

---

---

# МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

---

---

УДК 621.311.25

В. В. КУХАРЧУК, В. В. БОГАЧУК, В. Ф. ГРАНЯК

## АНАЛІЗ ТА КЛАСИФІКАЦІЯ ВІДОМИХ МЕТОДІВ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ВОЛОГОСТІ ПОРОШКОПОДІБНИХ МАТЕРІАЛІВ

*Вінницький національний технічний університет,  
вул. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021, Україна*

**Анотація.** У даній роботі розглянуто та класифіковано основні методи вимірювання вологості сипучих порошкоподібних речовин з ціллю автоматизації процесу сушки продукції переробної галузі АПК.

**Аннотация.** В данной работе рассмотрено и классифицировано основные методы измерения влажности сыпучих порошковидных веществ с целью автоматизации процесса сушки продукции перерабатывающей отрасли АПК.

**Abstract.** The basic methods of measuring of humidity of friable matters is considered and classified with the purpose of automation of process of drying of products of processing industry of AIC.

### ВСТУП

На сьогоднішній день значну частину діючих підприємств харчової та переробної промисловості агропромислового комплексу складають молокопереробні заводи, заводи з виготовлення сухого молока. Але через застарілі технології та відсутність засобів достовірного контролю основних технологічних параметрів продукція їх є недостатньо якісною.

Параметрами, що характеризують якість сухого молока, є: масова частка вільного жиру в готовому продукті; відносна швидкість розчинення сухого молока; коефіцієнт пористості; середній розмір частинок; ступінь кристалізації лактози. Але основним технологічним параметром якості сухого молока є масова частка вологи в готовому продукті. В умовах виробництва цей параметр вимірюють у лабораторіях термогравіметричним способом, що вимагає значних затрат часу, а отже, робить неможливим використання автоматизованих систем керування технологічним процесом сушки.

Відомі засоби контролю вологості порошкоподібних матеріалів, до яких відносяться сухі молочні продукти, є громіздкими, працюють переважно в ручному режимі, мають низьку точність, достовірність та швидкодію[1].

З огляду на викладене вище, очевидно є необхідність розвитку методів вимірювального контролю вологості порошкоподібних матеріалів та створення на їх основі засобів безперервного контролю вологості в процесі їхнього виробництва.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Присутність води в матеріалах навіть у незначних кількостях суттєво впливає на їх фізико-хімічні і електричні властивості. Це пов'язано з тим, що для неї характерна висока діелектрична проникність і здатність вибірково поглинати електромагнітне і оптичне випромінювання.

Вплив води на електричні та фізичні властивості матеріалів залежить також і від способу зв'язку молекул води з структурними частинами досліджуваної порошкоподібної суміші. Зокрема відомо три основні форми зв'язку води з твердими матеріалами: хімічна, фізико-хімічна і фізико-механічна [2].

В залежності від форми енергії зв'язку і виду матеріалу волога може бути у вигляді вільної води, капілярно зв'язана (фізико-механічний зв'язок), адсорбційно зв'язана (фізико-хімічний зв'язок) та хімічно зв'язана. Наявність декількох форм зв'язку води з речовиною ускладнює процес якісного контролю вологості; додаткові труднощі викликає і те, що в ряді процесів одна форма зв'язку поступово переходить в іншу. Різні методи вимірювання вологості по-різному реагують на форми зв'язку вологи [2].

Номенклатура порошкоподібних або, що одне і те ж, сипучих матеріалів, які є об'єктом контролю вологості, надзвичайно різноманітна як за хімічним складом, так і за електрофізичними властивостями. Часто один і той же матеріал у процесі його переробки, пов'язаної на останніх етапах із зневоднюванням, переходить з одного класу в інший, або з однієї межі класу на іншу [3].

Значною проблемою, що виникає у процесі вимірювання вологості сипучих порошкоподібних сумішей є також нерівномірність розподілу вологи по всьому об'єму матеріалу, що викликається такими факторами, як наявність дефектів різних типів, широкий набір розмірів пор – від макропор через мезопори і мікропори до субатомних “пор” [1].

### АНАЛІЗ ШЛЯХІВ ВИРШЕННЯ ЗАДАЧІ

Відомо багато методів вимірювання вологості [2]. Всі вони поділяються на прямі, коли матеріал ділять на суху речовину і вологу, і непрямі, коли вимірюють зміну фізичних величин або властивостей об'єкта контролю, функціонально пов'язаних з вологістю матеріалу.

