

УДК 4882048/25

А.Буняк, канд.техн.наук; Р.Провальний

Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя

АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ПСИХРОМЕТРИЧНИХ МЕТОДІВ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ВОЛОГОСТІ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ

У статті аналізуються можливості використання психрометричних методів для контролю вологості сипких матеріалів, а також пропонується пристрій для його виконання. Ці методи можна впровадити у технологічні процеси харчової промисловості.

Сипкі матеріали останнім часом активно поширюються завдяки зручності їх зберігання, транспортування та переробки. Харчова і переробна промисловість використовує та виробляє широкий спектр таких матеріалів: від сировини, продуктів переробки – до реагентів та хімічних додатків. Як правило, більшість сипких матеріалів мають гігроскопічні властивості, тому контроль їх вологості є важливим і непростим завданням, для розв’язання якого необхідний комплексний науковий метод.

Відомо багато різних методик вимірювання вологості твердих тіл, які можна застосувати і для визначення вологості сипких матеріалів. Розглянемо деякі з них, зокрема їх недоліки та переваги.

Найбільш відомим та поширеним методом вимірювання вологості твердих тіл є ваговий. Він базується на вимірюванні ваги матеріалу до і після висушування. Для цього беруть певний об’єм матеріалу, вологість якого необхідно визначити, зважують, висушують, після цього знову зважують. Різниця ваги матеріалу до і після висушування – це кількість вологи, яка знаходиться у цьому об’ємі [1].

$$W_v = \frac{m_1 - m_2}{V}, \quad (1)$$

де W_v – об’ємна вологість матеріалу;
 m_1 – вага матеріалу до висушування;
 m_2 – вага матеріалу після висушування;
 V – об’єм зразка.

Відносна вологість обчислюється за формулою:

$$\varphi = \frac{m_1 - m_2}{m_2}. \quad (2)$$

Перевагою даного методу є його простота і те, що він не потребує складних пристроїв чи розрахунків.

Основним недоліком цього методу є низька точність вимірювання, оскільки складно визначити закінчення процесу висушування матеріалу. Для точного визначення вологості при великому об’ємі матеріалу необхідно робити серію замірів і опрацьовувати результати статистичними методами. Вимірювання є досить тривалими, і не можуть проводитися неперервно. Тому їх складно повністю автоматизувати чи зробити вимірювання дистанційними.

Окремою групою методів визначення вологості є кондуктометричні методи. Вони базуються на зміні основних електричних властивостей матеріалу (опору, діелектричної та магнітної проникності) при зміні його вологості. Електричних параметри матеріалу сучасна вимірювальна техніка легко вимірює.

Вологість кондуктометричним методом при використанні залежності “вологість-опір” вимірюється так. Більшість сипких матеріалів у сухому вигляді є діелектриками з питомим опором ρ порядку 10^{10} - 10 Ом·м. У результаті їх зволоження електричний опір різко зменшується.

Залежність електричного опору матеріалу від його вологості описується рівнянням [2]:

$$R_x = A/W^n, \quad (3)$$

де R_x – опір сипкого матеріалу;
 A – стала, що залежить від матеріалу;
 W – вологість матеріалу у вагових відсотках;
 n – показник ступеня, що залежить від матеріалу.

Даний метод з урахуванням ступеневої залежності опору матеріалу від вологості має високу чутливість, однак вплив на величину опору різноманітних побічних факторів: температури, структури матеріалу, густини насипки, хімічного складу, непостійності електропровідності самої вологи – роблять цей метод малоприматним для автоматичного вимірювання вологості у реальних умовах виробництва.

Прилади цього типу застосовуються в основному в лабораторіях і базуються на низькочастотному кондуктометричному методі.

Більш розповсюджені високочастотні вологоміри з використанням ємнісних давачів, що базуються на залежності “вологість - діелектрична проникність”, де вищевказані побічні фактори впливають менше.

Більшість сипких матеріалів мають діелектричну проникність $\epsilon=1-6$, тоді як для чистої води вона становить $\epsilon_w=81$. Таким чином, наявність води у сипкому матеріалі значно впливає на середню діелектричну проникність, яку можна визначити за формулою [2]:

$$\epsilon_{cp} = \left(1 + \frac{\epsilon_w - \epsilon}{a\epsilon_w + b\epsilon} \frac{\rho}{\rho_w} \frac{W}{100} \right), \quad (4)$$

де ϵ – відносна діелектрична проникність сухого матеріалу;
 ρ – густина аналізованого матеріалу;
 ϵ_w – відносна діелектрична проникність води;
 ρ_w – густина води;
 W – вологість аналізованого матеріалу;
 a і b – сталі коефіцієнти.

