

**Й. Й. Білінський<sup>1</sup>**  
**В. В. Красносельський<sup>1</sup>**

## **НВЧ МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ ПРИРОДНОГО ГАЗУ**

<sup>1</sup>Вінницький національний технічний університет

*Встановлено, що найінформативнішим та змістовним показником вологості в газовій гігрометрії є значення температури точки роси — значення температури газу, за якої водяна пара, що міститься в охолоджуваному газі, ізобарично стає насиченою над плоскою поверхнею води. В нормативних документах найчастіше вказується саме температура точки роси вологи, оскільки цей показник є інформативним. Під час експлуатації магістральних газопроводів дуже важливо знати дійсне значення такого показника якості природного газу як вологість. За неефективного осушення газу, волога конденсується на внутрішній поверхні магістрального газопроводу і газового обладнання. Останнє стає джерелом серйозних проблем: знижується пропускна здатність, виникають умови для утворення кристалогідратів. Розглянуто питання, пов'язані з існуючими основними способами вимірювання вологості газу, наведено їх класифікацію, відповідно до якої методи вимірювання поділяються на випарювально-психрометричні, сорбційні, конденсаційні, фізичні, хімічні та фізико-хімічні. Проаналізовано стан питання методів вимірювання вологості газу, визначено головні недоліки методів та проаналізовано основні питання методів точки роси. Визначено конденсаційний метод вимірювання вологості газу як найпридатніший для використання в галузях газової промисловості. Виконано огляд засобів вимірювання вологості газу за температурою точки роси, проаналізовано фізичні основи процесів вимірювання та їх недоліки. Відомі на теперішній час методи вимірювання вологості газу не дозволяють досягти необхідної точності та швидкості вимірювання показника вологості, за умови, що він є найголовнішим параметром для визначення якості газу, внаслідок складності вимірювання через наявність додаткових компонентних домішок у складі газу та агресивного середовища. Також становить складність вимірювання двох та більше показників вологості водночас. Враховуючи всі вищевказані недоліки, необхідне подальше вдосконалення методу вимірювання та визначення температури точки роси природного газу.*

**Ключові слова:** методи визначення температури точки роси, природний газ, конденсаційні методи, гігрометр.

### **Вступ**

Однією з найважливіших задач у процесі транспортування природного газу є оцінювання його якості, зокрема за показником вологості. Під поняттям «якість природного газу» розуміють відповідність його складу певним значенням його основних характеристик, таких як теплотворна здатність, вміст вологи та наявність корозійно-активних компонентів (сірководень, вуглекислий газ тощо).

Природний газ, що видобувається зі свердловин, проходить обов'язкову підготовку перед транспортуванням кінцевому споживачу. Це пов'язано з тим, що природний (або попутний нафтовий) газ, будучи складною сумішшю різних вуглеводневих компонентів, містить окрім них різні домішки, що істотно впливають на процес транспортування газу по магістральних трубопроводах. Найзначущою є домішка води, наявність якої є шкідливою з багатьох причин. Водяна пара збільшує вартість перекачування, погіршує якість кінцевого продукту, призводить до прискорення корозії трубопроводу. Але найсерйознішою проблемою є гідратуутворення, яке відбувається за певних умов транспортування. В результаті зменшується пропускна спроможність газопроводу (до повної закупорки), ушкоджуються фільтри, крани, компресори. Утворення гідратних пробок в

трубопроводах вважається вельми серйозною аварією, ліквідація якої є дуже вартісним заходом. Вартість ліквідації тільки однієї крупної гідратної пробки навіть у місці, доступному для пересування транспортних засобів, може скласти декілька десятків тисяч доларів.

Умови транспортування не потребують повного видалення вологи з природного газу, а вимагають лише підтримки необхідної температури точки роси вологи та вуглеводнів, що не переводить газ, у разі зниження його температури, з ненасиченого стану в насичений, за якого можливе виділення конденсованої фази з його складу. Для попередження цих процесів необхідно точно прогнозувати та визначати теплові та гідравлічні режими газопроводів, оптимальні температури точки роси вологи та вуглеводнів природного газу, що транспортується [1], [2].

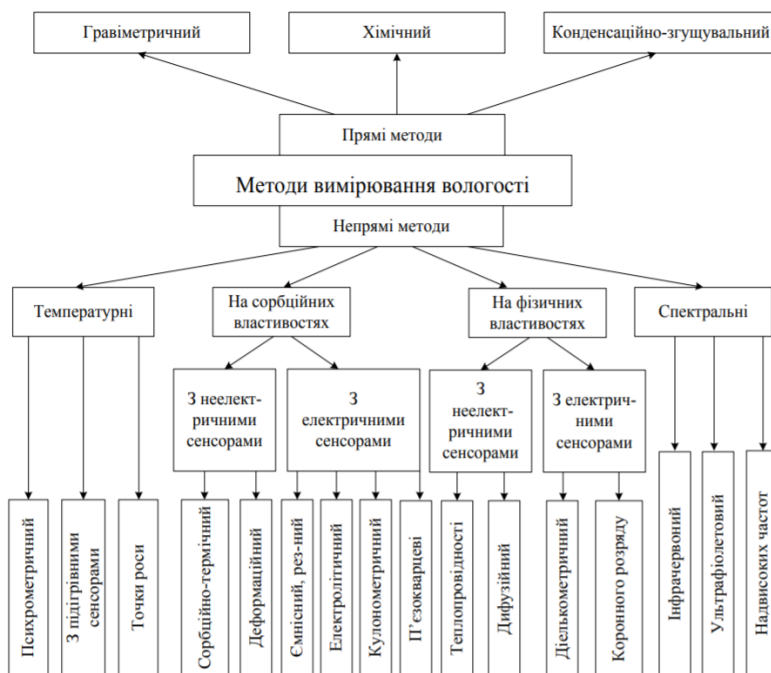
Сучасні дослідження відомих науковців показують необхідність впровадження нових науково-обґрунтованих методів та засобів для визначення фазових переходів, ідентифікації процесів конденсації компонентів природного газу і, що є найголовнішим, вологи разом з утворенням кристалічних сполук за умови її наявності у вільному стані.

На підприємствах газової промисловості України на сьогодні залишається актуальним вимірювання вологості за допомогою засобів, здатних визначати одночасно декілька показників якості, а саме: температуру точки роси, компонентів газу та температуру початку утворення кристалогідратів та криги. Тому відомі засоби вимірювання вологості природного газу внаслідок низького рівня інформативності та неможливості інтеграції цих засобів у загальну систему керування технологічними процесами втрачають свою доцільність.

Отже, необхідність та важливість нових методів та засобів для точного та швидкого визначення вологості природного газу зумовили вибір теми дослідження. Створення нової сучасної системи вимірювання показників якості природного газу, забезпечення точного, швидкого та достовірного визначення вологості з урахуванням домішок у його складі. Тому тема дослідження є актуальною.

### Класифікація методів вимірювання вологості природного газу

Вимірювання вологості — одна з найважливіших задач контролю якості природного газу, зокрема, його енерговмісту. З розвитком технологій газорозподілу, нафтохімії і газоперероблення для забезпечення якості продукції, коли вимагається перейти до гранично низьких концентрацій, виникла необхідність у швидкому відгуку аналізатора вологості, зокрема і для газів змінного складу. При цьому задача вимірювання вологості значно ускладнилася. Особливі труднощі її розв'язання виявились там, де необхідне визначення вологості: на потоці, в реальних технологічних газах і під час газоперероблення. У цих випадках вимагається прийняття швидкого рішення, наприклад неконтрольований рівень вмісту води може призвести до аварійної ситуації, до отримання неякісного продукту. Складність вимірювання вологості природного газу також полягає у



тому, що вологість повинна визначатись у вибухонебезпечних умовах за різних тисків [1], [2]. Для природного газу неможливо точно визначити коефіцієнт стисливості, що також ускладнює вимірювання його вологості. Нагромадження цих проблем потребує пошуку таких методів контролю і засобів вимірювання вологості природного газу, які б відповідали таким особливим вимогам.

