

АВТОМАТИКА ТА ІНФОРМАЦІЙНО-ВІМІРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА

УДК 621.311.25

В. В. Кухарчук, д. т. н, проф.;

В. В. Богачук, к. т. н.;

І. К. Говор,

В. Ф. Граняк

АНАЛІЗ МЕТОДІВ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ВОЛОГОСТІ ГЕТЕРОГЕННИХ ДИСПЕРСНИХ ДІЕЛЕКТРИКІВ

Розглянуто та класифіковано основні методи вимірювання вологості твердих гетерогенних речовин з метою автоматизації процесу контролю вологості продукції переробної галузі АПК.

Вступ

Одним з найпоширеніших прикладів гетерогенних дисперсних діелектриків, що виробляються переробною промисловістю АПК, є вершкове масло.

Вершкове масло — це молочний продукт, який виробляється шляхом збивання свіжого або кислого молока, вершків чи перетворення високожирних вершків.

Масло складається з молочного жиру та мікроскопічних часток води і молочних білків. Його виготовляють переважно з коров'ячого молока або продуктів його переробки, що не містять спеціальних харчових добавок. Вершкове масло, в залежності від масової частки жиру, розділяють на групи: екстра (частка жиру — 80...85 %), селянське (72,5...79,9 %), бутербродне (61,5...72,4 %), топлене (молочний жир, частка жиру — не менше 99 %). Залежно від технологічних особливостей та органолептичних показників вершкове масло поділяється на такі види: солодковершкове та солоне солодковершкове, кисловершкове та солоне кисловершкове.

Одним з основних параметрів, що характеризує якість вершкового масла, є ступінь дисперсності

водяної фази R (розподілу крапель води за розміром) [1]. В умовах виробництва цей параметр вимірюють у лабораторіях шляхом аналізу пробних зразків за допомогою мікроскопів з фотоприставкою, що вимагає значних затрат часу, а, отже, робить неможливим використання автоматизованих систем керування технологічним процесом [2].

Постановка задачі

Добру пластичність і стійкість при зберіганні вершкове масло проявляє при розмірах крапель води, що не перевищують 10 мкм [1, 2]. На кількість вміщеної у ньому води мають суттєвий вплив як особливості використовуваної сировини так і незначна зміна технологічних параметрів роботи промислового агрегату, тобто частоти обертання перемішувального механізму збивателя та шнеків обробника, температури збивання масляних вершків та оброблення масляного зерна, подачі вершків у збиватель (продуктивності апарату), рівня пахти у першій шнековій камері тощо (рис. 1) [2].



Рис. 1. Вплив технологічних параметрів масляного зерна на вміст у ньому води

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

Використання залежності перерахованих властивостей речовини від вміщеної у ній вологи покладено в основу усіх без винятку первинних вимірювальних перетворювачів, що використовуються у системах автоматичного та автоматизованого управління технологічними процесами. Проте наявність різних форм зв'язків між водою та речовиною, а, як наслідок цього, і відмінність окремих фізичних властивостей молекул води, в залежності від форми їх зв'язку з речовиною, вносить значні похибки у кінцевий результат вимірювань [3].

Відомі засоби контролю вологості гетерогенних дисперсних діелектриків, до яких належить вершкове масло, є громіздкими, працюють переважно в ручному режимі, мають низьку точність, вірогідність контролю та швидкодію.

З огляду на викладене вище, очевидно є необхідність розвитку методів вимірювального контролю вологості твердих гетерогенних речовин та створення на їх основі засобів автоматизованого контролю вологості в процесі виробництва.

Аналіз шляхів вирішення задачі

За дисперсністю водяної фази вершкове масло поділяють на п'ять класів [1]:

1 клас — діаметр крапель вологи менше 10 мкм;

2 клас — не більше 20 мкм;

3 клас — не більше 30 мкм;

4—5 класи — волога у більшій або меншій мірі знаходиться у вигляді неперервної водяної фази.

Відомо багато методів вимірювання вологості. Всі вони поділяються на прямі, коли інформаційний параметр вимірюється безпосередньо, та непрямі, коли вимірюють зміну фізичних величин або властивостей об'єкта контролю, функціонально пов'язаних з вологістю матеріалу [3].

При використанні прямих методів безпосередньо вимірюваними величинами є геометричні розміри найбільших крапель вологи, за результатами вимірювань яких визначають ступінь дисперсності води в речовині [1]. Такі методи вимірювання мають високу точність, проте вимагають тривалого часу вимірювання і достатньо складних технічних засобів, що унеможлиблює створення на їх основі автоматизованих систем контролю якості вихідного продукту [1, 2].