Давачі ємнісних вологомірів виконують у вигляді двох плоских пластин чи двох концентричних циліндрів, простір між якими заповнюється аналізованим матеріалом. Давач, як правило, заповнюється шляхом його засипання при вільному падінні матеріалу з певної висоти. Лише тоді досягається висока точність результатів вимірювання.

З аналізу видно, що ці методи ліпше пристосовані для автоматичних та оперативних вимірювань, використання їх безпосередньо в технологічному процесі пов’язане з багатьма труднощами.

Серед сучасних методів вимірювання вологості більшість базується на властивості вологи у матеріалі поглинати чи відбивати різного роду випромінювання. До них належить метод ядерно-магнітного резонансу, опромінення матеріалу швидкими нейтронами чи надвисокими частотами.

Ці методи дозволяють виконувати високоточні вимірювання вологості на відстані, без зупинки технологічного процесу для взяття проб.

Однак їх складність, висока вартість обладнання, необхідність висококваліфікованого обслуговування перешкоджають їх широкому запровадженню. Тому вони малоприматні для непотужних виробництв, міні-цехів тощо.

Ми запропонували психрометричний метод визначення вологості сипких матеріалів. Цей метод вимірювання вологості повітря добре відомий. Він нескладний і дає досить точні результати. Розглянемо фізичні основи даного методу.

Пристрій, що працює на цьому методі, називають психрометром. Він

складається з двох термометрів: “сухого” та “вологого”. Обидва розміщують недалеко один від одного, причому сухий термометр показує температуру досліджуваного повітря, а мокрий, термобалон якого вкритий вологою тканиною, нижчу температуру внаслідок охолодження його термобалона через випаровування вологи з поверхні вологої тканини. Різниця температур, на основі якої визначають вологість, називають психрометричною різницею.

Кількість води G , що випарується з мокрого термометра, дорівнює [3]:

$$G = \varepsilon F \frac{h''_{nn} - h'_n}{B_0}, \quad (5)$$

де ε – постійний коефіцієнт, що характеризує матеріал, з якого випаровується волога;

F – площа термобалона термометра;

h''_{nn} – парціальний тиск насиченої водяної пари при температурі мокрого термометра;

h'_n – парціальний тиск водяної пари в повітрі при температурі сухого термометра;

B_0 – барометричний тиск.

Кількість тепла Q_1 , використаного на випаровування цієї вологи, можна знайти з рівняння:

$$Q_1 = Gr = \varepsilon rF \frac{h''_{nn} - h'_n}{B_0}, \quad (6)$$

де r – приховане тепло пароутворення.

Поряд з цим внаслідок різниці температур повітря та термобалона мокрого термометра останній з повітря отримає таку кількість тепла :

$$Q_2 = \alpha F (t' - t''), \quad (7)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі;

t' і t'' – температура сухого і мокрого термометрів.

З досягненням рівноваги між втратою та припливом тепла буде справедливою така рівність:

$$Q_1 = Q_2, \quad (8)$$

або

$$\varepsilon rF \frac{h''_{nn} - h'_n}{B_0} = \alpha F (t' - t''), \quad (9)$$

звідси

$$h'_n = h''_{nn} - \frac{\alpha}{\varepsilon r} B_0 (t' - t''). \quad (10)$$

Величини α , ε і r при психрометричних вимірах практично постійні, тому рівняння виглядає так:

$$h'_n = h''_{nn} - CB_0 (t' - t''), \quad (11)$$

де C – психрометричний коефіцієнт, що дорівнює $\frac{\alpha}{\varepsilon r}$.

Тоді відносна вологість φ , що показує рівень насичення водяними парами, дорівнює [3]:

$$\varphi = \frac{h'_n}{h''_{nn}} = \frac{h''_{nn} - CB_0 (t' - t'')}{h''_{nn}}, \quad (12)$$

де h''_{nn} – парціальний тиск насиченої водяної пари при температурі сухого

термометра. Його значення залежить від температури і відображене в таблицях. Психрометричний коефіцієнт C залежить від параметрів обтікання термобалонів психрометра.

Більш досконалим приладом є психрометр з штучною циркуляцією повітря. При цьому термобалони сухого та мокрого термометрів вміщені у трубках, через які з допомогою вентилятора видувається повітря із сталою швидкістю.

Крім цього, на даному принципі збудовано електронний психрометр, давач якого складається з двох (сухого та мокрого) термометрів опору, а шкала проградуєвана в одиницях відносної вологості. Похибка вимірювання приблизно 3%. Перевагою даного пристрою є можливість виконання дистанційних вимірювань[4].

До недоліків даного методу належать вплив факторів зовнішнього середовища, необхідність довідкових табличних даних для визначення вологості.

Відомо, що волога може знаходитися у сипкому матеріалі в трьох видах: в середині часток, з яких складається матеріал, на їх поверхні та в порожнинах між ними. Розподіл вмісту води визначається типом матеріалу та деяких зовнішніх факторів (тиску, температури, вологості навколишнього повітря).

