

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

Й. Й. Білинський, В. В. Онушко

**МЕТОД І ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИЙ ЗАСІБ
ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ
ВОЛОГОСТІ ПРИРОДНОГО ГАЗУ**

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2014

УДК 681.121.4
ББК 30.10+32.86-5
Б61

Рекомендовано до видання Вченої радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 11 від 26.06.2013 р.)

Рецензенти:

Є. П. Пістун, доктор технічних наук, професор;
О. Є. Середюк, доктор технічних наук, професор.

Білинський, Й. Й.

Б61 Метод і оптико-електронний засіб вимірювального контролю вологості природного газу : монографія / Й. Й. Білинський, В. В. Онушко. – Вінниця : ВНТУ, 2014. – 132 с.

ISBN 978-966-641-555-7

Робота спрямована на розв'язання актуальної задачі підвищення вірогідності контролю вологості природного газу на основі використання відмінностей у поглинаючих властивостях інфрачервоного випромінювання, що проходить через сухий природний газ і водяну пару. Наведені удосконалені математичні моделі перенесення випромінювання в середовищі вологого газу, інфрачервоного вимірювального перетворювача вологості на основі використання зворотних зв'язків, інфрачервоного двоканального засобу контролю вологості та розроблено принципово новий засіб контролю вологості зі стабільними метрологічними та експлуатаційними характеристиками.

УДК 681.121.4
ББК 30.10+32.86-5

ISBN 978-966-641-555-7

© Й. Білинський, В. Онушко, 2014

ЗМІСТ

Вступ.....	5
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ЗОСОБІВ КОНТРОЛЮ ВОЛОГОСТІ ПРИРОДНОГО ГАЗУ	9
1.1 Класифікація та аналіз методів вимірювального контролю вологості газу	9
1.1.1 Прямі методи вимірювання вологості газу	11
1.1.2 Температурні методи вимірювання вологості газу	13
1.1.3 Методи засновані на сорбції водяної пари	16
1.1.4 Методи основані на фізичних властивостях газів	22
1.2 Огляд сучасних приладів вимірювання вологості газів	31
1.3 Вибір критерію оцінки ефективності вимірювальних перетворювачів.....	38
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ІНФРАЧЕРВОНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ВОЛОГОСТІ ПРИРОДНОГО ГАЗУ	43
2.1 Аналіз взаємодії оптичного випромінювання з газовим середовищем.....	43
2.2 Дослідження об'єкта контролю та шляхи знаходження його відносної вологості	51
2.3 Розробка двочастотного інфрачервоного методу контролю вологості природного газу	58
2.4 Математична модель двоканального вимірювального перетворювача вологості природного газу	60
2.5 Математична модель вимірювального перетворювача вологості природного газу зі зворотним зв'язком.....	64
2.6 Математична модель двоканального вимірювального перетворювача вологості природного газу зі зворотними зв'язками	67
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА ІНФРАЧЕРВОНОГО ЗАСОБУ КОНТРОЛЮ ВОЛОГОСТІ ПРИРОДНОГО ГАЗУ	70
3.1 Розробка структурної схеми засобу контролю вологості газу....	70
3.2 Перетворення та обробка вимірювальної інфомації. Виведення функції перетворення засобу контролю вологості.....	72

3.3 Моделювання процесу лінеаризації статичної характеристики вимірювального перетворювача.....	77
3.4 Аналіз статичних метрологічних характеристик засобу контролю вологості газу	78
3.5 Аналіз похибок засобу контролю вологості природного газу	82
3.5.1 Встановлення діапазону вимірювання вологості.....	84
3.5.2 Дослідження похибки квантування (похибки АЦП).....	85
3.5.3 Оцінювання загальної похибки вимірювання вологості	87
3.6 Оцінювання вірогідності контролю вологості природного газу	89
РОЗДІЛ 4 АПАРАТНО-ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАСОБУ КОНТРОЛЮ ВОЛОГОСТІ ГАЗУ	92
4.1 Розробка інженерної методики проектування засобу контролю вологості газів	92
4.2 Апаратна та програмна реалізація засобу контролю вологості природного газу	97
4.2.1 Алгоритм контролю вологості.....	97
4.2.2 Розробка електричної схеми та конструкції засобу контролю вологості.....	100
4.3 Експериментальні дослідження засобу контролю вологості природного газу	107
ЛІТЕРАТУРА	118

ВСТУП

Актуальність теми. В умовах неперервного зростання об'ємів споживання природного газу та підвищення світових цін на нього, щоразу актуальнішими стають вимоги до якості газу. Одним із основних шляхів підвищення якості газу є контроль його вологості, оскільки волога заміщує певну кількість газу, що має особливе значення при великих об'ємах газу.

Вологість газу є одним з основних параметрів при видобутку, транспортуванні й переробці природного (або попутного нафтового) газу. Надійне й точне вимірювання цього параметра необхідно на всіх етапах – від свердловини до газопереробного заводу, що істотно впливає на економічність й ефективність процесів. Задачу вимірювання та контролю вологості можна розділити на три великі групи відповідно до технологічних процесів газової промисловості, а саме: у процесах осушування газу на родовищах; газопереробних заводах; у комерційному обліку газу. Контролювати вологість потрібно постійно, оскільки при дроселюванні газу через ефект Джоуля-Томсона утворюється водяний конденсат.

Вологовміст у газі – параметр, що також грає істотну роль при забезпеченні якості та характеристик високотехнологічних технічних і промислових процесів. Кількісно цей параметр може характеризуватися різними фізичними величинами, серед яких найрозповсюдженішими є абсолютна вологість, молярна (об'ємна) частка вологи, об'ємний вологовміст, температура точки роси, відносна вологість.

На відміну від лабораторного аналізу в потоці виникає низка додаткових факторів, наявність яких суттєво утруднює його вимірювання. Основні з них – це:

- здатність деяких природних компонентів газу (вищих та ароматичних вуглеводнів) випаровуватись та конденсуватись за тих же умов, що й водяна пара, внаслідок чого необхідно окремо вимірювати температуру точки роси за водою $T_{TP_{\text{вод}}}$ та за вуглеводнями $T_{TP_{\text{вугл}}}$;
- наявність гідрофільних домішок, наприклад, етанол або діетиле-н-гліколь, які приводять до зміщення умов гідродинамічної рівноваги в системі «вода–водяна пара» і не розпізнаються промисловими аналізаторами;

- наявність гідрофобних домішок – висококип'ячих вуглеводів або парів компресорного масла, які утворюють гідрати при наявності конденсату води та блокують поверхню чутливого елемента аналізатора;
- домішки CO_2 і H_2S , які утворюють кислоти в результаті реакції з конденсатом води;
- змінний склад природного газу, який впливає на результат вимірювання та контролю;
- тривалий час вимірювання при визначенні малих концентрацій (від 10 хв. до годин), оскільки водяна пара здатна утворюватися та конденсуватися з різною швидкістю, залежно від значень термодинамічних параметрів;
- наявність механічних домішок, які забруднюють елементи вимірювальних трактів приладів;
- наявність адіабатичного процесу, тобто показників, які його характеризують – тиск, об'єм, теплоємність.

Огляд методів вимірювання вологості газів виявив, що похибка вологомірив коливається від 0,1 % до 5 %. Це досить висока точність, але не у випадку, коли йдеться про дуже великі об'єми газу. Значення відносної вологості за стандартних умов повинно бути меншим за 0,1 % (згідно з технічними вимогами Правил РД 50-213-80, що відповідає точці роси $-58,21$ °С при нормальних умовах [1, 2]).

Серед численних аналізаторів, що використовуються для лабораторного аналізу вологості газу, лише лічені одиниці здатні працювати в потоці. На сьогодні можна виділити чотири основних типи таких аналізаторів: аналізатори, що вимірюють температуру конденсації пари води на охолоджуваному дзеркалі; аналізатори з електролітичною коміркою на основі п'ятиокису фосфору; аналізатори з використанням ємнісних сенсорів Al_2O_3 або Si_2 ; аналізатори, що реалізують принцип мікроваг на основі п'єзокристала зі спеціальним покриттям.

Незважаючи на розбіжності в способах вимірювання першими трьома типами аналізаторів, всі вони реалізують рівноважний принцип вимірювання. Це означає, що для достовірних вимірювань необхідне встановлення рівноваги за водою в аналізованому газі й на чутливому елементі аналізатора. Це вимагає значних затрат часу. Тривалий час вимірювання утруднює визначення малих концентрацій (менше 20 ppm), тому що для утворення видимої плівки конденсату на дзеркалі може знадобитися кілька годин. Інше природне обмеження

пов'язане з тим, що домішки, які утримуються в природному газі, такі як метанол, розчиняються у воді, що конденсується на поверхні дзеркала. Температура точки роси розчину може істотно відрізнятись від її значення для чистої води. Якщо в багатокомпонентному середовищі – а саме таким є природний газ – температура конденсації будь-якого компонента вища точки конденсації парів води, то аналізатор може сприйняти цю температуру як дійсну.

