергії мікрохвильового поля в теплову залежить від діелектричних характеристик матеріалу. Коефіцієнт витрат включає коефіцієнт діелектричної проникності  $\varepsilon'$  й кут витрат  $\operatorname{tg} \delta$ . Діелектричну проникність можна розглядати як міру, що характеризує ступінь зниження напруженості поля в діелектрику в порівнянні з полем у вакуумі. Наступним важливим параметром, що характеризує діелектричні матеріали, є діелектричні витрати. Вони необхідні для визначення електричної потужності, що витрачається на нагрівання матеріалу. Для характеристики здатності діелектрика поглинати енергію змінного електричного поля використовують тангенс кута діелектричних втрат  $\operatorname{tg} \delta$ . Діелектричні втрати в речовині визначаються виразом  $\varepsilon'' = \varepsilon' \cdot \operatorname{tg} \delta$ . Щоб оцінити ступінь нагрівання речовини або провести попередній порівняльний аналіз для різних матеріалів, потрібно мати у своєму розпорядженні значення даних величин. У процесі сушіння діелектричні характеристики матеріалу можуть змінитися так, що його здатність перетворювати енергію електромагніт-

ного поля в теплову істотно зменшиться. Крім того, у сушарку може надходити матеріал з різним початковим вологовмістом. Все це визначило необхідність окремого дослідження діелектричних характеристик зернових матеріалів.

Величини  $\epsilon'$  і  $\text{tg}\delta$ , отримані для м'якої й твердої пшениці на частоті 2450 МГц, при різних значеннях вологості, наведені в таблицях 1 і 2. Ці величини були визначені експериментально за відомими методами [7].

Результати показують, що зі збільшенням вологості діелектрична проникність  $\epsilon'$  пшениці зростає. Значення  $\text{tg}\delta$  складним чином залежать від вологості, однак при цьому зі збільшенням вологості зерна величина тангенса діелектричних втрат має тенденцію до зростання. Величина фактора витрат, обумовлена добутком  $\epsilon'' = \epsilon' \text{tg}\delta$ , для пшениці твердої перебуває в межах  $\epsilon'' = 1,62 \div 4,84$ ; для пшениці м'якої  $\epsilon'' = 1,53 \div 4,34$ . Таким чином, сорт зерна впливає на фактор витрат, однак зниження вологовмісту помітно зменшує здатність матеріалу перетворювати енергію МХ поля. Так, якщо при початковому вологовмісті  $u_0 = 0,192$  (що в середньому відповідає значенню вологовмісту зерна, що надходить у зерносушарку) пшениці м'якої  $\epsilon'' = 2,76$ , то при кінцевому  $u_k = 0,13$   $\epsilon'' = 1,8$ , тобто зміна становить 35%. Ця обставина ускладнює одержання аналітичних залежностей для розрахунку сушіння матеріалів у мікрохвильовому полі. Для порівняння, вода при температурі 25 °С має значення  $\epsilon' = 78$ ,  $\text{tg}\delta = 0,16$ , або  $\epsilon'' = 12,5$  [8]. Таким чином, інтенсивність перетворення мікрохвильової енергії в теплову для води в кілька разів вища, ніж для зернових. Залежність коефіцієнта втрат від волого вмісту, котру ми спостерігаємо, може бути використана для оцінки зміни тривалості процесу сушіння при зміні вологовмісту матеріалу.

**Таблиця 1 – Діелектричні характеристики зерна пшениці твердої при різній вологості (при  $t = +22$  °С)**

Вологовміст, %	$\epsilon'$	$\text{tg}\delta$
13,0	7,81	0,23
14,0	8,57	0,24
16,1	9,04	0,26
17,2	9,34	0,27
19,2	9,86	0,28
22,0	10,8	0,30
24,3	13,7	0,28
25,4	15,6	0,27
27,5	17,3	0,28

Енергія при проникненні всередину матеріалу поглинається й слабшає. Товщина діелектрика, на якій потужність внутрішніх джерел теплоти зменшується в  $e$  раз, приймаємо за глибину проникнення [9,10]. При товщині зразка, що перевищує подвоєне значення глибини проникнення, рівномірність розподілу температури й вологовмісту може бути істотно порушена. Для оцінки глибини проникнення МХ поля в шар пшениці можна скористатися відомими теоретичними залежностями [10].

**Таблиця 2 – Діелектричні характеристики зерна пшениці м'якої при різній вологості ( $t = +22$  °С)**

Вологовміст, %	$\epsilon'$	$\text{tg}\delta$
13,0	8,15	0,20
14,2	8,58	0,22
16,4	9,02	0,24
17,0	9,21	0,25
19,3	9,86	0,26
21,8	10,8	0,27
24,0	13,2	0,27
25,2	15,0	0,26
28,1	16,1	0,27

Коефіцієнт ослаблення  $\alpha$  визначається залежністю [10]:

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda_0} \left[ \frac{1}{2} \cdot \varepsilon' \left[ \sqrt{1 + \operatorname{tg}\delta^2} - 1 \right]^{1/2} \right] = \frac{2\pi}{12,24 \cdot 10^{-2}} \left[ \frac{1}{2} \cdot 9,04 \left[ \sqrt{1 + 0,26^2} - 1 \right]^{1/2} \right] = 19,88 \text{ м}^{-1} \quad (2)$$

де  $\lambda_0$  – довжина електромагнітної хвилі у вакуумі.

