

І.Г.Грушка

МЕТОДИ І ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ МАТЕРІАЛІВ ТА СЕРЕДОВИЩ

Розглянуто методи і засоби вимірювання вологості матеріалів та деяких середовищ за джерелами науково-технічної літератури, наслідками патентних досліджень та пошуку в мережі Інтернет. За аналізом підходів щодо розробки вологомірів визначені найбільш перспективні з них, що можуть представляти інтерес для агрометеорології.

Аналіз патентної, науково-технічної літератури та інформації, представленої у мережі Інтернет, надає підстави стверджувати, що за останнє десятиріччя створено велику кількість технічних засобів вимірювання вологості різних матеріалів і середовищ, які відрізняються способом функціонування, ступенем експресності, впливом на вологоємкий матеріал, функціональною залежністю інформативного параметра від вологості, технічними рішеннями, способами відображення інформації та ін.

В останній час розробники вологомірів зробили вирішальний крок у напрямку мінітюаризації вимірювальних пристроїв і датчиків. У деревообробній промисловості та в галузі зберігання зерна навіть виникла серйозна конкуренція між виробниками вологомірів. Проте на фоні такого розмаїття технічних засобів вимірювання вологості деревини, кофе, зерна та інших матеріалів, прилади і методи вологометрії ґрунту практично слабо представлені на ринку вологомірів. Проблеми експрес-вимірювання вологості ґрунту практично залишились невирішеними, як і 20-30 років тому.

Короткий огляд інформації, представленої патентною службою і мережею Інтернет, ще не дає повного уявлення про перспективність тієї чи іншої розробки. Необхідні детальні дослідження залежності вологості матеріалів і середовищ від режимів і способів вимірювання, їх фізико-хімічного складу, щільності, температури та інших параметрів. Однак на основі цього огляду уже зараз можна передбачити перспективи і шляхи

розвитку вологометрії матеріалів і ґрунту, зокрема, на наступне десятиліття.

Методи і засоби вимірювання різноманітних матеріалів і середовищ за принципами дії умовно можна розділити на такі: гравіметричні, хімічні, кондуктометричні (омічні), діелькометричні (надвисокочастотні), оптичні, гамаскопічні, нейтронні, ядерного магнітного резонансу (ЯМР) та інші.

Гравіметричні методи і пристрої

Для визначення вологості різних матеріалів досить давно і широко застосовують так званий термогравіметричний метод. Він відноситься до прямих методів і має поширену в агрометеорології назву термостатно-вагового (ТВ) методу. Цей метод полягає в тому, що для визначення вологості ґрунту або іншого матеріалу попередньо відбирають невеликий зразок і зважують його. Потім за допомогою повітряного чи теплового сушіння видаляють вологу, знову зважують зразок після сушіння і за різницею маси вологого і сухого зразка визначають вологість матеріалу. На мережі агро- і гідрометеорологічних станцій цей метод і досі залишається основним.

Для відбору проб матеріалу в різних галузях матеріального виробництва використовують різноманітні пробовідбірники. На гідрометеорологічній мережі для відбору ґрунтових проб використовують ручний бур АМ-26, рідше бур АМ-16, інколи – бур Скіпського. Бури АМ-26 і АМ-16 різняться тільки тим, що АМ-26 має трохи зменшений діаметр бурового циліндра-пробовідбірника, що полегшує ручне буріння ґрунту. За своєю конструкцією бур Скіпського принципово відрізняється від обох попередніх тим, що він дозволяє відбирати проби ґрунту сталого об'єму з непорушеною структурою. Тому при застосуванні бура Скіпського, крім вологості, можна додатково визначати об'ємну масу ґрунту.

Абсолютну вологість у відношенні до маси сухого матеріалу визначають за формулою:

$$W = \frac{M_e - M_c}{M_c - M_t} \cdot 100 \% ; \quad (1)$$

у відношенні до загальної маси зразка за формулою:

$$W = \frac{M_e - M_c}{M_c} \cdot 100 \% , \quad (2)$$

де W – вологість у %; M_v – маса вологого зразка разом із тарою, в яку його помістили; M_c – маса сухого зразка разом із тарою; M_t – маса тари.

Об'ємну масу при використанні бура Скіпського обчислюють за формулою:

$$Vm = \frac{M_c - M_t}{V} \text{ г/см}^3, \quad (3)$$

де Vm – об'ємна маса ґрунту, г/см³; V – об'єм пробовідбірної циліндра бура Скіпського.

При коректному виконанні операцій відбору, зважування і висушування ТВ-метод дозволяє з досить високою точністю визначати вологість зразка. Тому термогравіметричний метод найчастіше використовують для градування вологомірів. Однак, коли вологоміром вимірюють вологість у більшому об'ємі матеріалу, ніж узятий зразок для визначення вологості ТВ-методом, то можуть виникнути суттєві розбіжності за різницею обсягів. Цього можна уникнути тільки за рахунок збільшення числа проб матеріалу при використанні ТВ-методу.

Поряд із цим ТВ-метод має також інші недоліки. До них належать:

- Значна тривалість процесів відбору ґрунтових проб, зважування їх, сушіння в термостатах і т.д., спричиняють запізнювання інформації про вологість ґрунту на 1-2 доби. Це для прийняття оперативних господарських рішень украй небажано, бо при рясних опадах чи суховіях вологість ґрунту за цей час може кардинально змінитися.
- Велика трудоемність методу (відбір проб, транспортування їх у лабораторію, зважування і громіздкі обчислення).
- Істотна вартість обладнання обумовлює високу собівартість одержання необхідної інформації про вологість матеріалів.
- Мала інформативність проби (менш 0,01% від маси зерна і ґрунту).