Таким чином, результати аналізу сучасного стану приладів і систем вимірювання вологості свідчать про необхідність розробки нових підходів і пошуку нових технічних рішень, що дозволять підвищити технічні й експлуатаційні характеристики засобів вимірювання та контролю вологості щодо умов роботи в середовищі потоку природного газу, що істотно відрізняються від лабораторних.

На основі вищесказаного аналізатори вологості повинні задовольняти такі основні вимоги:

1. Забезпечувати безперервний автоматичний контроль вологості або температур точки роси природного газу за водою незалежно від їхнього компонентного складу, способу технологічної підготовки, кількості технологічних домішок.

2. Швидкий відгук, щоб уникнути перекачування великого об'єму некондиційного продукту.

3. Виключення впливу агресивних домішок, а також перекручування результатів вимірювання газу від впливу спиртових з'єднань.

4. Низька похибка і відтворюваність результатів вимірювання.

5. Вбудовані засоби перевірки достовірності показів приладу без демонтажу польового блока й зупинки процесу, що дозволяють швидко усунути розбіжності між постачальником і споживачем у спірних ситуаціях.

Застосування неконтактних методів вимірювання дозволяє виключити вплив агресивних домішок, а також перекручування результатів вимірювання вологості газу внаслідок впливу спиртових сполук. Кількісна спектроскопія найбільш повно реалізує переваги неконтактного методу вимірювання вологості газу при використанні сучасних вискоефективних напівпровідникових лазерів [2, 3, 4]. Найбільш цікавими для кількісної спектроскопії є лінії електронних переходів ультрафіолетової (УФ) (довжина хвилі менш 120 нм) та інфрачервоної частини спектрів. Використання інфрачервоного діапазону, що впливає

на параметри ліній поглинання, виправдано у зв'язку з прогресом у створенні ІЧ світло- і фотодіодів, які придатні для застосування в спектральних аналізаторах. При цьому необхідно реєструвати параметри тиску й температури газу.

Поглинання випромінювання атомами й молекулами речовини та трансформування надлишкової енергії збудження відбувається як за рахунок водяної пари, так і за рахунок газу. Тому для отримання необхідної чутливості й точності при побудові сенсорів вологості важливим є вибір довжини хвилі з урахуванням того, що поглинання випромінювання відбувається як в першому, так і в другому випадку. У зв'язку з цим постає задача вимірювання вологості газу шляхом створення моделі перенесення випромінювання в ньому, яка б враховувала вищенаведені параметри. А вдосконалення сенсорів і систем вимірювального контролю вологості газових середовищ повинно бути направлене на підвищення їх чутливості, точності, вірогідності контролю та стабільності роботи, які задовольняють вищенаведені вимоги і найбільш повно реалізують переваги неконтактного методу.

Метою цієї роботи є підвищення вірогідності вимірювального контролю вологості газу на основі використання відмінностей у поглинаючих властивостях інфрачервоного випромінювання, що проходить через сухий природний газ і водяну пару.

Монографія складається зі вступу, чотирьох розділів і містить бібліографічний список із 138 найменувань.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ЗОСОБІВ КОНТРОЛЮ ВОЛОГОСТІ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

Для вимірювання і контролю вологості в газових середовищах застосовуються гігрометри, в основі яких лежать різні методи вимірювання вологості. Залежно від поставленої вимірювальної задачі, визначається вибір того чи іншого методу у кожному конкретному випадку [1, 2].

1.1 Класифікація та аналіз методів вимірювального контролю вологості газу

Для визначення вологості можна використовувати будь-яку властивість самої речовини, функціонально пов'язаної зі вмістом у ній води: масу, щільність, в'язкість, поверхневий натяг, діелектричну проникність, електропровідність, окислювально-відновний потенціал, теплопровідність та інші. Методи вимірювання вищенаведених фізичних і фізико-хімічних характеристик речовини добре розроблені, а апаратура і прилади цілком доступні. Але складність використання таких сенсорів полягає у пошуку таких експериментальних умов, які б відповідали найвищій чутливості та стабільності показів, що не завжди можна досягти [5].

Інша велика група методів оснований на використанні хімічних і фізико-хімічних властивостей самої води. До числа останніх відносять здатність молекул води вступати в хімічні реакції з багатьма речовинами. Можна скористатися також властивостями абсорбування води різними речовинами і поверхнями, тиску водяної пари, поглинання електромагнітного випромінювання в ультрафіолетовому, видимому, інфрачервоному і ультракороткому діапазонах, поглинання ядерного випромінювання тощо [6].

На основі проведеного літературного огляду розроблено класифікацію методів вимірювання вологості газу, яка наведена на рис. 1.1.

Всі методи вимірювання вологості газів можна розділити на прямі і непрямі [7–11].

Прямі методи оснований на безпосередньому розділенні вологи і сухого газу з подальшим визначенням кількості вологи. У цю катего-

рію входять методи повного поглинання: гравіметричний, хімічний і конденсаційно-згущувальний [5, 7].

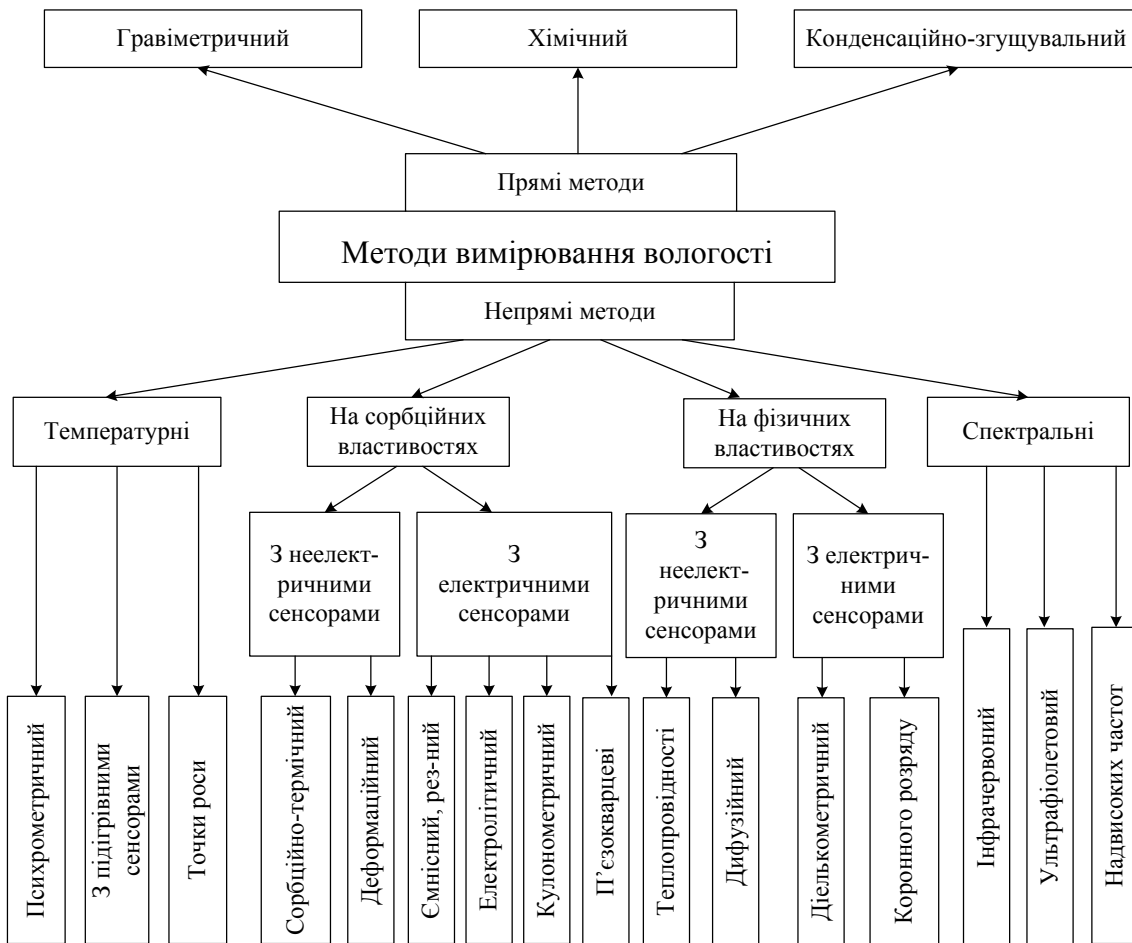


Рисунок 1.1 – Класифікація методів вимірювання вологості природного газу

У непрямих методах вимірюється та або інша фізична величина, функціонально пов'язана з вологовмістом газу. До найпоширеніших в сучасній вимірювальній практиці методів можна віднести температурний або конденсаційний метод, методи, які основані на сорбційних і фізичних властивостях середовища, спектральні методи [12, 13].