Для МХ поля із частотою 2450 МГц  $\lambda_0=12,24$  см. Діелектричні характеристики, для яких визначалося значення коефіцієнта ослаблення, відповідали значенням для зерна пшениці при температурі 20 °С і вологовмісті 0,16 кг/кг.;  $\varepsilon'=9,04$ ,  $\operatorname{tg}\delta=0,26$ .

Знаючи коефіцієнт ослаблення, можна визначити глибину проникнення розрахунковим шляхом [10]:

$$\Delta = \frac{1}{2\alpha} = \frac{1}{2 \cdot 19,88} = 0,025 \text{ м} \quad (3)$$

Дані дослідів дозволяють розрахувати експериментальне значення глибини проникнення енергії МХ ЕМП у зерно пшениці. Розрахунок виконувався за умови, що коефіцієнт ослаблення електромагнітної енергії не змінювався по товщині шару. Тоді можна записати рівняння, що пов'язує потік, що поглинається у шарі, з коефіцієнтом ослаблення, відповідно до закону Бугера.

Відповідно до даних експерименту, в якому матеріал містив два шари зерна товщиною 0,01м, одержали, що кількість енергії, яка була поглинена у верхньому шарі, становило  $\Delta J_1 = 36,2$  Вт; у середньому  $\Delta J_2 = 25,3$  Вт. Кількість падаючої на поверхню верхнього шару:  $J_1 = 120,2$  Вт. Розрахунки показали, що коефіцієнт ослаблення для першого шару:  $\alpha = 30,1 \text{ м}^{-1}$  для другого шару:  $\alpha = 30,1 \text{ м}^{-1}$ . Глибина проникнення згідно із цими даними:  $\Delta = 0,033$  м. Аналогічні дані були отримані при інших експериментах на зразках, що містять 3 і 4 шари.

Значення коефіцієнта ослаблення електромагнітної енергії й глибини проникнення, що отримані за експериментальними даними для тришарового й чотиришарового зразка, збігаються. Чисельні значення цих величин залежать від електрофізичних характеристик матеріалу й справедливі при вологовмісті пшениці 0, 20-0,12 кг/кг і насипної щільності шару 640 кг/м<sup>3</sup>. Відхилення величини глибини проникнення, отриманої по теоретичній залежності (2), пояснюється похибкою у визначенні діелектричних характеристик зерна  $\varepsilon'$  й  $\operatorname{tg}\delta$ .

Аналіз експериментальних даних показав, що подвоєна глибина проникнення, отримана як розрахунковим, так і експериментальним шляхом, не є оптимальною для вибору товщини шару зерна в сушарці. Її рекомендується збільшити в 1,5 - 2 рази, при цьому розігрів шару буде досить рівномірний, що пов'язане з відносно інтенсивним охолодженням зовнішньої поверхні (термічний опір теплопровідності дисперсного матеріалу значно вищий термічного опору тепловіддачі).

### Висновки

1. Зі збільшенням вологості діелектрична проникність  $\varepsilon'$  зерна зростає. Значення тангенса кута втрат  $\operatorname{tg}\delta$  має складний характер залежності від вологості, однак є тенденція до зростання при збільшенні вологовмісту. Сорт зерна впливає на фактор витрат, однак зниження вологовмісту зменшує здатність матеріалу перетворювати енергію МХ поля. Так, при зниженні вологовмісту від 0,192 до 0,14 фактор діелектричних витрат для пшениці зменшується на 25 %. Тому при проектуванні зерносушарок із шаром, що рухається, для промислового використання раціонально забезпечити нерівномірну подачу електромагнітної енергії по висоті шару, з більшою щільністю енергії на вході й меншою на виході.

2. Величини глибини проникнення, отримані експериментально й за відомими аналітичними залежностями, що враховують діелектричні властивості матеріалу, корелюються один з одним.

### Література

1. Атаназевич В. И. Сушка пищевых продуктов. – М.: Наука. – 2000. – 294 с.
2. Станкевич Г. Н. Технологии и техники сушки зерна в Украине // Промышленная теплотехника.– 2002.– Т. 24. – С. 52– 56.
3. Абросимова Е.Б., Лабутин С.А., Никулин С.М., Петров В.В. Амплитудный СВЧ влагомер твердых и сыпучих материалов // Измерительная техника. – 1996.– № 11. – С. 66–68.
4. Алешкин А.Н., Лабутин С.А. Исследования зависимости диэлектрической проницаемости древесины от влажности резонаторным СВЧ методом // Межвуз. сб.: Радиоэлектронные и телекоммуникационные системы и устройства. – Нижний Новгород. – 1999. – вып. 5. – С. 6–7
5. Алешкин А.Н., Лабутин С.А., Пугин М.В. Исследования резонаторного СВЧ измерителя диэлектрической проницаемости твердых, сыпучих и жидких сред // Датчики и системы. – 2000. – №10. – С. 28–32.