На сьогодні відома велика кількість методів вимірювання вологості газів. Показана на рис. 1 детальна класифікація методів вимірювання вологості природних і технологічних газів включає близько двадцяти найменувань.

Як і більшість методів вимірювання фізичних величин, всі методи

Рис. 1. Класифікація методів вимірювання вологості природного газу

вимірювання вологості газів можна поділити на прямі і непрямі методи.

Прямі методи основані на безпосередньому поділі вологи і сухого газу з подальшим визначенням кількості вологи. У цю групу входять методи повного поглинання (гравіметричні і хімічні), з виморожуванням вологи [3]—[7].

У непрямих методах вимірюється та чи інша фізична величина, функціонально пов'язана з вмістом вологи в газі.

*Психрометричний метод*, який ґрунтується на використанні психрометричного ефекту, відкритого німецьким фізиком Ернстом Августом. Суть ефекту у тому, що випаровування з поверхні зволоженого тіла і, як наслідок, ступінь його охолодження, тим інтенсивніші, чим менша відносна вологість газового середовища, де знаходиться тіло.

Значення психрометричної різниці залежить від температури газу в контрольованому середовищі, значення якої отримують за допомогою сухого термометра, а також від швидкості обтікання зволоженого тіла середовищем, вологість якого вимірюється [3].

Суть *сорбційного* методу полягає у використанні властивості деяких гігроскопічних речовин (з пористою структурою), поглинати (абсорбувати) вологу із газового середовища. І ця поглинута вода знаходиться у стані рівноваги з вологістю контрольованого за вологістю середовища. Кількість води, що адсорбується на поверхні такого ПВП, однозначно пов'язана з вологістю газового середовища, яка визначається по масі, кольору або інших параметрах вологи сорбуючих матеріалів [8].

*Ємнісні вологоміри*. В методі вимірювання вологості використовується вплив наявності вологи в твердому тілі на величину діелектричної проникності. Діелектрична проникність сухого речовини зазвичай дорівнює 2...5, а діелектрична проникність води — 81. Діелектричну проникність вологого матеріалу визначають по зміні ємності конденсатора, між обкладками якого знаходиться досліджувана речовина. Недолік ємнісних перетворювачів, виконаних у вигляді конденсаторів того чи іншого типу, складається у впливі на результати вимірювання (зміни) поверхневої густини тканини, так як приріст ємності перетворювача залежить як від вологості тканини, так і від її поверхневої густини, тому нерівномірність матеріалу вносить додаткову похибку при вимірюванні вологості [1].

*Електролітичні гігрометри*. У гігрометричному методі вимірювання вологості газів використана залежність електричних параметрів вологосорбуючих матеріалів від вологості газів, при цьому чутливий елемент знаходиться в гігрометричній рівновазі з вимірюваним газом. У промисловості застосовують такі різновиди датчиків електричних гігrometerів: електролітичні, електролітичні з підігрівом і сорбційні. В електролітичних гігrometerи міститься вологочутливий елемент з електролітом.

Зміна вологості газу викликає зміну кількості вологи, що міститься в вологочутливому елементі, що призводить до зміни концентрації електроліту в ньому і відповідної зміни його опору або електропровідності.

*Вологоміри інфрачервоні (ІЧ)*. З інших методів, що знайшли застосування в автоматичних системах управління в харчовій промисловості, можна відзначити метод інфрачервоної спектроскопії, заснований на поглинанні або відображенні світла в цій галузі спектра матеріалами, залежно від їх абсорбційних або характеристик, що розсіюють.

Метод інфрачервоної спектроскопії може бути використаний для контролю вологості борошна та сухого молока за відбивною здатністю продуктів у ближній ІЧ-області спектру [9], [10].

*Абсорбційний метод вимірювання вологості*. Абсорбційний метод заснований на поглинанні водяної пари безводним диетиленгліколем (ДЕГ) і подальшому визначенні пов'язаної ДЕГом води титруванням розчином К. Фішера. Цей метод має обмеження щодо вмісту водяної пари в газі (не більше  $0,1 \text{ г/м}^3$ ) і кількості сірчистих сполук в газі (не більше  $0,03 \text{ г/м}^3$ ), вимагає витратних матеріалів і тому застосовується тільки в лабораторних умовах.

*Сорбційні методи* вимірювання вологості використовують здатність речовин сорбувати вологу і тим самим змінювати їх властивості. В останні 15—20 років широке застосування знайшов порівняно новий метод вимірювання вологості газів — *п'єзосорбційний*.

До недоліків п'єзосорбційних гігrometerів слід віднести необхідність їх градування на газових сумішах з відомою вологістю, збільшення похибки вимірювання за наявності в аналізованому середовищі домішок, що сорбуються чутливим елементом [11].

*Кулонометричний спосіб вимірювання вологості газу*. У вологомірів цього типу чутливий елемент виконаний у вигляді трубчастого корпусу з електроізоляційного матеріалу, всередині якого розміщено дві недотичні спіралі (електроди) з Pt і Rh. Простір між спіралями заповнений адсорбентом — частково гідратованим  $\text{P}_2\text{O}_5$ . До електродів підведена напруга, що забезпечує електроліз

поглинутої вологи. Аналізований газ з постійною витратою пропускають через елемент, і водяні пари практично повністю поглинаються  $P_2O_5$ .

Діапазон вимірювань від  $10^{-5}$  до 0,1 %. Недолік приладу — неможливість вимірювання вологості газів, які містять лужні і полімерні компоненти [12].

*Резонансні методи* вимірювання електричних характеристик речовин знаходять широке застосування в різних діапазонах, забезпечуючи порівняно високу точність отриманих результатів. Основна ідея резонансних методів, незважаючи на різний характер її технічного втілення, полягає в спостереженні резонансних кривих коливального контуру, в який введений зразок досліджуваного діелектрика. Вивчення резонансних кривих до і після внесення діелектрика дозволяє за добротністю контуру і його резонансною частотою визначити як дійсну, так і уявну частину діелектричної проникності зразка. [13].

Резонансні методи з успіхом можуть бути використані для вимірювань газів, що мають дуже малі значення проникності і втрат, а також для дослідження рідких речовин з дуже малими кількостями матеріалу, необхідного для дослідження. Під час вимірювань фізико-хімічних параметрів рідинних і газоподібних середовищ виникають специфічні проблеми врахування впливу ємності.

*Конденсаційні методи вимірювання вологості газу.* Суть методу точки роси полягає у визначенні температури, за якої водяна пара, що є в контрольованому газі, за її охолодження досягає стану насичення, тобто починає конденсуватися. Існує однозначна залежність між вологістю газового середовища і температурою конденсації. Визначивши температуру конденсації, можна за відповідними таблицями знайти відносну вологість [14].

### Аналіз НВЧ методів і засобів вимірювання вологості газів

Перспективним є НВЧ метод, який полягає в вимірюванні вологості природного газу за методом визначення температури точки роси в умовах високого вмісту парів вищих вуглеводнів. У методі визначення температури точки роси в природному газі, заснованому на вимірюванні температури охолоджуваного дзеркала в момент початку конденсації на ньому парів води, для контролю стану поверхні дзеркала використовуються радіохвилі сантиметрового або міліметрового діапазонів. Вимірювальна комірка гігрометра містить діелектричний хвилевід, що охолоджується термоелектричним модулем, і датчик температури поверхні хвилеводу. З одної сторони хвилеводу розміщується джерело НВЧ-хвиль, з іншого — детектор цих хвиль. За умови охолодження хвилеводу нижче температури точки роси, на ньому починають конденсуватися крапельки вологи, при цьому через поглинання радіохвилі НВЧ-діапазону в воді амплітуда сигналу з детектора падає, що фіксується електронною схемою. На плівку конденсату вищих вуглеводнів пристрій практично не реагує. Цей спосіб дозволяє зменшити похибку визначення температури точки роси в природному газі в присутності парів вищих вуглеводнів в порівнянні з оптичними приладами, що використовуються для цієї мети, в кілька разів [15], [16].