До температурних методів, в яких вологість газу пов'язана з температурою, віднесені методи: психрометричний, точки роси і метод на основі електролітичних підігрівних сенсорів [14].

Велику групу методів, основаних на явищах сорбції водяної пари, можна розділити за характером величини, в яку перетвориться вологість, на дві підгрупи. У першу підгрупу входять методи, де вихідна

величина первинного перетворювача є неелектричною. До них відносяться деформаційний, сорбційно-термічний. Причому останній метод вимірювання можна віднести і до температурних. Методи, основані на використанні електричних пірометричних сенсорів (адсорбції та абсорбції, електролітичні, кулонометричні), утворюють другу підгрупу сорбційних методів, особливістю якої є електрична природа вихідної величини первинного перетворювача. Наступна група основана на вимірюванні різних фізичних властивостей досліджуваного газу – неелектричних (теплопровідності, акустичних характеристик і т. п.) або електричних [15, 16].

Умовно виділені в самостійну групу спектральні методи, в яких використовуються кількісні оцінки фізичних властивостей вологого газу в різних ділянках спектра електромагнітних коливань – інфрачервоному, ультрафіолетовому або надвисоких радіочастот. Сюди включені і радіометричні методи [6].

Методи, що відносяться до однієї чи різних груп, відрізняються за такими аналітичними характеристиками, як чутливість, точність, діапазон вимірюваних концентрацій, тривалість вимірювання, специфічність та ін. У таблиці 1.1 наведені найпоширеніші методи вимірювання вологості та їх допустимі параметри, де вплив забруднення аналізованого середовища на точність вимірювань позначається від (+) – мінімального до (+++) – значного впливів.

У ГОСТ 20060-83 визначено лише три методи визначення вологості газу, такі як конденсаційний, електролітичний і абсорбційний, але на сьогодні у зв'язку з потребами різко зростає кількість методів і приладів на їх основі, які придатні до високоточного вимірювання вологості газу [4, 17].

1.1.1 Прямі методи вимірювання вологості газу

Гравіметричні методи – це методи опосередкованого вимірювання вологості, який полягає у виділенні вологи з газового середовища і безпосереднього вимірювання маси або об'єму вологої речовини та її сухої частини або виділеної вологи. Розрізняють сорбційно- й конденсаційно-гравіметричні методи вимірювання вологості газу.

Конденсаційно-згущувальні методи сновані на конденсації водяної пари при штучному охолодженні вологого газу і вимірюванні кількості конденсату, що утворився при проходженні відомої кількості газу через холодильник. Для охолодження газу знайшли практич-

не застосування прості способи пропускання газу через трубку, поміщену у ванну з льодом, або найчастіше (при вимірюваннях вологості газів з високою температурою), через холодильник, що має водяну сорочку з циркуляцією водопровідної води [3, 4, 18–21].

Таблиця 1.1 – Найпоширеніші методи вимірювання вологості

Метод вимірювання	Типовий діапазон		Вплив забруднення	Тип пробовідбору	Похибка вимірювання
	Вологість	Температура			
Психрометричний	5...100 %	Довкілля	+++	Занурювальний	5...15 %
Ємнісний	2...98 %	-30...+60 °С	++	Проточний/ занурювальний	1...3 %
Ємнісно-оксидний	-90...+60 °С т. т. р.	До +60 °С Вологість < 50 %	++	Проточний	1...5 °С т. т. р.
Конденсаційний	-100... +100 °С т. т. р.	-90...+90 °С	+	Проточний/ занурювальний	0,2...1,0 °С т. т. р.
Кулонометричний	<1 ррт... 1000 ррт	Довкілля	+	Пробовідбір	3...10 %
Спектральний	Від <1 ррт до насичення	Довкілля	++	Проточний/ занурювальний	3...10 % і вище
Резистивний	3...95 %	-30...+60 °С	++	Проточний/ занурювальний	2...3 %

Вимірювання малої і дуже малої вологості можливе при глибокому охолодженні аналізованого газу. У сучасних гігрометрах цього типу для вимірювання кількості газу та конденсату використовуються електричні сенсори й електронні прилади, а весь процес вимірювання виконується автоматично. Результат вимірювання вологості визначається не тільки відношенням кількості конденсату в мірній посудині до кількості газу, але також і температурою охолодження та тиском газу в системі. Температуру і тиск газу необхідно підтримувати постійними або вводити відповідні поправки в результат вимірювання. Точність вимірювання підвищується зі збільшенням кількості конденсату, тобто при збільшенні об'єму газу і підвищенні його волого-

вмісту. У сучасних гігрометрах цього типу витрати газу стабілізують або вимірюють кількість газу за допомогою витратомірів (електронних з звужуючими пристроями, ротаметрами), забезпечених інтеграторами. Мінімальна тривалість одного циклу вимірювання при заданих значеннях максимальної вологості, витрати газу і допустимої похибки визначається глибиною охолодження [22].

Основна область застосування конденсаційних гігрометрів – вимірювання абсолютної вологості газів при високих температурах. При цьому позитивною властивістю методу є те, що газові домішки, що не конденсуються при температурі охолодження, не впливають на результати вимірювання.

Основою хімічних методів є обробка зразка газу реагентом, який вступає в хімічну реакцію тільки з вологою, що міститься в зразку. Кількість води в зразку визначається за кількістю рідкого або газоподібного продукту реакції. Найбільш поширеним хімічним методом є карбідний (газометричний) метод. Кількість виділеного ацетиленового газу внаслідок реакції вологого газу з карбідом кальцію визначають вимірюванням його об'єму або за підвищеним тиском в щільно закритому об'ємі. Зазвичай прилад градууюють емпірично, оскільки практично не вся вода бере участь в реакції і кількість виділеного ацетилену не відповідає рівнянню реакції. Менш поширений хімічний метод визначення вологості за підвищенням температури внаслідок хімічної реакції реагенту з вологою речовини. Найчастіше як реагент використовується сірчана кислота. Підвищення температури суміші карбіду кальцію з матеріалом можна використовувати також в карбідному методі, оскільки реакція води з CaC_2 протікає з виділенням тепла [23–27].

Метод має низку недоліків, головним з яких є час вимірювання, що становить від десятків секунд до десятків хвилин, залежно від концентрації вологості [1].

1.1.2 Температурні методи вимірювання вологості газу

До температурних методів, в яких вологість газу пов'язана з температурою, віднесені психрометричний, точки роси і метод заснований на застосуванні електролітичних підігрівних сенсорів.

Психрометричний метод є одним із досить старих та поширених в промисловості, метеорології та наукових дослідженнях методів вимірювання вологості повітря при додатних температурах. Він оснований

на залежності між вологістю повітря та різницею показів сухого t_c і мокрого t_m термометрів, так званою «психрометричною різницею». Але досі немає універсальної теорії психрометра, що достатньо повно враховує всі чинники. Практично основою психрометричних вимірювань слугують напівемпіричні психрометричні формули [28].

Серед зовнішніх умов на роботу психрометрів найбільше впливає швидкість газу. Із зростанням швидкості потоку посилюється випаровування та зменшується спотворювальний вплив притоку тепла (радіаційного та від теплопровідності) в тепловому балансі мокрого термометра.

Застосування психрометрів без примусової вентиляції, що збереглося в лабораторній практиці і в метеорологічних вимірюваннях, приводить до значних похибок, особливо при використанні психрометричних таблиць, складених для певної швидкості повітря. В цьому випадку варто в результат вимірювання вводити поправку на реальну швидкість повітря, що омиває мокрий термометр. Вказана похибка може бути досить значною при вимірюванні низької відносної вологості [5].

Похибки, пов'язані із швидкістю повітряного потоку, залежать від форми і розмірів (діаметр, довжина) термочутливого елемента. Вони зменшуються у сенсорів з мініатюрними чутливими елементами (спаї термопар, виготовлених з тонких провідників, напівпровідникові мікротермістори і т. п.), оскільки в цьому випадку необхідна швидкість вентиляції істотно знижується. Додаткові утруднення виникають, якщо вимірювання виконуються при від'ємних або високих додатних температурах. При низьких температурах відносна похибка вимірювання психрометричної різниці збільшується, оскільки величина цієї різниці значно зменшується з пониженням температури. Верхня межа температур також обмежена. Прийнято вважати, що психрометри можна застосовувати (при атмосферному тиску) в межах до $+100\text{ }^\circ\text{C}$. З підвищенням температури збільшується вплив радіаційного притоку тепла на температуру мокрого термометра [9].

Основними перевагами психрометрів є їх невисока вартість при високій надійності і стабільності, широкий діапазон вимірювання, можливість роботи при підвищеній температурі і в умовах конденсації. До недоліків відносяться інерційність вимірювання, зволоження аналізованого середовища в процесі експлуатації, менша порівняно з

іншими методами точність вимірювань, необхідність регулярного обслуговування.

Найширше застосування в галузі вимірювання вологості газів знайшли гігрометри точки роси. Термін «точка роси» як характеристика вологості газу, виражена в одиницях термометричної шкали, введена у гігрометрію в зв'язку зі створенням конденсаційного гігрометра, призначеного переважно для аналізу атмосферного повітря. У визначенні точки роси, наведеному в [10], фігурує тільки вологе повітря. У стандарті, що діяв до недавнього часу [11], дано таке визначення точки роси: «Точка роси – температура, при якій конденсується водяна пара у вологому газі, охолоджуваному ізобарно».

З такого визначення випливає, що представленню t_d у чисельному вигляді повинно передувати переведення цієї макроскопічної гомогенної двокомпонентної системи газ–водяна пара з початкового стану в кінцевий стан насичення через ізобаричне охолодження. При цьому мова йде про температуру кінцевого рівноважного стану системи, а не про температуру, при якій фазовий перехід у ній фактично починається. Система в кінцевому рівноважному стані являє собою газову фазу, що стикається з плоскою поверхнею вологи в конденсованому стані, що має однакові з розглянутою системою значення температури і тиску. Наслідком такого зіткнення буде тільки зміна характеру рівноваги. Зі статичної рівноваги система перейде в стан двофазної динамічної рівноваги.

Система в такому стані відповідно до правила фаз Гіббса є біваріантною, тобто має два ступеня свободи. Звідси випливає, що чисельне значення t_d при такій вологості газу обов'язково повинно супроводжуватися ще і відомостями про тиск газу [12]. Більше того, тому самому значенню t_d при такому тиску можуть відповідати неоднакові значення вмісту вологи в різних за своєю природою газах. Одним зі способів вирішення цієї проблеми є приведення значення t_d , що відповідає реальному тиску газу, до значення $t_{d, 101,3}$, що відповідає нормальному тиску 101,3 кПа. При нормальному тиску поведіння багатьох технічних газів і їхніх сумішей мало відрізняється від поведінки ідеального газу. У такому випадку відпадає необхідність у вказівці природи газу, а отримане значення $t_{d, 101,3}$ досить просто переводити у відповідні значення інших характеристик вологості (об'ємних часток, во-

логовмісту, абсолютної вологості і т. д.). Відповідно, спрощується порівняльна оцінка гігрометрів різного принципу дії і забезпечується можливість однозначної інтерпретації результатів вимірювання вологості газів [29–33].

Приведення значень t_d до $t_{d101,3}$ може бути виконане з використанням як математичних залежностей значень t_d від параметрів стану по кривих фазових рівноваг, так і відповідних табличних, розрахункових чи експериментальних даних, номограм і т. п. [3].

1.1.3 Методи засновані на сорбції водяної пари

Велику групу методів, основаних на явищах сорбції водяної пари твердими і рідкими речовинами, можна розділити за характером величини, в яку перетвориться вологість, на дві підгрупи. Методи, основані на використанні електричних пірометричних сенсорів (адсорбційних і абсорбційних, електролітичних, кулонометричних), утворюють першу підгрупу сорбційних методів, особливістю якої є електрична природа вихідної величини первинного перетворювача. У другу підгрупу методів, де вихідна величина первинного перетворювача є неелектричною, до якої входять деформаційний, колірний і сорбційно-термічний, причому останній метод вимірювання можна віднести і до температурних [12, 13].

Електричні гігрометричні сенсори (ЕГС) мають чутливий елемент, виконаний з гігроскопічного матеріалу, який при вимірюваннях вологості знаходиться в гіротермічній рівновазі з контрольованим газом. Вихідною величиною ЕГС є той або інший електричний параметр вологочутливого елемента.

Нижче зроблено розподіл ЕГС на електролітичні, сорбційні і кулонометричні. Така класифікація дещо умовна, оскільки процеси сорбції і десорбції вологи відбуваються в сенсорах всіх трьох типів. Проте тоді як у сорбційних ЕГС тільки ці процеси визначають механізм дії сенсора, вологочутливі елементи сенсорів першої групи містять електроліти (розчини гігроскопічних солей або, рідше, кислот), які використовуються і як сорбент якості джерела іонів. Нарешті, в кулонометричних сенсорах паралельно з сорбцією і десорбцією вологи має місце її розкладання електролізом. У електролітичних ЕГС вихідною величиною, як правило, є електропровідність ненасичених водних розчинів неорганічних кислот або солей. Відомо, що при одній і тій же темпера-

турі тиск насиченого водяної пари над таким розчином нижчий, ніж тиск насиченої пари над поверхнею розчинника, тобто чистої води (закон Рауля). Чутливий елемент електролітичного ЕГС – це рідка або суха плівка електроліту, що поглинає вологу з навколишнього середовища до тих пір, поки тиск пари, що утворюється, над поверхнею розчину, не досягне рівноваги з тиском водяної пари навколишнього середовища. Подальша зміна вологості середовища залежно від знака цієї зміни викличе поглинання вологи чутливим елементом або випаровування її до досягнення нового стану рівноваги [34–40].

Опір електролітичної плівки R_x змінюється залежно від температури концентрації розчиненої речовини. Остання, у свою чергу, залежить від вологості навколишнього газу.

Для визначення статичної характеристики електролітичного ЕГС – функції $R_x(\varphi)$ необхідно знати:

- а) залежність концентрації електроліту, застосованого в чутливому елементі, від відносної вологості повітря φ ;
- б) залежність еквівалентної провідності від концентрації електроліту.

Електролітичні ЕГС на практиці градуують емпірично, оскільки наведений вище елементарний аналіз їх характеристик не враховує впливу низки чинників, зокрема, введення в електролітичну плівку речовин, що істотно діють при малих концентраціях розчиненої речовини.

Серед відомих електролітичних ЕГС можна виділити декілька типів, що відрізняються один від одного вологочутливим елементом. У простих ЕГС розчин електроліту знаходиться на поверхні водостійкої підкладки без застосування будь-яких допоміжних в'язучих або плівкоутворювальних матеріалів [35]. Не дивлячись на різноманітність конструктивного оформлення і способів виготовлення, електролітичні ЕГС мають низку загальних властивостей. У більшості сенсорів верхня межа вимірюваної вологості обмежена тим, що тривале перебування ЕГС в газі з відносною вологістю, близькою до 100 %, може викликати порушення градуювання і навіть руйнування чутливого елемента. Обмежена також і нижня межа; вона визначається значенням тиску водяної пари над насиченим розчином електроліту, застосуванням в цьому ЕГС. Якщо вологість досліджуваного газу зменшується нижче величини, при якій розчин електроліту ЕГС (при даній температурі)

стає насиченим, подальше випаровування води з електроліту викликає появу сухої речовини, що не проводить електричний струм.

Температура має значний вплив на основну характеристику ЕГС, оскільки обидві функції, що визначають властивості ЕГС (залежність концентрації електроліту від вологості і залежність його провідності від концентрації), у свою чергу залежать від температури. Неусувні похибки вимірювання можуть бути викликані гістерезисом характеристик сенсора, забрудненнями досліджуваного середовища і поляризацією електродів [14, 15, 28–39].

Сорбційні ЕГС можна розділити на адсорбційні і абсорбційні. В перших використовується явище адсорбції вологи зовнішньою поверхнею матеріалу у вигляді тонкого шару, а об'єктом вимірювання є електричні характеристики цієї поверхні (наприклад, поверхневий опір), обумовлені наявністю на ній водної плівки з іонами водорозчинних речовин. У ЕГС другої групи чутливим елементом є тонкий шар вологочутливого матеріалу на водостійкій підкладці або певний об'єм капілярнопористого матеріалу. Механізм роботи сенсорів другої групи аналогічний: водяна пара, що міститься в газі, поглинається капілярами всього об'єму чутливого елемента і змінює його об'ємні електричні характеристики. Наведене розділення сорбційних ЕГС на дві групи дещо умовне. Утворення на поверхні водної плівки у деяких матеріалів супроводжується зволоженням шарів матеріалу, що примикають до поверхні, електричні характеристики яких також впливають на результат вимірювання [40–55].

Статична характеристика абсорбції ЕГС – це залежність вихідної електричної величини від значення вимірюваної вологості газу – визначається двома функціями:

а) залежністю вологомісткості матеріалу чутливого елемента від вологості повітря, тобто ізотермами сорбції і десорбції матеріалу цього елемента;

б) залежністю вимірюваної електричної величини (опору в ланцюзі постійного або змінного струму, ємності, тангенса кута діелектричних втрат тощо) від вологомісткості чутливого елемента.

Рівноважна вологість матеріалу є його індивідуальною характеристикою, тому статичні характеристики, навіть у ЕГС одного типу, що мають вологочутливі елементи з різних матеріалів, не збігаються.

Статичну характеристику можна обчислити, якщо відомі вказані вище дві функції, але на практиці ЕГС градуують емпірично.

Як вже наголошувалося вище, поверхневий опір вимірюється тільки у тих ЕГС, у яких тонка водна плівка утворюється на гладкій поверхні водостійкого непористого діелектрика (скла, кварцу, деяких видів обпаленої кераміки тощо). Перевагами таких ЕГС є різкі зміни поверхневого опору з вологістю і мала інерція; поверхневий опір можна вимірювати при постійному струмі. Проте цей опір залежить від стану поверхні діелектрика і дуже чутливий до всякого роду забруднень поверхні і наявності в повітрі пари аміаку, спирту, ацетону та інших полярних рідин.

Із вказаних причин ЕГС чисто адсорбційного типу не знайшли широкого застосування. Підкладкою сенсорів спочатку слугувало переважно скло різних сортів; іноді його заздальгідь обробляли – термічним або іншим способом. У сучасних ЕГС перевагу віддають кварцу, найчастіше плавкому. На поверхню кварцової пластини напилюють електроди з благородних металів, наприклад, гребінчастої форми.

Значно більше поширені ЕГС з пористим діелектриком, у яких основним процесом є адсорбція вологи на внутрішній поверхні пор. Сенсори цього типу більш інерційні, ніж суто адсорбційні, але мають стійкіші характеристики. Відома велика кількість ЕГС цього типу, що мають як вологочутливий елемент тонкі шари різноманітних пористих матеріалів [8, 37].

Інші сорбційні ЕГС мають чутливий елемент – диск з бутирату ацетилцелюлози або інших ефірів целюлози, товщина якого не перевищує одного або декількох десятків мікрометрів. Електродами слугують вологопроникні шари графіту, нанесені на обидві поверхні диска.

У абсорбційних ЕГС використовується не тонкий шар, а певний об'єм гігроскопічного матеріалу. Більшість капілярнопористих матеріалів дуже легко поглинають вологу, але лише небагато з них так само легко віддають її та вільні від сорбційного гістерезису. Заповнення капілярів водяною парою викликає різке зменшення об'ємного опору; в той же час наявність розгалужених капілярів збільшує інерційність ЕГС цього типу. Крім того, їм властиві також гістерезис і нестабільність характеристик. Незважаючи на ці недоліки, було створено низку сенсорів цього типу з використанням різних твердих матеріалів або

окремих волокон і тканин з волокон. Чутливим елементом були, наприклад, скляне волокно або нейлонова тканина, затиснуті між двома перфорованими металевими пластинами, а також штучне волокно з вплетеними в тканину срібними нитками, що виконують роль електродів. Ширше застосування знайшли пористі керамічні матеріали, наприклад суміші з окислом цезію і двоокисом титану. Перевага цих сенсорів – здатність переносити тривалу дію газів з відносною вологістю, рівною 100 %. Найбільше практичне значення мають сорбційні сенсори таких типів: вугільні, п'єзокварцові і алюмінієвооксидні [5, 39, 54–57].

Вугільні ЕГС мають вологочутливий елемент у вигляді плівки гігроскопічної сполучної речовини, що містить у вигляді суспензії тонко розмелені частинки вугілля. Найчастіше сполучником слугує целюлоза або її з'єднання (наприклад, гідроксилетилцелюлоза або ацетилцелюлоза) з домішками желатину, а іноді і інших речовин. Вугілля часто вводиться в сполучник у вигляді сажі (ацетиленової). Вологочутлива плівка наноситься методом занурення (рідше накраплення) на основу – прямокутну пластину з твердого діелектрика (оргстекла або полістиролу).

Вихідною величиною вугільного сенсора слугує його електричний опір. Згідно із загальноприйнятою теорією провідність плівки змінюється в результаті її стиснення або розширення під впливом сорбованої вологи. Деформація плівки викликає переміщення провідних частинок вугілля. Деякі дослідники ставлять під сумнів деформаційний механізм дії сенсора і вважають його чисто сорбційним, обумовленим целюлозними складовими плівки [39].

П'єзокварцові сорбційні сенсори засновані на зміні параметрів (амплітуда і частота коливань) кварцового резонатора в результаті адсорбції вологи на його поверхні або сорбції вологи гігроскопічною плівкою, занесеною на поверхню кварцу. Основним чутливим елементом осередку аналізатора є кварцовий кристал зі спеціальним покриттям, що адсорбує воду. Частота вимірюваного кварцового генератора (власна частота 8,98 МГц) порівнюється із частотою стандартного генератора 9,00 МГц, також наявного в аналізаторі. Таким чином, зміна частоти пов'язана з адсорбцією води. Вихідною величиною вологочутливих елементів обох типів в більшості випадків слугує влас-

ЛІТЕРАТУРА

1. РД 50-213-80. Правила измерения расхода газов и жидкостей стандартными сужающими устройствами. – М. : Изд-во стандартов, 1981. – 319 с.
2. Крук І. С. Якість природних газів : довідник / І. С. Крук, О. М. Химко, О. І. Крук. – К.–Х. : НаукаУЦЕБОП, 2010. – 407 с.
3. Коряков В. И. Приборы в системах контроля влажности твердых веществ и их метрологические характеристики / В. И. Коряков, А. С. Запорожец // Практика приборостроения. – 2002. – № 1. – С. 5–11.
4. Ивченко Ю. А. Чем измерить влажность? / Ю. А. Ивченко, А. А. Федоров // Датчики и системы. – 2003. – № 8. – С. 53–54.
5. Мухитдинов М. Оптические методы и устройства контроля влажности / М. Н. Мухитдинов, Э. С. Мусаев. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 96 с.
6. Ничуговский Г. Ф. Определение влажности химических веществ / Г. Ф. Ничуговский. – Л. : Химия, 1977. – 200 с.
7. Онушко В. В. Універсальна класифікація оптичних методів дослідження густини газу / Й. Й. Білінський, Б. П. Книш, В. В. Онушко // Вісник Хмельницького національного університету. – 2100. – № 4. – С. 23–26. – ISSN 2226–9150.
8. Газы горючие природные. Методы определения содержания водяных паров и точки росы влаги : ГОСТ 20060-83. – М. : Издательство стандартов, 1983. – 10 с.
9. Уоррэл Р. Психрометрическое определение относительной влажности воздуха при температуре, превышающей 100 °С / Р. Уоррэл. – Л. : Гидрометеиздат. – 1967. – 300 с.
10. Берлинер М. А. Измерения влажности / М. А. Берлинер. – М. : Энергия. – 1973. – 400 с.
11. Бекиров Т. М. Основные положения отраслевого стандарта / Т. М. Бекиров // Газовая промышленность. – 1994. – № 7. – С. 24 – 26.

12. Зайцев В. А. Влажность воздуха и ее измерение / В. А. Зайцев, А. А. Ледохович, Г. Т. Никандрова. – Л. : Гидрометеиздат, 1974. – 112 с.
13. Білінський Й. Й. Класифікація оптичних методів дослідження фізико-хімічних параметрів газу / Й. Й. Білінський, Б. П. Книш, В. В. Онушко // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2011. – № 2. – С. 52–56. – ISSN 2219–9365.
14. Плотников В. В. Контроль состава и качества природного газа / В. В. Плотников, В. А. Подрешетников. – Л. : Недра. – 1983. – 345 с.
15. Соков И. А. Метрологическое обеспечение гигрометрии / И. А. Соков. – М. : Госстандарт СССР, (Обз. инф. Госстандарта СССР, вып.1), 1987. – 56 с.
16. Конверсия и новые возможности измерения влажности в трубопроводах / [Д. Л. Рогожинский, Ю. С. Гангнус, Ю. А. Малоземов, и др.] // Газовая промышленность. – № 10. – 1991. – С. 16–17.
17. Schmidt T. Natural Gas Treatment: Simultaneous Water and Hydrocarbon-Dew Point Control / T. Schmidt, D. Rennemann, T. Shulz // Wissenschaft&Technic. – Bd. 46, Heft 10. – 1993. – P. 366–374.
18. Соков И. А. Метрологическое обеспечение гигрометрии: обз. информ. / И. А. Соков, Г. Д. Вапняр. – М. : ВНИИКИ. –1982. –211 с. – Сер.: «Метрологическое обеспечение измерений». – Вып. 5.
19. Москалев И. Н. Влагометрия природного газа: состояние и проблемы: обз. информ. / И. Н. Москалев, В. С. Битюков. – М. : ИРЦ Газпром. – 1999. – 36 с. – Сер.: «Подготовка и переработка газа и газового конденсата».
20. Богословский В. Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха). – Учебник для вузов / В. Н. Богословский. – М. : Высшая школа, 1970. – 370 с.
21. Пістун Є. П. Облік та економія природного газу / Є. П. Пістун // Нафта і газова промисловість. – 2000. – № 2. – С. 51–53.

22. Оптоволоконные сенсоры / Под ред. Дж. Дейкина и Б. Калшо. – М. : Мир, 1992. – 360 с. – Вып. 1. Принципы и компоненты.
23. Бусурин В. К. Волоконно-оптические датчики: Физические основы, вопросы расчета и применения / В. К. Бусурин, Ю. Р. Носов. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 280 с.
24. Викулин И. М. Полупроводниковые датчики / И. М. Викулин, В. И. Стафеев. – М. : Сов. радио, 1975. – 104 с.
25. Патент РФ № 2224246. Микроэлектронный датчик влажности поверхностно-конденсационного типа / М. И. Горлов, А. В. Андреев, Л. П. Ануфриев, Е. В. Николаева; Заявл. 10.07.02; Опубл. 20.02.2004. Бюл. № 5.
26. Многопараметрические влагомеры для сыпучих материалов / [Н. С. Дубов, Е. С. Кричевский, Б. И. Невзлин и др.]. – М. : Машиностроение, 1980. – 144 с.
27. Лыков А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. – М. : Энергия, 1986. – 472 с.
28. Горлов М. И. Контроль содержания паров воды внутри корпусов интегральных схем / М. И. Горлов, Л. П. Ануфриев, Е. В. Николаева. – Минск : Бестпринт, 2002. – 280 с.
29. Герасимов Я. И. Курс физической химии / Я. И. Герасимов. – М. : Госхимиздат, 1963. – 400 с.
30. Кричевский И. Р. Фазовые равновесия в растворах при высоких давлениях / И. Р. Кричевский. – М. : Госхимиздат, 1946. – 320 с.
31. Рид Р. Свойства газов и жидкостей / Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. – Л. : Химия, 1982. – 430 с.
32. Биргер Г. И. Автоматические измерители малых влагосодержаний воздуха и газов / Г. И. Биргер, В. И. Калашников. – М. : ЦИНТИэлектропром, 1960. – 250 с.
33. Матьюс Д. А. Хлористолитиевые радиозондные гигрометры / Д. А. Матьюс. – Л. : Гидрометеиздат, 1967. – 340 с.

34. Найденев Р. Измерение влажности парогазовой среды емкостным сенсором / Р. О. Найденев, В. С. Кореньков, Б. И. Федоров // ИФЖ. – 1969. – № 5. – С. 25–28.

35. Дерягин Б. В. Мембранный гигрометр и применение его для определения относительной влажности воздуха / Б. В. Дерягин, М. К. Мельникова // Метеорология и гидрология. – 1952. – № 5. – С. 35–40.

36. Лопухов К. К. Сенсоры коронного разряда для контроля влажности при изготовлении кирпича / К. К. Лопухов // Строительные материалы. – 1970. – № 2. – С. 15–20.

37. Мікроелектронні сенсори фізичних величин : науково-навчальне видання. В 3 т. / В. Вуйцік, З. Ю. Готра, О. З. Готра; за ред. З. Ю. Готри. – Львів : Ліга-Прес, 2003. – Том 2. – 595 с.

38. Осадчук В. С. Сенсоры влажности : монография / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Л. В. Крилик. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2003. – 208 с.

39. Оптоэлектронные преобразователи и устройства отображения информации : сб. науч. тр. – М. : МАИ, 1983. – 82 с.

40. Осипович Л. А. Датчики физических величин / Л. А. Осипович. – М. : Машиностроение, 1979. – 159 с.

41. Берлинер М. А. Безынерционные электрические гигрометры с сенсорами коронного разряда / М. А. Берлинер, К. К. Лопухов // Заводская лаборатория. – 1971. – № 2. – С. 26–32.

42. Пат. 1372223 СССР, МКИ G01N21/81. Гигрометр точки росы / С. Н. Зеленин, А. Д. Разговоров (СССР). – № 3996101; заявл. 29.12.85; опубл. 07.02.88. Бюл. № 5. – 3 с.

43. Пат. 989252 СРСР, МКИ G01N21/81. Оптомолекулярний гігрометр / Н. С. Підоренко, І. А. Зайденман, Б. І. Ільїн, А. М. Капустін, С. П. Козуб, В. І. Кутаков, А. Б. Малиновський, В. П. Ричков, Г. К. Смирнов (СРСР). – № 2747426; заявл. 03.04.1979; опубл. 15.11.1981. Бюл. № 42. – 3 с.

44. Пат. 60834 УКРАЇНА, МКІ G01N21/81, G01N21/41. Волоконно-оптичний вологомір / Козич Левко Іванович, Фролова Наталія Петрівна (УКРАЇНА). – № 2003031890; заявл. 03.03.2003; опубл.15.11.2006. Бюл. № 11. – 3 с.

45. Александров А. Н. Основные полосы поглощения молекул воды в ИК-области спектра / А. Н. Александров, Н. К. Михайлян // Химическая промышленность. – 1962. – № 5. – С. 7–14.

46. Спенсер-Грегори К. Гигрометрия / Спенсер-Грегори К., Роурке Е. – М. : Metallurg-izdat, 1963. – 430 с.

47. Карякин А. В. Компенсация поглощения при ИК-спектроскопии / А. В. Карякин, А. В. Петров // Аналитическая химия. – 1967. – № 1. – С. 134–139.

48. Малкин Л. Ш. Визуальный сенсор влажности / Л. Ш. Малкин, А. И. Филенко, Л. М. Мозоляно // Холодильная техника. – 1972. – № 11. – С. 17–19.

49. Рогинская Ц. Н. Промышленные ИК-спектрометры / Ц. Н. Рогинская, А. И. Финкельштейн // Аналитическая химия. – 1959. – № 3. – С. 360–361.

50. Селезнев С. В. Анализ методов и средств измерения влажности и точек росы природного газа / С. В. Селезнев // Геология, бурение, разработка и эксплуатация газовых и газоконденсатных месторождений : научно-технический сб. – 2005. – № 2. – С. 10–22.

51. Приборы для определения влажности газа / [А. Л. Халиф, Е. И. Туревский, В. В. Сайкин и др.] // Подготовка, переработка и использование газа. – М. : ИРЦ Газпром, 1995. – 45 с.

52. Анализаторы точек росы углеводородных газов по влаге и углеводородам / [А. М. Деревягин, С. В. Селезнев, А. Г. Агальцов, В. А. Истомина] // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2004. – № 3. – С. 6–12.

53. Смирнов А. Н. Методы и средства измерения влажности газов и воздуха / А. Н. Смирнов, Л. В. Шиманская. – М.: ВНИИЭ Газпром, 1973. – 32 с.

54. Поляков А. В. Пьезоэлектрические кварцевые резонаторы. Применение в датчиках [Электронный ресурс] / А. В. Поляков, И. Е. Заднепрятный, В. Б. Поляков // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2004. – № 1. – С. 36–37. – Режим доступа : http://www.electronics.ru/pdf/1_2004/08.pdf
55. Порєв В. А. Аналітичні екологічні прилади та системи / [В. А. Порєв, О. А. Дашковський, Я. Л. Миндюк, В. П. Приміський]; Під заг. ред. В. А. Порєва. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2009. — 336 с.
56. Високочутливі засоби контролю малих концентрацій газів : / В. А. Іщенко, В. Г. Петрук. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 152 с.
57. Исмагуллаев П. Р. Теоретическое и экспериментальное исследование сверхвысокочастотного метода измерения влажности материалов / П. Р. Исмагуллаев, А. Б. Гринвальд. – Ташкент, 1982. – 84 с.
58. Бензарь В. К. Техника СВЧ-влажнометрии / В. К. Бензарь. – Минск : Высшая школа, 1974. – 352 с.
59. Мутанов Г. М. Измерение влагосодержания силикатной смеси / Г. М. Мутанов, Г. К. Шадрин, Н. В. Аринова // Состояние, проблемы и перспективы информатизации в РК : Сборник статей и материалов II-ой Междунар. науч.-практ конф. – Усть-Каменогорск, 2005. – С. 80–87.
60. Кричевский Е. С. Высокочастотный контроль влажности при обогащении полезных ископаемых / Е. С. Кричевский. – М. : Недра, 1972. – 216 с.
61. Laser-Two-Beam (L2B) Optical Gas Flow Meter : промисл. каталог [Электронный ресурс] / COSA Instruments. – Режим доступа : <http://www.cosa-instrument.com/Products/Products.html>.
62. Измерение влажности природного газа : промисл. каталог [Электронный ресурс] / Artvik. – Режим доступа : http://www.artvik.ru/pdf/analyzers_appl/moisture_in_natural_gas_rev3.pdf
63. Поляков А. В. Пьезоэлектрические кварцевые резонаторы и их применение в датчиках / А. В. Поляков, И. Е. Заднепрятный,

В. Б. Поляков // ООО, СКТБ ЭлПА. – Режим доступа до журн. : <http://www.sktbelpa.ru/quartzcrystalsandsensors.pdf>

64. Анализатор влажности природного газа, модель 5812 : промышл. каталог [Электронный ресурс] / Artvik. – Режим доступа : http://www.artvik.ru/pdf/analyzers_appl/moisture_in_natural_gas_rev3.pdf

65. Ассортимент выпускаемой продукции: промышл. каталог [Электронный ресурс] / Toros. – Режим доступа : <http://toros.kiev.ua/prod.html>

66. Стационарные гигрометры взрывозащищенного исполнения ТОРОС-3-1, ТОРОС-3-1У, ТОРОС-3-1В: промышленный каталог [Электронный ресурс] / НПФ «Прибор Центр», Институт газа. – Режим доступа : <http://toros.kiev.ua/prod1.html>

67. Переносные автономные гигрометры взрывобезопасного исполнения ТОРОС-3-2В, ТОРОС-3-2ВУ: промышл. каталог [Электронный ресурс] / Toros. – Режим доступа : <http://toros.kiev.ua/prod2.html>

68. Міхеєнко Л. А. Аналіз оптичних систем малогабаритних відзеркалювальних вологомірів / Л. А. Міхеєнко, І. І. Синявський // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2000. – № 4. – С. 27–31.

69. Усольцев В. А. Измерение влажности воздуха / В. А. Усольцев. – Л. : Гидрометеиздат, 1959. – 290 с.

70. Кузьмин И. В. Основы теории информации и кодирования / В. А. Кедрус. – К. : Вища школа, 1986. – 238 с.

71. Кузьмин И. В. Оценка эффективности автоматизированных систем контроля / И. В. Кузьмин, А. А. Касаткин. – М. : Энергия, 1967. – 234 с.

72. Філінюк М. А. Критеріальна оцінка ефективності узагальнених перетворювачів іммітансу / М. А. Філінюк, Ле Туан Ту, О. П. Піддубний // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 1999. – № 1. – С. 85–90.

73. Конюхов Н. Е. Оптоэлектронные контрольно-измерительные устройства / Н. Е. Конюхов, А. А. Плют, П. И. Марков. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 152 с.

74. Лесовий Л. В. Визначення відносної вологості газу для вузлів обліку із застосуванням засобів вимірювання температури точки роси / Л. В. Лесовий, Ф. Д. Матіко // Вісник національного університету «Львівська політехніка». – 2009. – № 659. – С. 84–91.

75. Селезнев С. В. Анализ методов и средств измерения влажности и точек росы природного газа / С. В. Селезнев // Геология, бурение, разработка и эксплуатация газовых и газоконденсатных месторождений : научно-тех. сб. — 2005. – № 2. – С. 10–22.

76. Енохович А. С. Справочник по физике / А. С. Енохович. — М. : Просвещение, 1978. – 415 с.

77. Вимірювання витрат та кількості газу : довідник / [М. П. Андрійшин, С. О. Каневський, О. М. Карпаш та ін.] – Івано-Франківськ : Сімик, 2004. —160 с.

78. Білинський Й. Й. Модель перенесення випромінювання в середовищі вологого газу та визначення його відносної вологості / Й. Й. Білинський, В. В. Онушко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2010. – № 5. – С. 18–22. – ISSN 1997–9266.

79. Онушко В. В. Математична модель перенесення випромінювання в середовищі вологого газу та визначення його відносної вологості / В. В. Онушко, Й. Й. Білинський // Оптикоелектронні інформаційні технології «Фотоніка ОДС – 2010» : 5-та міжнародна науково-технічна конференція, 28–30 вересня. – 2010 р. : тези доп. – Вінниця, 2010. – С. 190.

80. Білинський Й. Й. Методика визначення коефіцієнтів поглинання складових вологого природного газу / Й. Й. Білинський, В. В. Онушко, Б. П. Книш // Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. – 2011. – № 9. – С. 125–129.

81. Пеклер В. В. Состояние и перспективы развития гигрометров и средств их метрологического обеспечения / В. В. Пеклер, Г. М. Мамонтов // Датчики и системы. – 2006. – № 1. – С. 33–38.

82. Сайдов Г. В. Практическое руководство по абсорбционной молекулярной спектроскопии / Г. В. Сайдов О. В. Свердловска. – Ленинград, 1973. – 106 с.

83. Котяхов Ф. И. Физика нефтяного и газового коллектора / Ф. И. Котяхов. – М. : Недра. 1997.

84. Білінський Й. Й. Математична модель аналізатора вологості природного газу [Електронний ресурс] / Й. Й. Білінський, В. В. Онушко // Наукові праці ВНТУ – 2010. – № 4. – Режим доступу до журн. : <http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2010-4/uk.htm>.

85. Пат. 17925 Україна МПК G01N 5/00. Конденсаційний гігрометр / Білінський Й. Й., Онушко В. В.; заявник і патентовласник – Вінницький національний технічний університет – № U200685280 ; заявл. 31.07.2006; опубл. 15.12.2006. Бюл. № 12.

86. Пат. 26496А Україна МПК G01N 19/00. Конденсаційний гігрометр / Білінський Й. Й., Онушко В. В., Долецький В. А.; заявник і патентовласник – Вінницький національний технічний університет – № U200705201 ; заявл. 11.05.2007; – опубл. 25.09.2007. Бюл. № 15.

87. Джексон Р. Г. Новейшие датчики / Р. Г. Джексон. – М : Техносфера, 2007. – 384 с.

88. Онушко В. В. Підвищення чутливості аналізатора вологості газу / В. В. Онушко, Й. Й. Білінський, О. С. Городецька // Методи та прилади контролю якості. – 2010. – № 25. – С. 51–54. – ISSN 1993–9981.

89. Волоконно-оптические датчики: вводный курс для инженеров и научных работников / Под ред. Э. Удда. – М : Техносфера, 2008. – 520 с.

90. Аш Ж. Датчики измерительных систем : в 2-х книгах / Ж. Аш. – М. : Мир, 1992. – 424 с.

91. Како Н. Датчики и микро-ЭВМ : пер. с япон. / Н. Како, Я. Ямане. – Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1986. – 120 с.

92. Орнатский П. П. Автоматические измерения и приборы / П. П. Орнатский. – К. : Вища школа, 1980. – 560 с.

93. Латыев С. М. Компенсация погрешностей в оптических приборах / С. М. Латыев. – Л. : Машиностроение, 1985. – 248 с.

94. Полішко С. П. Точність засобів вимірювань : пер. з рос. / С. П. Полішко, О. Д. Трубенюк. – К. : Вища школа, 1992. – 173 с.

95. Пат. 53496 Україна МПК G01N 19/00. Конденсаційний гігрометр / Білинський Й. Й., Онушко В. В., Іоніна К. Ю.; заявник і патентовласник – Вінницький національний технічний університет – № U201003872; заявл. 06.04.2010; опубл. 11.10.2010, Бюл. № 19.

96. Пат. 55512 Україна МПК G01N 21/81. Аналізатор вологості газів / Білинський Й. Й., Онушко В. В., Іоніна К. Ю.; заявник і патентовласник – Вінницький національний технічний університет – № U201009109; заявл. 20.07.2010; опубл. 10.12.2010. Бюл. № 23.

97. Савченко В. Г. Измерительная техника : учебн. пособие для радиотехнических специальностей / В. Г. Савченко. – М. : Высшая школа, 1974. – 335 с.

98. Математична модель інфрачервоного аналізатора вологості газу на основі використання частотно-імпульсної модуляції / [В. В. Онушко, Й. Й. Білинський, О. С. Городецька, М. Й. Юкиш] // Методи та прилади контролю якості. – 2011. – № 26. – С.38–44. – ISSN 1993–9981.

99. Долгинов Л. М. Применение светодиодов на основе гетеропереходов четвертных твердых растворов для измерения влажности / Л. М. Долгинов, М. Мухитдинов, Є. С. Мусаев // Измерительная техника. – 1981. – № 6. – С. 65–67.

100. Зуев В. Е. Распространение видимых и инфракрасных волн в атмосфере / В. Е. Зуев. – М. : Советское радио, 1970. – 320 с.

101. Коган Л. М. Полупроводниковые светоизлучающие диоды / Л. М. Коган. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 208 с.

102. Иванов В. И. Полупроводниковые оптоэлектронные приборы : справочник / В. И. Иванов, А. И. Аксенов, А. М. Юшин. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 448 с.

103. Математична модель інфрачервоного аналізатора вологості газу на основі використання частотно імпульсної модуляції / [В. В. Онушко, Й. Й. Білинський, О. С. Городецька, та ін.] // Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах ВКДТС-2111: 1-ша міжнародна наукова конференція, 18–20 жовтня 2011 р. : тези доп. – Вінниця, 2001. – С. 159.
104. Разевиг В. Д. Система проектирования OrCAD 9.2 / В. Д. Разевиг. – М : СОЛОН–Р, 2003. – 528 с.
105. Гаврилов Л. П. Нелинейные цепи в программах схемотехнического моделирования / Л. П. Гаврилов. – М. : СОЛОН–Р, 2002. – 368 с.
106. Дмитриев А. Л. Оптические системы передачи информации : учебное пособие / А. Л. Дмитриев. – СПб. : СПбГУИТМО, 2007. – 96 с.
107. Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю : навч. посіб. / [Є. Т. Володарський, В. В. Кухарчук, В. О. Поджаренко, Г. Б. Сердюк]. – Вінниця : Велес, 2001. – 219 с.
108. Полішко С. П. Точність засобів вимірювань : пер. з рос. / О. Д. Трубенюк. – К. : Вища школа, 1992. – 173 с.
109. Онушко В. В. Засіб контролю вологості газу та дослідження його статичних метрологічних характеристик / В. В. Онушко, Й. Й. Білинський, О. С. Городецька // Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПРТП-2011) : 5-та міжнародна науково-технічна конференція, 19–21 травня, 2011 р. : тези доп. – Вінниця, 2011. – С.108.
110. Онушко В. В. Двоканальний аналізатор вологості газу та дослідження його статичних метрологічних характеристик / Й. Й. Білинський, О. С. Городецька, Б. П. Книш // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – № 3. – С. 222–228. – ISSN 1997–9266.
111. Дьяконов В. П. Математическая система Maple 7 / В. П. Дьяконов. – СПб. : Питер, 2002. – 672 с.

112. Дунаев Б. Б. Точность измерений при контроле качества / Б. Б. Дунаев. – К. : Техніка, 1981. – 152 с.
113. Володарський Є. Т. Підвищення вірогідності контролю з застосуванням адаптивного алгоритму / Є. Т. Володарський, І. П. Москаленко // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 1999. – № 3. – С. 111–114.
114. Полупроводниковые фотоприемники: Ультрафиолетовый, видимый и ближний инфракрасный диапазон спектра / [И. Д. Аисимова, И. М. Викулин Ф. А. Заитов и др.]. – М. : Радио и связь, 1984. – 216 с.
115. Иванов В. И. Полупроводниковые оптоэлектронные приборы / В. И. Иванов, А. И. Аксенов, А. М. Юшин. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 184 с.
116. Вольфганг Райс. Как работают аналогово-цифровые преобразователи и что можно узнать из спецификации на АЦП / Вольфганг Райс // Компоненты и технологии. – 2005. – № 3. – С. 20–24.
117. Гитис Э. И. Аналогоцифровые преобразователи : учеб. пособие для вузов / Э. И. Гитис, Е. А. Пискулов. – М. : Энергоиздат, 1981. – 360 с.
118. Федорков Б. Г. Микросхемы ЦАП и АЦП: функционирование, параметры, применение / Б. Г. Федорков, В. А. Телец. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.
119. Лавренчик В. Н. Постановка физического эксперимента и статистическая обработка его результатов / В. Н. Лавренчик. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 272 с.
120. Браславский Д. А. Точность измерительных устройств / Д. А. Браславский, В. В. Петров. – М. : Машиностроение, 1976. – 312 с.
121. Венцель Е. С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения / Е. С. Венцель, Л. А. Овчаров. – М. : Наука, 1991. – 384 с.

122. Фрумкин В. Д. Теория вероятностей и статистика в метрологии и измерительной технике / В. Д. Фрумкин, Н. А. Рубичев. – М. : Машиностроение, 1987. – 168 с.
123. Володарский Е. Т. Уменьшение влияния погрешности измерительного канала на достоверность контроля / Е. Т. Володарский, И. П. Москаленко // Сб. труд. МНТК «Измерения – 98». – К. – 1998. – С. 266–267.
124. Якушенков Ю. Г. Методы борьбы с помехами в оптико-электронных приборах / Ю. Г. Якушенко, В. Н. Луканцев, М. П. Колосов. – М. : Радио и связь, 1981. – 180 с.
125. Проектування інформаційних систем : посібник за ред. В. С. Пономаренка. – К. : Академія, 2002. – 488 с.
126. Завадский В. А. Компьютерная электроника / В. А. Завадский. – К. : ВЕК, 1996. – 368 с.
127. Локазюк В. М. Мікропроцесори та мікроЕОМ у виробничих системах : посіб. / В. М Локазюк. – К. : Академія, 2002. – 368 с.
128. Агуров П. В. Интерфейсы USB. Практика использования и программирования / П. В. Агуров. – СПб. : БХВ-Петербург, 2004. – 576 с.
129. Партала О. Н. Цифровая электроника / О. Н. Партала. – СПб. : Наука и техника, 2000. – 208 с.
130. Сопряжение датчиков и устройств ввода данных с компьютерами IBM PC / Под ред. У. Томпкинса и Дж. Уэбстери. – М. : Мир, 1997. – 450 с.
131. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента / Под ред. Н. П. Буслиенко : пер. с англ. – М. : Мир, 1972. – 381 с. ССР. – М. : Издательство стандартов, 1986. – 8 с.
132. Государственная система обеспечения единства измерений. Государственный первичный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений относительной влажности газов: ГОСТ 8.547-86. Госстандарт СССР. – М. : Издательство стандартов, 1986. – 8 с.

133. Онушко В. В. Особливості повірки вимірювальних комплексів «Суперфлоу» на прикордонних ГВС / В. В. Онушко, Д. Р. Піталов, Ш. В. Щупак // Вимірювання витрат та кількості газу : 6-та всеукраїнська науково-технічна конференція, 2009 р. : тези доп. – Івано-Франківськ, 2009. – С. 41.

134. Онушко В. В. Світловодний гігрометр точки роси з багаторазовим відбиттям / В. В. Онушко, Й. Й. Білинський, К. Ю. Іоніна // Інформаційна інженерія та комп'ютерна техніка : науково-практична міжнародна конференція : тези доп. – Вінниця, 2010. – С. 289–290.

135. Онушко В. В. Двохвильовий аналізатор вологості природного газу / В. В. Онушко, А. М. Власюк, Й. Й. Білинський // Приладобудування 2012; стан і перспективи : 11-та міжнародна науково-технічна конференція : тези доп. – К., 2012. – С. 123.

136. Онушко В. В. Комплекс вимірювальний роторний КВР-1 / В. В. Онушко, А. М. Власюк, В. М. Ярошевич // Приладобудування 2011 : 10-та міжнародна науково-технічна конференція, 2011 р. : тези доп. – К., 2011. – С. 223–224.

137. Максимов В. П. Измерение, обработка и анализ быстропротекающих процес сов / В. П. Максимов, И. В. Егоров, В. А. Карасев. – М. : Машиностроение, 1987. – 208 с.

138. Егоров А. Е. Исследование устройств и систем автоматики методом планирования эксперимента / А. Е. Егоров, Г. Н. Азаров, А. В. Коваль; под. ред. В. Г. Воронова. – Х. : Вища школа, 1986. – 240 с.

Наукове видання

**Білінський Йосип Йосипович
Онушко Василь Володимирович**

**МЕТОД І ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИЙ ЗАСІБ
ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ
ВОЛОГОСТІ ПРИРОДНОГО ГАЗУ**

Монографія

Редактор Н. Мазур
Оригінал-макет підготовлено Й. Білінським

Підписано до друку 30.01.2014 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. др. арк. 7,62
Наклад 300 (1-й запуск 1–75) прим. Зам № В2014-02

Вінницький національний технічний університет,
КІВЦ ВНТУ,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-85-32.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано ФОП Барановська Т. П.
21021, м. Вінниця, вул. Порики, 7.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 4377 від 31.07.2012 р.