Друга група — непрямі методи вимірювання вологості — об'єднує цілий ряд різноманітних методів та засобів, 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 [1—3] є істотні відмінності. У зв'язку з цим, а також з огляду на те, що мова йде лише про методи вимірювання вологості твердих гетерогенних діелектриків, пропонується до непрямих методів віднести методи, перераховані нижче.

Найпоширенішими 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, отже, створити системи автоматичного управління за вологістю для великої кількості технологічних процесів. Електричні методи вимірювання вологості поділяють на кондуктометричні, діелькометричні та надвисокочастотні (НВЧ). Як самостійний серед них, можна виділити також ємнісний метод [3, 4].

Значного розповсюдження набули також радіаційні (радіометричні) методи, найпоширенішими серед яких є методи ядерного магнітного резонансу (ЯМР), рентгенівський та нейтронний [5]. Слід відзначити, 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 [6]. Та, оскільки перераховані властивості суттєво залежать від гранулометричного складу досліджуваної речовини, то в більшості випадків необхідне градування вологоміра для конкретного матеріалу. Це 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.

Перелічені вище непрямі методи вимірювання вологості та їх класифікацію наведено на рис. 2.

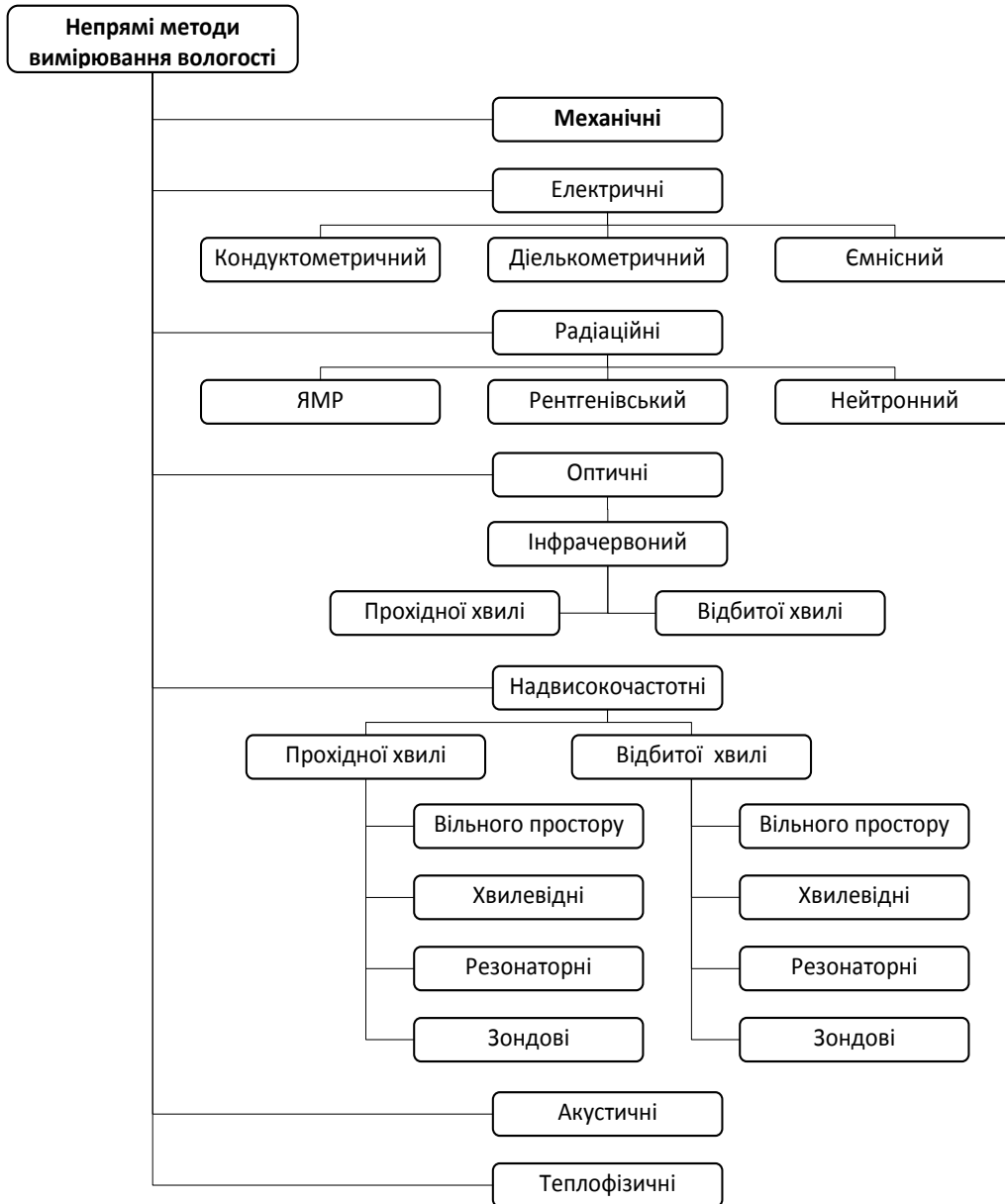


Рис. 2. Класифікація непрямих методів неруйнівного контролю вологості матеріалів

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

В кондуктометричному методі [7] 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 елек-

тричного 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 ступеня дисперсності водяної фази, то даний метод не дає можливості забезпечити високу точність отриманих результатів. До того ж для твердих гетерогенних діелектриків, що містять вологу у вигляді окремих крапель кондуктометричний метод обмежений у використанні лише четвертим та п'ятим класом вологовмісту, а, отже, є непридатним для створення на його основі високоточної системи автоматичного керування технологічним процесом.

Патентний пошук та аналіз літературних джерел [8] показав, що досить поширеним є діелькометричний метод, заснований на використанні залежності деяких діелектричних характеристик матеріалів від його вологості. Суть методу полягає у вимірюванні діелектричної проникності і тангенса кута діелектричних втрат в широкому діапазоні частот — від звукових до НВЧ [1].

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. Через те, що велика кількість гетерогенних речовин у сухому вигляді має 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 досліджуваною речовиною. Саме тому у літературі нерідко називають цей метод ємнісним [8].