Для вимірювання вологості широко застосовуються мікрохвильові (НВЧ) методи і пристрої, теорія яких досить добре розвинена, у зв'язку з очевидними перевагами:

- 1) здійснення неруйнівного контролю;
- 2) прийнятна точність вимірювань;
- 3) безпека за рахунок інформативної взаємодії малопотужних мікрохвильових полів біжучих і стоячих хвиль з матеріалом, що не супроводжується нагріванням матеріалу.

Однак практично всі мікрохвильові методи і пристрої мають такі недоліки:

- працюють на одній (двох) стабілізованій частоті;
- не універсальний за зовнішнім виглядом і формою матеріалу, найчастіше вимагає індивідуального калібрування на місці;
- у вологостійкості будівельних матеріалів не застосовуються двоапертурні методи вільного простору для проходження, а також резонаторні, хвильові і зондові методи, які дозволяють визначити інтегральну і середню вологість по зоні взаємодії, апертурні методи також стаціонарні, громіздкі і вартісні в реалізації;
- одноапертурні методи відбиття не завжди підходять, до того ж основний метод Брюстера дозволяє визначити тільки вологість поверхні, завжди немає обґрунтувань застосовності методів відбиття по товщині матеріалу, відсутні координати хвильових опорів — низька ефективність;
- у відомих пристроях відсутній зв'язок між взаємодією мікрохвильових полів з матеріалом і з можливістю їх мікрохвильового нагріву, процес такого нагрівання дуже інформативний, що дає

можливість вивчити, крім вологості, набір інших теплофізичних характеристик матеріалу, кінетику мікрохвильової сушки, вивчення термограм дуже перспективний;

– поверхнева вологість матеріалу і вологість з погляду обсягу взаємодії не рівні за рахунок нормального градієнта вологості через сучасні процеси сушіння і зволоження, необхідні комплексні вимірювання цих значень.

До того ж, на сьогодні не вивчені інформативні аспекти дисперсії діелектричної проникності вологих матеріалів — частотні залежності, необхідне оперативне сканування вологості великих поверхонь. Невирішеним є питання оптимізації вибору робочого діапазону частот, а також відсутня валідність необхідності використання складних адаптивних електронно-керованих апертур.

Вирішення зазначених вище протиріч і завдань дозволило розробити безконтактний оперативний мікрохвильовий метод визначення набору характеристик, з вологістю поверхні включно, вологість за об'ємом взаємодії, градієнт вологості, з перспективою визначення інших теплофізичних величин. Це стало можливим на основі теоретичних і практичних розробок термовологометричного мікрохвильового методу [17].

Згідно з прийнятою класифікацією, наявні мікрохвильові методи вимірювання вологості поділяються на:

1) вільні методи простору: (а) за допомогою прохідної хвилі; б) за допомогою відбитої хвилі. В обох модифікаціях вимірюваною характеристикою може бути загасання (коефіцієнт передачі або модуль коефіцієнта відбиття), зміна амплітуди або фази хвилі;

2) резонаторні методи;

3) хвильові методи потоку;

4) методи зонда.

Деякі інші відомі методи дуже перспективні. До них відносяться методи зонда, поверхнева хвиля, обертанні площини поляризації.

Існують вимірювачі вологи, засновані на принципі зміни хвильових характеристик відбитої електромагнітної хвилі зі зміною вологості матеріалу.

З методів вимірювання вологості, що застосовуються в промисловості, тільки високочастотна вологометрія може конкурувати за широтою використання з НВЧ-методом. Перевагами НВЧ-вологометрії є: можливість безконтактного вимірювання, відносна простота та дешевизна апаратури, а часом і хороші метрологічні характеристики. Відмінність високочастотних та НВЧ-методів полягає в співмірності довжини хвилі з мінімальними характеристичними розмірами об'єкта, і в особливості поведінки води в гігагерцевому діапазоні [18], [19].

Одна з унікальних властивостей хвилі — це аномально висока діелектрична проникність, викликана тим, що осі Н у молекулі води мають кут, близький до  $105^\circ$ . Ця особливість, обумовлена законами квантової механіки, призводить до того, що навіть без зовнішнього електричного поля молекула води має власний дипольний момент. Орієнтація полярної молекули у зовнішньому полі відрізняється від орієнтації неполярної молекули при електронній чи іонній поляризації, коли деформується лише електронна хмара. При дипольній поляризації молекула повертається як єдине ціле, тому на процес поляризації впливають енергія зв'язку води зі скелетом і температура. Обертання молекули відстає від моменту, що обертає, викликаного змінним електромагнітним полем, за рахунок сил тертя, що зменшують також і амплітуду підсумкової поляризації. Цю відсутність зручно характеризувати часом релаксації, який для води дорівнює  $0,6 \cdot 10^{-11}$  с ( $T = 293$  К) та для льоду  $10^{-5}$  с ( $T < 273$  К). Полімеризація води зі скелетом поблизу поверхні твердої фази призводить до збільшення часу релаксації до  $10^{-9} \dots 10^{-7}$  с. У разі збігу частоти зовнішнього поля зі своєю частотою диполів (область дисперсії) зростають втрати і діелектрична проникність починає залежати від частоти [13]

$$\varepsilon(j\omega) = \varepsilon'_\infty + \sum_i \left[ \frac{\Delta\varepsilon_i}{1 + j\omega\tau_i} \right], \quad (1)$$

де  $\varepsilon'_\infty$  — діелектрична проникність, що відповідає пружній поляризації  $\varepsilon'_\infty \approx 2$ ;  $\Delta\varepsilon_i$  — внесок поляризації конкретного виду, коли  $\omega \rightarrow 0$ ;  $j = \sqrt{-1}$ ;  $\omega = 2\pi f$  — кругова частота;  $\tau_i$  — час релаксації  $i$ -го механізму поляризації  $\tau_i \in [10^{-16}; 10^{-14}]$  для електронної та  $\tau_i \in [10^{-14}; 10^{-12}]$  для іонної поляризації, тому в подальшому розглядатимемо тільки дипольну поляризацію).

Реально спостерігаються залежності (хіба що для льоду), які не можна характеризувати дискрет-

ним часом релаксації. Для таких молекулярних систем має місце спектр часу релаксації з функцією розподілу  $G(\tau)$ , а відповідні складові  $\varepsilon(j\omega)$  такі:

$$\varepsilon' = \varepsilon_\infty + \int_0^\infty G(\tau) d\tau / (1 + \omega^2 \tau^2); \quad \varepsilon'' = \int_0^\infty G(\tau) \omega \tau d\tau / (1 + \omega^2 \tau^2). \quad (2)$$

Про вид функції можна робити висновки по годографу комплексної діелектричної проникності (так званої діаграмі Коул-Коул). Якщо розподіл  $\tau$  дискретний (тільки один час релаксації), то діаграма має вигляд півкола з центром на осі абсцис: при симетричній щодо центрального моменту функції розподілу діаграма набуває вигляду півкола з центром, що лежить нижче осі абсцис. Якщо функція розподілу несиметрична, то годограф має вигляд несиметричної кривої.

