

Ю. В. Крушевський, к.т.н., доц.; Я. О. Бородай, магістр

ВПЛИВ МАСООБМІНУ ВОДИ НА ТОЧНІСТЬ ВИМІРЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ ЗЕРНА

У роботі наведені результати експериментальних досліджень електрофізичних параметрів зерна, на основі яких розкриваються причини, що призводять до зниження точності вимірювання вологості дієлькометричними вологомірами. Запропоновані шляхи підвищення точності вимірювання комплексної діелектричної проникності зернових культур.

Ключові слова: дієлькометричний вологомір, вологість зерна, діелектрична проникність зерна.

Вступ

Україна є одним з найбільших світових виробників зерна, виробником конкурентноздатних зерносушарок, але не має сучасних систем контролю та керування процесами сушіння зерна – на ринку відсутні пристрої вітчизняного виробництва, які б відповідали необхідним вимогам по ціні, точності, надійності і забезпечували б можливість контролю вологості зерна в режимі реального часу. Вологоміри, які випускалися ще в СРСР, не використовуються на практиці через їх фактичні низькі точності. Використання імпортованих вологомірів зерна для більшості підприємств агропромислового комплексу (АПК) недоступне через їх високу вартість. Тим не менше процес висушування зерна – один з найбільш енергоємних і відповідальних з усього циклу збереження та переробки зерна. Це пов'язано як з прямими збитками, зумовленими втратою якості зернових і неможливістю їх зберігання при невідповідній вологості, так і зі збільшенням енергетичних витрат на процес висушування. Розміри збитків з цієї причини, навіть на рівні окремих комбінатів хлібопродуктів, сягають десятків тисяч гривень за сезон [1]. Актуальність цього питання в цілому для АПК не викликає сумніву.

Аналіз досліджень і публікацій

При вимірюванні вологості зерна розрізняють прямі та непрямі методи. Прямі методи базуються на видаленні із дослідної проби будь-яким способом вологи і вимірюванні маси зразка до та після видалення вологи. Найпоширенішими в цій групі є термогравіметричні вологоміри. Такі вологоміри забезпечують високу точність результатів (похибка на рівні $\pm 0,1\%$), однак вимагають багато часу на вимірювання (від 20 хв. до кількох діб) [2]. З середини 90-х років минулого століття на ринку України пропонуються імпортовані лабораторні вологоміри із вбудованими вагами та інфрачервоними джерелами випромінювання (інколи такі прилади комплектуються мініатюрними млинками для розмелювання дослідної проби зерна), які завдяки об'єднанню сушильної шафи, ваг та мікропроцесорного пристрою управління в одному приладі дають можливість зменшити час вимірювання та підвищити сходиність результатів, при цьому забезпечують межу допустимої похибки аналізатора на рівні $\pm 0,2...0,3\%$ [3]. Проте, для використання таких приладів у лабораторії необхідна адаптація їх режимів роботи до вітчизняних вимог, а для цього необхідно проводити метрологічні повірки, що призводить до додаткових витрат, до того ж практично всі прилади, які використовують термогравіметричний метод, належать до групи приладів руйнівного контролю, тобто дослідний зразок зерна в процесі вимірювання його зволоженості стає непридатним для подальшого використання, що не завжди прийнятно.

Непрямі методи вимірювання вологості базуються на залежності фізичних властивостей об'єкта контролю – дослідної проби зерна від ступеню (рівня) її зволоженості. У приладах, побудованих на таких методах, час вимірювання не перевищує 1 – 5 хв. [3]. Найбільшого поширення в цій групі отримали прилади, які використовують електричні способи

визначення вологості: кодуктометричні (або резистивні), дія яких ґрунтується на вимірюванні електричного опору зразка при проходженні через нього постійного струму та дієлькометричні (ємнісні та мікрохвильові), дія яких ґрунтується на значній залежності діелектричної проникності (ϵ) зерна від вмісту води. Це зумовлюється аномально великим значенням ϵ води (81 при 20°C) [4].