Перевагами діелькометричного (ємнісного) методу є: невелика чутливість до щільності та температури матеріалу, висока швидкість, точність (похибка біля 0,5 %) та широкий діапазон вимірювання [5]. Проте, використовуючи цей метод для автоматизованого контролю вологості вершкового масла, виникає ціла низка проблем. Зокрема, у якості рівняння перетворення у вологомірах такого типу модель вершкового масла представляють як «вологу у жирі», для якої діелектрична проникність в загальному вигляді з урахуванням об'ємного вмісту дисперсної фази та розміру частинок для гетерогенних дисперсних діелектриків описується рівнянням [1].

$$E = E_0 \left(1 + 3f \left[\frac{E - E_0}{E + 2E_0} + \frac{3}{5} \frac{E_0 E a^2}{(E + 2E_0)^2} X^2 \right] \right), \quad (1)$$

де E_0 — діелектрична проникність середовища; E — діелектрична проникність дисперсної фази; f — відносний об'єм дисперсної фази.

$$X = \frac{1}{\delta}, \quad (2)$$

де δ — дебаївський радіус іонної атмосфери, що в даному випадку відповідає товщині іонних шарів на поверхні краплі.

Як видно з (1), (2), аналізуючи вологовміст діелькометричним методом, не враховуються похибки, викликані непостійною діелектричною проникністю навколишнього середовища, можливих відхилень, спричинених спрощенням хімічної моделі вершкового масла, а, головне, вплив триелектродних ефектів, які за умови використання змінної напруги високої частоти (яка найчастіше використовується для цих цілей) значно впливають на результат вимірювання (рис. 3) [1].

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 [9].

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 [10]. 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 [9]. 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 послабленням) [11]. 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 найхарактерніші ознаки цього методу [8]. 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 контрольованого матеріалу. Похибки визначаються відмінністю поверхневої вологи від середньої, а також ступенем неоднорідності поверхневого шару.

Найпоширенішою модифікацією НВЧ методів є вимірювання вологості у вільному просторі. Це пояснюється простотою методу, нескладною методикою вимірювання, відсутністю безпосереднього контакту з об'єктом, 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 підходу реалізуються три схеми вимірювання вологості — за значенням поглинання енергії НВЧ-поля, значенням фазового зсуву коливань НВЧ і за параметрами відбитої хвилі. На практиці найпоширенішою є перша схема. Метод відбиття широко не використовується через низьку точність вимірювань, особливо в діапазоні малих вологостей.

Встановлено, 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 послаблення та фази [5, 6].