При використанні прямих методів безпосередньо вимірюваними величинами є маса води в пробі (навісі)  $m_w$  і маса проби  $m$ . За результатами вимірювань  $m_w$  і  $m$  розраховують масову частку води в речовині [4]:

$$W = \frac{m_w}{m} \cdot 100\%, \quad (1)$$

або інші відносні величини, такі як об'ємна або молярна частка води, що використовується в якості характеристики “вологісного” стану твердих речовин. Такі методи вимірювання мають високу точність, та вимагають тривалого часу вимірювання і достатньо складних технічних засобів, що унеможлиблює створення на їх основі автоматизованих систем контролю якості вихідного продукту. [2, 5, 6].

Друга група – непрямі методи вимірювання вологості – об'єднує цілий ряд різноманітних методів, в яких контроль вологості здійснюється за оцінюванням зміни властивостей об'єкта контролю.

Слід зазначити, що в даний час остаточно не розроблено класифікацію методів вимірювання вологості. Так, наприклад, у класифікаціях, що наведені в [2, 6, 7] є істотні розходження. У зв'язку з цим, а також з огляду на те, що мова йде лише про методи вимірювання вологості твердих та сипучих матеріалів, пропонується до непрямих методів віднести методи, перераховані нижче.

Найбільш поширеними серед непрямих методів вимірювання вологості є електричні методи. В їх основу закладено пряме вимірювання електричних параметрів матеріалу, які залежать від вмісту в ньому вологи. Вимірювання вологості електричними методами можна вважати миттєвою процедурою, що дає можливість з їх допомогою автоматизувати процеси контролю вологості, а також створити системи автоматичного управління за вологістю для великої кількості технологічних процесів. Електричні методи вимірювання вологості поділяють на кондуктометричні, діелькометричні та надвисокочастотні (НВЧ) [2, 7]. Як самостійний серед них, можна виділити також ємнісний метод.

Значного розповсюдження набули також радіаційні (радіометричні) методи, найбільш поширеними серед яких є методи ядерного магнітного резонансу (ЯМР), рентгенівський та нейтронний [2]. Та слід зазначити, що більшість радіометричних методів заборонено використовувати для вимірювання вологості продуктів харчової промисловості, а отже вони є непридатними для систем автоматичного контролю вологості продукції харчової та переробної галузей.

Механічні методи базуються на вимірюванні механічних характеристик матеріалів, які змінюються зі зміною його вологості.

В основу теплофізичних методів покладена залежність від вологості матеріалу його теплофізичних властивостей – коефіцієнта теплопровідності, питомої та об'ємної теплоємності, енергії фазового переходу [7]. Та оскільки перераховані властивості суттєво залежать від гранулометричного складу і пористості матеріалу, що досліджується, в більшості випадків необхідне градування вологоміра для конкретного матеріалу, що значно ускладнює процес отримання результату та зменшує його ефективність через допустимі відхилення нетехнологічних параметрів вихідного продукту.

Акустичні методи базуються на залежності акустичних властивостей матеріалу від вмісту в ньому вологи. Метод полягає у вимірюванні значення поперечної і повздовжньої швидкості ультразвукової хвилі.

Перераховані вище непрямі методи вимірювання вологості та їх класифікацію наведено на рис. 1[1].