У таблиці наведені характеристики дієлькометричних вологомів, заявлених виробниками, які представлені (пропонуються до продажу) на території країн СНД [2, 5, 6, 7, 8, 9].

Таблиця

Основні технічні характеристики дієлькометричних вологомів, представлених на ринку країн СНД

Назва приладу	Країна-виробник	Діапазон вимірювання, %	Похибка вимірювання/сходимість, %	Тривалість вимірювання, хв. (сек.)	Маса, кг/потужність споживання, Вт	Діапазон робочих температур, °С
PM-300 "Kett"	Японія	1 – 40	±0,5		1	
PM-400 "Kett"	Японія	6 – 30	±0,5		1,5	
PM-600 "Kett"	Японія	1 – 40	±0,2...0,5/ 0,05...0,2		1,7	
Аквасерч-600 "Kett"	Японія	1 – 40	±0,5		1,7	
ІВЗ-М 1, ІВЗ-М І Т	Росія	8 – 35	±1...1,5	1	9/55	
ЦВЗ-3А	Росія	8 – 35	±1...2,5	2	8/10	
WILE-65	Фінляндія	8 – 35	±1...1,5		0,8	0 – 60
Sinar AP 6060	Швеція	1 – 35	±0,3	(6)		0 – 55
"Капля"	Росія	8 – 24	±0,8	(0,5)	2,5/20	
Grain Master	США	5 – 40	±0,25/0,25		0,6	0 – 40
ВСП-100	Росія	4 – 30	±0,5	1	0,3	5 – 35
ВСП-6П	Росія	4 – 24	±0,8	1	0,5	5 – 35
WILE-55	Фінляндія	8 – 35	±0,5...1,0		0,8	
Multi-Grain	США	6 – 45	±0,5		1,5	
ФАУНА	Росія	6 – 30	±1,5			5 – 40
ФАУНА М	Росія	6 – 30	±1,0...2,0	(7)	0,33	5 – 40
Farmpoint	Данія	5 – 45	±0,5		2,0	
GAC500	США	5 – 45	±0,5/0,1		5,4	0 – 50
HE-50	Німеччина	8 – 35	±0,5		3,2	
Superpoint	Данія	5 – 45	±0,5		0,75	0 – 45

Такі вологоміри складаються із первинного (за необхідності проміжного) вимірювального перетворювача та вимірювального пристрою. На точність дієлькометричних вологомів впливає багато чинників, оскільки ϵ об'єкта контролю є складною функцією багатьох параметрів [1].

$$\epsilon = f(W, T, G, H, P, \dots)$$

де W , T , G , H , P – відповідно вологість, температура, гранулометричний склад проби, хімічний склад проби, електрохімічний критерій границі електрод – зерно.

У сучасних дієлькометричних вологомірах вплив температури на результат визначення

вологості у більшості випадків врахований у вигляді поправочних коефіцієнтів, які автоматично або в ручному режимі вводяться в кінцевий результат вимірювань (вологоміри серії “Kett”, ЦВЗ-3А, WILE-65/55, Sinar AP 6060, “Капля”, Grain Master, ВПС-100, Multi-Grain, Farmpoint, GAC500, HE-50, Superpoint; див. дані табл.).

Гранулометричні характеристики зерна не ідеальні, тому при кожному повторному засипанні щільність упаковки дослідної проби в контейнері-конденсаторі різна, і як наслідок, падає повторюваність (сходимість) результатів. Зменшити вплив щільності упаковки в деяких сучасних вологомірах намагаються застосуванням пробопідготовки – попереднього ущільнення зерна в камері контейнера-конденсатора (вологоміри “Капля”, Grain Master, ВСП-100, WILE-65, Farmpoint, HE-50, Superpoint; див. дані табл.).