Щоправда, тривалість сушіння зараз удається скоротити майже в 100 разів із застосуванням вологоміру МТ-250 або аналізатора вологості ЕЛВИЗ-2 (рис. 1.1). Перший застосовують до текстильних матеріалів у лабораторних і цехових умовах, другий – для експрес-вимірювання вологості твердих монолітних, сипучих, волокнистих, пастоподібних, водяних суспензій і рідин у лабораторних умовах. Однак і в цих умовах придатність їх для визначення вологості ґрунту треба поставити під сумнів. За допомогою цих приладів можливе визначення вологості тільки в одній пробі, у той час, коли тільки на одному окремо взятому полі під час гідрометеорологічних спостережень відбирають 44, інколи 64 проби.



1.1. Аналізатор вологості ЕЛВИЗ-2



1.2. Вологомір ґрунтових зразків типу ЕВК



1.3. Вологомір зерна РМ-400 фірми "Kett" (Японія)



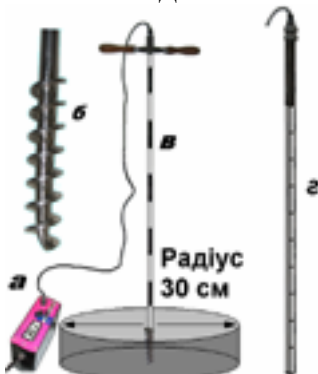
1.4. Вимірювач вологості деревини КЕДР-2



1.5. Датчик вологості ґрунту корпорації Sutron (США)



1.6. Вологомір ґрунту "Агротестер"



1.7. Вимірювач параметрів ґрунтів ВПГ-4ц.



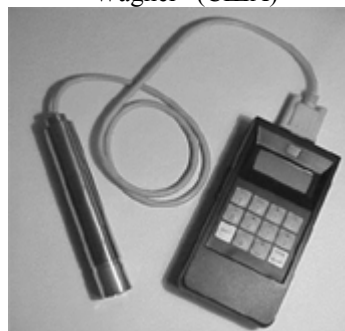
1.8. Контактні вологоміри фірми "Wagner" (США)



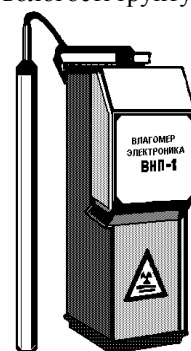
1.9. Радіолокатор для визначення вологості ґрунту



1.10. Фотооптичний вологомір ґрунту



1.11. Переносний ІЧ-вологомір IRMM-106



1.12. Нейтронний вологомір ґрунту ВНП-1

Рис. 1. Зовнішній вигляд приладів вимірювання вологості матеріалів і середовищ

Тому не випадково, що для вимірювання вологості ґрунту, особливо деревини, зерна, інших продуктів і виробів, в останні роки почали широко застосовувати інші опосередковані експрес-методи і технічні засоби вимірювання (рис. 1).

Хімічні методи і пристрої

Типовим представником хімічних методів є вологомір ґрунтових зразків типу ЕВК, в якому для екстракції води застосовано карбід кальцію.

Цей вологомір (рис. 1.2) є індикатором і призначений для визначення вмісту води в зразку ґрунту, вийнятому ґрунтовим буром із різної глибини до 1,5 м.

Вологомір складається з камери тиску; посудини з прокладкою, що закріплюються гвинтом, і манометра, змонтованого в корпусі вологоміра. Шкала манометра є шкалою приладу.

Недоліки хімічних методів і засобів такі:

- низька точність вимірювання вологості ґрунту;
- необхідність застосування спеціальних бурів для відбору зразків ґрунту;
- неоперативність та непридатність для масового використання в агрометеорології.

Кондуктометричні методи і прилади

Матеріали, що містять у собі вологу (сировина, продукти, середовище), можна розглядати як трифазну суміш: суха речовина – вода – повітря. Більшість матеріалів і середовищ в абсолютно сухому стані можна віднести до діелектриків, магнітна проникність яких наближена до нуля.

Припускаючи, що діелектрик є однорідним і ізотропним, його властивості в електромагнітному полі можна описати комплексною діелектричною проникністю і тангенсом кута діелектричних утрат [1, 13, 14].

Однак треба застерегти, що це дещо спрощене уявлення. Складність проблеми пов'язана ще з тією обставиною, що вода у твердих, аморфних і сипучих матеріалах знаходиться в різних формах (вільній рідинній, зв'язаній у молекулах матеріалів і у вигляді пари). При низькому вмісті води вода в трифазній суміші утримується на поверхні молекул,

частинок або капілярів і утворює мономолекулярний шар, зв'язаний із сухим матеріалом. Через обмеженість руху диполів молекул води їх вплив на діелектричну проникність і втрати в суміші невеликі. При збільшенні вмісту вологи в суміші зв'язок води із сухою речовиною слабшає. Вода в цьому випадку все більше заповнює простір між частинками матеріалу, і її вплив на діелектричні властивості матеріалу росте. Під час вимірювання вологості будь-яким способом необхідно або стабілізувати щільність матеріалу, або визначити її величину іншим незалежним засобом і враховувати при вимірюванні вологості. Це стосується і інших фізичних параметрів: температури, фізико-хімічного і гранулометричного складу тощо.