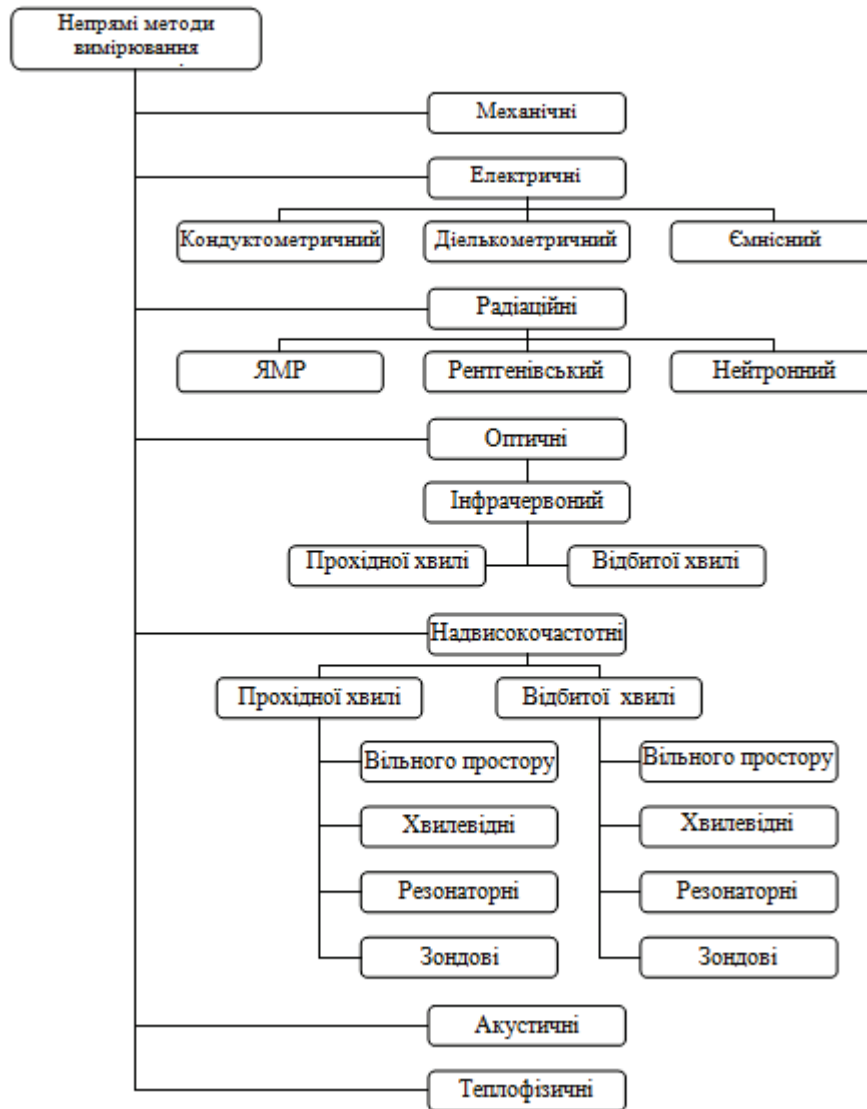


Рис. 1. Класифікація непрямих методів неруйнівного контролю вологості матеріалів

Порівняємо особливості перерахованих методів і здійснимо аналіз недоліків та переваг кожного з них з точки зору можливості їх застосування для контролю вологості сипучих матеріалів за умови неперервності технологічного процесу.

В кондуктометричному методі [8] оцінка вологовмісту здійснюється за результатами вимірювання електричного опору (об'ємного або поверхневого). Вологомісткі матеріали, будучи в сухому вигляді діелектриками, в результаті зволоження стають напівпровідниками. Неоднорідність діелектрика і наявність у ньому вологи впливають не лише на значення питомої провідності, але й на якісні особливості електропровідності і на її залежність від напруженості електричного поля та температури. Оскільки електропровідність твердого матеріалу визначається розчиненими у воді електролітами, та характер залежності питомої електропровідності визначається розподілом вологи в матеріалі, який в свою чергу залежить від пористої структури, форми пор, їх розміру і характеру, то даний метод не дає можливості забезпечити високу точність отриманих результатів. Окрім цього кондуктометричний метод обмежений вузьким діапазоном вимірювання від 2 до 30 % [2, 8]. При вологості матеріалу більше 30 % метод має надзвичайно високу чутливість через степеневу залежність опору від вологості. В діапазоні до

2 % вимірювання вологості практично неможливе, оскільки опір матеріалу стає більшим вхідних опорів вимірювальних пристроїв. Головною перевагою цього методу є простота схеми та конструкції засобів вимірювання, які дозволяють здійснювати контроль вологості безперервно та майже безінерційно. Але вплив на результат вимірювання хімічного та гранулометричного складу об'єкта контролю, характеру нерівномірності розподілу вологи в зразку, наявності поверхневої вологи, температури, щільності, а також вузький діапазон вимірювання обмежують область застосування цього методу.

Патентний пошук та аналіз літературних джерел [9] показав, що досить поширеним є діелькометричний метод, заснований на використанні залежності деяких діелектричних характеристик матеріалів від його вологості. Сутність методу полягає у вимірюванні діелектричної проникності і тангенса кута діелектричних втрат в широкому діапазоні частот – від звукових до НВЧ [2].

Відомо, що будь-яка речовина складається з позитивних атомних ядер, оточених негативними електронними сферами. Під дією зовнішнього електричного поля електронні шари зміщуються відносно ядер. При цьому у атома виникає наведений дипольний момент і електронна поляризація речовини, в результаті якої збільшується його провідність або діелектрична проникність. А так як, велика кількість твердих та сипучих матеріалів у сухому вигляді мають дуже низьку діелектричну проникність (біля 1-10), а діелектрична проникність води майже на два порядки вища, то наявність навіть невеликої кількості води у пробі викликає суттєві зміни його діелектричної проникності та діелектричних втрат. Цим пояснюється висока чутливість діелькометричного методу.