Тому використання психрометричного методу можливе у двох напрямках: для вимірювання вологості повітря, у сипкому матеріалі та використання тонкого шару матеріалу замість вологої тканини. Розглянемо детально кожен метод.

Якщо сипкий матеріал має незначні гігроскопічні властивості, тобто волога не зв'язується в його частках хімічно, то основна частина води міститиметься відповідно в повітрі, що заповнює порожнини сипкого матеріалу, а загальна вологість матеріалу буде функцією від вологості повітря.

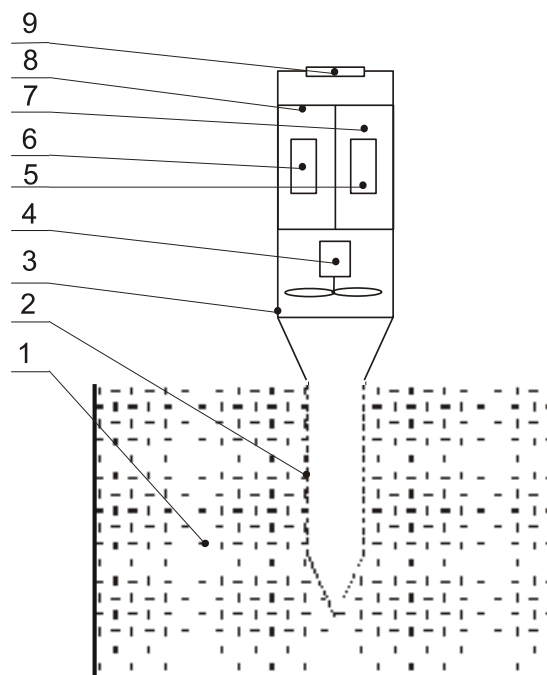


Рис.1. Психрометричний вологомір з штучною циркуляцією:
1-сипкий матеріал; 2-забірник повітря; 3-вологомір; 4-вентилятор; 5-сухий термометр;
6-вологий термометр; 7,8-трубки; 9-клапан.

Вологомір 3 (див. рис. 1) складається із забірника повітря 2, що бере проби повітря з сипкого матеріалу 1 за допомогою вентилятора 4. Далі повітря пропускається крізь трубки 7 та 8, у яких розміщені відповідно “сухий” 5 і “вологий” 6 термометри. На виході повітря розміщений автоматичний клапан 9, призначений для підтримання сталої тиску в зоні термометрів, що дозволить отримати такі умови вимірювань:

$$\frac{h''_{nn}}{h'_{nn}} = const, \quad (13)$$

$$\frac{CB_0}{h'_{nn}} = const.$$

Замінивши їх на коефіцієнти a і b , отримаємо формулу:

$$\varphi = a - b(t' - t''), \quad (14)$$

тобто вологість виглядатиме, як лінійна залежність від психрометричної різниці температур (рис. 2).

Перевагами цього методу є його простота, можливість автоматизації, відсутність сторонніх впливів на процес вимірювання.

До недоліків даного методу належать неможливість неперервних вимірювань, неточність для певних видів матеріалів, а також те, що вимірюється не безпосередня вологість матеріалу, а повітря в пустотах.



Рис. 2. Графік залежності вологості від психрометричної різниці температур.

На базі фізичних основ психрометричного вимірювання вологості ми запропонували ще один метод вимірювання вологості сипкого матеріалу.

Як уже вказувалося, коефіцієнт ε – характеризує матеріал, з якого випаровується волога. На основі цього можна запропонувати гіпотезу, що він може досить точно і комплексно характеризувати вологість матеріалу, оскільки характеризує її випаровуваність при сталих параметрах навколишнього середовища. Знання даного параметра дозволяє вибирати оптимальний режим сушіння чи зберігання сипких матеріалів.

Для знаходження величини ε пропонуємо використати три значення температури (сухого, мокрого та контрольного термометрів). На давач контрольного термометра наспається тонкий шар досліджуваного матеріалу. Відомо, що з поверхні контрольного термометра випарується певна кількість води[3]:

$$G_k = \varepsilon_k F \frac{h''_{nn} - h'_{nn}}{B_0}, \quad (15)$$

або

$$G_k = \varepsilon_k F \frac{h''_{nn} - \left(h''_{nn} - \frac{\alpha}{\varepsilon r} B_0 (t' - t'') \right)}{B_0}. \quad (16)$$

Після розкриття дужок і скорочення отримаємо:

$$G_k = \varepsilon_k F \frac{\alpha}{\varepsilon r} (t' - t''). \quad (17)$$

Для випаровування цієї води необхідно така кількість тепла:

$$Q_{k1} = Gr = r\varepsilon_k F \frac{\alpha}{\varepsilon} (t' - t''). \quad (18)$$

Одночасно до контрольного термометра з повітря надійде така кількість тепла:

$$Q_{k2} = \alpha_k F (t' - t'''), \quad (19)$$

де t''' - температура контрольного термометра.