Хімічний склад дослідної проби зерна залежить від його селекційних особливостей, які певним чином враховуються введенням калібровочних кривих для сортів максимально можливої кількості найменувань сільськогосподарських культур в пам'ять мікропроцесорного блоку або комплектацією вологомірів відповідними таблицями та (або) проведенням перед виміром спеціальної калібровки (вологоміри серії “Kett”, ИВЗ-М1, ИВЗ-М1Т, ЦВЗ-3А, WILE-55/65, Smar AP 6060, “Капля”, Grain Master, ВСН-100, ВСП-6П, Multi Grain, ФАУНА, ФАУНА М, Farmpoint, GAC500, HE-50, Superpoint; див. дані табл.). Крім того на хімічний склад зерна впливають умови, в яких росла культура (грунти, кількість добрив, погодні фактори та ін.), які практично, не піддаються аналітичному прогнозуванню і можуть бути враховані лише в поодиноких випадках при попередній калібровці з використанням даних, отриманих гравіметричним методом для конкретного виду (сорт) культури з конкретного поля.

Постановка завдання

Інформація про питання, пов'язані із вологообміном на границі стінка – зерно (електрохімічний критерій границі електрод – зерно) в контейнері-конденсаторі первинного вимірювального перетворювача, в рекламній інформації виробників діелькометричних вологомірів відсутня, тому з високою вірогідністю можна стверджувати, що в сучасних вологомірах цей параметр впливу на ϵ дослідної проби зерна не враховується. Існують лише варіанти, в яких пропонується після проведення кількох повторів вимірювань перші отримані результати вологості проби відкинути, а інші – усереднити [12].

До зазначеного вище необхідно додати, що результати вимірювань ϵ залежать від співвідношення між кількістю вільної та зв'язаної вологи у досліджуваному матеріалі [10]. Крім того існуючі діелькометричні вологоміри дають оцінку вологості дослідної проби по значенню модуля її комплексної відносної діелектричної проникності $|\dot{\epsilon}|$, значення якої знаходиться за формулою:

$$|\dot{\epsilon}| = \frac{C'_{вим}}{C_0},$$

де $C'_{вим}$ – виміряне вологоміром значення ємності контейнера із зерном,

C_0 – ємність порожнього контейнера.

Значення $C'_{вим}$ можна розрахувати за формулою:

$$C'_{вим} = C_0 \times \epsilon \sqrt{1 + tg^2 \delta},$$

де ϵ – відносна діелектрична проникність дослідного матеріалу,

$tg \delta$ – тангенс кута діелектричних втрат у дослідній пробі зерна.

Тобто результат вимірювання залежатиме не тільки від ємності заповненого зерном контейнера (вологості проби), а й від тангенса кута діелектричних втрат у досліджуваному матеріалі (вологості та мінерального складу зернівки). Спосіб вимірювання вологості зерна,

запропонований в [11], дозволяє підвищити точність діелькометричних вологомірів за рахунок одночасного вимірювання дійсної та уявної частин комплексної діелектричної проникності проби зерна. Однак процес масообміну води в об'ємі зернової маси та на границі стінка контейнера – зерно під час вимірювань призводить до того, що ступінь зв'язку молекул води із структурою зернівки змінюється, і як наслідок, не залишаються сталими впродовж проведення експерименту активна та уявна частини комплексної діелектричної проникності.

Завдання цієї статті – показати результати експериментальних досліджень впливу процесів вологообміну у контейнері – конденсаторі, заповненому зерном пшениці, на значення відносної діелектричної проникності та тангенсу кута діелектричних втрат проби дослідного матеріалу.

Основні матеріали статті

Нижче наведені результати експериментальних досліджень електрофізичних параметрів проби одного і того ж самого зерна із різним ступенем зволоженості при різних умовах проведення експериментів у чутливому елементі конденсаторного типу первинного вимірювального перетворювача вологоміра.

