

<https://doi.org/10.31649/1997-9266-2023-167-2-125-134>

УДК 616.77

Й. Й. Білинський¹
М. О. Скалецька¹

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ СИПКИХ ПРОДУКТІВ

¹Вінницький національний технічний університет

Розглянуто різноманітні методи вимірювання вологості зерна. Проаналізовано традиційні та сучасні методи вимірювання вологості зерна, які використовуються в сільському господарстві та продовольчій промисловості. Описано принципи роботи та переваги і недоліки кожного методу. Детально розглянуто методи та проаналізовано новітні методи вимірювання вологості зерна, такі як методи, що використовують інфрачервону та мікрохвильову технологію. В роботі запропонована класифікація методів вимірювання вологості сипких продуктів та виявлено найактуальніші варіанти для подальших досліджень. Досліджено методи й засоби контролю вологості зерна. В роботі встановлено, що вибір методу вимірювання вологості зерна повинен залежати від різних факторів, таких як тип зерна, точність вимірювання, швидкість та вартість обладнання. Автори детально проаналізували кожний метод та зробили рекомендації щодо вибору оптимального методу вимірювання вологості зерна для конкретних умов. Проведено аналіз і вибрані значущі параметри, що впливають на вимірювання вологості зерна. Досліджені методи й засоби контролю вологості зерна. Проведено порівняння характеристик вологомірів, реалізованих відомими надвисокочастотними методами. Точність та похибки вимірювання вологості вологомірів суттєво залежать від щільності матеріалів та показників середовища вимірювання. Розглянуті вологоміри мають високу похибку вимірювань, що не задовольняє потреби деяких виробництв. Порівняння цих параметрів дало змогу визначити оптимальний метод для максимально точного вимірювання вологості.

Ключові слова: зерно, вимірювання, вологість, контроль вологості, методи вимірювання.

Вступ

Вологість зерна — це відсотковий вміст води у зерні, що вимірюється за масою. Вологість зерна відіграє важливу роль в сільському господарстві. Вологість зерна є критично важливим параметром, оскільки вона впливає на його якість та тривалість зберігання. Занадто висока вологість зерна може призвести до розвитку цвілевих грибків, бактерій та комах, що може знизити якість зерна та пошкодити його. З іншого боку, надто низька вологість зерна може призвести до втрати маси зерна та зниження його поживної цінності. Оптимальний рівень вологості зерна залежить від типу зерна та умов його зберігання. Для вимірювання вологості зерна є спеціальні прилади — вологоміри зерна. Вони можуть бути електронними або механічними та використовуються для швидкого та точного вимірювання вологості зерна. Вимірювання вологості зерна є дуже важливим та актуальним процесом у сільському господарстві та харчовій промисловості [1], [2]. Правильне вимірювання вологості зерна допомагає визначити оптимальний час для його збирання та зберігання, що сприяє підвищенню врожайності та поліпшенню якості зерна. Крім того, це може допомогти скоротити витрати на зберігання та транспортування зерна та підвищити продуктивність у харчовій промисловості.

Від рівня вологості залежить, скільки у зерні міститься поживних речовин. А також наскільки воно підходить для переробки або зберігання. Чим цей показник вищий, тим більше у ньому води та менше корисних компонентів. І тим гірше воно зберігатиметься і перероблятиметься. Надмірна наявність вологи є каталізатором, що активує фізіологічні та фізико-хімічні процеси, такі як проростання, дихання, набухання, активізація ферментів, розщеплення біополімерів [4].

Якщо зерно прибрано з поля з підвищеною вологістю, мікроорганізми на його поверхні розвиваються прискореними темпами. У загальному обсязі такої зернової маси значно зростає кількість кліщів та різних шкідників із класу комах. Це теж негативно впливає на якість крупи та насіння, збільшує ймовірність їхнього псування під час зберігання.

Ще один важливий фактор полягає в тому, що у вологого зерна змінюються фізичні властивості. Знижується натура (тобто, вага якогось об'єму, наприклад, 1 т зерна, на відміну від поширеного показника ваги 1000 шт. зерна) та опір роздавлювання, погіршується сипкість. Оболонки стають гладкими та еластичнішими. В результаті, на механічне дроблення доводиться витратити більше енергії ніж для сухого матеріалу, або переробка виявляється просто неможливою.

У період збирання різних зернових культур, вологість врожаю коливається у значному діапазоні — від 10 % до 30 % і більше. З зазначених вище причин визначення цього параметра є важливим етапом виробничого процесу. Залежно від його результатів ухвалюється рішення про необхідність підвищення якості за допомогою сушіння [3].

Певна кількість вологи у зерні є завжди. Точне його значення залежить від багатьох факторів: кліматичних умов, виду культури, особливостей її анатомії, ступеня стиглості, наявності гідрофільних колоїдів, умов збирання та подальшого зберігання.