Діелектричну проникність вимірюють опосередковано через електричну ємність сенсора, заповненого речовиною, що досліджується. Саме тому у літературі нерідко називають цей метод ємнісним [3].

Перевагами діелькометричного (ємнісного) методу порівняно з кондуктометричним є: менша чутливість до щільності та температури матеріалу, висока швидкодія, точність (похибка біля 0,5 %) та діапазон вимірювання [2]. При використанні цього методу на температурні, вологісні та частотні характеристики матеріалу вплив має щільність матеріалу та його гранулометричний склад. Для усунення цього недоліку використовують примусове ущільнення матеріалу [10]. На результат вимірювання вологості діелькометричним методом впливають, крім того, співвідношення кількості вологи різних станів і видів зв'язку.

Всі надвисокочастотні методи вимірювання вологості базуються на залежності параметрів електромагнітної хвилі, яка взаємодіє з вологим матеріалом, від його діелектричних характеристик. В самому загальному вигляді взаємодія електромагнітної хвилі з матеріалом описується рівняннями Максвелла [11].

Значення діелектричних параметрів вологого матеріалу залежать від значень цих параметрів кожного з компонентів, що містяться в ньому, а також від кількісного співвідношення компонентів, їх форми та взаєморозміщення [12]. З усіх компонентів, що входять до складу вологого матеріалу, найбільші значення діелектричних параметрів в діапазоні НВЧ має вільна вода, і ці значення зменшуються пропорційно збільшенню енергії зв'язку води з речовиною [11]. Тобто, очевидним є те, що в цьому діапазоні частот основний вплив на діелектричні характеристики вологого матеріалу має кількість в ньому вільної води.

НВЧ-методи вимірювання вологості застосовують в тих областях і для тих матеріалів, які є традиційними для електричних методів вимірювання вологості. Найбільше поширення отримали методи прохідної хвилі, а саме, вимірювання вологості за поглинанням НВЧ-енергії (за затуханням) [13]. Близько 87 % усіх НВЧ-воломірів у світі побудовано за цим принципом. Простота технічних рішень, висока чутливість, широкий динамічний діапазон, мала похибка вимірювання, низька вартість елементів НВЧ-тракту в найбільш поширеному трисантиметровому діапазоні – це найбільш характерні ознаки цього методу [3]. Але при цьому результати вимірювань в значній мірі залежать від температури.

НВЧ-методи, засновані на вимірюванні параметрів відбитої хвилі, застосовуються у вологометрії значно рідше, ніж методи прохідної хвилі, хоча мають суттєву перевагу – результати вимірювань не залежать від товщини матеріалу, що контролюється. Похибки визначаються відмінністю поверхневої вологи від середньої, а також ступенем неоднорідності поверхневого шару.

Найбільш поширеною модифікацією НВЧ методів є вимірювання вологості у вільному просторі. Це пояснюється простотою методу, нескладною методикою вимірювання, відсутністю контакту з пробєю, можливістю інтегральної оцінки вологості в значних об'ємах. Принцип, який лежить в основі цих методів досить простий і полягає у вимірюванні параметрів відбитої чи прохідної хвилі, попередньо зібраної в вузькі пучки за допомогою передавальної та приймальної антени, після взаємодії з матеріалом. На основі цього принципу реалізуються три схеми вимірювання вологості – за значенням поглинання енергії НВЧ-поля, значенням фазового зсуву коливань НВЧ і за параметрами відбитої хвилі. На практиці найбільш поширеною є перша схема. Метод відбиття широко не використовується через низьку точність вимірювань, особливо в діапазоні малих вологостей.

Слід зазначити, що в усіх трьох методах на контрольований параметр впливають такі фактори, як

щільність та температура матеріалу, а також товщина шару. Зменшити такий вплив у деяких випадках можна шляхом одночасного вимірювання затухання та фази [3, 7].

Методи, засновані на залежності частоти резонансної системи від діелектричних параметрів матеріалу, використовують для контролю малих вологостей. Чутливість цього методу до незначних змін діелектричних властивостей матеріалів пояснюється високою напруженістю поля і суттєвою взаємодією поля з речовиною [7, 11]. При цьому, на відміну від аналогічних методів з використанням відбитої хвилі, в резонансних системах прохідної хвилі зміщення зразка мало впливає на результати вимірювань. Обмеження діапазону вимірювання вологості визначається тим, що при підвищенні вологості збільшується частка розсіяної енергії, що знижує добротність системи та точність вимірювання частоти [13].