У будівництві широкого застосування набувають амплітудно-фазові прилади на проходження. В цьому випадку внутрішній стан об'єкта контролю визначається впливом середовища на сигнал, що пройшов через зразок. Принципова схема методу показана на рис. 2. Основою методу є наявність двох антен (приймальної та випромінюючої), що знаходяться по різні сторони від об'єкта контролю і, зазвичай, співвісні між собою.

В основному існують дві принципові блок-схеми приладів, у яких застосовано метод «на проходження» (рис. 3).

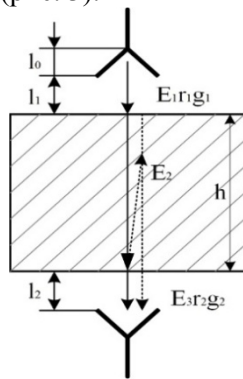


Рис. 2. Принципова схема утворення сигналу у схемі «на проходження»:  $l_0$  — довжина рупора;  $l_1$  — відстань від краю випромінюючого рупора до першої поверхні;  $l_2$  — відстань від другої поверхні до приймального рупора;  $h$  — товщина контролюваного виробу;  $r_{1,2}$  — коефіцієнт відображення від першої та другої кордонів;  $g_{1,2}$  — коефіцієнт прозорості першої та другої меж;  $E_1$  — випромінювана хвиля;  $E_2$  — хвиля у зразку;  $E_3$  — хвиля, що приймається

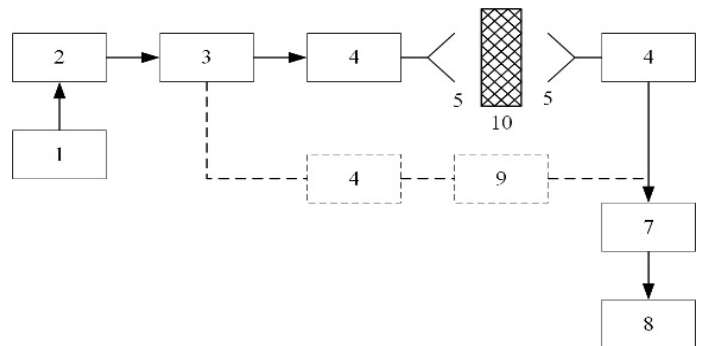


Рис. 3. Блок-схема амплітудно-фазових приладів, що працюють за схемою «на проходження»: 1 — блок живлення; 2 — джерело енергії НВЧ; 3 — елемент, що розв'язує (Феритовий вентиль); 4 — атенюатор; 5 — випромінююча антена; 6 — приймальна антена; 7 — детектор; 8 — блок обробки інформації; 9 — фазообертач; 10 — об'єкт контролю

Принцип роботи частини схеми, в якій усі елементи позначені суцільною лінією полягає в такому (див. рис. 3). Енергія НВЧ від клістроного генератора 2 подається через вентиль 3 в хвилевід і атенюатор 4 до випромінюючого рупора 5. Енергія проходить через зразок 10, приймається приймальною антеною 6 і через вимірювальний атенюатор потрапляє на детектор 7, після чого сигнал посилюється і подається на індикаторний пристрій 8.

Така схема дозволяє проводити контроль властивостей матеріалу за величиною згасання енергії НВЧ зразку, що обчислюється за шкалою атенюатора, за допомогою якого величина індикаторного сигналу пристрою підтримується на постійному рівні. Для більшості практичних випадків потужність сигналу, що приймається, можна визначати за формулою

$$P = \frac{P_0 S}{2\pi} g_1^2 g_2^2 \left( \frac{1}{(l+h)^2} + \frac{r_1^2 r_2^2}{(l+3h)^2} - \frac{2r_1 r_2}{(l+h)(l+3h)} \cos 2K_2 h \right), \quad (3)$$

де  $P_0$  — випромінювана потужність;  $l = l_1 + l_2 + l_3$ ;  $K_2 = 2\pi/\lambda_{\text{діел}}$  — хвильове число у зразку;  $r_1, r_2, g_1, g_2$  — коефіцієнти відображення та проходження.

Схему (рис. 3), в якій частина елементів позначена пунктиром, часто називають інтерферометром з відкритим плечем. У цій схемі інформативний сигнал порівнюється по амплітуді та фазі з опорним, що подається через атенюатор 4 і фазообертач 9. Така схема має більшу інформативну

емність ніж перша, але у випадках, коли об'єкт контролю має великі розміри, її важко реалізувати.

Щоб виключити вплив перевідбиття, необхідно узгодити межі розділу з прийнятною та випромінювальною антенами, тобто виключити появу стоячої хвилі [20].

Дослідження діелектричних характеристик в НВЧ діапазоні довжин хвиль дозволяє отримати унікальну інформацію про стан водної компоненти. Фізичною основою цього є велика різниця діелектричної проникності природного газу, що становить приблизно  $\epsilon \cong 1$  та води  $\epsilon \cong 81$ . НВЧ діелектрометрія в області дисперсії вільної води (близько 10 ГГц) є прямим методом вивчення стану води в різних об'єктах.

Молекула води — це диполь, що зумовлює її високу діелектричну проникність. Диполь молекули води у НВЧ діапазоні в змінному електромагнітному полі (ЕМП) не встигає обернутися і слідувати за змінами поля. Ця здатність характеризується комплексною діелектричною проникністю  $\epsilon$ . Зміна вологості, як вищезазначено, несуттєво змінює діелектричну проникність вологовмісного середовища, при цьому суттєвими є діелектричні втрати, тобто електрична потужність, що розсіюється в діелектрику у вигляді тепла під дією прикладеного до нього електричного поля. Діелектричні втрати залежно від частоти електромагнітного поля будуть мати різні значення. На рис. 4 показано характеристики діелектричних втрат за різних значень довжини НВЧ хвилі.

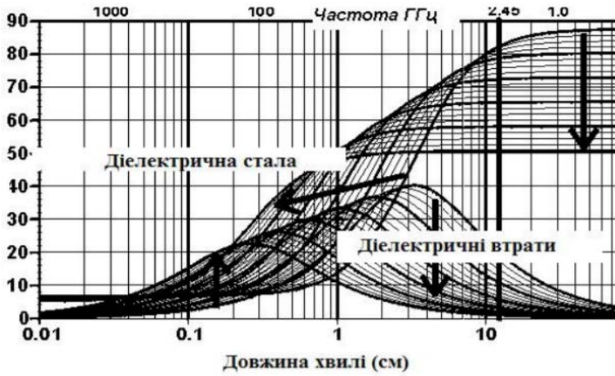


Рис. 4. Характеристики діелектричних втрат за різних значень довжини НВЧ хвилі

Отже вимірювання вологості газів на надвисоких частотах є різновидом діелектрометричного методу, в якому зміна діелектричних властивостей газів оцінюється за їх взаємодією з радіохвилями дециметрового, сантиметрового та міліметрового діапазонів. На основі цього графіка можна зробити висновок про те, що найбільший діапазон діелектричних втрат припадає на довжину хвилі в 3 см, яку в подальшому і буде взято за основу для побудови вимірювального перетворювача та засобу вимірювання вологості природного газу.

Сучасна фізика діелектриків пов'язує залежність  $\epsilon$  і  $\text{tg } \delta$  матеріалів від їх властивостей з основним процесом, що відбувається в будь-якому реальному діелектрику під впливом електричного поля, з поляризацією частинок діелектрика.

У гетерогенних системах поляризація має неоднаковий характер для різних фаз і для всієї системи в цілому. На характеристики системи здійснює також вплив подвійний електричний шар, зумовлений наявністю заряду на поверхні поділу між фазами, що мають різні електричні властивості ( $\epsilon$  і  $\sigma$ ).