6. Рогов И. А., Некрутман С. В. Сверхвысокочастотный нагрев пищевых продуктов. – М: Агропромиздат. – 1986. – 350 с.
7. S. O. Nelson. A System for Measuring Dielectric Properties at Frequencies from 8.2 to 12.4 GHz // J. Transactions of ASAE. – 1972. – Vol. 15, No. 6. – P. 1094–1098.
8. S. O. Nelson. Review of Factors Influencing the Dielectrical Properties of Cereal Grain // J. Cereal Chem. – 1981. Vol. 58, No. 6. – P. 487–492.
9. Клоков Ю. В., Остапенков А. М. О глубине проникновения ЭМП СВЧ в пищевые продукты // Электронная обработка материала. – 1988. – №5. – С. 65–68.
10. Advances in Agricultural Science and Technology. Volume 1. Advances in Bioprocessing Engineering. Editors Harrison Yang, Juming Tang. World Scientific. – 2002. – 172 p.

УДК 635.44.004.4.004.12

## КОРЕЛЯЦІЙНА ЗАЛЕЖНІСТЬ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ПРОРОСЛОГО ЗЕРНА ПШЕНИЦІ ПРИ ЗБЕРІГАННІ

Яковенко А.І., к.т.н., доц., Борта А.В., к.т.н., доц., Кац А.К., к.т.н.  
Одеська національна академія харчових технологій

*Наведено результати досліджень з обґрунтування показників якості пророслого зерна пшениці, за якими можна прогнозувати можливі зміни кількості та якості клейковини при зберіганні.*

*The results of researches are resulted on the ground of indexes of quality of germinating corn wheat's on which it is possible to forecast the possible changes of amount and quality of gluten at storage.*

Ключові слова: проросле зерно, пшениця, показники якості, зберігання

Починаючи з 1997 року і донині на зернозаготівельні підприємства надходить зерно пшениці з пророслим зерном. Проростання відбувається ще на стеблі, перед жнивими. Причини цього явища — значні атмосферні опади і розтягнутий на 1,5...2 місяці період збору врожаю. У такий спосіб післязбиральне дозрівання зерна відбувається на рослині. При зволоженні такого зерна до 40-45 % навіть протягом доби воно може проростати. Це явище спостерігається у всіх сільськогосподарських регіонах України.

Під час зберігання пророслого зерна відзначені зміни кількості та якості клейковини. За даними наукових досліджень і практичної діяльності [1, 2] було встановлено, що в процесі нормального зберігання свіжозібраного зерна пшениці спостерігається збільшення виходу клейковини і поліпшення її якості. Але при зберіганні великих партій зерна врожаю десяти останніх років відбувалося зниження виходу клейковини при зміцненні її якості. Це було причиною переходу зерна з одного класу в іншій — в основному з вищого в нижчий, хоча спостерігаються і протилежні варіанти. Такі зміни відбуваються тоді, коли зерно пшениці відносили до нижчого класу через слабку клейковину. Усе це було і залишається незрозумілим для фахівців галузі і призводить до матеріальних утрат, оскільки зерно реалізується за більш низькими цінами проти закупівельних.

Що відбувається з клейковиною при зберіганні пшениці?

За нашими спостереженнями [3, 4, 5] протягом 1997–2008 рр. зменшення виходу клейковини і поліпшення її якості при зберіганні відбуваються тільки в тих партіях, у яких є пророслі зерна і проростання відбулося в колосі до збору врожаю. У такому зерні процеси післязбирального дозрівання порушуються. Воно має підвищену активність ферментів, що зумовлює при зберіганні зниження виходу клейковини і поліпшення її якості. Доказом цього є той факт, що в пророслому зерні, як було показано нами раніше [3], вологість ендосперму і зародка дуже відрізняються і у ньому в деяких випадках спостерігається подальше проростання. Тому спрямованість біохімічних процесів убик розщеплення є характерною рисою такого зерна. Ці процеси і призводять до зміни кількості і якості клейковини. Але і власникам зерна, і Держхлібінспекціям потрібно довести, що ці процеси відбуваються з об'єктивних причин, а не через порушення технології зберігання зерна (аналогічні зміни можуть відбуватися і внаслідок порушення технології зберігання за рахунок процесів самозігрівання й ін.).

**Метою** нашого дослідження був пошук показників якості, за якими можна прогнозувати заздалегідь, перед закладкою на зберігання, можливі зміни кількості та якості клейковини при подальшому зберіганні.

Матеріалом для дослідження була узята пшениця сорту «Шестопаловка», вирощена на полях дослідної станції «Дачне» Одеської області. Зерно пшениці пророщували в лабораторних умовах при