За допомогою хвилевідних методів вимірюють малі вологості, особливо з використанням хвиль міліметрового діапазону. Цей метод значно чутливіший порівняно з методом вимірювання у вільному просторі через високу концентрацію поля. Експериментальні дослідження показали можливість отримання чутливості на міліметрових хвилях біля  $3 \cdot 10^{-5}\%$  [7]. Інформативним параметром є ослаблення чи фазовий зсув прохідної чи відбитої хвилі. Обмеженість застосування хвилевідних методів на практиці пояснюється складністю введення в них контрольованого матеріалу.

Зондові методи призначені для контролю вологості невеликої частини зі всієї маси матеріалу і, як правило, використовуються для дослідження розподілу вологи в об'ємі матеріалу або її зміни в часі. Інформативним параметром є амплітуда, фазовий зсув і частота електромагнітних коливань. На результати вимірювань суттєво впливає поверхнева вологість матеріалу і неоднорідність по вологості та щільності його поверхневого шару.

Для зменшення впливу на результати вимірювання вологості НВЧ-методами таких факторів, як температура, щільність, неоднорідність та ін. доцільно використовувати комбіновані методи. В роботах [3, 7, 11] описано деякі з них.

Серед оптичних методів визначення вологості найбільший інтерес викликають інфрачервоні методи, в основу яких покладено вимірювання вибіркового поглинання вологою інфрачервоного (ІЧ) випромінювання певної довжини хвилі відбитого від поверхні матеріалу, або прохідного через матеріал. ІЧ-методи використовуються для широкого класу речовин та матеріалів: газів, рідин, твердих та сипучих матеріалів як органічного, так і неорганічного походження. Діапазон вимірювання вологості знаходиться в межах від  $10^{-4}\%$  до  $100\%$ , причому температурні впливи є незначними. Зміна температури на  $1\%$  еквівалентна зміні вмісту вологи на  $0,002\%$  [2].

Характерними особливостями ІЧ-методів є висока вибіркковість, чутливість, точність і відтворюваність вимірювань, а також можливість безперервного контролю, безконтактність та експресність аналізу [14]. Найбільша точність досягається при вологості  $0-30\%$ , а для вимірювання низького вологовмісту ці методи є просто незамінними. Абсолютна похибка результатів вимірювання вмісту вологи складає біля  $0,05\%$ . Для створення ІЧ-воломірів найбільш перспективною є ближня ІЧ-область від  $0,8$  до  $6,1$  мкм, в якій волога має ряд смуг поглинання різної інтенсивності.

Головною особливістю ІЧ-спектрів є те, що поглинання випромінювань залежить не лише від молекули в цілому, а й від окремих груп присутніх в цій молекулі атомів. Це положення є основою для ІЧ спектрального аналізу речовинного складу і визначення кількості тих чи інших груп атомів, наявних в матеріалі. Кількісний аналіз вмісту в контрольованому матеріалі того чи іншого компонента досить простий, якщо є смуга поглинання цього компонента, яка не перекривається смугами поглинання інших компонентів. Тоді глибина смуги добре корелюється з концентрацією піддослідного компонента [7].

Вологоміри, як правило, реєструють прозорість  $T$ , яка характеризує відношення потоку, що пройшов через речовину, до потоку  $I_0$ , що падає на речовину

$$T = \frac{I}{I_0}. \quad (2)$$

Можна замість прозорості реєструвати оптичну густину  $D$ , що є логарифмом оберненої прозорості [7]

$$D = \lg\left(\frac{1}{T}\right) = \lg\left(\frac{1}{I/I_0}\right) = \lg I_0 - \lg I. \quad (3)$$

Зв'язок між глибиною і концентрацією компонента визначається законом Бугера-Ламберта-Бера [7]

$$I = I_0 \exp[-kcl] , \quad (4)$$

де  $k$  – коефіцієнт затухання, який також називають коефіцієнтом екстинкції, якщо концентрація виражена в одиницях маси;  $c$ ,  $l$  – концентрація і товщина шару контрольованої речовини.

Частіше користуються не інтенсивністю, а оптичною густиною  $D$ , модель якої після підстановки (4) в (3) матиме вигляд [7]

$$D = \lg\left(\frac{I_0}{I}\right) = kcl . \quad (5)$$

Вода в ближній ІЧ-області спектра має декілька ліній поглинання, по інтенсивності яких можна оцінювати вологість матеріалів [15]. Слід пам'ятати, що інтенсивність смуг поглинання зменшується зі зменшенням довжини хвилі і залежить від температури контрольованого матеріалу і рівня зв'язку води з твердою речовиною. Але більшості вуглеводів властиве інтенсивне поглинання в діапазоні довжин хвиль більше 2 мкм. Тому для вологометрії в переважній більшості випадків слід рекомендувати використання аналітичних довжин хвиль, які мають  $\lambda \leq 2$  мкм [7].