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 [6, 9]. 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 [11].

За допомогою хвилеводних 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 в міліметровому діапазоні хвиль в околі близько $3 \cdot 10^{-5} \%$ [6]. Інформативним параметром є ослаблення чи фазовий зсув прохідної чи відбитої хвилі. Обмеженість застосування хвилеводних 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

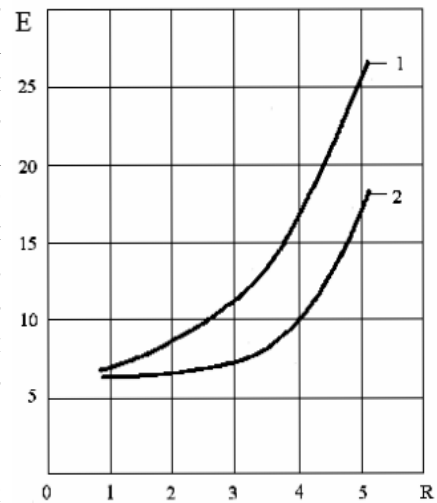


Рис. 3. Криві залежності діелектричної проникності проби від радіусу вкрапель води:
1 — при частоті сигналу 1 МГц;
2 — при частоті сигналу 30 МГц

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 [6, 8, 9] 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 сипких 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°C еквівалентна зміні вмісту води на 0,002 % [3].

Характерними особливостями ІЧ-методів є висока вибірковість, чутливість, точність і відтворюваність вимірювань, а також можливість безперервного контролю, безконтактність та експресність контролю [3]. Найбільша точність досягається при вологості відповідає 0...40 %, для цього технологічного процесу. Абсолютна похибка результатів вимірювання вмісту води складає біля 0,05 %. Для створення ІЧ-воломірів найбільш перспективною є ближня ІЧ-область від 0,8 до 6,1 мкм, в якій вода 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 підослідного компонента [6].

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

$$T = \frac{I}{I_0}. \quad (3)$$

Можна замість прозорості реєструвати оптичну густину D , що є логарифмом оберненої прозорості [6]

$$D = \lg\left(\frac{1}{T}\right) = \lg\left(\frac{1}{I/I_0}\right) = \lg I_0 - \lg I. \quad (4)$$

Зв'язок між глибиною і концентрацією компонента визначається законом Бугера–Ламберта–Бера [6]

$$I = I_0 \exp[-kcl], \quad (5)$$

де k — коефіцієнт послаблення, 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 (5) в (4) матиме вигляд [6]

$$D = \lg\left(\frac{I_0}{I}\right) = kcl. \quad (6)$$

Вода в ближній ІЧ-області спектра має декілька ліній поглинання (рис. 4), за інтенсивністю яких можна оцінювати вологість матеріалів [3].

З наведеної вище залежності поглинання ІЧ-хвилі від її довжини для води та основних компонентів, що входять до складу вершкового масла, видно, що хвиля довжиною 6,3 мкм не перекрива-

ється спектрами поглинання жодного з основних компонентів вершкового масла. Отже, якщо контрольований зразок опромінювати ІЧ-променями з такою довжиною хвилі і вимірювати потужність прохідного або відбитого потоку випромінювання, то вона буде змінюватись в залежності від його вологості.

Але при вимірюваннях на одній довжині хвилі виникають похибки, основними джерелами яких, окрім вологості, є розсіювання випромінювання матеріалом, його товщина тощо. Для вилучення таких похибок використовують ще один потік випромінювання з опорною довжиною хвилі, що лежить поза смугою поглинання вологою та компонентів, вміст яких може суттєво змінюватися. Як видно з наведеної вище графічної залежності, найпридатнішою для цього є хвиля з довжиною 4,2 мкм, яка лежить поза зонами поглинання основних компонентів продукту.

Незалежність результатів вимірювання ІЧ-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 [3]. Найпоширеніший — 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]

$$\Delta E = E \left[1 - \left(\frac{A - 1}{A + 1} \right) \right]^2, \quad (7)$$

де ΔE — втрати енергії нейтрона; E — енергія нейтрона до взаємодії; A — масове число елемента, з яким відбулась взаємодія.

Проте, як уже зазначалося, цей метод заборонено використовувати у харчовій та переробній промисловості, тому для розв'язання поставленої задачі інтересу він не становить.