Потрібно відзначити, що на ринку вологомірів прилади, засновані на кондуктометричному методі вимірювання представлені дуже широко. Тут найбільше вологомірів насіння зернових і зернобобових культур (пшениця, ячмінь, гречка, ріпак, соняшник, кукурудза, боби, рис, овес, жито, сорго, горох, соєві боби, насіння льону, гірчиця, нут). Це ИВС-1, ИВС-1-1, ИВС-2 науково-виробничого підприємства "Укрекспо-Процес", РМ-600 (модель РМ-6040) виробництва компанії КЕТТ, ЕВЛАС-5, Волна – 5С, ВИМС-1, РМ-400 японської фірми "Kett", цифровий вологомір WILE - 55, вологомір для зерна і сіна WILE-35 та інші.

Кожний із названих приладів відрізняється своїм технічним рішенням і способом вимірювання. Більшість із них складається з двох частин: посудини-датчика і вимірювального пристрою (з цифровим рідиннокристалічним індикатором або із звичайним мікроамперметром). Цікаве рішення знайшла японська фірма "Kett", розмістивши датчик і вимірювальний пристрій у спільному корпусі (рис. 1.3). Вимірювальний пристрій цього приладу оснащений цифровим рідиннокристалічним індикатором. Фірму "Kett" стали наслідувати інші фірми і тепер уже є мініатюрні вологоміри зерна (ЦВЗ-3А, ряд вологомірів "Фауна" фірми "Лепта", кілька модифікацій ST2500, вологоміри фірми GLOBAL EDGE, вологоміри TFU 001, SE 100, РМ1, ММС, вологоміри фірми Merlin та інші)

Друга велика група приладів – вологоміри деревини і пиломатеріалів. Це КЕДР-2 Чернівецького національного університету (рис. 1.4), вологоміри пиломатеріалів УПК-12, УПК-12М, ВЕРБ-1, ВЕРБ-1-1, ВЕРБ-1-2, ВЕРБ-1-3, ВЕРБ-1-4 Харківського державного технічного університету радіоелектроніки тощо.

Існують також цифрові вологоміри WILE-25 (для сіна і силосу), WILE-25t (для тютюну), WILE-55S (для олійних культур) і ряд інших.

Зауважимо, що ринок цього класу приладів у мережі Інтернет не представлений жодним ґрунтовим вологоміром, окрім стаціонарного датчика вологості ґрунту корпорації Sutron (США), який показано на рис. 1.5. Конструктивно цей датчик виконано таким чином, що основна стінка циліндра є напівпроникною (пропускає тільки воду), а в середині циліндра знаходяться два ізольовані електричні контакти і речовина, що всмоктує вологу з ґрунту. Коли внутрішня всмоктувальна сила датчика більша, ніж у ґрунті, він утягує воду, і навпаки, віддає, коли смоктальна сила ґрунту більша. Діапазон осмотичних сил знаходиться в межах від 10 до 200 сантибар, а вимірний електричний опір – у межах від 500 до 30000 Ом. Датчик сертифіковано Міжнародною організацією по стандартизації.

Недоліками такого типу датчиків є велика енергійність і неможливість використання їх на полях, які в даний момент обробляються. Окрім того, датчик – сорбційний (усмоктуючий), а це означає, що сорбційна здатність його з часом може змінюватись, а з нею і його градувальні параметри. Адже ґрунт – це не інертне, а активне середовище. Активність, а подекуди і агресивний характер його може призвести до того, що внутрішній наповнювач датчика почне хімічно взаємодіяти з ґрунтом, а це може призвести до змін його електричних градувальних параметрів.

Разом із тим, виникають певні проблеми, зумовлені конструкцією датчика і пов'язані з його установленням на окремих полях. Воно здійснюється ручним способом шляхом викопування лопатою шурфів і встановлення датчиків на глибинах 10, 20, 30, ... 100, ... 150 см. Така ж методика установки датчиків Даніліна, де використано оголені вугільні електроди.

Відомі прилади “Агротестер” [2] (рис. 1.5) та ВПГ-4ц [4] (рис. 1.7) ще не зайняли певної позиції на ринку кондуктометричних вологомірів.

В основу ВПГ-4ц покладено новий спосіб вимірювання вологості матеріалів, розроблений співробітниками УкрНДГМІ в 2000-2001рр. Особливість цього методу в тому, що він більш чутливий до ємнісної складової комплексної електропровідності ґрунту, ніж усі відомі досі. Усі досліджувані нами досі методи вимірювання комплексної електропровідності мали співвідношення активної і ємнісної складової як,

1:20. Новий метод вимірює названі складові у співвідношенні, приблизно, 1:1. Це забезпечує переваги нового методу перед відомими, бо, як доведено більшістю досліджень, саме активна складова є причиною виникнення низки помилок при вимірюванні вологості ґрунту, пов'язаних із нестабільністю, щільністю та механіко-хімічним складом ґрунтів. Пріоритет на цей спосіб підтверджено заявкою на винахід [8]. Конструктивні і технічні дані ВПГ-4ц описані в [4].

Переносні датчики ВПГ-4ц захищені патентами України [10, 12]. Пріоритет на винахід стаціонарного датчика вологості ґрунту приладу ВПГ-4ц (рис. 1.72) підтверджено міжнародною заявкою [7]. За результатами державної метрологічної атестації (протокол № 36-2/182 від 04.03.2004р.) прилад ВПГ-4ц визнано придатним для вимірювання вологості і температури ґрунту.

Необхідно прийняти до уваги, що при конструюванні вологомірів доводиться часто вирішувати ряд додаткових питань, без врахування яких не може бути впроваджена будь-яка якісна розробка. До таких проблем можна віднести опрацювання методики градування приладу на різних типах ґрунтів, способу врахування їх щільності, температури, фізико-хімічного складу тощо.

В основу критеріїв вибору методу, придатного для вимірювання вологості ґрунту, можна покласти положення, зафіксовані в роботах [5, 15], (див. також [3, 16]).