На рис. 1 наведені графіки залежностей зміни ϵ і $tg\delta$ в часі при різному зволоженні дослідної проби зерна. Як видно із графіків, ϵ та $tg\delta$ змінюються впродовж проведення експерименту тим швидше, чим вища вологість зернової маси. Так, за 20 хвилин значення відносної діелектричної проникності проби зерна порівняно із початковим результатом збільшується більш ніж на 10%, а втрати – більш ніж на 25% для вологого зерна і лише на 0,3% та відповідно на 1,5% для сухого зерна. Таким чином змінювання ϵ і $tg\delta$ в часі можна використати як додатковий інформативний параметр при визначенні вологості зерна.

На рис. 2 наведені залежності відносної діелектричної проникності та втрат в часі для проби вологого зерна, отримані за допомогою одного чутливого елемента конденсаторного типу із стінками (обкладками), виготовленими з різних матеріалів.

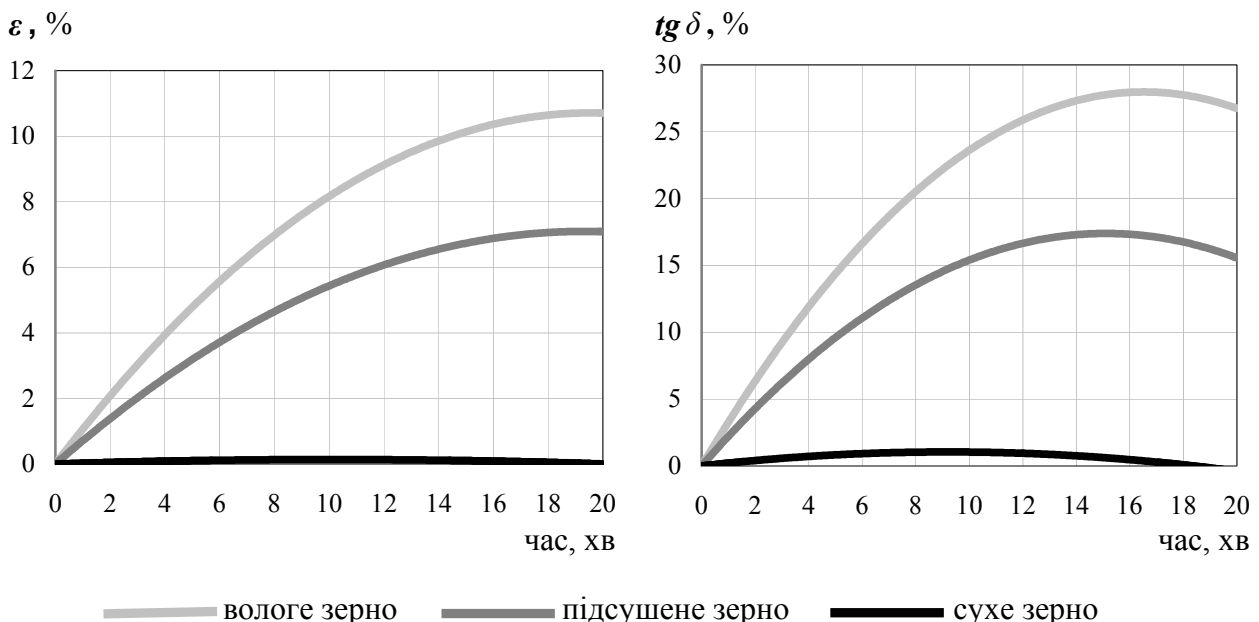


Рис. 1. Залежність в часі змінення відносної діелектричної проникності та втрат дослідної проби зерна різної зволоженості

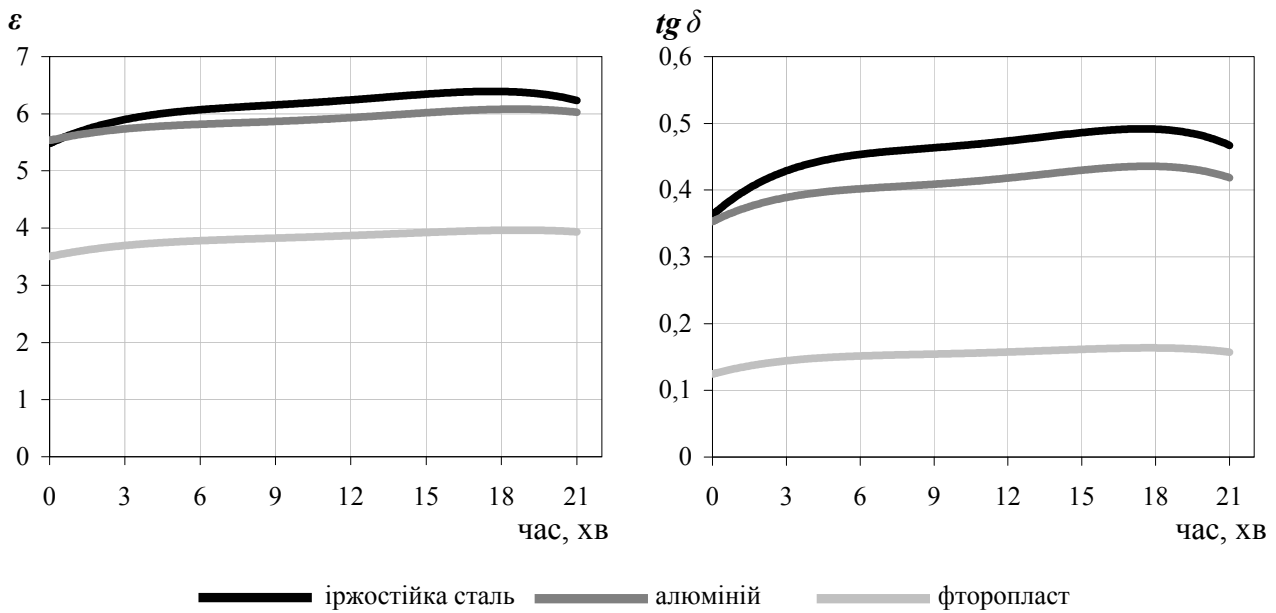


Рис. 2. Залежність в часі діелектричної проникності та втрат дослідної проби зерна від матеріалу стінок контейнера при однаковій зволоженості

Аналіз отриманих результатів свідчить про те, що після засипання дослідної проби зерна в контейнер чутливого елемента конденсаторного типу (як в об'ємі зернової маси, так і на границі стінка контейнера – зерно) відбуваються процеси вологообміну (як в напрямі “вивільнення”, так і в напрямі “зв'язування” вологи), які призводять до того, що значення ε і $\text{tg } \delta$ змінюються впродовж проведення експерименту. Процеси, які відбуваються в об'ємі дослідної проби зерна після засипання її в контейнер-конденсатор первинного вимірювального перетворювача можна пояснити. Коли зернова маса дослідної проби в контейнері знаходиться в стані спокою, на зв'язок молекул води із структурою зернівки впливають два фактори – “зв'язування” активними центрами сорбції поверхні зернини [10] та “вивільнення” в об'єм менісків, які утворюються в місцях дотику зернин до стінок контейнера та між собою в об'ємі дослідної проби. У момент засипання зерна в контейнер всі меніски руйнуються, при цьому відбувається вивільнення енергії, внаслідок чого молекули води стають більш зв'язаними, що призводить до зменшення ε і $\text{tg } \delta$. Після завершення засипання, настає новий стан спокою для зерна і відбувається зворотній процес поглинання енергії із об'єму проби, що призводить до зменшення ступеню зв'язку між молекулами води та структурою зернівки і збільшення ε і $\text{tg } \delta$. Через певний час, який залежить від співвідношення вільної та зв'язаної вологи (вмісту вологи) в зерні, процеси вивільнення та зв'язування молекул води врівноважуються.

Згадані процеси суттєво впливають на точність дієлькометричних вологомірів і мають складний характер, який залежить від матеріалу стінок (обкладок) чутливого елемента, а інтенсивність вологообміну залежить від ступеню зволоженості дослідної проби зерна.

Необхідно зазначити, що вологообмін в об'ємі дослідної проби зерна суттєво впливає на результат вимірювання лише у приладах насипного (лабораторного) типу, для поточних вологомірів, де об'єкт дослідження постійно перебуває в русі, вивільнення молекул води в меніски практично не відбувається, оскільки вони постійно руйнуються при транспортуванні зерна в потоці.

Отже, для підвищення точності результатів дієлькометричних вологомірів необхідно враховувати вплив вологообміну, який відбувається як в об'ємі дослідної проби, так і на границі “стінка контейнера – зерно”.

Висновки

1. Точність вимірювання комплексної діелектричної проникності об'єктів контролю біологічного походження, наприклад, зернових культур, які є основними продуктами сільськогосподарського виробництва, після засипання зерна в контейнер чутливого елементу конденсаторного типу знижується суттєвим впливом вологообміну як в об'ємі зернової маси, так і на межі "стінка – зерно".

2. Процес вологообміну носить складний характер і залежить від багатьох факторів, які необхідно враховувати при проектуванні діелькометричних вологомірів.

3. Для підвищення точності вимірювання комплексної діелектричної проникності зернових культур в якості додаткового інформативного параметру доцільно використовувати залежність у часі зміни відносної діелектричної проникності та втрат дослідної проби зерна.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Влагомер зерна в потоке – мал золотник, да дорог. Просяняк А.В., к. т. н., директор; Клабуков В.Ф., гл. конструктор АСУТП ГНПП "Эльдорадо"; Соснин К.В., аспирант НГУ г. Днепропетровск. <http://dnvpeldorado.dp.ua/doc/article3.doc>.
2. ТД "Автоматика" – контрольно-измерительные приборы (КИПИА), г. Смоленск, <http://www.tdautomatiku.ru/showme.php?rasdel=5-2>.
3. Влагомеры, г. Воронеж. Zernolab.ru. <http://www.zernolab.ru>.
4. Диэлькометрические влагомеры и гигрометры. Словарь научных терминов. Портал Естественных Наук. <http://e-science.ru/index/?id=776>.
5. Анализаторы влажности, г. Воронеж. Zernolab.ru. <http://www.zernolab.ru/index.php?m=178&page=101>.
6. Оборудование для определения влагосодержания зерна и продуктов его переработки. ЗАО "ЗЕРНОТЕХНИКА", г. Москва. http://www.zernotechnika.ru/equip/lab/vl_zerno.htm.
7. Влагомеры, плотномеры, вискозиметры, прочие приборы. Laborant.ru. <http://www.measurement.ru/gk/sostav/06/044.htm/>
8. Влагомеры. ООО АкваСенсор. Украина. г. Харьков. http://aqua-sensor.com.ua/vlagomer/v_grainmaster.php.
9. Влагомер зерна, семян трав и муки. Новинка 2005 г. ООО "Агрола", г. Москва (Институт Зерна). <http://agrola.narod.ru/superpoint.htm>.
10. Егоров Г. Термодинамическое взаимодействие зерна с водой //Хлебопродукты. – 2004. – №2. – С. 22–23.
11. А. С. 4775221 СССР Способ измерения влажности /Крушевский Ю.В., Куцевол М.А., Сूपьян В.Я. //Бюллетень. – 1992. – №9.
12. Влагомер зерна «ЭВЛАС-5». Руководство по эксплуатации САП 030.00.00.000 РЭ. СИБАГРОПРИБОР http://www.sibagroprigor.ru/ru/content/doc/evlas/evlas5/manual_evlas5.pdf.

Крушевський Юрій Володимирович – доцент кафедри радіотехніки;

Бородай Ярослав Олександрович – магістр радіотехніки.

Вінницький національний технічний університет