В роботі [2] найбільш придатною для практичного використання вважають довжину хвилі 1,94 мкм. Вода, яка попадає в речовину, змінює її спектр. Із різних спектральних характеристик сухої речовини (рис. 2, крива 1) і при вологості 9 % (крива 2) впливає, що на довжині хвилі 1,94 мкм вода має значне поглинання. Отже, якщо контрольований об'єкт опромінювати ІЧ-променями з такою довжиною хвилі і вимірювати потужність прохідного або відбитого потоку випромінювання, то вона буде змінюватись в залежності від вологості.

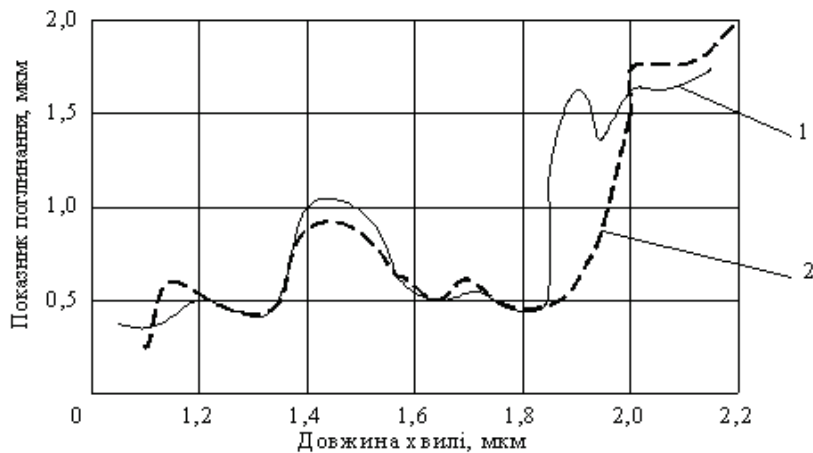


Рис. 2. Спектральні характеристики сухої (1) та вологої (2) речовини

Але при вимірюваннях на одній довжині хвилі виникають похибки, основними джерелами яких, окрім вологості, є розсіювання випромінювання матеріалом, його товщина і т. д. Для вилучення таких похибок використовують ще один потік випромінювання з опорною довжиною хвилі, що лежить поза смугою поглинання вологою.

У вологометрії твердих та сипучих матеріалів, крім описаного вище методу контролю, який базується на пропусканні ІЧ-випромінювання, поширені методи, які використовують спектри дифузно або дзеркально відбитих від матеріалу ІЧ-випромінювань [7]. Коефіцієнтом відбиття є відношення відбитого  $I_e$  і падаючого  $I_0$  потоків випромінювання.

Як показано в роботі [15], значення відбиття  $R$  і пропускання  $T$  для шару обмеженої товщини можна знайти із співвідношень

$$R = R_{\infty} \cdot \frac{1 - \exp[-2\alpha l]}{1 - R_{\infty}^2[-2\alpha l]}, \quad (6)$$

$$T = \frac{\exp[-2\alpha l] \cdot (1 - R_{\infty}^2)}{1 - R_{\infty}^2 \exp[-2\alpha l]}, \quad (7)$$

$$\alpha = \sqrt{k - 2kS}, \quad (8)$$

де  $l$  – товщина шару матеріалу;  $k$  та  $S$  – коефіцієнти поглинання та розсіювання – константи.

Для найбільш поширених двохлапеліх ПЧ-аналізаторів значення вологості  $W$  виражається формулою [1]

$$W = k_0 + k_1 \lg\left(\frac{R_1}{R_0}\right), \quad (9)$$

де  $R_0$  – коефіцієнт спектрального відображення на опорній спектральній позиції;  $R_1$  – коефіцієнт спектрального відображення на вибраній аналітичній спектральній позиції;  $k_0$ ,  $k_1$  – градувальні коефіцієнти.

Незалежність результатів вимірювання ПЧ-методом від маси одиниці площі матеріалу, від вмісту в ньому деяких речовин та домішок, а також безконтактність методу роблять його перспективним, особливо для контролю вологості в потоці.

В радіометричних методах використовуються різні види ядерних випромінювань і взаємодій [16]. Найбільш поширений – нейтронний метод – заснований на сповільненні і розсіюванні швидких нейтронів при пружних зіткненнях з ядрами водню, які входять до складу води, що міститься у матеріалі чи продукті. Для центрального удару цей ефект описується залежністю [3]

$$\Delta E = E[l - ((A - 1)/(A + 1))^2], \quad (10)$$

де  $\Delta E$  – втрати енергії нейтрона;  $E$  – енергія нейтрона до взаємодії;  $A$  – масове число елемента, з яким відбулась взаємодія.