Залежність між цими величинами має вигляд [21]

$$\epsilon'' = \epsilon; \epsilon'' = \frac{\sigma}{\omega}; \text{tg } \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} = \frac{\sigma}{\omega \epsilon'}; \epsilon^* = \epsilon(1 - j \text{tg } \delta), \quad (4)$$

де  $\omega$  — кутова частота;  $\text{tg } \delta$  — тангенс кута діелектричних втрат.

За Дебаєм частотна залежність діелектричної проникності при релаксаційному поглинанні описується рівнянням

$$\epsilon^* - \epsilon_\infty = \frac{\epsilon_0 - \epsilon_\infty}{1 + j\omega\tau}, \quad (5)$$

звідки

$$\epsilon^* = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_0 - \epsilon_\infty}{1 + j\omega^2\tau^2} \quad (6)$$

$$\epsilon'' = (\epsilon_0 - \epsilon_\infty) \frac{\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2}. \quad (7)$$

Можна визначити максимальне значення  $\epsilon''$

$$\epsilon''_{\text{макс}} = \frac{\epsilon_0 - \epsilon_\infty}{2}. \quad (8)$$

Вихідною величиною вимірювального перетворення, що базується на проходженні електромагнітної хвилі по хвилеводу у вільному середовищі, є послаблення сигналу.

Галузь надвисокочастотної (НВЧ) вологометрії розвивається з 50-х років ХХ століття. Найважливішими достоїнствами НВЧ вологомірів є: можливість безконтактних вимірювань (у вільному просторі), висока чутливість, необмежена верхня межа вимірювань, малий вплив на результати вимірювань хімічного складу матеріалу і деяких інших факторів [25].

Надвисокочастотні (НВЧ) вологоміри використовують значну (в десятки разів) відмінність електричних властивостей води та сухого матеріалу. Концентрацію вологи вимірюють шляхом ослаблення НВЧ-випромінювання, що проходить через шар аналізованого матеріалу та ґрунтується на двох фізичних явищах: поглинанні і розсіянні радіохвиль, що пов'язано з наявністю широкосмугової обертальної релаксації полярних водяних молекул в області НВЧ. Чим більше вологість аналізованого матеріалу, тим менше сигнал, що потрапляє у вимірювальне обладнання. НВЧ-вологоміри дозволяють вимірювати вологість у широкому діапазоні (0...100 %) з високою точністю.

Одною з основних переваг діелькометричного методу є те, що засоби на їх основі, забезпечують відсутність інерційності й дозволяють працювати з газом у потоці та здійснювати безперервний контроль стану обладнання в умовах експлуатації.

Відповідно до прийнятої класифікації [21] методи НВЧ-вологомісту поділяються на:

1) методи вільного простору (оптичні методи): а) з використанням хвилі, що проходить по тракту; б) з використанням відбитої хвилі. У модифікаціях а) і б) вимірюваною характеристикою можуть служити затухання (модуль коефіцієнта передачі або коефіцієнта відбиття), зміна амплітуди або фази хвилі.

2) резонаторні методи, які використовують закриті (металеві) і відкриті (діелектричні) резонатори;

3) хвильові методи, які використовують параметри хвилі;

4) зондові методи, які використовують зондування деякої поверхні;

5) методи биття або інтерференційні методи.

Більша частина розробок, що використовують методи вільного простору базуються на антенних вимірюваннях. Основними недоліками при цьому є велика розмірність пробних об'єктів і відсутність практично прийнятної теорії характеристик перетворення датчиків, що зумовлено відсутністю теорії ефективної діелектричної проникності вологого середовища.

Метод вільного простору з відбитою хвилею може бути реалізований таким чином. За малих втрат в матеріалі (область дуже низького вологовмісту) знайшов застосування оптичний метод кута Брюстера, що полягає в знаходженні кута падіння, якому відповідає мінімум відображення поляризованої електромагнітної хвилі (паралельна поляризація, за якої вектор електричного поля паралельний площини падіння) від плоскої поверхні зразка.

З існуючих методів найбільше практичне застосування знайшли методи, засновані на порівнянні характеристик електромагнітної хвилі, у вільному просторі, і хвилі, що пройшла через досліджуваний матеріал. Вимірювання зводяться до визначення комплексного коефіцієнта передачі ділянки напрямної системи, заповненої досліджуванним матеріалом (коефіцієнта поглинання / відбиття як функції вологовмісту) [22]. Такою системою може бути як хвилевід, частково або повністю заповнений досліджуванним діелектричним середовищем, так і область вільного простору, в якій поширюються електромагнітні коливання НВЧ. На рис. 5 показана узагальнена схема пристрою для вимірювання вологості природного газу з використанням хвилеводної вимірювальної лінії.

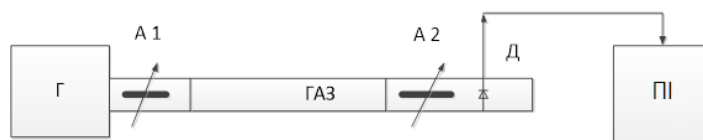


Рис. 5. Узагальнена схема пристрою для вимірювання вологості природного газу: Г — генератор НВЧ; А1 і А2 — атенюатори; Д — діод; І — пристрій індикації

При проходженні радіохвиль НВЧ через вологий матеріал відбуваються поглинання і розсіювання енергії електромагнітних хвиль частинками речовини. Для отримання інформації про властивості речовини можна використовувати параметри досліджуваного променя, що пройшов через пробу, або відбитого випромінювання. Інформацію про вологість містять амплітуда, фаза і кут повороту площини поляризації електромагнітної хвилі як відбитої, так і тої, що пройшла через вологий матеріал.



З метою збільшення ефективності вологомірів можуть бути використані двочастотні методи, коли одна з частот знаходиться в зоні резонансного поглинання електромагнітної енергії молекулами.

НВЧ вологоміри працюють переважно в режимі стоячої хвилі.

Для вимірювання діелектричної проникності газів можуть бути використані також хвильові методи, основані на зсуві вузла стоячої хвилі при введенні в хвилевід досліджуваного газу. В такому пристрої генератор височастотних коливань з'єднаний (через атенюатор) з хвилеводною вимірювальною лінією, яка, в свою чергу, приєднана до довгої хвилеводної секції (осередку), герметизованою з лівого боку тонкою слюдяною пластинкою. Правий кінець хвилеводного осередку коротко замкнутий за допомогою металевої пластинки. Перед вимірюванням повітря, що міститься в хвилеводній комірці відкачується, а на вимірювальній лінії знаходиться положення будь-якого вузла стоячої хвилі. Потім в хвилеводну комірку вводиться досліджуваний газ, що викликає зсув мінімуму стоячої хвилі у напрямку до кінця хвилеводу, оскільки довжина хвилі при цьому зменшується.

Для усунення неоднозначності визначення проникності під час введення газу проводиться спостереження за переміщенням вузла стоячої хвилі з тим, щоб число цілих півхвиль залишилося незмінним. Виміряне таким чином зміщення вузла дозволяє визначити діелектричну проникність досліджуваного газу за відомою довжиною хвилі. Недоліком такого підходу є великі розміри хвилеводної комірки [23].

Для підвищення чутливості хвилеводних методів використовуються довші хвильові комірки, а також проводяться інші заходи, пов'язані, наприклад, з усуненням відбиття від слюдяного вікна і підвищення стабільності генератора. Компенсація відбитої хвилі від слюдяної пластинки досягається введенням індуктивної діафрагми, реактивна провідність якої дорівнює за абсолютною величиною провідності вікна, але протилежна за знаком.