Діелькометричні (надвисокочастотні) вологоміри

Методи вимірювання вологості матеріалів у потоці або на конвеєрі повинні характеризуватися швидкодією, безконтактністю та іншими властивостями, які не властиві одноразовим та вибірковим вимірюванням. До таких перспективних, із цієї точки зору, підходять ємнісні, надвисокочастотні (НВЧ) та Іч-методи.

Від кількості води у зразку залежить або згасання прихідної хвилі, або фаза НВЧ. Від кількості зв'язаної води залежить час дипольної релаксації. Тому апаратура НВЧ повинна мати можливість вимірювати величину діелектричної проникності в такому діапазоні частот, де ці величини мають великі значення. Методи НВЧ діляться на такі, що засновані на відбиванні радіохвиль (резонаторні) і на пропусканні їх.

Максимум діелектричних утрат для вільної води буває на частоті 20 ГГц. Однак, якщо треба проводити вимірювання в зразках великої

товщини з необхідністю глибокого проникнення радіохвиль у речовину, то використовують більш низькі частоти, аж до 1 ГГц. Резонаторні методи більш ефективні для зразків, які мають форму півки. Діелектричні втрати легше визначити методом, заснованим на відбитті радіохвиль. Але ці методи взагалі важче застосовувати для об'ємно протяжних матеріалів. Швидкість розповсюдження хвилі НВЧ краще всього визначити шляхом вимірювання фазових зсувів. Метод вимірювання фази НВЧ має ряд переваг перед методом вимірювання згасання, оскільки він менше піддається збурюючим факторам. Існує думка, що на нього менше впливає вміст додаткових хімічних речовин, що містяться в матеріалі, і, зокрема, солей.

Ринок вологомірів, заснованих на застосуванні НВЧ, найкраще репрезентує фірма WAGNER (рис. 1.8), яка випускає цілий ряд приладів, здебільшого для вимірювання вологості деревини в меблевій промисловості. Це і малогабаритний сканер L609, кишеньковий вологомір L606 (так званий “Інспектор” L610), штабельний вимірювач вологості L712, вологоміри для виробників та монтажників меблів: ММС 210 і 220.

Серед інших приладів можна назвати вимірювач вологості деревини S200, універсальний вимірювач вологості будматеріалів МГ4 (МГ-4Б), вимірювачі вологості нафтопродуктів ИВН-93 і ИВН-95, вимірювач вологості деревини МГ4Д, вимірювач відносної вологості в газоподібних і сипучих середовищах ИВЦ-01, вимірювач вологості пиломатеріалів ИВПМ-02. В більшості цих приладів використано мікропроцесор для оперативного одержання даних про вологість речовин.

Фірма “Мікрорадар”, яка ввібрала розробки Білоруського державного аграрного технічного університету, зараз пропонує цілий комплекс приладів від портативних переносних приладів для вимірювання вологості деревини в лісопильній і меблевій промисловості та стаціонарних пристроїв для визначення вологості різних матеріалів у потоковому виробництві. Фірма пропонує переносні мікрохвильові вологоміри деревини СОМРАСТ, LG6NG, ИВПМ-02, SH-0453, ИВД-1, потоковий вологомір МІКРОРАДАР-113, призначений для вимірювання вологості зерна безпосередньо в самотіках.

У мережі Інтернеті з'явилась інформація про макет, що має назву “Радіолокатор для визначення вологості ґрунту” (рис. 1.9). Він суміщує в спільному корпусі вимірювач і датчик. Передавач вологоміра працює на

частотах: 200, 400, 600, 800 і 1000 МГц. Вимірювання виконуються з поверхні ґрунту за допомогою двох невеликих (7,5 см) торчаків-антен. Недоліком такого типу приладів є те, що ними можна визначити вологість лише у верхньому шарі ґрунту на глибину до 10 см. Такий же недолік мають і аерокосмічні прилади.

Оптичні прилади

В оптичних приладах може використовуватися видимий спектр випромінювання, якщо речовина змінює своє забарвлення і коефіцієнт відбиття, функціонально залежний від вологості.

Інфрачервоний (ІЧ) спектральний метод вологометрії засновано на тому, що в спектрі з довжиною хвилі 0,8-6,1 мкм вода має ряд досить сильних смуг поглинання різної інтенсивності ($\lambda = 1,94$ мкм і $\lambda = 2,48$ мкм). У порівнянні із надвисокочастотним в ІЧ-методі сильніше проявляється вплив розмірів частинок. ІЧ – цілком поверхневий метод. Властивості поверхні матеріалу при висиханні значно змінюються. Тому результати вимірювань на поверхні відрізняються від глибинних. Окрім того, вони можуть залежати від відстані між вимірювачем і поверхнею. Смуги поглинання, характерні для молекул води, не завжди легко використати, оскільки вони можуть співпадати зі смугами поглинання інших хімічних матеріалів і середовищ. Найбільш часто у ІЧ-вологомірах використовуються смуги поглинання, розташовані поблизу 1,4; 1,9; 2,7 мкм.

Відомі ІЧ-вологоміри найчастіше створюються за двоххвильовою схемою, тобто сигнал, що вимірюється, фіксує різницю інтенсивності випромінювання двох хвиль: еталонної і аналітичної. Виділення їх зі спектру джерела випромінювання може здійснюватися як до його попадання на об'єкт, що контролюється, так і після. Як приклади, можна назвати портативний фотоелектричний вологомір ґрунтових зразків (рис. 1.10), вологомір ВІЛ-1, автоматичні вологоміри Anacon - 106 (Англія), Quadra Beat Model 475 (США) та інфрачервоний вологомір IRMM-106 (рис. 1.11). Висока чутливість та можливість разом з вологою визначати і інші компоненти речовини висувають ІЧ метод у число найбільш перспективних для аналізу якості сільськогосподарських продуктів, оскільки, незважаючи на дорожнечу, складність і окремі недоліки, вологоміри такого типу дозволяють вести безперервний контроль вологості в умовах потоку і можуть успішно застосовуватись в системах

автоматичного контролю і регулювання технологічними процесами. Основний недолік Іч-методу в тому, що вологість вимірюється в поверхневому шарі, коли неоднорідність розподілу вологи по поверхні та в глибині контрольованого матеріалу може бути причиною значних помилок.

Нейтронні вологоміри

Принцип дії цих вологомірів заснований на здатності атомів водню уповільнювати рух швидких нейтронів, переводячи їх у ранг повільних. Типовим представником цих вологомірів є ВНП-1 (рис. 1.12). У склад приладу входить електронний цифровий вимірювальний блок з індикатором на рідинних кристалах і датчик, суміщений в одному корпусі з джерелом швидких нейтронів.

Для проведення вимірювань в заданій точці поля необхідно пробурити свердловину на глибину 1,5 м і вставити в неї стаціонарну обсадну металеву або пластмасову трубу, щоб закріпити стінки свердловини і попередити їх осипання. Внутрішній діаметр труби повинен бути таким, щоб дозволяв легко рухатись в трубі датчику ВНП-1.

Технічні дані ВНП-1 такі: діапазон вимірювання вологості становить 0,05-0,5 г/см³ (або 5-50 %), похибка вимірювання – 0,025 г см³ (або 2,5 %). Загальна маса комплексу без обсадних труб 5 кг.

Задум засновників цього методу був такий: вода складається з двох атомів водню і одного атому кисню; якщо занурити датчик приладу в ґрунт і потім поміряти енергію нейтронів, уповільнених атомами водню, то на базі цих даних можна дуже точно визначити вміст води в ґрунті.

Спочатку при впровадженні цього методу вважалось, що це ідеальний метод, розрахований якраз на такі об'єкти, як ґрунт. Однак, як пізніше з'ясувалось, не було враховано багато супутніх факторів, які вносять суттєві помилки при визначенні вологості ґрунту цим методом.

По-перше, атоми водню входять не тільки до складу води, але й до складу хімічних сполук та органічної частини ґрунту (гумусу, перегнилих і не перегнилих решток рослин, органічних добрив і мікрофлори). Органічна фракція ґрунту може досягати до 20 відсотків від усієї маси ґрунту, що збільшує відносну помилку вимірювання до 100 %.

По-друге, радіус дії нейтронного методу 30 см, тобто ним можна поміряти концентрацію повільних нейтронів у сфері діаметром 60 см. Це означає, що у верхніх шарах ґрунту 0-10 і 0-20 см нейтронним методом

визначати вологість ґрунту не можливо. При зануренні датчика на глибину 10 см прилад ВНП-1 завжди показує нуль, навіть при повному насиченні ґрунту водою, а на глибині 20 см дані вологості ґрунту мають в 1,5-2 рази менші значення в порівнянні з глибиною 30 см. Це явище пов'язане з тим, що на глибинах до 20 см сфера дії нейтронного методу діаметром 60 см уміщує не тільки ґрунт, але й повітря, де концентрація атомів водню в одиниці об'єму значно нижча, ніж у ґрунті. Тому ВНП-1 рекомендують застосовувати, починаючи з глибини 30 см. Це суттєвий недолік даного методу, бо вологість орного шару ґрунту найбільш мінлива, а інформація про неї найбільш необхідна.

По-третє, потреба закладення на полях обсадних труб створює певні незручності для господарників. Такі труби могли б стояти на полях із колосовими культурами і травами в період між останнім обробітком (боронування посівів, підкормкою тощо) і збиранням. Щодо просапних культур, то тут період, коли обсадні труби можуть знаходитись на полі, ще коротший. У той же час термостатно-ваговий метод гідрометеостанції використовують весь вегетаційний період і навіть, частково, зимою.

Ми розглянули тільки три недоліки, характерні для нейтронного методу визначення вологості ґрунту. Окрім того, похибки цього методу, як і будь-якого іншого, пов'язані також із неврахуванням щільності, температури, хіміко-механічного складу ґрунту та інших факторів.

Метод ядерного магнітного резонансу (ЯМР)

Метод ядерного магнітного резонансу (ЯМР) використовують переважно в наукових дослідженнях. ЯМР ефективний при дослідженні твердих і рідких речовин. Його засновано на використанні магнетизму атомних ядер, що дає інформацію про структуру речовин на атомному рівні. Визначається резонанс ядер з магнітним ядерним моментом. Ці ядра можна розглядати як магнітні диполі, які в поляризованому статичному магнітному полі певної напруженості зазнають його впливу. Кожна з орієнтацій відповідає певному енергетичному рівню. Явище ЯМР засновано на поглинанні або випусканні енергії при переходах ядер між різними енергетичними станами. Поглинання енергії максимальне, коли випромінювання ϵ , співпадає з частотою, тобто за умови резонансу:

$$\epsilon = \frac{V}{2\pi} \cdot H_0, \quad (4)$$

де V – гіромагнітне відношення, рівне відношенню магнітного моменту ядра до моменту кількості руху; H_0 – напруженість поляризуючого статичного магнітного поля.

Знімаючи при розгортці H_0 спектр ЯМР, можна визначати, які ядра містяться в зразку. За шириною смуги ЯМР можна вивчати агрегатний стан зразка і розрізняти кількість вільної і зв'язаної води. Оскільки зі зміною вологості в більшості матеріалів відбувається перерозподіл часткового складу вільної і зв'язаної води, то, природно, ЯМР-метод не може бути абсолютним, тобто пристрої ЯМР потребують попереднього градування.

Серед приладів, що випускаються за кордоном, слід відмітити ЯМР-аналізатор РАТ-20 фірми "Varian" (США), ЯМР-аналізатор фірми "Newport Instrument" (Англія), спектрометр Р20 фірми "Brucker" (ФРГ). Серед вітчизняних слід вказати на переносний пристрій ЯРВ-2 (м. Львів, Фізико-механічний інститут НАН України). Він має постійний магніт, малі розміри і вагу 10 кг. Об'єм проби досліджуваного матеріалу $1,5 \text{ см}^3$. Діапазон вимірювання вологості 2-30%, похибка вимірювання 0,5%. Час вимірювань - менше 30 сек. Цей прилад призначено для контролю вологості харчових продуктів у процесах сушіння та інших технологіях.

Із проведеного аналізу існуючих засобів і методів вимірювання вологості матеріалів і середовищ для впровадження в систему спостережень вологості ґрунту на мережі агро- і гідрометеорологічних станцій найбільшу перспективу мають кондуктометричні вологоміри типу ВПІ-4ц і "Агротестер". У зв'язку з цим слід звернути увагу на той факт, що в Японії кондуктометричний вологомір РВ-1К (фірми Kete Electrical Laboratory) прийнято за стандартний вимірювальний засіб. Ще півдесятка фірм Японії серійно випускають вологоміри, засновані на кондуктометричному принципі, що вимірюють вологість рису, кормів, сіна, зерен і насіння [16] із точністю $\pm 0,5 \%$ у діапазоні 10-30 % вологості.

За даними мережі Інтернет в останні роки дуже багато фірм США, Англії, України, Росії, інших країн стали випускати різноманітні портативні прилади для вимірювання вологості деревини, пиломатеріалів, будматеріалів, різних аморфних і сипучих харчових продуктів, засновані на кондуктометричному методі. Причому точність вимірювання їх достатньо висока і не поступається точності вологомірів, заснованих на НВЧ, ІЧ та інших методах.

Кондуктометричний метод має ту перевагу перед всіма іншими методами, що на його основі можна створювати найбільш портативні (навіть мініатюрні) і дешеві прилади.

Аерокосмічні методи і засоби вимірювання вологості та температури ґрунту

Аналіз патентної, науково-технічної літератури та інформації, представленої в мережі Інтернет, присвяченої аерокосмічним методам контролю стану поверхні землі, зокрема, рослинності і ґрунтів дає підстави стверджувати, що при розробці методів такого контролю, наземним методам і засобам контролю приділяється мало уваги. Розроблювані моделі оцінки стану рослин і ґрунту за супутниковими даними, що базуються, переважно, на законах оптики, термодинаміки та інших фізичних засадах, завжди потребуватимуть експериментальної перевірки в наземних умовах. А для цього необхідна надійна наземна мережа контролю стану рослин і ґрунту.

Однак при цьому виникають дуже складні і, тим не менше, важливі проблеми, пов'язані з особливостями аерокосмічних і наземних методів.

Перша особливість. Дуже відрізняються роздільна здатність поверхні ґрунту, коли його сканувати аерокосмічними датчиками і вимірювати наземними засобами. Так, якщо датчики супутників Землі охоплюють площу земної поверхні, що має форму кола діаметром від десятків метрів до кількох кілометрів, то термостатно-ваговий метод може характеризувати грудочку землі діаметром до 3-4 см. У той же час датчики ВПГ-4ц (стаціонарний і переносний) діють у полі, що має форму кола діаметром 60 см і більше. Якщо для космічних датчиків за роздільну здатність прийняти коло діаметром 10 м, то обсяги вибірки щодо вологості поверхні ґрунту для датчиків супутників становитимуть $7,85 \cdot 10^7$ см², для ВПГ-4ц – $2,826 \cdot 10^3$ см², а для ТВ-методу – лише 7,1 см². Тобто вони співвідноситимуться як $1,1 \cdot 10^7 : 4,0 \cdot 10^2 : 1$.

Поки що єдиним ефективним способом врахувати цю особливість залишається збільшення числа повторень на площі вимірювання за допомогою приладу ВПГ-4ц і, особливо, визначень вологості ґрунту ТВ-методом.

З іншого боку, за допомогою аерокосмічних методів не можна одержати розподіл температури і вологості ґрунту на різних глибинах. В

цьому випадку вони поки що не можуть замінити наземні засоби одержання інформації про агрометеорологічні параметри.

Друга особливість. Аерокосмічні дані, зазвичай, не співпадають із наземними в часі і просторі. Траєкторія супутників рідко співпадає з місцем розташування існуючих гідрометеорологічних станцій і постів, які ведуть наземні спостереження за станом атмосфери, рослин і ґрунту. Строки агрометеорологічних спостережень також часто не співпадають із часом проходження штучних супутників над місцем розташування станцій і постів.

Щоб врахувати цю особливість, є два способи.

Перший спосіб. За добре вивчених мікрокліматичних особливостей території, потрібно вводити відповідні поправки на добовий хід агрометеорологічних показників в дані наземних спостережень.

Другий спосіб. По трасі проходження штучного супутника слід заздалегідь розмістити пересувні агрометеорологічні пости з частішими, ніж на гідрометеорологічних станціях, строками спостережень. Основою таких постів може стати дистанційний агрометеорологічний пост ДАП-1, що розробляється в УкрНДГМІ. Пости типу ДАП-1 дозволять не тільки більш точно прив'язати наземні спостереження до аерокосмічних даних, але можуть служити новою, дуже ефективною технічною базою для мікрокліматичних досліджень території.

Реалізація другого способу дозволить у майбутньому найбільш ефективно використовувати перший спосіб.

Третя особливість. В основу наземних і аерокосмічних засобів вимірювання покладені різні фізичні принципи.

В аерокосмічних методах і засобах використовуються кілька способів вимірювання параметрів підстильної поверхні землі. Це реєстрація відбитої радіації у видимій частині спектру, в інфрачервоному (ІЧ) діапазоні та у високочастотному радіодіапазоні, а також вимірювання природного гама-випромінювання поверхні землі.

У приладі ВП-4ц застосовано кондуктометричний спосіб вимірювання ємності ґрунту в змінному електричному струмі.

ТВ-метод заснований на зважуванні, висушуванні та визначенні кількості випаруваної води.

Кожний із трьох вищезгаданих методів має свої переваги і недоліки. Переваги аерокосмічних методів полягають у тому, що вони швидкодіючі і охоплюють великі території. Але вони мають і недоліки. За допомогою

їх не можна отримати розподіл вологості у глибинах ґрунту, що є перевагою наземних засобів.

Прилад ВПГ-4ц має ту перевагу перед ТВ-методом, що він характеризує пробу ґрунту об'ємом 28 л, а ТВ-метод – лише 22 мл.

ТВ-метод має свою основну перевагу перед ВПГ-4ц і аерокосмічними методами. Вона полягає в тому, що він прямий метод і служить засобом градування як ґрунтових вологомірів, так і аерокосмічних засобів вимірювання вологості ґрунту. Однак, спроба градувати космічні датчики лише за допомогою ТВ-методу може бути безуспішною, якщо не використовувати ВПГ-4ц, як проміжний засіб.

Таким чином, потрібне таке співвідношення у використанні всіх трьох методів, щоб одержувати найбільш об'єктивну інформацію про вологість ґрунту.

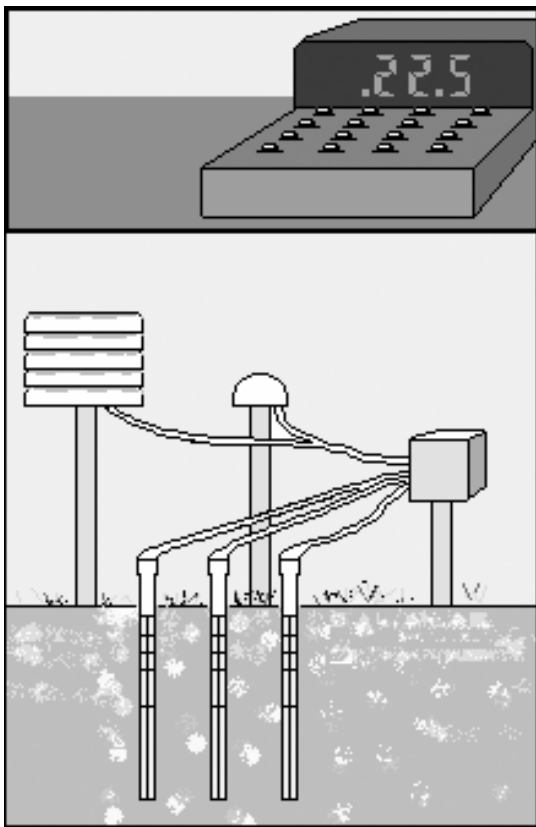


Рис. 2. Загальний вигляд дистанційного агрометеорологічного поста ДАП-1

На рис. 2. наведено загальний вигляд дистанційного агрометеорологічного поста ДАП-1, який може використовуватись як стаціонарно на гідрометеорологічних станціях і постах, так і в пересувних агрометеорологічних лабораторіях на базі будь-якого мікроавтобуса-всюдихода.

В останньому випадку установку і демонтаж обладнання, представленого на рис. 2, можна здійснити за одну годину.

Передбачається, що на трасі проходження супутника або в точці, де перехрещуються траєкторії кількох супутників Землі, серед поля завчасно

мають бути установлені датчики ДАП-1. Цифровий пульт можна установити за межами поля, наприклад, в лісосмузі у палатці. Таких постів можна установити декілька не тільки на трасах проходження

супутників, але для спеціальних мікрокліматичних досліджень території. ДАП-1 і операторів-спостерігачів можна транспортувати в одному мікроавтобусі. Можливий варіант об'єднання ДАП-1 і ВПГ-4 ц в одному універсальному пристрої.

За допомогою ДАП-1 можна вимірювати такі агрометеорологічні показники:

- вологість у шарах ґрунту: 0-10, 11-20, ... 91-100, ... 141-150 см;
- температуру ґрунту на глибинах: 0, 3, 10, 20, ... 91-100, ... 141-150 см;
- температуру і вологість повітря на висоті 2 м (або на іншій);
- сумарну і фотосинтетично активну радіацію (ФАР) та альbedo.

Точність вимірювання не поступатиметься кращим аналогам.

Висновки

За наведеним оглядом та аналізом можна відзначити наступні особливості методів і засобів вимірювання вологості матеріалів та середовища.

1. Гравіметричні методи і пристрої, зокрема термостатно-ваговий метод, самі по собі не можуть забезпечити достовірною інформацією про вологість ґрунту як протягом певного часу, так і на заданій території (наприклад, окремому полі) у зв'язку з малою інформативністю відібраних ґрунтових проб. Потрібне істотне збільшення числа проб ґрунту, що унеможлиблює самостійне застосування цих методів і пристроїв без залучення інших непрямих, прискорених експрес-методів і засобів, заснованих, наприклад, на кондуктометричному принципі.

2. Кондуктометричні методи і прилади найбільш поширені у світі. В деяких країнах їх застосовують як стандартні засоби одержання вологості найрізноманітніших матеріалів і середовищ. Тому можна вважати їх найбільш перспективними для створення ґрунтових вологоміврів. Не поступаючись іншим принципам вимірювання вологості за точністю, вони мають ту основну перевагу, що є найбільш простими у реалізації. Як приклад, можна навести переносний і стаціонарний варіант вимірювача параметрів ґрунтів ВПГ-4ц. Він захищений кількома патентами і заявками на винахід та атестований в Науково-виробничому інституті метрологічного забезпечення вимірювань складу, властивостей і кількості речовин і матеріалів (УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ). Прилад портативний, обладнаний цифровою індикацією, забезпечує пряме відображення агрометеорологічних параметрів (вологості і температури) на цифровому

табло. Він уже повністю готовий до серійного виробництва і впровадження на гідрометеорологічній мережі. Кращого варіанту ґрунтового вологоміра поки що не запропоновано.

3. Діелькометричні, оптичні, нейтронні і інші прилади в сучасному вигляді поки що малопридатні для одержання оперативної інформації про вологість ґрунту. Потрібні ще дуже кропіткі дослідження взаємозв'язку принципів вимірювання, покладених у їх основу, із механічним, хімічним, агрегатним складом ґрунту, його щільністю, температурою тощо. Окрім того, вагомим недоліком цих принципів є те, що прилади, побудовані на їх основі, дуже громіздкі. Їх не можна мініатюризувати так, як кондуктометричні вологоміри.

4. Для одержання об'єктивної просторової та часової інформації про вологість ґрунту потрібне оптимальне поєднання ефективних наземних і аерокосмічних методів визначення даних про вологість і температуру ґрунту. При цьому необхідно модернізувати існуючу систему наземних агрометеорологічних вимірювань, наприклад, за допомогою дистанційних агрометеорологічних постів ДАП-1.

* *

Рассмотрены методы и средства измерения влажности материалов и некоторых сред по материалам научно-технической литературы, патентных исследований и поиска в сети Интернет. По результатам анализа известных подходов относительно разработки влагомеров определены наиболее перспективные из них, которые могут представлять интерес для агрометеорологии.

* *

1. Берлинер М. А. Измерения влажности. – М.: Энергия. – 1980.
2. Влагомер почвы "Агротестер". Руководство по эксплуатации УХ2. 940. 063. РЭ.
3. Влагомеры диэлькометрические твердых веществ и материалов. Общие технические требования. ГОСТ 26375-84. Издание официальное. Е. М.: Изд-во стандартов. – 1985. – 18 с.
4. Грушка И.Г. Вимірювач параметрів ґрунтів ВПГ-4ц (див. цей збірник).
5. Грушка И.Г. Некоторые требования к почвенным влагомерам // Труды УкрНИГМИ. – 1990. – Вып. 238. – С. 109-117.
6. Грушка И.Г. Нові методи і засоби агрометеорологічних вимірювань і питання гідрометеорологічного забезпечення землеробства. Матеріали

- наради-семінару “Обмін досвідом гідрометеорологічного забезпечення сільськогосподарського виробництва у сучасних умовах”. 15-20 жовтня 2001р. м. Ялта. Український ГМЦ. – Київ: – 2001. – С. 43-54.
7. *Грушка І.Г., Грушка Я.І.* Блок датчиків вологості та температури. G 01 № 27/02, G 01 № 25/56, заявки № РСТ/UA2005/000009 від 02.03.2005 та № 20044011597 від 04.03.2004.
 8. *Грушка І.Г., Грушка Я.І.* Спосіб вимірювання електричної ємності та вологості і пристрій для його здійснення (варіанти). 001 № 22/00, 27/02, 27/12/ 27/22, № 200500714 від 26.01.2005.
 9. *Грушка И.Г., Калинин Ю.И., Грушка Г.Г.* и др. Способ определения влажности сыпучих материалов. G 01 N 27/02, А. С. 1695209 (СССР): Бюлл. изобрет. – 1991. – № 44, 30.11.1991.
 10. *Грушка І Г., Криворучко І.П., Грушка Г.Г.* та ін. Датчик вологості. G01 № 27/02, патент України 27798, бюл. №5, 16.10.2000.
 11. *Грушка І.Г., Рубан М.А.* Датчик вологості ґрунтів. G01 N 25/56, патент України № 239 від 15. 01. 1993.
 12. *Грушка І.Г., Рубан М.А., Грушка Г. Г.* та ін. Датчик вологості // G01N27/02, патент UA № 277798. Бюл. № 5., 16.10.2000
 13. *Кричевский Е.С., Бензаль В.К., Венедиктов М.В.* Теория и практика экспрессного контроля твёрдых и жидких материалов. – М.: Энергия, 1980. – 239 с.
 14. *Кричевский Е.С., Волченко А.Г., Голушкин С.С.* Контроль влажности твердых и сыпучих материалов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – С. 136.
 15. *Паршин А.И.* О разработке измерителя влажности почв для целей агрометеорологии // Труды ИЭМ. – 1972. – Вып. 29. – С. 3-8.
 16. *Романов В.Г.* Поверка влагомеров твердых веществ. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 175 с.
 17. *Нау moisture meter model M-8BS.* Проспект фирмы Kett Elektric Laboratory (Japan), 1978.

*Український науково-дослідний
гідрометеорологічний інститут, Київ*