При досягненні рівноваги між припливом і втратою тепла буде справедливим:

$$Q_{k1} = Q_{k2}, \quad (20)$$

$$\varepsilon_k F \frac{\alpha}{\varepsilon} (t' - t'') = \alpha_k F (t' - t'''), \quad (21)$$

звідси:

$$\varepsilon_k = \frac{(t' - t''')}{(t' - t'')} \frac{\alpha_k \varepsilon}{\alpha}. \quad (22)$$

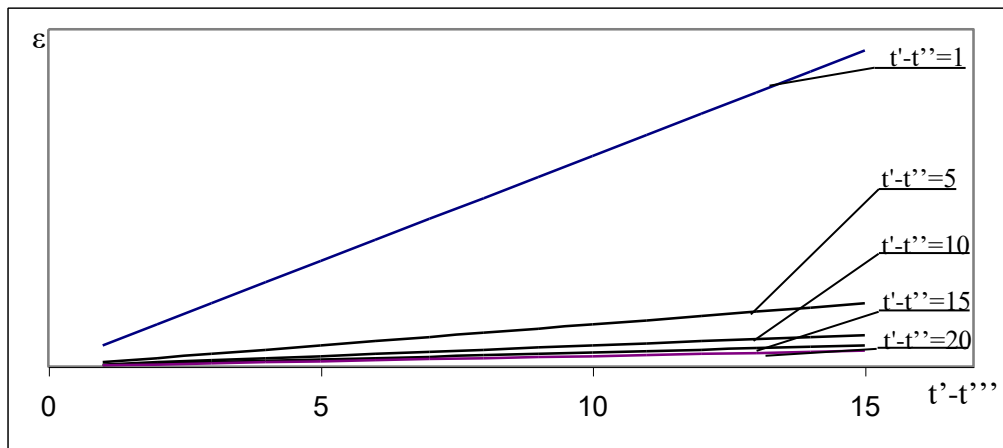


Рис. 3. Графік залежності коефіцієнта ε .

Даний вид вимірювання при підтвердженні гіпотези про зв'язок даного коефіцієнта з вологістю досить простий, на нього, як видно з формули 22, не впливають фактори навколишнього середовища. З графіка залежності коефіцієнта від різниці температур (рис.3) бачимо, що залежність описується сімейством прямих ліній.

Використання електронних термометрів дозволяє автоматизувати вимірювання, а використання обчислювальної техніки для розрахунків робить його перспективним для вивчення та впровадження подалі.

Висновок

1. Отже, на основі аналізу можна підтвердити можливість та доцільність використання психрометричних методів та пристроїв, побудованих на їх основі, для вимірювання вологості сипких матеріалів. Залежності між величинами, що вимірюються (температура), та результатами вимірів лінійно залежні (мал.2,3), тобто є простими та точними, легко автоматизуються. Хоч вони й не дають можливості прямого визначення вологості сипкого матеріалу, величини, отримані в результаті вимірів, мають достатньо інформації для її визначення.

2. Для дальшого знаходження вологості сипкого матеріалу пропонуємо використовувати сучасну обчислювальну техніку, використання якої дозволить перейти від визначення вологості методами номограм, таблиць та розрахунків з коефіцієнтами для нормальних умов до вимірювання вологості на базі багатопараметричних математичних моделей, що враховуватимуть більшість факторів,

які впливають на визначення вологості. У пам'яті ЕОМ можуть зберігатися значення коефіцієнтів для різних матеріалів та умов вимірювання, а швидкодія дозволяє виконувати значні обсяги розрахунків для високоточного визначення вологості у режимі реального часу, які при ручному методі вимагали значних затрат часу та висококваліфікованих людських ресурсів.

The analysis of the possibility of psychrometric methods application for bulk materials humidity control is described in present article. Also device for this method realisation is proposed. Those methods can be implemented for products quality control in food processing industry.

Література

1. Электрические измерения электрических и неэлектрических величин/ Под ред. Е.С. Полищука. -К. : Вища школа, 1984. –359 с.
2. Жуков Ю.П., Кулаков М.В. Высокочастотная безэлектродная кондуктометрия. –М. : Энергия, 1968. – 112 с.
3. Мурин Г.А. Теплотехнические измерения. –М. :Госэнергоиздат, 1978. –570 с.
4. Туричин А.М., Новицкий П.В. и др. Электрические измерения неэлектрических величин /Под ред. П.В.Новицкого. –Л. Энергия, 1975. –576 с.

Одержано 06.12.2000 р.