Втрати в газах можуть бути виміряні шляхом реєстрації потужності, що надходить на вхід індикаторного пристрою. Вимірюючи спочатку потужність, що реєструється чутливим індикатором, за відсутності газу в хвилеводі, а потім з уведеним газом, можна визначити постійну загасання. Такий спосіб вимірювання автоматично враховує власні втрати хвилеводу, позаяк різниця між потужностями обумовлена тільки втратами, зумовленими досліджуваним газом. Вплив власних втрат хвилеводу спостерігається у вузлі стоячої хвилі за занадто довгого осередку, що призводить до додаткових похибок у визначенні зміщення вузла. Це зумовлює обмеження довжини хвилеводної комірки деяким її оптимальним значенням, за якого вплив втрат ще мало позначається на точності вимірювання вузла стоячої хвилі.

Незважаючи на порівняно низьку чутливість хвилеводних методів, останні знайшли широке застосування в радіоспектроскопії, оскільки вони дозволяють виконувати дослідження в ширшому спектрі частоти у порівнянні з резонатором.

У методі відбивання можна використати похиле або нормальне падіння хвилі. Перевагу зазвичай віддають нормальному падінню, за якого використовується одна приймально-передавальна антена, в той час як для похилого падіння застосовуються вимірювальні пристрої, основані на оцінюванні параметрів стоячої хвилі, що виникає в результаті суперпозиції падаючої і відбитої хвиль.

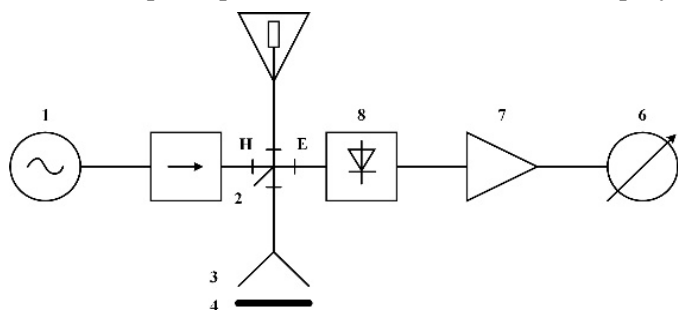


Рис. 6. Блок-схема вологоміра НВЧ, побудованого на принципі відбиття

На рис. 6 показана мостова схема автоматичного вологоміра на принципі відбиття з подвійним хвилеводним трійником [24], [25].

Генератор НВЧ 1 приєднаний до Я-плеча, детектор — до £-плеча подвійного трійника 2. Одне з бічних плечей має рупорну антену 3, направлену на поверхню досліджуваного матеріалу 4. Друге плече (опорне) містить еталон 5 (зразок матеріалу з постійною вологістю). У разі рівного розподілу модулів і фаз коефіцієнтів відбиття  $R_x$  матеріалу і  $R_3$  еталона напруженості відбитих хвиль в £-плечі рівні і знаходяться в протифазі. Показання приладу 6, підключеного через підсилювач 7 до детектора 8, дорівнюють нулю. Якщо еталон ідеально узгоджений, а характеристика детектора квадратична, показання індикатора приблизно пропорційні  $R_x$ .

Для резонаторних методів характерне використання двох резонаторів: вимірювального та опорного. Для отримання точних результатів необхідно, щоб частота опорного резонатора залишалась незмінною протягом всього часу, необхідного для вимірювань. Під час вимірювання діелектричної

проникності вологий газ продувається через резонатор і вимірюється відносний зсув частоти резонатора, заповненого паром, порівняно з частотою резонатора, заповненого сухим газом. На основі вимірювань, отриманих для певного вмісту води в газі, можуть бути проведені розрахунки діелектричної проникності газу за іншого відсоткового вмісту води. Ці розрахунки проводяться за допомогою ентропійних діаграм, що ускладнює обробку результатів вимірювання і є суттєвим недоліком [21].

У методі биття порівнюються резонансні частоти двох генераторів. Перший генератор є опорним і працює на фіксованій частоті, а в коливальний контур другого генератора включається еталонний змінний конденсатор. Коливання від двох генераторів подаються на змішувач, що дозволяє отримати різницеву частоту (биття), яка реєструється вихідним індикатором. Змінюючи частоту генератора, домагаються рівності частот (нульові биття). Після отримання нульового биття паралельно до еталонного конденсатора підключається вимірювальний конденсатор з досліджуваною речовиною. Діелектрична проникність визначається через різницю значень ємності еталонного конденсатора до підключення вимірювального конденсатора, його ємності після підключення і ємності вимірювального конденсатора. Недоліком такого методу є складне схематехнічне рішення.

Розглянуті резонансні первинні перетворювачі (РПП), що орієнтовані на малорозмірні проби. Такі перетворювачі, зазвичай, використовують для вимірювання сипких і пористих середовищ, а також апаратно розв'язують задачу зведення результату вимірювань до одномірного.

Розроблено низку мікрохвильових датчиків для гігromетрії технологічних газів. Один з них базується на спеціально структурованому РПП з робочим видом коливань  $H_{012}$  і дозволяє реалізувати прямі вимірювання вмісту води в газах за значенням ефективної діелектричної проникності. Зважаючи на те, що відхилення значення діелектричної проникності вологого газу від сухого газу становить  $10^{-3} \dots 10^{-5} \%$ , чутливість РПП повинна мати досить високі значення. З цією метою в конструкції  $H_{012}$  РПП торцеві стінки потрібно виконати з матеріалу з істотно нижчим значенням електропровідності в порівнянні з матеріалом бічної області циліндра. При цьому вихідний сигнал вимірювальної інформації формується на базі зміни добротності РПП залежно від вологовмісту газового середовища, що заповнює його. Структурна схема мікрохвильового гігromетра такого типу показана на рис. 7 і не містить складних у експлуатації пристроїв АПЧ і гетеродинного частотоміра.

Схема мікрохвильового гігromетра включає тільки один НВЧ генератор (Г), блок опорного і вимірювального резонатора (P1) і (P2), модулятор (М), високо прецизійний хвилеводний міст на балансовому подвійному трійнику зі НВЧ детектором (Д) в Е-плечі і традиційний газовий блок (БГ).

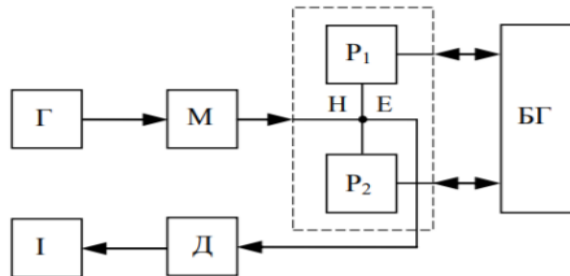


Рис. 7. Структурна схема мікрохвильового гігromетра

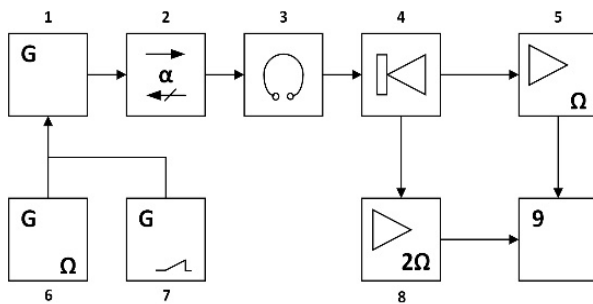


Рис. 8. Функціональна схема НВЧ гігromетра модуляційного типу: 1 — НВЧ генератор; 2 — феритовий вентиль; 3 — РПП; 4 — НВЧ детектор; 5, 8 — селективні підсилювачі; 6 — НЧ генератор; 7 — генератор пилкоподібної напруги; 9 — мікроконтролер

Недоліками мікрохвильового резонатора є висока чутливість до води, що обмежує діапазон вимірювань, неоднорідна структура електромагнітного поля, що містить максимуми і нулі поля по всьому поперечному перерізу потоку, що призводить до нестабільності відгуку резонатора і вимагає застосування складних статистичних методів оброблення сигналу.