Одним із перспективних методів вимірювання вологості речовин тваринного та рослинного походження є метод ядерного магнітного резонансу (ЯМР) [5]. Сутність методу полягає в тому, що за певних умов в результаті переорієнтації ядерних спінів речовина вибірково на фіксованій частоті поглинає енергію електромагнітного поля. Частота, на якій це відбувається, 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 калібрування 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.

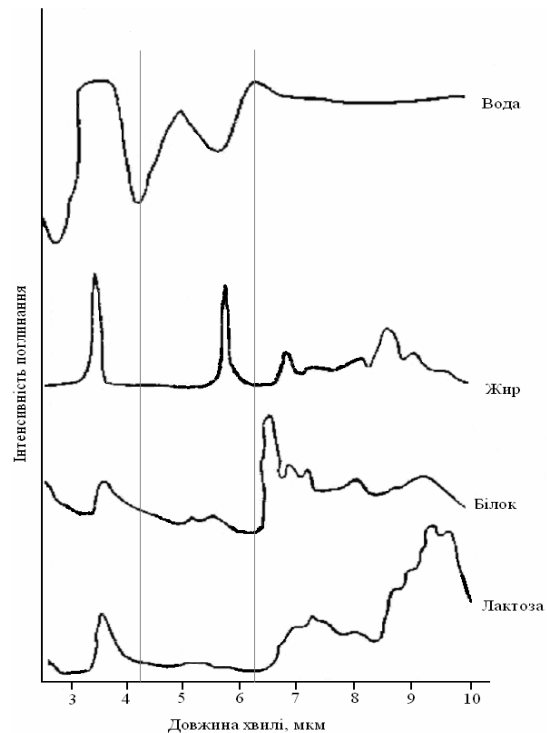


Рис. 4. Залежність інтенсивності поглинання хвилі від частоти для води та основних компонентів вершкового масла

Висновок

З наведеного вище порівняльного аналізу відомих методів контролю вологості твердих гетерогенних матеріалів, а також враховуючи особливості технологічних параметрів їх виробництва, можна зробити висновок, що для вимірювання вологості вершкового масла 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, здійснювати експресний контроль вологості і найголовніше — вимірювати вологість продукту в потоці, тобто, з урахуванням динаміки процесу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бажанов В. А. Зависимость относительной диэлектрической проницаемости сливочного масла от степени дисперсности водной фазы / В. А. Бажанов, Б. В. Корнелюк. — Ярославль, 1970. — 10 с.
2. Вышемирский Ф. А. Производство сливочного масла / Ф. А. Вышемирский. — Москва : Агропромиздат, 1987. — 340 с.
3. Богачук Володимир Васильович. Методи та засоби вимірювального контролю порошкоподібних матеріалів : монографія / В. В. Богачук, Б. І. Мокін. — Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. — 141 с.
4. Берлинер М. А. Измерение влажности. — Изд. 2-е, перераб. и доп. / М. А. Берлинер. — М.: Энергия, 1973. — 420 с.
5. Мухитдинов М. Оптические методы и устройства контроля влажности / М. Мухитдинов, Э. С. Мусаев. — М. : Энергоатомиздат, 1986. — 96 с.
6. 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.
7. Берлинер М. А. Электрические методы и приборы для измерения и регулирования влажности / М. А. Берлинер. — М. : Энергия, 1960. — 68 с.
8. Теория и практика экспресного контроля влажности твердых и жидких материалов / Е. С. Кричевский, В. К. Бензарь, М. В. Венедиктов и др. ; под ред. Е.С. Кричевского. — М. : Энергия, 1980. — 240 с.
9. Исмагуллаев Р. П. Теоретическое и экспериментальное исследование сверхвысокочастотного метода измерения влажности материалов / Р. П. Исмагуллаев, А. Б. Гринвальд. — Ташкент : Фан, 1982. — 83 с.
10. Брандт А. А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах / А. А. Брандт. — М. : Гос. физ.-мат. издат., 1963. — 403 с.
11. Бензарь В. К. Техника СВЧ-влажнометрии / В. К. Бензарь. — Минск, 1974. — 76 с.

Рекомендована кафедрою електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті

Надійшла до редакції 19.06.09
Рекомендована до друку 30.06.09

Кухарчук Василь Васильович — завідувач кафедри, **Говор Ігор Костянтинович** — асистент.

Кафедра теоретичної електротехніки та електричних вимірювань;

Богачук Володимир Васильович — доцент кафедри електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті;

Граняк Валерій Федорович — студент Інституту електроенергетики та електромеханіки.

Вінницький національний технічний університет