Вода в зерні може перебувати у трьох станах:

– хімічно зв'язана. В цьому випадку молекули води, у строго певних співвідношеннях, входять до складу молекул компонентів зерна. Щоб видалити таку воду, треба прожарити матеріал або провести хімічну реакцію. В обох випадках структура речовин, що входять у зерно, виявиться зруйнованою;

– фізично зв'язана. Сюди відноситься вода структурна, осмотично поглинена та адсорбційна. Співвідношення молекул можуть змінюватись у деяких межах. Якщо вони сорбовані присутніми у зерні гідрофільними колоїдами, то бути розчинником вже не можуть. Переміщення таких молекул H_2O у тілі зерна утруднене, як і участь у хімічних реакціях. У результаті фізіологічні процеси з участю майже відбуваються. Під час висушування така волога, з труднощами, але все ж таки видаляється;

– механічно зв'язана. Вона розташовується в макро- і мікрокапілярах, що є в тілі зерна. Ця вода називається вільною. Вона зберігає всі свої властивості і бере участь у мікробіологічних, біохімічних і фізіологічних процесах, що відбуваються в зерні. Легко забирається висушуванням.

За рівнем вологості зерно може бути сухе, середньої сухості, вологе чи сире [4], [6]—[8]. У кожній групі визначено показники у відсотках, різні для різних культур. Наприклад, для ячменю, жита чи пшениці вони становлять відповідно: до 14 % включно; 14,1...15,5 %; 15,6...17,0 %; 17,1 % і більше. У деяких бобових ці цифри вищі, у олійних — нижчі. Зокрема, у сухому насінні соняшнику є не більше 7 % вологи. Найкраще зберігати сухе зерно. Вільна волога у ньому практично відсутня. А зв'язана здебільшого утримується гідрофільними колоїдами. Вологість, за якої у зерні з'являється вільна вода, після чого різко інтенсифікуються дихання, проростання та інші фізіологічні процеси, внаслідок яких починають активно розвиватися мікроорганізми, називають критичною.

В основних видів зерна нормальною для зберігання вважається вологість нижче 14 %, тобто менше критичної. У цьому випадку зерно можна відносно довго зберігати у насипах заввишки до 30 м і більше. Якщо величина вологості менше критичної (зерно середньої сухості), то інтенсивність дихання зростає у 2—4 рази. Але оскільки газообмін невеликий, то терміни зберігання теж досить довгі. У вологого зерна цей показник збільшується у 4—8 разів, у сирого — у 20—30 разів. При цьому з активним розвитком мікроорганізмів спостерігається процес виділення тепла — самозгрівання, в процесі якого температура зернової маси іноді піднімається до 75 °C [9].

Для визначення вологості сипких матеріалів розроблені різні методи, які поділяються на прямі і непрямі (рис. 1). До непрямих відносяться методи, в яких вимірюються величини або властивості, функціонально пов'язаних з вологістю матеріалів. До прямих відносяться методи, в яких відбувається поділ матеріалу на суху речовину і воду.

Непрямі методи визначення вологості

Методи визначення вологості сипких продуктів непрямыми методами основані на явищі зміни різних його властивостей. В залежності від властивості яка змінюється існують непрямі електричні і неелектричні методи.

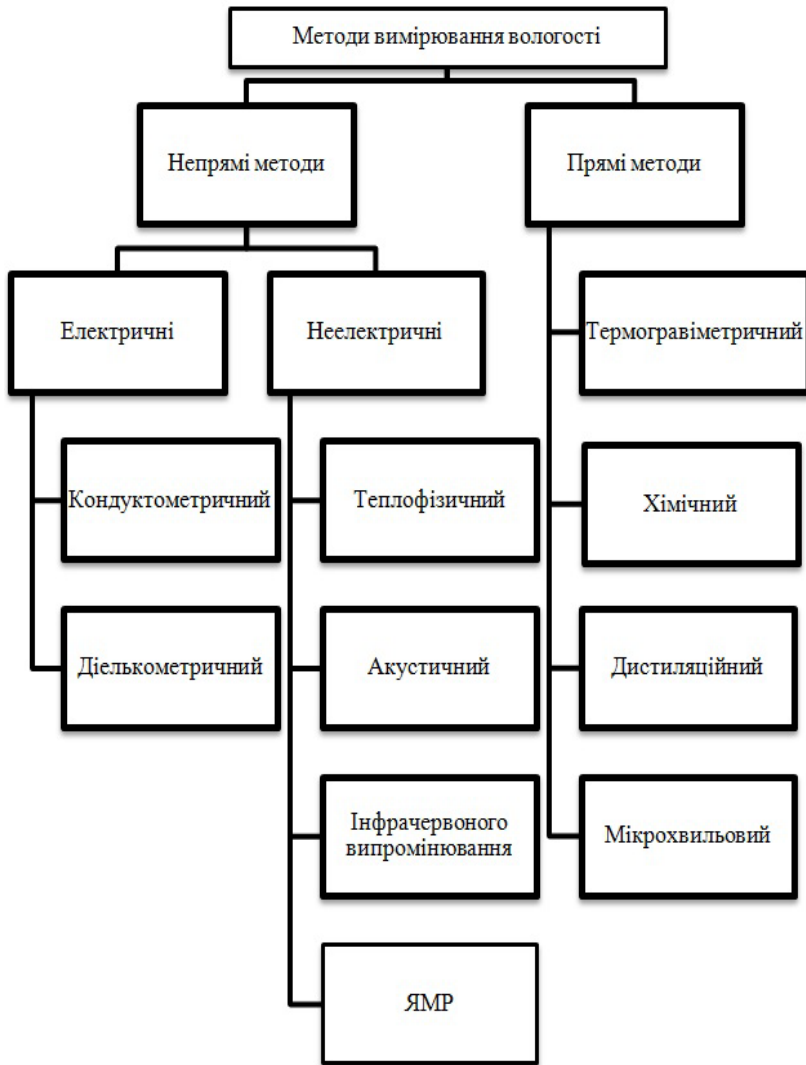


Рис. 1. Класифікація методів вимірювання вологості сипких продуктів

вимірювання вологості зерна ґрунтується на зміні електропровідності зерна зі зміною його вологості. Вологе зерно має більшу електропровідність, ніж сухе. Електропровідність зерна може бути виміряна за допомогою спеціального приладу, який називається кондуктометром. Кондуктометр для вимірювання вологості зерна працює за принципом проведення електричного струму через зерно та вимірюванням електричної провідності зерна [10]. За допомогою датчиків — електродів, які поміщаються у зерно, пропускається електричний струм та вимірюється електричний опір зразка. Потім опір перераховується у відсотки вологості. Кондуктометричний метод є одним зі швидких та точних методів вимірювання вологості зерна. Він застосовується в сільському господарстві та харчовій промисловості, оскільки дозволяє швидко та точно визначити вологість зерна.

Діелектричний метод вимірювання вологості зерна ґрунтується на зміні діелектричної проникності зерна зі зміною його вологості. Діелектрична проникність (або постійна діелектрична) зерна змінюється в залежності від кількості води, що міститься в зерні. Чим вища вологість зерна, тим вища його діелектрична проникність. Для вимірювання діелектричної проникності зерна використовується спеціальний пристрій, який називається діелектроміром. Діелектромір складається з двох електродів, які поміщаються у зерно. Один з електродів є джерелом високочастотного сигналу, а інший — датчиком сигналу, який вимірює зміну діелектричної проникності зерна. Для вимірювання вологості зерна діелектромір застосовується таким чином: спочатку зерно поміщається між електродами діелектроміра, потім подається високочастотний сигнал на один електродів, і датчик вимірює зміну сигналу на іншому електроді. Потім за допомогою математичних формул діелектромір обчислює зміну діелектричної проникності і переводить у відсотки вологості зерна. Діелектричний метод є одним з найточніших та чутливих методів вимірювання вологості зерна. Він застосовується в сільському господарстві та харчовій промисловості, тому що дозволяє точно

Електричні методи вимірювання вологості зерна основані на зміні електричних властивостей зерна зі зміною його вологості. Сухе зерно має високий опір, тоді як вологе зерно має нижчий опір. Основним приладом, який використовується для вимірювання вологості зерна, є гігрометр або електронний вологомір. Гігрометр працює за принципом вимірювання електричного опору зерна у разі проходження через нього електричного струму. Електричний струм пропускається через зерно, і вимірюється його опір. Існує кілька типів гігрометрів для вимірювання вологості зерна, але основна їхня відмінність полягає в принципі роботи та конструкції електродів. Деякі гігрометри використовують два електроди, які проникають у зерно, інші — один електрод, який контактує з поверхнею зерна [3]. Електричні методи вимірювання вологості зерна — найточніші та найшвидші. Вони широко використовуються в сільському господарстві та харчовій промисловості, тому що дозволяють швидко та точно визначити вологість зерна.

Кондуктометричний метод

та швидко визначити вологість зерна.

Існує кілька неелектричних методів вимірювання вологості зерна, які ґрунтуються на різних фізичних принципах [12], [16]. Деякі з них застосовуються вже давно і досі активно використовуються у сільському господарстві та харчовій промисловості. Один з таких методів — метод визначення вологості зерна шляхом сушіння. Цей метод полягає в тому, щоб висушити зерно та виміряти його вагу до і після сушіння. Різниця ваги дозволяє визначити вологість зерна. Цей метод є одним з найпростіших і доступніших, але вимагає часу на його проведення і не підходить для швидкого контролю вологості зерна в процесі зберігання або транспортування. Інший неелектричний метод — визначення вологості зерна за методом оптичної лінзи. Цей метод ґрунтується на зміні світлового потоку, що проходить через зерно, залежно від його вологості. Зерно міститься між двома лінзами, і вимірюється збільшення або зменшення зображення, що отримується на екрані. Проте цей метод не дуже точний і може давати велику похибку внаслідок впливу на зерно зовнішніх факторів, таких як пил або забруднення.

Також існують методи, що ґрунтуються на зміні щільності або об'єму зерна зі зміною його вологості, наприклад, метод гідростатичного зважування. Цей метод полягає в тому, щоб занести зерно в рідину певної густини і виміряти силу, що діє на зерно в рідині. Така сила залежить від густини зерна, яка, і собі, залежить від його вологості. Деякі методи неелектричного вимірювання вологості зерна можуть бути не надто точними, проте вони можуть бути корисні в деяких умовах і ситуаціях, до прикладу, у віддалених районах або за неможливості використання електричних приладів.

Теплофізичний метод вимірювання вологості зерна оснований на зміні теплопровідності зерна в залежності від його вологості. А саме, вологе зерно має більшу теплопровідність, ніж сухе зерно, через наявність води в його структурі. Цей метод можна використовувати для вимірювання вологості зерна в реальному часі, що робить його корисним інструментом у виробничих процесах. Одним із прикладів теплофізичного методу вимірювання вологості зерна є метод сухого теплового потоку, який полягає в тому, щоб виміряти тепловий потік, що проходить через зерно, нагріте нагрівальним елементом. Вимірний тепловий потік залежить від вологості зерна і може бути використаний для визначення вологості. Інший приклад — метод, що ґрунтується на зміні електричної ємності зерна у разі зміни його вологості. Цей метод використовує конденсатор, в якому зерно виступає як діелектрик, і вимірює зміну ємності зі зміною вологості зерна. Однією з переваг теплофізичного методу є його швидкість та можливість використання у режимі реального часу. Він також не вимагає контакту з зерном, що дозволяє уникнути можливих проблем із забрудненням або пошкодженням зерна. Проте, як і інші методи, цей метод може давати деяку похибку внаслідок впливу на зерно зовнішніх факторів, таких як температура та вологість навколишнього середовища, тому необхідно враховувати ці фактори під час проведення вимірювань.

Акустичний метод вимірювання вологості зерна ґрунтується на зміні швидкості звуку в зерні в залежності від його вологості. Конкретніше, вологе зерно має нижчу швидкість звуку, ніж сухе зерно, через наявність води у його структурі. Цей метод можна використовувати для вимірювання вологості зерна в реальному часі, що робить його корисним інструментом у виробничих процесах. Один із прикладів акустичного методу вимірювання вологості зерна — це метод, оснований на вимірюванні часу поширення звукових хвиль через зерно. Цей метод використовує два акустичні датчики, розташовані на протилежних кінцях зразка зерна. Один датчик випромінює звукові хвилі, а інший детектор реєструє їх на іншому кінці зразка. Вимірний час розповсюдження звуку залежить від вологості зерна і може бути використаний для визначення вологості [11]. Однією з переваг акустичного методу є можливість проведення вимірювань у безперервному режимі у виробничих умовах. Він також не вимагає контакту із зерном, що дозволяє уникнути можливих проблем із забрудненням або пошкодженням зерна. Як і інші методи, цей метод може давати деяку похибку внаслідок впливу на зерно зовнішніх факторів, таких як температура та вологість навколишнього середовища, тому необхідно враховувати ці фактори під час проведення вимірювань.

Метод інфрачервоного випромінювання для вимірювання вологості зерна ґрунтується на тому, що вода має специфічну спектральну характеристику поглинання інфрачервоного випромінювання. Сухе зерно поглинає менше інфрачервоного випромінювання ніж вологе зерно, що дозволяє використовувати цей метод для визначення вологості зерна. Існує кілька різновидів методу інфрачервоного випромінювання для вимірювання вологості зерна, але один з найпоширеніших методів використовує прилад, названий інфрачервоним вологоміром зерна. Цей прилад вимірює кількість інфрачервоного випромінювання, поглиненого зразком зерна за певної довжини хвилі, і

перетворює цю інформацію на відсоткову вологість зерна. Інфрачервоний вологомір зерна зазвичай використовується для вимірювання вологості зерна на місці, наприклад, на фермі або в сховищах зерна. Він може працювати в широкому діапазоні температур і вологості, що робить його зручним інструментом для використання в різних умовах. До того ж, цей метод не руйнує зерно та не вимагає великої кількості зразка, що зменшує втрати продукту. Проте слід зауважити, що метод інфрачервоного випромінювання може впливати на точність вимірювання вологості зерна іншими компонентами в зерні, такими як жири та білки, які також можуть поглинати інфрачервоне випромінювання. Тому, залежно від типу зерна та специфікацій інструменту, метод інфрачервоного випромінювання може давати певну похибку у вимірюваннях вологості зерна.

Метод ядерно-магнітного резонансу (ЯМР) для вимірювання вологості зерна використовує здатність ядер атомів водню у зерні реагувати на вплив магнітного поля. У процесі вимірювання вологості зерна методом ЯМР зразок зерна поміщається в магнітне поле і піддається радіочастотному імпульсу. Потім вимірюється інтенсивність, яку випромінюють ядра атомів водню, повертаючись до свого первісного стану, [4]. Величина інтенсивності пов'язана з кількістю води в зерні і може бути використана для визначення вологості зерна. Однією з переваг методу ЯМР є те, що він не руйнує зерно та не вимагає попередньої підготовки зразка. Крім того, цей метод може бути використаний для вимірювання вологості зерна з високою точністю та повторюваністю. Метод ЯМР для вимірювання вологості зерна має і деякі обмеження. Цей метод досить дорогий і потребує спеціального обладнання. Крім того, цей метод може бути чутливим до інших компонентів зерна, таких як олії або білків, що впливає на точність вимірювання вологості зерна в цілому.

Прямі методи визначення вологості

Прямі методи вимірювання вологості зерна — це методи, які безпосередньо вимірюють вміст води у зразку зерна. Ці методи включають методи, такі як термогравіметричний метод, дистиляційний метод, мікрохвильовий метод. Прямі методи зазвичай вважаються точнішими, ніж непрямі методи, оскільки вони дозволяють безпосередньо виміряти вміст води у зерні. Однак вони також можуть бути витратнішими та трудомісткішими для проведення, особливо коли потрібний швидкий контроль вологості зерна у виробничих умовах [19]. Прямі методи можуть бути особливо корисні у виробництві харчових продуктів, таких як зернові культури, де точний контроль вологості є важливим для забезпечення якості та безпеки продуктів. Вони також можуть бути використані в наукових дослідженнях для отримання точніших даних про взаємодію вологи з зерном та її вплив на різні фізико-хімічні властивості зерна.

Термогравіметричний метод вимірювання вологості зерна використовується для визначення вологості зерна шляхом вимірювання зміни його маси у разі нагрівання. Цей метод ґрунтується на тому, що у разі нагрівання зерно втрачає вологу, яка випаровується, що приводить до зменшення маси. Чим вищий вміст вологи в зерні, тим більшою буде його втрата маси у разі нагрівання. Для вимірювання вологості зерна методом термогравіметрії зразок зерна розміщується в камері нагрівання та нагрівається до певної температури. При цьому відбувається випаровування вологи, яка виводиться з камери нагрівання, та зміна маси зерна. Зміна маси зерна вимірюється за допомогою термогравіметра, і у ньому визначається вологість зерна [10]. Однією з переваг методу термогравіметрії є його простота та доступність. Цей метод можна використовувати для вимірювання вологості різних видів зерна, а також інших матеріалів, що містять воду. До того ж, метод термогравіметрії досить точний і дає змогу отримувати результати з високою точністю.

Проте, метод термогравіметрії також має деякі обмеження. Наприклад, цей метод не може бути використаний для вимірювання вологості зерна в реальному часі і його застосування вимагає часу на підготовку зразків і виконання вимірювань. До того ж, цей метод може бути чутливим до інших компонентів зерна, таких як олії, жири або білки, що може впливати на точність вимірювання вологості зерна.

Хімічний метод вимірювання вологості зерна заснований на визначенні вмісту води в зерні шляхом хімічного аналізу зразка зерна. Цей метод використовує хімічні реакції визначення кількості води у зерні. Хімічний метод вимірювання вологості зерна дозволяє отримувати результати з високою точністю, проте він вимагає більше часу та зусиль ніж багато інших методів вимірювання вологості зерна з використанням реагентів. Крім того, цей метод може вимагати використання небезпечних хімічних реагентів, що може становити небезпеку для здоров'я людини та навколишнього середовища.

Дистиляційний метод вимірювання вологості зерна є хімічним методом і заснований на принципі дистиляції води зі зразка зерна. Для проведення вимірювання зразок зерна спочатку зважується, потім поміщається в спеціальний апарат, в якому нагрівається зразок і дистилюється. Під час нагрівання зразка вода випаровується та збирається в іншій колбі. Після закінчення дистиляції колбу з водою зважують, щоб визначити її масу. Різниця між початковою масою зразка та масою колби з водою дозволяє визначити вміст води у зразку зерна. Дистиляційний метод вимірювання вологості зерна дозволяє отримувати результати з високою точністю, але потребує багато часу та зусиль для проведення. До того ж, цей метод може бути досить складним для проведення в умовах виробництва, де потрібний швидкий та точний контроль вологості зерна.

Мікрохвильовий метод вимірювання вологості зерна ґрунтується на зміні діелектричних властивостей зерна зі зміною вмісту води. Для вимірювання зразок зерна поміщають у спеціальний прилад, який генерує електромагнітні хвилі певної частоти. Ці хвилі проходять через зерно і частково поглинаються залежно від вмісту води в зерні. Вимірюючи рівень поглинання хвиль, можна визначити вміст води у зерні. Мікрохвильовий метод вимірювання вологості зерна є швидким, точним та безперервним методом контролю вологості зерна, який може бути використаний у виробничих умовах. Він також має перевагу перед іншими методами, оскільки не вимагає руйнування зразка зерна. Як і будь-який метод, він має свої обмеження, наприклад, використання для певного типу зерна.

Через різноманіття матеріалів та складності процесів, що в них відбуваються, особливо гостро постають питання розробки методів і засобів для оцінювання властивостей і складу об'єктів, зокрема, вологості.

Оцінювання вологості сипких продуктів вважається особливо складним процесом. Це пояснюється різноманітністю сипких матеріалів, їхніми фізико-хімічними властивостями, формою зв'язку, а також їхнім нестаціонарним станом в процесі вимірювання вологості [11].

На сучасному ринку представлено велику кількість засобів вимірювання вологості:

Вологомір для зерна «Фермер» — малогабаритний переносний прилад, призначений для експрес-визначення вологості зернових і олійних культур, починаючи з невеликих фермерських господарств і закінчуючи великими сільськогосподарськими підприємствами.

«Фермер» має можливість визначати вологість 8 культур, запрограмованих в його пам'яті, а замовник, купуючи прилад, може замовити необхідний йому список культур, з якими він буде працювати. Будучи наймасовішим приладом серії «Варіант», прилад експлуатується на сільськогосподарських підприємствах України, Росії та Молдови.

Технічні характеристики вологоміра «Фермер»:

- діапазон вимірюваної вологості 5...38, % абс.;
- кількість вимірюваних культур 8, шт.;
- похибка у визначенні вологості (+/-) 0,5...1,2, % абс.;
- фракція проб.

Вологомір зерна FarmPro сконструйований на основі новітніх технологій, принцип роботи якого оснований на вимірюванні частоти контуру, конденсатор якого поміщений у зразок зерна, і за вимірюваною частотою обчислюється ємність, а отже вологість зразка. Разом зі стискуванням, подрібненням зразка і автоматичною температурною компенсацією вимірювання дають надійніший результат.

Вологомір зерна FarmPro призначений для експрес-аналізу вологості зернових, бобових культур, насіння, трав в лабораторних і польових умовах, під час збирання врожаю, під час післяжнивної обробки — сушінні, розміщенні у сховищах, у разі зволоження зерна перед помелом.

Базове налаштування приладу має такі калібрування: овес, пшениця, ячмінь, жито, конюшина, сорго, кукурудза, рапс, горох, соняшник, соя, гречка, рис, просо, льон, борошно пшеничне, вівсяниця червона.

Основні технічні характеристики вологоміра FarmPro:

- метод вимірювання резистивний;
- збіжність $\pm 0,1$, %;
- точність $\pm 0,3$, %;
- діапазон вимірювання вологості від 5 до 50, %;
- кількість калібрувань 19, шт.

Вимірювач вологості зерна «Дніпро-3К» призначений для експресного визначення вологості зерна під час масового надходження на елеваторах, заготівельних підприємствах, млинах та на великих хліборобних підприємствах під час заготівлі, збирання та зберігання зернових культур.

«Дніпро-3» працює з культурами: пшениця, соняшник, ячмінь, жито, гречка, просо, овес, кукурудза, горох, ріпак та соя.

У вимірювачі вологості зерна «Дніпро-3» передбачені режими корекції характеристик приладу

за результатами власних вимірювань тепловим методом, а також можливість побудови своєї характеристики за тепловим методом [12]. Країна виробник — Україна.

Технічні характеристики вологоміра «Дніпро-3К»:

Діапазон вимірювання:

- для зернових культур 6...40 %;
- для зернобобових та кукурудзи 6...40 %;
- для продуктів переробки 9...16 %.

Допустимі значення абсолютної похибки вимірювання:

- в діапазоні вимірювання від 8 до 17% $\pm 1,0$ %;
- в діапазоні вимірювання від 17 до 35% $\pm 1,5$ %;
- в діапазоні вимірювання від 35 до 40% $\pm 2,5$ %;

Випадкова складова похибки вимірювання $\pm 0,2$ %.

Вологомір Микрорадар-101 (Микрорадар, Білорусь) призначений для експрес-вимірювань вологості сипких матеріалів. Принцип дії вологоміра базується на вимірюванні частоти та амплітуди НВЧ сигналу в резонаторі та перетворення цих параметрів в цифровий код, що відповідає вологості матеріалу.

Технічні характеристики:

- діапазон вимірювання вологості від 0 до 20 %;
- похибка вимірювання від $\pm 0,05$ до $\pm 0,5$ %;
- температура навколишнього середовища від 10 до 35 °C ;
- час вимірювання до 40 секунд.

Вологомір «Копье» українського виробництва пристрій для вимірювання вологості в гранульованих та порошкоподібних продуктах та матеріалах. В цьому приладі використовується метод вільного простору, що ґрунтується на поглинанні електромагнітних хвиль високої частоти молекулами води. Відтворюваність і точність показів визначається, насамперед змінами щільності вимірюваного об'єкта поблизу поверхні датчика. Високий ступінь точності вимірювань забезпечується за постійної щільності матеріалу [13].

Технічні характеристики цього приладу:

- діапазон вимірюваної відносної вологості 2...40 (50) %;
- можливість виміру температури матеріалу $-40...+120$ °C;
- похибка вимірювання ± 3 %.

Вологомір LMA 310SA (Sartorius, Німеччина). Метод мікрохвильового резонансу, який використовується у в цьому вологомірі, має перевагу, яка полягає в гранично швидких вимірюваннях, що тривають менше секунди. Зміни кольору або структури поверхні проби, що зустрічаються в сировинних матеріалах натурального походження, не впливають на результат вимірювання. Завдяки методу мікрохвильового резонансу визначається як поверхнева, так і глибинна вологість матеріалу. Процедура вимірювання дозволяє проводити аналіз незалежний від щільності, а калібрування стабільне протягом тривалого проміжку часу.

Технічні характеристики:

- діапазон вимірювання вологості 0,5...60 %;
- похибка вимірювання від $\pm 0,01$ до $\pm 0,1$ %.

Портативний вологомір зерна «SuperPro». Портативний електронний прилад виробництва Supertech Agroline (Данія) з новітніми технологіями експрес-аналізу вологості насіння трав, зернових та бобових культур в лабораторних і польових умовах. Принцип роботи ґрунтується на вимірюванні ємності конденсатора зі зразком, що відповідає вологості зерна. Базове налаштування приладів має такі калібрування: овес, пшениця, ячмінь, жито, конюшина, сорго, кукурудза, рапс, горох, соняшник, соя, гречка, рис, просо, льон, борошно пшеничне, вівсяниця червона, вівсяниця лугова, манка/макарони. Можливе градування приладу на інші культури і харчову сировину. Головне — робота з багатьма видами зерна, насіння трав без попереднього подрібнення та борошна в широкому діапазоні вологості з високою точністю. Вміст вологи відображається у відсотках на електронному дисплеї [14].

Основні технічні характеристики вологоміра SuperPro:

- метод вимірювання резистивний;
- точність $\pm 0,3$ %;
- збіжність $\pm 0,1$ %;
- діапазон вимірювання вологості від 5 до 50, %;
- кількість калібрувань 19, шт.;
- розміри 210×130×80.

Апарат Чижової — електронний переносний прилад, який точно вимірює дані показників вологи і виводить їх на екран. Це універсальне устаткування, яке може бути використане в роботі з найрізноманітнішими видами культур і насіння трав без необхідності їхнього попереднього подрібнення.

Основні сервісні функції апарата:

- автоматичне відключення живлення;
- автоматичне введення поправок по температурі;
- зміщення градуїрованої характеристики;
- індикація розряду батареї;
- усереднювання результатів вимірювання;
- налаштування встановлені автоматично.

Вологомір безперервного контролю вологості — прилад-індикатор, який здійснює безперервний контроль вологості необхідної культури в реальному масштабі часу в двох точках контролю з автоматичним усередненням показників датчиків і виведенням результату на панель індикації. Базовий комплект складається з двох датчиків, блоку управління і індикації.

Прилад успішно зарекомендував себе на сушарках типу ДСП-50 під час роботи в режимі прямиоточного сушіння. Сьогодні прилад експлуатується на підприємствах України для контролю пшениці, ячменю, сої, соняшнику і кукурудзи, для внутрішнього технологічного контролю, для вимірювання вологи дерева, ґрунту, пиломатеріалів та інших [16].

Вологомір зерна HE Lite (з помелом) — прилад, створений на сучасній імпортованій елементній базі. Механізм ручного млина дозволяє отримати точніші результати. Можливий рівень зміщення від -2% до $+2\%$ дозволяє отримати коригувальне значення вологості. У вологомірі передбачена автоматична компенсація температури зерна. Корпуси приладів виконані з полістиролу, що не вимагає їхнього заземлення і відсутня корозія. У конструкції датчиків застосована сталь зі спеціальним покриттям і теплоізоляційні непровідні матеріали. Виробник вологоміра зерна «HE Lite» Image фірма Pfeuffer, (Німеччина).

Технічні характеристики вологоміра «HE Lite»:

- діапазон вимірюваної вологості $5...30\%$;
- похибка у визначенні вологості: в діапазоні від 5 до 20% — $0,5$; в діапазоні понад 20% і до 30% — не більше $0,3$ (за паспортом $0,2\%$) $0,4$;
- збіжність результатів вимірювань $0,05...0,20\%$;
- діапазон робочої температури від -10 до $+40, ^\circ\text{C}$;
- габаритні розміри $200\times 94\times 64$.

Вологомір зерна «Wile-55» — мікропроцесорний електронний прилад, призначений для експрес-вимірювання вологості 16 сортів насіння і зерен, а також продуктів їхньої переробки у польових умовах, під час збирання, зберігання та переробки зерна, під час післязбиральної обробки і сушіння зерна, на токах, при розміщенні зерна в сховищах, при зволоженні зерна перед помелом, борошна в процесі помелу. Програма Wile-55 враховує також різні сорти зерна залежно від регіону походження. Контрольовані культури: пшениця, ячмінь, гречка, ріпак, овес, жито, соняшник, кукурудза, боби, рис, сорго, нут, горох, соєві боби, насіння льону, гірчиця, люцерна, тимофіївка, борошно, сіль, тирса. На додаток до запрограмованих сортів зерна Wile-55 може вимірювати велику кількість сортів зерна і насіння за допомогою «нульової» шкали приладу. Вміст вологи в вимірюваній масі відображається на LCD-дисплеї у відсотках ваги. Процес вимірювання базується на визначенні об'ємного опору вимірювального матеріалу.

Діапазон вимірювання вологості становить:

- для зернових і зернобобових культур $8...35\%$;
- для олійних культур $5...25\%$.

Вологомір є мікропроцесорним електронним приладом, який забезпечує оперативне вимірювання вологості без пошкодження контрольованих проб зерна. Вологоміри зерна Wile зареєстровані в держреєстрі засобів вимірювальної техніки України (У2953-09).

Точність та похибки вимірювання вологості вологомірів суттєво залежать від щільності матеріалів та показників середовища вимірювання. Попередньо можна зробити висновок, що визначення та контроль вологості зерна це одна з найважливіших технічних проблем, пов'язана з визначенням одного з параметрів багатоконпонентної, багатозафазної гетерогенної системи, якими і є зерновий потік.

В результаті аналізу методів та засобів вимірювання вологості доцільно провести дослідження із застосуванням НВЧ метода, як одного з найперспективніших.

Висновки

Дедалі жорсткіші вимоги до якості та конкурентоспроможності вітчизняної сільськогосподарської продукції висувають нові вимоги і до приладів та пристроїв експресного контролю вологості у більшості технологічних процесів. У сучасних технологічних процесах потрібні універсальні прилади, що контролюють вологість широкого кола сільськогосподарських матеріалів. Цілком очевидно, що широке впровадження необхідних засобів та приладів контролю вологості в народне господарство та їхня правильна експлуатація дадуть відчутний техніко-економічний ефект.

Незважаючи на недоліки НВЧ методу вимірювання, він є значно ефективнішим ніж інші. Тому подальша розробка й удосконалення НВЧ сушарок матиме позитивний вплив на зберігання і подальше використання не тільки зернових продуктів, а й інших сипких матеріалів, а також спонукатиме до створення високоточної і надійної системи вимірювання вологості зерна, здатної працювати в складних експлуатаційних умовах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] М. А Берлинер, *Приборы и системы управления. Влагомеры СВЧ*. Москва: Энергия, 1973, 400 с.
- [2] С. Т. Володарський, В. В. Кухарчук, В. О. Поджаренко, Г. Б. Сердюк, *Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю*, навч. посіб., Вінниця : Велес, 2001, 219 с.
- [3] Е. П. Вишневський, Г. В. Чепурин, «Вплив вологості на властивості матеріалів», *Журнал С.О.К.*, № 3-4, 2010.
- [4] ДСТУ ГОСТ 10840:2019 *Зерно. Метод визначення натури* (ГОСТ 10840-2017, ІДТ).
- [5] Л. Ф. Скалецька, *Технологія зберігання і переробки продукції рослинництва*, Київ: Вища школа, 1994, 25 с.
- [6] ЗАО «Зернотехника», *Оборудование для определения влагосодержания зерна и продуктов его переработки*. 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] ООО АкваСенсор, *Влагомеры*. Украина. г. Харьков. http://aquasensor.com.ua/vlagomer/v_grainmaster.php .
- [9] ООО «Агрола», *Влагомер зерна, семян трав и муки. Новинка 2005 г.* Москва (Институт Зерна). <http://agrola.narod.ru/superpoint.htm> .
- [10] *Жито. Технічні умови, ДСТУ-4522:2006*. Чинний від 2006-02-28. Київ : Держспоживстандарт України 2009, 18 с.
- [11] P. Sharma, and R. R. Khanna, “A literature survey and classification framework of TRIZ methodology ,” *Proceedings of 2nd International Conference on Computational Intelligence and Communication Technology*, CICT (Ghaziabad, U.P, India, February, 12-13, 2016) , IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers, Ghaziabad (India), 2016, pp. 516-522.
- [12] Y. Chen, M. Zhao, Y. Liu, and Y. Xie, “A formal functional representation methodology for conceptual design of material-flow processing devices,” *AI EDAM*, 2016, issue 4, pp. 353-366.
- [13] R. S. Jachowicz, “Moisture Content Measurements in Solids-Limitations and Improvements with Modern Technology,” on *Elektromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances*, Third workshop Athens, USA, 1999, pp. 32-41.
- [14] P. G. Bartly, S. O. Nelson, and R. W. McClendon, “Determination of Moisture Content in Wheat Using an Articial Neural Network Third workshop,” on *Elektromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances*, Athens, USA, 1999, pp. 74-78.
- [15] C. Alippi, and A. Ferrero, “Articial Intelligence for Instruments and Measurement Applications,” *IEEE Instr. & Meas. Magazine*, 1998, p. 47.
- [16] В. К. Бензарь, *Техника СВЧ-влагометрии*. Минск, 1974.
- [17] В. В. Лисовский, *Теория и практика сверхвысокочастотного контроля влажности сельскохозяйственных материалов*, Минск, 2005.
- [18] Л. Н. Губкин, *Физика диэлектриков. Теория электрической поляризации в постоянном и переменном электрическом поле*, Москва, 1971.
- [19] I. Renhart, “The Control of Moisture of Rocks by Methods of Microwave Aquametry,” in *Elektromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances*, 4th International Conference, Weimar, 2001, pp. 372-379.

Рекомендована кафедрою загальної фізики, ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 20.02.2023

Білинський Йосип Йосипович — д-р техн. наук, професор, професор кафедри загальної фізики, e-mail: yosyp.bilynsky@gmail.com ;

Скалецька Марина Олегівна — аспірантка кафедри загальної фізики, e-mail: maryna.skaletska@gmail.com .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

Analysis of Methods and Means for Measuring the Humidity of Bulk Products

¹Vinnitsia National Technical University

Various methods of grain moisture measurement are considered in the article. The authors conducted the analysis of the conventional and modern methods of grain moisture measurement used in agriculture and the food industry. The principles of operation and the advantages and disadvantages of each method are described. The article examines in detail the methods used in international standards, and also analyzes the latest methods of grain moisture measurement, such as methods using infrared and microwave technology. The paper proposes a classification of methods for measuring the moisture content of bulk products and identifies the most relevant options for further research. Methods and means of grain moisture control are studied. The work established that the choice of grain moisture measurement method should depend on various factors, such as grain type, measurement accuracy, speed and cost of equipment. The authors analyzed each method in detail and made recommendations for choosing the optimal method of grain moisture measurement for specific conditions. The analysis was carried out and significant parameters affecting grain moisture measurements were selected. A comparison of the characteristics of hygrometers implemented by well-known ultra-high-frequency methods was carried out. The accuracy and errors of moisture measurement significantly depend on the density of materials and indicators of the measurement medium. The considered hygrometers have high measurement error that does not meet the requirements of certain productions. The comparison of these parameters enabled to determine the optimal method for accurate moisture measurement.

Keywords: grain, measurement, humidity, humidity control, measurement methods.

Bilynskyi Yosyp Yo. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of General Physics, e-mail: yosyp.bilynsky@gmail.com ;

Skaletska Maryna O. — Post-Graduate Student of the Chair of General Physics, e-mail: maryna.skaletska@gmail.com