Запропоновано та реалізовано НВЧ варіант гігromетрів на основі спеціальних вологосорбентів. Фактично це аналог мікроелектронних ємнісних датчиків для гігromетрії. Переваги мікрохвильового гігromетричного сенсора пов'язані з можливістю окремої оптимізації вологосорбента за критерієм нормованості процесів сорбції та десорбції і техніки вимірювання його ефективної діелектричної проникності, як функції поглинання води з газу.

На рис. 8 показано функціональну схему розробленого НВЧ гігromетра проточного газу з мікрохвильовим датчиком на основі коаксіального резонатора з торцевою вимірювальною апертурою.

Сорбентна частина сенсора (3) може наноситися на діелектричну підкладку і оптимально включатися в випромінювальну апертуру РПП (1) за критеріями значення його робочої добротності та

чутливості. Десорбція накопичувальної вологи для підготовки сенсора до нового вимірювання здійснюється після виходу показань гігromетра на насичення за допомогою або резистивного нагріву (а), або нагріву ІЧ випромінюванням (б). За дозової гігromетрії сорбент може включатися в поле РПП за варіантом (в).

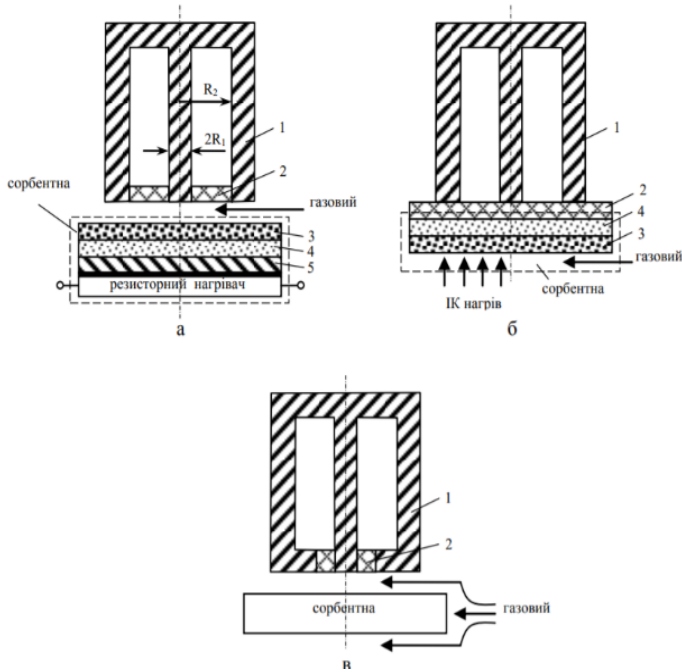


Рис. 9. Схематичне зображення РПП для НВЧ гігromетрії

Окрім вищенаведених недоліків слід відмітити, що у НВЧ вологометрії на відміну від класичного гравіметричного методу існує проблема суттєвого впливу таких завад, як щільність вологовмісної проби та відтворюваності об'єму, що взаємодіє з НВЧ полем сенсора, на градувальну характеристику. Разом з невідтворюваністю параметрів низки елементів НВЧ тракту сенсора ці обставини значно зменшують використання НВЧ методу вологометрії, який має перевагу у експресності вимірювання.

З вітчизняних гігromетрів, що серійно випускаються і працюють на цьому принципі, на ринку представлений гігromетр «Аргон-м». Номенклатура зарубіжних гігromетрів значно ширша — це гігromетри «Shaw», «Dewlux», «Panametrics Ltd», «Hygrolog WMY 770Z», «Marquis», «Dewmatics», «ИВА» та ін.

Серед численних вологомірів, що використовуються для лабораторного аналізу вологості газу, лише лічені одиниці здатні працювати в потоці. На сьогодні можна виділити чотири основних типи таких вологомірів: вимірюють температуру конденсації пари води на охолоджуваному дзеркалі; з електролітичною коміркою на основі  $P_5$  оксиду фосфору; вологоміри, що використовують ємнісні сенсори  $Al_2O_3$  або  $Si_2$ ; що реалізують принцип мікровоаг на основі  $P_5$  езокристалів зі спеціальним покриттям.

Сенсори оксидом металу Іна сьогодні є поширеним пристроєм для вимірювання точки роси, також відомі як технологія оксиду алюмінію. Ці пристрої, зазвичай, призначені для вимірювань з низькою температурою точки роси. Вони невеликі за розміром, і їх часто можна розмістити на стінках або каналах в промислових умовах. Гігromетри з оксиду металу, зазвичай, менш точні ніж дзеркальні пристрої, і не вважаються ефективними для тривалого використання. Сенсори, чутливі до факторів навколишнього середовища, можуть бути легко знищені, якщо вони потрапляють у вологі умови. Через таку чутливість необхідна регулярна перевірка та повторне калібрування.

Відомі також сенсори хлориду літію, що використовуються завдяки високій надійності та відносно простому конструюванню. Вони вигідніші порівняно з електричними пристроями вологості, оскільки не дуже забруднюються. Промислове використання цього пристрою включає вимірювання для сушарок та холодильного обладнання. Кожен такий сенсор складається з металевих трубок, насичених розчином хлориду літію і намотаних дротами, які підключені до джерела живлення. Зазвичай, ці датчики використовуються для промислового використання, що вимагає невисокої точності.

Коаксимальний резонатор з торцевою вимірювальною апертурою показаний на рис. 9.

Для обчислення електричних властивостей матеріалу за параметрами резонатора необхідно знати картину поля, відповідно до прийнятого типу коливань в використуваному резонаторі.

Застосування у вологомірах добре розробленої техніки резонаторних методів зустрічає такі перешкоди:

а) необхідність введення в резонансну порожнину невеликого зразка строго визначених розмірів і форми виключає можливість безперервних вимірювань і сильно ускладнює дискретні вимірювання;

б) використовуються вимірювальні схеми, розраховані на роздільне визначення дійсної та уявної частини діелектричної проникності непридатні або занадто складні для вологомірів (особливо автоматичних); додаткові труднощі зумовлені збільшенням пологості та ширини резонансних кривих з ростом вологості.

В енергетиці та для вимірювання нафтохімічних процесів застосовуються полімерні сенсори для вимірювання точки роси. Ці сенсори використовуються для вимірювань з низькою температурою точки роси. Помітною перевагою таких сенсорів є його довготривала стабільність та ефективність у процесах, які вимагають мінімального обслуговування.

На сьогодні можна виділити п'ять основних типів таких вологомірів: дієлькометричні, конденсаційні, електролітичні на основі п'ятиокису фосфору, ємнісні на основі  $Al_2O_3$  або  $Si_2$ , вологоміри, що реалізують принцип мікроваг на основі п'єзокристалів зі спеціальним покриттям.

На основі проведеного аналізу методів і засобів в таблиці подані основні технічні характеристики основних методів і умови їх використання, що використовуються для вимірювання вологості природного газу в потоці.