При центральному ударі і при  $A=1$  (тобто коли взаємодіючим елементом є водень) нейтрон повністю передає свою енергію взаємодіючому ядру. Найбільш ефективно швидкі нейтрони сповільнюються на ядрах водню [3]. Оскільки присутність водню у матеріалі, що досліджується, найбільш часто пояснюється наявністю в ньому води, то ця обставина і покладена в основу нейтронного методу вимірювання вологості. Про вологість матеріалу судять за значенням ефекту сповільнення швидких нейтронів, яке оцінюють, в свою чергу, за значенням концентрації повільних нейтронів на певній відстані від джерела.

Нейтронними вологомірами вимірюють вологість в шарі від 10 до 20 см або в сфері радіусом від 15 до 30 см. На покази вологомірів впливають:

1. Наявність органічних домішок, які збільшують концентрацію нейтронів;
2. Вміст аномальних поглинень теплових нейтронів (швидкість рахунку зменшується при масовій концентрації хлору 0,01 % і бору 0,001 % [17]);
3. Варіації щільності контрольованого середовища в межах  $\pm 100$  кг/м<sup>3</sup>, які призводять до похибок [18], що залежать від діапазону вологості (при вимірюванні об'ємної частки води в речовині від 10 до 40 % похибка вимірювання збільшується від 0,7 до 1,8 %);
4. Зміна відстані між джерелом та детектором;
5. Градієнти вологості у вимірюваному середовищі [7].

Вплив вказаних джерел похибок можна зменшити: за допомогою детекторів надтеплових нейтронів [19]; одночасним вимірюванням концентрацій теплових і надтеплових нейтронів або теплових нейтронів і захватного  $\alpha$ -випромінювання [17] при одному джерелі нейтронів; використанням окремих

джерел нейтронів і  $\alpha$  - випромінювання та детекторів повільних нейтронів і  $\alpha$  -випромінювання.

До основних переваг нейтронного методу можна віднести такі: вимірювання вологості в широкому діапазоні (до 100 %), нечутливість до розподілу вологи в зразку і його мінералогічного складу, контроль динаміки сушки, можливість вимірювати вологість матеріалів без відбору проб і порушення структури об'єкта, значний об'єм матеріалу, що аналізується при вимірюванні вологості. Сфера використання нейтронного методу досить широка. Це контроль вологості ґрунтів, торфу, будівельних матеріалів і конструкцій та ін.

Основними недоліками нейтронного методу є вплив на результати вимірювань елементів, які ефективно поглинають нейтрони (хлор, бор, залізо), форм зв'язку води з матеріалом, небезпека виникнення в досліджуваному матеріалі наведеної радіоактивності, необхідність біологічного захисту [2].

Одним із перспективних методів вимірювання вологості речовин тваринного та рослинного походження є метод ядерного магнітного резонансу (ЯМР) [2]. Сутність методу полягає в тому, що при певних умовах в результаті переорієнтації ядерних спінів речовина вибірково на фіксованій частоті поглинає енергію електромагнітного поля. Частота, на якій це настає, залежить від властивостей ядер і значення зовнішнього магнітного поля, яке впливає на речовину. Змінюючи значення магнітного поля, можна знімати спектр ЯМР і визначити, які ядра містяться в зразку.

Кількість енергії, яка поглинається, пропорційна числу ядер (протонів), які містяться в зразку, а оскільки протони входять до складу молекул води, то для речовин, що не мають інших протонів, з інтенсивності поглинання енергії можна судити про їх вологість.

До переваг ЯМР-методу можна віднести неруйнівний характер аналізу, його експресність, широкий діапазон вимірюваної вологості, можливість калібровки приладів за сигналами герметизованих стандартних зразків. Але висока вартість та складність апаратури, необхідність розділення сигналів протонів води та інших протонів, що входять до складу речовини, а також порівняно невеликий об'єм зразків, що зумовлює збільшення похибки, пов'язаної з нерівномірним розподілом вологи в матеріалі, обмежують сферу використання вологомірів, що реалізуються на основі ЯМР-методу.