**Порівняння характеристик засобів найрозповсюдженіших методів вимірювання вологості природного газу, що використовують в потоці**

Метод Параметри	Дієлькометричний	Конденсаційний	Ємнісний	Мікроваг	Електролітичний
Робочий тиск, МПа	1...15	1...10	1...10	1...3	0,07...0,7
Робоча температура, С	-30...110	-40...50	-30...110	До 50	0...50
Відносна вологість, %	0...80	0...98	0...100	0...100	0...100
Абсолютна вологість, г/м <sup>3</sup>	0...18	0...20	0...18	0...30	0...30
Відносна похибка, %	+/-2...3	+/-1,5	+/-3...5	+/-10	+/-5
Чутливість, г/м <sup>3</sup>	5...8	6...8	6...8	6...8	6...8

### Висновки

Проаналізовано методи вимірювання вологості газу та впливу НВЧ випромінювання на газове середовище. Запропоновано класифікацію методів вимірювання вологості природного газу. Розглянуті основні методи, що використовуються для вимірювання вологості природного газу, наведені основні технічні характеристики відповідних засобів і умови їх використання. Детально розглянуто як перспективні НВЧ методи вимірювання вологості газів.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] С. В. Лозинський, В. О. Бакастов, і І. А. Гордієнко, «Як виміряти вологість природного газу,» *Нафтова та газова промисловість*, № 5, с. 60-63, 1998.
- [2] О. І. Бакуменко. «Нові розробки у галузі визначення температури точки роси природного газу,» *Трубопровідний транспорт*, № 4 (94), с. 16-26, 2015.
- [3] Н. И. Кошкин, *Справочник по элементарной физике*. М.: Наука, 1972, 256 с.
- [4] С. Y. Lee, and G. V. Lee, "Humidity sensors: a review," *Sensor Letters*, no. 3, pp. 1-15, 2005.
- [5] Z. M. Rittersma, "Humidity sensor," *Enycl. Sensors*, no. 4, pp. 481-509, 2006.
- [6] H. Farahani, R. Wagiran, and M. N. Hamidon, "Humidity sensors principle, mechanism, and fabrication technologies: a comprehensive review," *Sensors*, no. 14, pp. 7881-7939, 2014.
- [7] Z. Chen, and C. Lu, "Humidity sensors: a review of materials and mechanisms," *Sensor Letters*, no. 3, pp. 274-295, 2005.
- [8] Н. П. Богородицкий, В. В. Пасынков, и Б. М. Тареев, *Электротехнические материалы*. М.: Энергоатомиздат, 1985, с. 384.
- [9] Й. Й. Білінський, і В. В. Онушко, *Метод і оптико-електронний засіб вимірювального вимірювання вологості природного газу*. Вінниця : ВНТУ, 2014, с. 132.
- [10] М. Н. Мухитдинов, и Э. С. Мусаев, *Оптические методы и устройства контроля влажности*. М.: Энергоатомиздат, с. 96, 1986.
- [11] «Анализаторы влажности на основе пьезокристалла,» *Законодательная и прикладная метрология*, № 1, 1997.
- [12] С. А. Дмитриев, П. А. Федюнин, и Д. А. Дмитриев, «Микроволновой контроль влажности капиллярно-пористых материалов,» *Тезисы докладов VI Международной теплофизической школы «Теплофизические измерения при контроле и управлении качеством»*, 1-6 октября, 2007, г. Тамбов: ТГТУ, 2007.
- [13] А. А. Брандт, *Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах*. М.: Физмат-гиз, 1963, с. 403.
- [14] В. А. Истомина, «Влагомеры конденсационного типа,» *Газовая промышленность*, № 12, с. 39-41, 2000.
- [15] И. В. Лебедев, *Техника и приборы СВЧ*. М.: Высшая школа, 1972, 374 с.
- [16] К. Гупта, Р. Гардж, Р. и Чадха, *Машиное проектирование СВЧ-устройств*, пер. с англ. М.: Радио и связь, 1987, 428 с.
- [17] Н. А. Малков, и В. П. Шелуховостов, *Микроэлектронные устройства СВЧ*. Тамбов: изд-во Тамб., 2000, 124 с.
- [18] А. М. Чернушенко, Н. Е. Меланченко, Л. Г. Малорацкий, и Б. В. Петров, *Конструирование СВЧ-устройств и экранов*, А. М. Чернушенко, Ред. М.: Радио и связь, 1983, 400 с.

- [19] В. А. Воробьев, В. Ф. Михайлов, А. А. Харитонов, *СВЧ диэлектрики в условиях высоких температур*. М.: Сов. радио, 1977, 203 с.
- [20] П. А. Федюнин, и В. А. Тетушкин, «Термовлагодетрический метод сканирования и обработки информативного СВЧ поля падающей и отраженной волн. Повышение эффективности средств обработки информации на базе математического моделирования,» *Материалы VII Всерос. науч.-техн. конф.*, 27–28 апреля 2004 г., Тамбовский ВАИИ. Тамбов: ТВАИИ, 2004.
- [21] A. Sun, Z. Li, T. Wei, Y. Li, and P. Cui, “Highly sensitive humidity sensor at low humidity based on the quaternized polyurethane composite film,” *Sensors and Actuators. B: Chemical*, no. 142, pp. 197-203, 2009.
- [22] Ю. М. Поплавко, В. І. Молчанов, і В. А. Казміренко, *Мікрохвильова діелектрична спектроскопія*. Київ, Україна: КПІ, 2011, 304 с.
- [23] І. М. Бондаренко, Ю. О. Гордієнко, і О. Ю. Панченко, *Напрями та проблеми мікрохвильових досліджень вологовмісних матеріалів та структур*, А. М. Панов, Ред. 2019, 320 с.
- [24] Д. В. Новицький, Й. Й. Білинський, і О. С. Городецька, «НВЧ вологомір рідких і газоподібних вуглеводів,» *МПК Н02М 3/00, № u 2019 08056*, Бер. 10, 2020.
- [25] C. Bernou, D. Rebière, and J. Pistré, “Microwave sensors: a new sensing principle application to humidity detection,» *Sensors and Actuators B: Chemical*, no. 68, 2000.

Рекомендована кафедрою фізики ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 10.02.2022

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

**Красносельський Віталій Валерійович** — аспірант кафедри фізики, e-mail: wommerses@gmail.com .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

**Yo. Yo. Bilynskyi<sup>1</sup>**  
**V. V. Krasnosielskyi<sup>1</sup>**

## Microwave Methods and Means of Humidity Measurement Natural Gas

<sup>1</sup>Vinnitsia National Technical University

*It is established that the most informative and meaningful indicator of humidity in gas hygrometry is the value of dew point temperature — the value of gas temperature at which water vapor contained in isobarically cooled gas becomes saturated above the flat surface of water. Regulatory documents often indicate the dew point temperature of moisture, as this figure is informative. When operating main gas pipelines, it is very important to know the true value of such an indicator of natural gas quality as humidity. When gas dehumidifiers are ineffective, moisture condenses on the inner surface of the main gas pipeline and gas equipment. The latter becomes a source of serious problems: capacity is reduced, there are conditions for the formation of crystal hydrates. Issues related to the existing main methods of measuring the humidity of the gas, their classification, according to which the measurement methods are divided into evaporative-psychrometric, sorption, condensation, physical, chemical and physico-chemical. The state of the issue of gas humidity measurement methods is analyzed, the main shortcomings of the methods are identified and the main issues of the dew point methods are analyzed. The condensation method for measuring gas humidity is the most suitable for use in the gas industry. The review of gas humidity measuring instruments by dew point temperature is performed, the physical bases of measurement processes and their shortcomings are analyzed. Currently known methods of measuring gas humidity do not allow to achieve the required accuracy and speed of humidity measurement, provided that it is the most important parameter for determining gas quality, due to the complexity of measurement due to additional components in the gas and aggressive environment. It also makes it difficult to measure two or more humidity indicators at the same time. Taking into account all the above shortcomings, it is necessary to further improve and refine the method of measuring and determining the dew point temperature of natural gas.*

**Keywords:** dew point temperature determination methods, natural gas, condensation methods, hygrometer.

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

**Krasnosielskyi Vitalii** — Post-Graduate Student of the Chair of Physics, e-mail: wommerses@gmail.com