## ВИСНОВОК

З наведеного вище порівняльного аналізу відомих методів контролю вологості сипучих матеріалів, а також враховуючи особливості сушки органічних речовин, можна зробити висновок, що для вимірювання вологості сухого молока та іншої подібної продукції переробних підприємств АПК доцільним та перспективним є використання оптичних методів, а саме інфрачервоного методу відбитої хвилі. Це дозволить оптимізувати та автоматизувати процес управління сушінням продукту за вологістю, проводити експресний контроль вологості і найголовніше – вимірювати вологість продукту в потоці, тобто, з врахуванням динаміки процесу.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Богачук В. В. Методи та засоби вимірювального контролю порошкоподібних матеріалів: Монографія. / В. В. Богачук, Б. І. Мокін – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – 141 с. – ISBN 978-966-641-245-6
2. Мухитдинов М. Оптические методы и устройства контроля влажности. / М. Мухитдинов, Э. С. Мусаев – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 96 с.
3. Теория и практика экспресного контроля влажности твердых и жидких материалов / Кричевский Е.С., Бензарь В.К., Венедиктов М.В. и др. / Под ред. Е.С. Кричевского. – М.: Энергия, 1980. – 240 с.
4. Иванов В. П. Метрологическое обеспечение влагометрии твердых веществ: Обзорная информ. / В. П. Иванов, С. В. Медведевских, А. М. Меньшиков – М., 1990. – 40 с.
5. Романов В. Г. Проверка влагомеров твердых веществ. / В. Г. Романов – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 46 с.
6. Грицай В.И. Классификация методов измерения влажности сыпучих материалов / В. И. Грицай // Контрольно-измерительная техника. – 1972. – Вып. 12. – С. 130-133.
7. Кричевский Е. С. Контроль влажности твердых и сыпучих материалов / Е. С. Кричевский, А. Г. Волченко, С. С. Галушкин / под ред. Е.С. Кричевского. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 136 с.
8. Берлинер М. А. Электрические методы и приборы для измерения и регулирования влажности. / М. А. Берлинер – М.: Энергия, 1960. – 68 с.
9. Способ непрерывного измерения влажности сыпучих материалов в технологическом потоке: А.с. №1300373 СССР, МКИ G 01 N 27/22 / Меремьянин Ю.И., Бушуев В.А., Смирнов В.И., Яшуркаев С.И. – № 3821416/31-25; Заявлено 06.12.1984; Оpubл. 13.03.87, Бюл. № 12. – 3 с.



10. Пат. Японії № 56-16375, МКИ G 01 N 15/10. Пристрій для виміру вологості сипучих матеріалів. – Заявл. 6.06.77; Опубл. 16.04.81. – 4 с.
11. Исмагуллаев Р. П., Теоретическое и экспериментальное исследование сверхвысокочастотного метода измерения влажности материалов. / Р. П. Исмагуллаев, А. Б. Гринвальд – Ташкент: Фан, 1982. – 83 с.
12. Брандт А. А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. / А. А. Брандт – М.: Гос. физ.-мат. издат., 1963. – 403 с.
13. Бензарь В. К. Техника СВЧ-влажнометрии. / В. К. Бензарь – Минск, 1974. – 286 с.
14. Метод распознавания градуировок инфракрасного влагомера с микроЭВМ / С. А. Черненко, В. П. Королев, О. И. Москаленко, Л. Б. Багдасарян. // Приборы и системы управления. – 1991. – №3. – С.38-39.
15. Авраменко В. Н. Спектральный анализ в пищевой промышленности. / В. Н. Авраменко, М. П. Эсельсон – М.: Пищевая промышленность, 1979. – 102 с.
16. Измерения в промышленности: [Справочник] / Под ред. П. Профоса: Пер.с нем. – М.: Металлургия, 1980. – 648 с.
17. Емельянов В. А. Измерение влажности нейтронным методом // Приборы и системы управления. / В. А. Емельянов – 1970. – №1. – С. 24-26.
18. Нейтрометрия влажности пахотного слоя почв / В. А. Емельянов, В. И. Сеницын, Л. И. Бескид, Ю. К. Евсеев // Атомная энергия. – 1969. – Т. 26. – Вып. 1. – С. 10-14.
19. Филиппов Е.М. Нейтрон-нейтронный и нейтронно-гамма методы в рудной геофизике. / Е. М. Филиппов Б. С., Валетин, А. В. Новоселов – Новосибирск: Наука, 1972. – 58 с.

Надійшла до редакції 20.05.2009р.

**КУХАРЧУК В.В.** – д.т.н., проф., завідувач кафедри теоретичної електротехніки та електричних вимірювань, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна.

**БОГАЧУК В.В.** – к.т.н., доцент кафедри електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна.

**ГРАНЯК В. Ф.** – аспірант кафедри теоретичної електротехніки та електричних вимірювань, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна.