

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

Й. Й. Білинський, К. Ю. Іоніна

**СВІТЛОВІДНІ СЕНСОРИ ТЕМПЕРАТУРИ
ТОЧКИ РОСИ ПРИРОДНОГО ГАЗУ**

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2014

УДК 681.785
ББК 32.86
Б61

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 7 від 26.02.2014 р.)

Рецензенти:

В. П. Манойлов, доктор технічних наук, професор
Г. С. Хрипунов, доктор технічних наук, професор

Білинський, Й. Й.

Б61 Світловодні сенсори температури точки роси природного газу : монографія / Й. Й. Білинський, К. Ю. Іоніна. – Вінниця : ВНТУ, 2014. – 136 с.

ISBN 978-966-641-589-2

Робота спрямована на розв'язання актуальної задачі підвищення вірогідності контролю вологості природного газу на основі врахування нерівномірності зміни коефіцієнта відбиття вздовж світловода та постановки у відповідність вимірюваній температурі точки роси вихідного струму фотоприймача. В роботі наведені удосконалені математичні моделі поширення випромінювання в плоскому та полому світловодах, сенсорів точки роси на основі зовнішнього та внутрішнього багаторазового відбиття і розроблено засіб контролю температури точки роси зі стабільними метрологічними та експлуатаційними характеристиками.

УДК 681.785
ББК 32.86

ISBN 978-966-641-589-2

© Й. Білинський, К. Іоніна, 2014

ЗМІСТ

Вступ.....	5
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ ВОЛОГОСТІ ПРИРОДНОГО ГАЗУ	7
1.1 Аналіз методів та засобів контролю вологості природного газу....	7
1.2 Класифікація світловодних вимірювачів вологості	22
1.3 Вибір критерію оцінки ефективності вимірювальних перетворювачів вологості природного газу	27
1.4 Постановка задачі дослідження	29
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ ПРИРОДНОГО ГАЗУ	31
2.1 Особливості вологого природного газу та вимірювання його вологості за температурою точки роси	31
2.2 Аналіз поведінки променів на межі розділу двох середовищ.....	36
2.3 Математичний опис поширення випромінювання по плоскому світловоду з внутрішнім відбиттям	41
2.4 Аналіз проходження світлового променя при зовнішньому відбитті в пустотілому світловоді	48
2.5 Математична модель вимірювального перетворювача точки роси на основі зовнішнього відбиття.....	52
2.6 Розробка та дослідження вимірювального перетворювача точки роси на основі плоского світловода з внутрішнім відбиттям ..	55
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА СВІТЛОВОДНОГО ЗАСОБУ ВИМІРЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ ПРИРОДНОГО ГАЗУ НА ОСНОВІ МЕТОДУ ТОЧКИ РОСИ.....	69
3.1 Розробка конденсаційного засобу вимірювання вологості газу на основі полого світловода	69
3.2 Розробка двоканального конденсаційного засобу вимірювання вологості газу на основі полого світловода	70
3.3 Розробка конденсаційного засобу вимірювання вологості газу на основі плоского світловода.....	72
3.4 Розробка оптоелектронного засобу вимірювання вологості природного газу на основі критичного кута	74

3.5 Розробка оптоелектронного конденсаційного засобу вимірювання вологості природного газу з вибірковістю вимірювань	76
3.6 Перетворення та обробка вимірювальної інформації. Виведення функції перетворення засобу вимірювання вологості на основі зовнішнього відбиття	78
3.7 Аналіз статичних метрологічних характеристик аналізатора вологості газу	79
3.8 Аналіз основних похибок засобу вимірювання вологості на основі плоского світловода зовнішнього відбиття.....	86
3.9 Оцінювання вірогідності контролю вологості природного газу.....	92
РОЗДІЛ 4 АПАРАТНО-ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАСОБУ ВИМІРЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ ПРИРОДНОГО ГАЗУ	
4.1 Розробка рекомендацій з проектування засобу вимірювання вологості на основі плоского світловода.....	95
4.2 Розробка електричної схеми та конструкції засобу вимірювання вологості природного газу.....	104
4.3 Апаратна реалізація засобу вимірювання вологості природного газу	113
4.4 Алгоритм контролю вологості	115
4.5 Експериментальні дослідження засобу вимірювання вологості природного газу та його калібрування.....	118
4.6 Експериментальні дослідження похибок засобу вимірювального контролю вологості	121
4.7 Обробка результатів непрямого вимірювання температури точки роси.....	123
ЛІТЕРАТУРА	126

ВСТУП

Актуальність теми. Вимірювання та контроль вологості природного газу є актуальною задачею як сучасної науки, так і її різноманітних застосувань в народному господарстві. Вологовміст в газі – це параметр, який має важливе значення для забезпечення необхідної тепловіддачі при горінні та якості процесів переробки природного газу.

Важливо вимірювати вологість природного газу, оскільки він є одним з основних джерел енергії. Природний газ, що видобувається з підземних джерел, насичений рідкою водою і важкими вуглеводнями. Для того, щоб задовольнити вимоги, які висуваються до чистого, сухого й абсолютно газоподібного палива, придатного для передачі по трубопроводах і постачання кінцевим користувачам для спалювання, газ повинен пройти декілька стадій переробки, включаючи видалення рідин, захоплених газом, з подальшим висушуванням для зниження вмісту водяної пари.

Наявність вологи в газі небажана, оскільки при транспортуванні газу можуть спостерігатися випадки корозії трубопроводів і арматури, а також утворення гідратів (продуктів приєднання води до різних речовин) і конденсату. Крім того, вміст вологи знижує питому теплоту згорання газу.

Технічні вимоги до фізико-хімічних показників газів, які подаються в магістральні газопроводи та до споживача, направлені на вирішення таких задач:

- забезпечення надійності та безпечності поставки газу споживачам;
- мінімізація втрат від дії будь-яких корозійних процесів;
- забезпечення контролю за фізико-хімічними показниками, передбаченими контрактами та договорами;
- підвищення якості газу, що поставляється.

Головною метою встановлення показників і норм на якість газу, призначеного для транспортування по магістральних газопроводах, є гарантія однофазного стану газу в будь-якій точці газопроводу, а також підвищення надійності і ефективності роботи газотранспортних систем, підвищення коефіцієнта видобування вуглеводневого конденсату на газодобувних підприємствах і, отже, зниження його втрат. Однофазний стан газу – головна вимога при магістральному транспортуванні газу. Порушення цієї вимоги призводить до фазових перетворень компонентів газу, що транспортується, в рідкий і твердий стан (вода і вуглеводневий конденсат, лід і газові гідрати) і, відповідно, до збільшення гідравлічного опору трубопроводів.

В той же час визначення показників якості газу, що йде на промислове і комунальне використання, має на меті підвищення безпеки використання газу і покращення санітарно-гігієнічних умов при спалюванні газу (наприклад, в побутових пальникових пристроях).

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, 30]).

Вологість газів вимірюється різними методами, прийнятність конкретного з яких визначається місцем застосування на основі його точності та чутливості. Одним з найбільш високоточних із застосованих до природного газу методів є конденсаційний, на основі вимірювання температури точки роси. Відомо, що класична схема вимірювача вологості на основі методу точки роси містить конденсаційну поверхню, яку ще називають дзеркалом, та оптичну схему. В таких пристроях зазвичай використовується одноразове відбиття світлового променя від конденсаційної поверхні. Однак конденсаційний вимірювач завдяки одному зовнішньому відбиттю не забезпечує високу точність, оскільки отримання відбитого променя лише в одній точці вимагає додаткових апаратних затрат, а зміна інтенсивності залежить від швидкості випадання роси, тобто процес вимірювання буде більш довготривалим. Використання багаторазового відбиття дозволяє підвищити швидкість зміни вихідної інтенсивності, а отже й точності, тому доцільним може бути використання явища багаторазового як внутрішнього, так і зовнішнього відбиття. Такий ефект може бути досягнутий за допомогою світловодної структури. При зовнішньому багаторазовому відбитті промінь світла, зазнаючи багаторазового відбиття, контактує з вимірюваним аналізованим середовищем, як це відбувається у пустотілому світловоді. При внутрішньому багаторазовому відбитті промінь світла, зазнаючи багаторазового відбиття, не контактує з вимірюваним аналізованим середовищем.

Таким чином, підвищення точності, контролю вологості природного газу за допомогою конденсаційного методу можна досягти шляхом розробки засобу вимірювання вологості через використання принципу багаторазового відбиття світлового променя.

Метою роботи є підвищення точності та чутливості вимірювання вологості природного газу за рахунок використання явища багаторазового відбиття.

Монографія складається зі вступу, чотирьох розділів і містить бібліографічний список із 122 найменувань.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ ВОЛОГОСТІ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

Для вимірювання вологості газів у різних галузях науки та техніки використовують різноманітні вологоміри, вибір типу яких визначається особливостями кожного конкретного місця застосування [1–10].

1.1 Аналіз методів та засобів контролю вологості природного газу

Всі методи вимірювання вологості газів можна поділити на прямі та непрямі. Прямі методи ґрунтуються на безпосередньому розділенні вологи та сухого газу з подальшим визначенням кількості вологи. В цю категорію входять методи повного поглинання (гравіметричні та хімічні), конденсаційно-згущувальний, з виморожуванням вологи та ін.

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

Непрямі методи можна поділити на температурні, сорбційні, основані на фізичних властивостях газів, та спектрометричні.

До температурних методів, в яких вологість газу перетворюється в температуру, відносяться методи: психрометричний, точки роси та метод, в основі якого лежить використання електролітичних підігрівних сенсорів. Велику групу методів, що ґрунтуються на явищі сорбції водяної пари твердими тілами та рідинами, можна розділити за характером величини, в яку перетворюється вологість, на дві підгрупи. До першої групи методів, де вихідна величина первинного перетворювача є неелектричною, входять деформаційний, кольоровий та сорбційно-термічний, при цьому останній метод вимірювання можна віднести і до температурних. Методи, що ґрунтуються на використанні електрометричних гігрометричних сенсорів (адсорбційних та абсорбційних, електричних, кулонометричних), утворюють другу підгрупу сорбційних методів, особливістю якої є електрична вихідна величина первинного перетворювача. Наступна група ґрунтується на вимірюванні різних фізичних властивостей газу, що досліджується – неелектричних (теплопровідності, акустичних характеристик тощо) та електричних. Умовно виділені в окрему «спектроскопічну» групу методи, в яких використовуються кількісні оцінки фізичних властивостей вологого газу на різних

ділянках спектра електромагнітних коливань – інфрачервоної, ультрафіолетовій та надвисоких радіочастот; сюди включені і радіометричні методи.

Також методи вимірювання вологості безпосередньо можна поділити за принципами вимірювання на методи вилучення водяної пари (води) з газової суміші, що базується на кількісних вимірюваннях її складу, основані на використанні фізико-хімічних властивостей води, та на основані на зміні фізико-хімічних властивостей та характеристик газу під дією молекул води. Серед перших методів можна виділити термогравіметричну, електролітичну, газову хроматографію, титрування Карла–Фішера. Складності процесу вилучення водяної пари та вимірювання маси газу і водяного екстракту роблять цей принцип мало придатним для використання в мікроелектронних сенсорах вологості. На принципі використання фізико-хімічних властивостей води побудована ціла низка конкретних вимірювальних методик: НВЧ, ІЧ та УФ-випромінювання, нейтронне розсіювання, конденсація і вимірювання точки роси, зміна діелектричної сталої та електропровідність. Методи, основані на зміні фізико-хімічних властивостей та характеристик різних матеріалів під дією молекул води (обернена оцінка води), використовують такі процеси, як випаровування з поверхні, адсорбція та дифузія молекул води, а також їх хімічна взаємодія з матеріалом, що приводять до зміни температури, електропровідності, діелектричної сталої, механічних характеристик, теплопровідності матеріалів. Так, принцип випаровування з вологої поверхні використовується в хлоридкобальтових, волосяних та хлоридлітієвих гігрометрах [1, 2].

Нині основними методами вимірювання вологості природного газу є психрометричний, сорбційний та метод точки роси [1–5].

Психрометричний метод оснований на залежності між парціальним тиском пару в парогазовій суміші та показами сухого і мокрого термометрів:

$$p_{H.M} - p = AB(t_C - t_M), \quad (1.1)$$

де p – парціальний тиск пару в парогазовій суміші; $p_{H.M}$ – парціальний тиск насиченого пару при температурі суміші t_M ; B – барометричний тиск; A – психрометрична постійна; t_C , t_M – температура сухого і мокрого термометрів.

Відносна вологість може бути визначена з (1.1) таким чином:

$$\varphi = \frac{p}{p_{н.с}} 100 = \frac{100}{p_{н.с}} [p_{н.м} - AB(t_c - t_m)], \quad (1.2)$$

де $p_{н.с}$ – парціальний тиск насиченого пару при температурі t_c .

У зв'язку з тим, що $p_{н.м}$ і $p_{н.с}$ однозначно визначаються за t_c і t_m , якщо $A = const$, можна отримати залежність

$$\varphi = f(t_c - t_m, t_c). \quad (1.3)$$

За цією залежністю можна скласти психрометричні таблиці. Ці таблиці можуть бути різними для різних конструкцій мокрого термометра. Психрометрична постійна A визначається умовами тепловідводу від термометра через гніт в навколишнє середовище (розмірами і формою резервуару або гільзи термометра, теплопровідністю гільзи і тканини гніту та іншими факторами), тому практично для кожної нової конструкції A буде відмінною від інших. Для забезпечення постійності A для кожної конструкції забезпечують такий режим обдуву мокрого термометра, при якому $A = const$. Залежність (1.3) може бути апроксимована сімейством прямих $\varphi = const$ в координатах t_c, t_m . Припускаючи, що прямі $\varphi = const$ перетинаються в одній точці з координатами t_a, t_b (рис. 1.1), можна вважати

$$\varphi = f\left(\frac{t_m - t_a}{t_c - t_b}\right). \quad (1.4)$$

Шкала психрометра градується в процентах відносної вологості. Можливі різні модифікації цієї схеми, але, як правило, її принцип дії залишається незмінним.

До переваг психрометричного методу слід віднести достатньо високу точність і чутливість при температурах вище 0°C . До недоліків методу відноситься зменшення чутливості і точності при низьких температурах, а також похибка, яка пов'язана з непостійністю психрометричної постійної A . Психрометричні гігрометри, в основному, викори-

стовують для вимірювання вологості газових середовищ при температурах 0–100 °С. Вимірювальне коло таких гігрометрів звичайно представляє собою автоматичний міст або компенсатор.

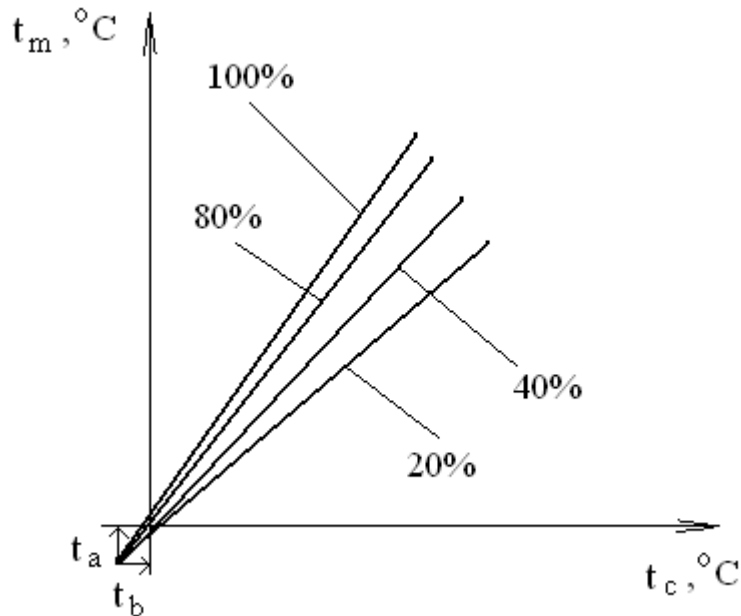


Рисунок 1.1 – Залежність відносної вологості від температури мокрого і сухого термометрів

Сорбційні електричні гігрометричні сенсори (ЕГД) 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 ЕГД 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 ЕГД 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.

Статична характеристика абсорбції ЕГД – залежність вихідної електричної величини від значення вимірюваної вологості газу – визначається двома функціями: залежністю вологовмісту матеріалу чутливого елемента від вологості повітря, тобто ізотермами сорбції і десорбції матеріалу цього елемента, та залежністю вимірюваної електричної величини (опору в ланцюзі постійного або змінного струму, ємності, тангенса кута діелектричних втрат і т. п.) від вологовмісту чутливого елемента. Рівноважна вологість матеріалу є його індивідуальною характеристикою, тому статична характеристика, навіть у ЕГД одного типу, що мають вологочутливі елементи з різних матеріалів, не збігається. Її можна обчислити, якщо відомі вказані вище функції, але на практиці ЕГД градуують емпірично. Як вже наголошувалося вище, поверхневий опір вимірюється, строго кажучи, тільки у тих ЕГД, у яких тонка водна плівка утворюється на гладкій поверхні водостійкого непористого діелектрика (скла, кварцу, деяких видів обпаленої кераміки і т. д.). Перевагами таких ЕГД 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 забруднення поверхні та наявності в повітрі пари аміаку, спирту, ацетону й інших полярних рідин. З указаних причин ЕГД чисто адсорбційного типу не знайшли широкого застосування [1–3].

Значно більше поширені ЕГД з пористим діелектриком, у яких основним процесом є адсорбція вологи на внутрішній поверхні пор. Сенсори цього типу більш інерційні, ніж чисто адсорбційні, але володіють стійкішими характеристиками. Стабільність характеристики сенсора забезпечується тим, що вимірювання проводяться на постійному струмі при щільності струму, що не перевищує 10^{-9} А/см². Для збільшення чутливості сенсора при вимірюванні низьких значень абсолютної вологості (0,1–0,8 г/см³) чутливий елемент просочували водним розчином хлористого літію. Провідність просоченого сенсора визначається не тільки провідністю плівки води, адсорбованою поверхнею пор, але і електролітичною провідністю розчину LiCl, що заповнює пори; такий сенсор є сорбційно-електролітичним. Проте довготривала стабільність характеристики такого сенсора виявилась недостатньо задовільною. У абсорбційних ЕГД 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 від-

дають її і вільні від сорбційного гістерезису. Заповнення капілярів водною парою викликає різке зменшення об'ємного опору, в той же час наявність розгалужених капілярів збільшує інерційність ЕГД цього типу. Крім того, їм властиві також гістерезис і нестабільність характеристик. Перевага цих сенсорів – здатність переносити тривалу дію газів з відносною вологістю, рівною 100 %. Найбільш практичне значення мають сорбційні сенсори таких типів: вугільні, п'єзокварцові та алюмінієвооксидні [3].

Вугільні ЕГД мають вологочутливий елемент у вигляді плівки гігроскопічної сполучної речовини, що містить у вигляді суспензії тонко розмолоті частинки вугілля. Для них характерна наявність гістерезису.

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, нанесеною на поверхню кварцу. Вихідною величиною вологочутливих елементів обох типів в більшості випадків є власна частота коливань п'єзокварцу, що зменшується зі зростанням вимірюваної вологості.

Метод точки роси відноситься до теплових методів вимірювання вологості газів. Тепловий метод аналізу оснований на залежності теплових властивостей речовини, головним чином, теплопровідності, від її складу і концентрації окремих компонентів, а також на визначенні температурних коефіцієнтів при різних фізико-хімічних фазових перетвореннях речовини [7].

Вимірювання вологості газу за точкою роси полягає у визначенні температури поверхні води, при якій встановлюється динамічна рівновага між кількістю вологи, яка випаровується з поверхні та осідає з газу. При практичному втіленні методу вимірюють температуру Θ_p поверхні твердого тіла (металевого дзеркала), яке охолоджують до тих пір, поки не з'явиться роса (конденсат). За допомогою терморегулятора підтримують температуру поверхні таким чином, щоб кількість конденсату не змінювалась. Відомі гігрометри, в яких охолодження дзеркала відбувається з використанням ефекту Пельтьє.

За температурами точки роси Θ_p і досліджуваного газу Θ ($\Theta \geq \Theta_p$) можна визначити відносну вологість (у відсотках):

$$\varphi = \frac{E(\Theta_p)}{E(\Theta)} \cdot 100\%, \quad (1.5)$$

де $E(\Theta_p)$ і $E(\Theta)$ – пружності насиченого пару, відповідно, при температурах Θ_p і Θ .

Перевагами гігрометрів точки роси є відносно висока точність і можливість вимірювання вологості повітря та різних газів при низьких температурах (-160 °С) і високих тисках ($2 \cdot 10^7$ Па), а недоліками – складність конструкції та додаткові похибки від забруднення дзеркала домішками, що містяться в газах (пил, агресивні гази) [2, 8].

У нафтогазовій промисловості ГОСТ 20060-83 встановлює три основних і найбільш поширених методи визначення точки роси вологи: конденсаційний, кулонометричний і абсорбція. Проте аналіз вітчизняних і зарубіжних розробок показує, що за останнє десятиліття стався істотний прорив в області сорбційних методів вимірювання вологості, заснований на використанні нових матеріалів і сплавів.

Кулонометричний метод заснований на повному всотуванні вологи плівкою сорбуючої речовини з потоку точно дозованого аналізованого газу при одночасному електролітичному розкладанні поглиненої вологи і вимірюванні струму електролізу. При цьому струм електролізу у встановленому режимі є мірою вмісту вологи в газі. Основні вимоги до кулонометричних гігрометрів нормовані ГОСТ 17142-78 «Гігрометри кулонометричні. Загальні технічні умови» [24]. З гігрометрів, що серійно випускаються і базуються на кулонометричному методі, можна виділити гігрометри «Байкал» і «Кедр» (Росія), «Hygromat».

Метод абсорбції заснований на поглинанні водяної пари безводним діетиленгліколем (ДЕГ) і подальшому визначенні зв'язаної ДЕГом води титруванням розчином К. Фішера [21]. Цей метод має обмеження за змістом водяної пари в газі (не більше 0,1 г/м) і кількості сірчистих з'єднань в газі (не більше 0,03 г/м³), вимагає витратних матеріалів і тому застосовується лише в лабораторних умовах.

Сорбційні методи вимірювання вологості використовують здатність речовин сорбувати вологу і тим самим змінювати їх властивості. В останні десятиліття широке застосування знайшов порівняно новий метод вимірювання вологості газів – п'езосорбційний. Чутливий елемент п'езосорбційного гігрометра є п'езоелектричним (кварцовим) резона-

тором, покритим тонким шаром речовини, що сорбує вологу. При підвищенні відносної вологості газу маса сорбованої вологи збільшується, а власна частота кварцового резонатора зменшується. Частота вимірювального кварцового генератора порівнюється з частотою опорного генератора. Різниця між цими двома частотами є мірою відносної вологості газу. Найбільш широке поширення в промисловості знайшли вітчизняні п'езосорбційні гігromетри серії «Волна», «Вітік» та «Іва», а із зарубіжних – «Du Pont».

Дієлькометричний метод заснований на вимірюванні діелектричної проникності газу, сильно залежної від його вологості. Основою діелектричного методу є залежність діелектричної проникності газу від його вологовмісту. Принцип дії гігromетрів, що базуються на дієлькометричному методі, заснований на порівнянні діелектричної проникності сухого опорного і вологого аналізованого газу, який по чергово поступає на один і той же ємнісний перетворювач. 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», «Hygrolog WMY 770Z», «Marquis» та ін.

Отож, сутність конденсаційного методу полягає у визначенні температури, до якої необхідно охолодити прилеглий до охолоджуваної поверхні шар газу, для того, щоб довести його до стану насичення (рівноважного стану між утворенням і випаровуванням роси). Вимірювання точки роси конденсаційним методом зводиться до виконання трьох операцій: охолодження поверхні конденсаційного дзеркала, фіксація моменту появи на дзеркалі флюїду (у вигляді роси чи інею) та вимірювання температури поверхні дзеркала, яка відповідає цьому моменту. Способи виконання цих операцій визначають конструкцію гігromетра. По суті, конденсаційний метод дозволяє природним чином та в найбільш повному об'ємі отримувати достовірну інформацію про стан газу. Серед гігromетрів конденсаційного типу, що серійно випускаються, можна відзначити ручні гігromетри серії «Харків» (Україна) і «Чандлер» (США), та автоматичні гігromетри «Bovar», «Anaconda», «Торос», «Конг-Пріма». У Росії найбільшого поширення набули прилади серії «Конг-Пріма».

З наведеного вище огляду видно, що список засобів вимірювання вологості досить широкий. Проте з різних причин далеко не всі вони

знайшли своє застосування на об'єктах газової промисловості. Всі сучасні гігрометри, що використовуються для вимірювання вологості природного газу, за методом вимірювання можна узагальнено розділити на дві групи: конденсаційні та сорбційні [23].

ГОСТ 20061-84 стандартизує конденсаційний метод визначення точки роси по вуглеводнях для природних газів, що не містять краплинних суспензій. Суть методу полягає у вимірюванні температури охолодженого металевого дзеркала при безперервному потоці над ним попередньо осушеного від вологи досліджуваного газу. За точку роси береться температура початку конденсації на дзеркалі вуглеводневих фракцій.

У вітчизняній газовій промисловості температура точки роси по вуглеводнях до 2000 року або не контролювалася зовсім, або піддавалася періодичному візуальному контролю за допомогою неавтоматичного індикатора кондиційності типу «Харків». В кінці 90-х років для забезпечення контролю якості газу по точці роси були закуплені імпорتنі газовимірювальні станції, до складу яких входив аналізатор точок роси по воді та вуглеводнях «Vovag» модель 241 (Канада). Проте показані результати вимірювань не відповідали реальним значенням точок роси по волозі та вуглеводнях і аналізатори були зняті з експлуатації. Безперервний контроль точки роси по вуглеводнях, що конденсуються раніше вологи, став можливим із введенням в експлуатацію аналізатора «Конг-Пріма-4» в 2002 році. Аналіз зарубіжних систем контролю точки роси показує, що для контролю точки роси по вуглеводнях в них також використовується конденсаційний метод вимірювання.

Виходячи з наведеного в розділі 1 огляду, можна констатувати, що при побудові сучасних систем автоматичного безперервного контролю якості природного газу по температурах точки роси вологи та вуглеводнів є два можливі варіанти: використання конденсаційного методу вимірювання точок роси, як вологи, так і вуглеводнів або використання різних методів вимірювання (сорбційного – для вимірювання точки роси по волозі та конденсаційного – для вимірювання точки роси по вуглеводнях).

Другий варіант передбачає фактично наявність двох незалежних приладів, об'єднаних в єдину систему вимірювання. За таким варіантом побудовано багато зарубіжних систем вимірювання («Bartec», «Michel», «Marquis»). Недоліки цього підходу полягають в збільшенні

вартості, зниженням об'єктивності інформації через вимірювання точок роси різними методами і різними перетворювачами інформації.

Тому перспективним напрямом є використання єдиного перетворювача інформації для вимірювання декількох температур точки роси. Проте цей підхід накладає жорсткі вимоги щодо диференціювання конденсованих домішок. За таким варіантом побудовані згадані вище аналізатори «Vovac», модель 241, і «Конг-Пріма-4».

Конденсаційні гігрометри складають основну частину парку приладів, практично використовуваних в газовій промисловості [21].

Як відомо з термодинаміки, стан газу може бути однозначно визначений будь-якою парою його параметрів стану. Знаючи тиск газу і початкову температуру та вимірюючи температуру точки роси газу по волозі (обидві температури можуть бути визначені в одному циклі вимірювання), отримуємо повну інформацію про стан природного газу.

Первинні перетворювачі інформації сучасних конденсаційних гігрометрів складаються з конденсаційного дзеркала, де власне і відбувається випадання вологи або плівки вуглеводнів, а також термосенсора, що вимірює температуру на дзеркалі, та, нарешті, системи реєстрації вологи, що випала на дзеркалі, або плівки вуглеводнів.

Для охолодження конденсаційного дзеркала можуть застосовуватися різні рідини (ефір та інші), що легко випаровуються, охолоджуючи суміші, найчастіше суміші твердої вуглекислоти (сухий лід) з бензином або спиртом. Для глибшого охолодження використовують зріджені гази, наприклад, азот або рідке повітря. У сучасних приладах найбільш широке вживання знайшли: термоелектричне охолодження та охолодження, засноване на вихрових ефектах.

Ключовим елементом в побудові конденсаційного гігрометра є вибір системи реєстрації, оскільки саме вона визначає вимірювальні, габаритні та потужнісні характеристики гігрометра в цілому. Чим менша кількість вологи випала або чим тоншу плівку вуглеводнів вона може зареєструвати, тим меншої площі повинно бути дзеркало приладу; у свою чергу розміри дзеркала визначають потужність термоелектронної батареї, а від потужності батареї залежать розміри зовнішнього радіатора приладу і споживана ним електрична потужність.

Система реєстрації може бути оптичною, електричною (за зміною провідності шару конденсату), високочастотною (за зміною діелектричної проникності) і так далі. Аналіз всіх існуючих методів детектуван-

ня плівки конденсату на поверхні дзеркала показує, що найбільш перспективним методом є оптичний метод реєстрації. Цей метод реалізований практично у всіх серійних гігрометрах. Його популярність обґрунтовується простотою, надійністю і стійкістю до важких умов експлуатації на природних газах.

У класичному варіанті оптичний метод включає джерело світла (світлодіод, лазерний діод), приймач світла (фотодіод) і, власне, об'єкт для аналізу (дзеркало приладу, на якому відбувається конденсація флюїду). Суть оптичного методу проста: світло, що випромінюється джерелом, відбивається від дзеркала і потрапляє на фотодіод, але при охолодженні на дзеркалі конденсується волога та з'являється розсіяння світла, що і фіксується фотодіодом.

Аналізуючи оптичні методи реєстрації температури точки роси по воді слід зазначити, що існує ціла низка об'єктивних причин, які не дозволили до теперішнього часу повною мірою реалізувати переваги методу при його конкретній реалізації в серійній приладовій продукції. До цих причин слід, перш за все, віднести:

1. Проблему чутливості і вибірковості визначення точки роси по воді у присутності раніше конденсованих вищих вуглеводнів і гліколів.
2. Складність конструкції, а також великі габарити, вага та енергоспоживання.

Щодо вимірювання точки роси по вуглеводнях, яка визначає умови транспортування газу без конденсації рідкої вуглеводневої фази, то тут альтернативи конденсаційному методу взагалі не існує. Істотною відмінністю методу вимірювання точки роси по вуглеводнях є те, що вимірюється лише температура початку конденсації, тоді як метод вимірювання точки роси по волозі має на увазі вимірювання як температури конденсації, так і температури випаровування. Це пов'язано, перш за все, зі здатністю сконденсованої плівки вуглеводнів певний час утримуватися на перегрітій конденсаційній поверхні. Під перегрітою поверхнею розуміється те, що температура поверхні перевищує температуру точки роси по вуглеводнях. Крім того, тривалість утримання плівки залежить від конкретних фізичних властивостей того вуглеводню, який сконденсувався в даних умовах. Це, звичайно, може призвести до помилок у визначенні температури випаровування, і як наслідок, до невірного вимірювання точки роси по вуглеводнях. Тому точку роси по вуглеводнях визначають лише по конденсації. Для виключення залежності

ті температури, що фіксується, від тиску вводиться обмеження на швидкість охолодження конденсаційної поверхні.

З гігрометрів, що серійно випускаються і вимірюють точку роси по вуглеводнях, можна відмітити ручні гігрометри серії «Харків» та ручні зарубіжні гігрометри «Чандлер», а також автоматичні гігрометри серії «Конг-прима», «Торос», а також гігрометри фірм «Vovan» («Bartec»), «Michell». У всіх гігрометрах, що випускаються, використовується конденсаційний метод реєстрації точки роси по вуглеводнях. Основною проблемою всіх попередньо розглянутих приладів є недостатньо висока чутливість реєструвального тракту, особливо до важких вуглеводнів. Ручними гігрометрами плівку важких вуглеводнів практично неможливо зареєструвати через її оптичну прозорість. Автоматичні гігрометри, як правило, фіксують плівку важких вуглеводнів значно пізніше за температуру початку їх фактичної конденсації (тобто має місце значне заниження вимірюваної точки роси газу по вуглеводнях в порівнянні з фактичною).

Розглянемо детальніше практичну реалізацію оптичного методу реєстрації в сучасних конденсаційних гігрометрах. Конструкції первинних перетворювачів інформації мають чимало особливостей. Як вже було відмічено, перетворювачі інформації сучасних систем вимірювання конденсаційного типу складаються з конденсаційного дзеркала, де власне і відбувається випадання флюїду (води або вуглеводнів), системи охолодження дзеркала, пристрою, що вимірює температуру на дзеркалі, та системи реєстрації моменту випадання флюїду на дзеркалі.

Як правило, як конденсаційне дзеркало використовуються поліровані металеві поверхні. Розмір і форма конденсаційного дзеркала визначаються особливостями вживаної системи реєстрації плівки конденсату і охолодження дзеркала. Для ручних візуальних приладів дзеркало має значні розміри для можливості контролю випадання плівки конденсату візуально без додаткових технічних засобів (або через оптичний окуляр з незначним збільшенням). Для автоматичних приладів, що мають більш чутливі системи реєстрації, дзеркало має значно менші розміри (діаметром 10 мм і менше). Чим менша необхідна кількість вологи, що випадає, або вуглеводнів для реєстрації плівки, тим меншу площу може мати дзеркало приладу.

Для охолодження конденсаційного дзеркала використовуються дросельні холодильники, вихрові труби, охолоджувальні термоелект-

ричні пристрої, різні рідини (ефір та інші), що легко випаровуються, зріджені та стислі гази. Практично у всіх типах автоматичних гігрометрів для охолодження використовується охолоджувальні термоелектричні пристрої. Очевидно, що розміри дзеркала визначають потужність термоелектронної батареї, а від потужності батареї залежать розміри зовнішнього радіатора приладу і споживана ним електрична потужність.

Пристрій для вимірювання температури дзеркала знову ж таки визначається конструкцією і розмірами дзеркала. Як правило, в сучасних гігрометрах використовуються малогабаритні платинові або напівпровідникові термосенсиори, вбудовані або напилені на дзеркалі.

Як система реєстрації плівки конденсату застосовується оптична схема, побудована за принципом розсіювання світла, описана вище, або оптоволоконний перетворювач інформації, що використовує ефект порушення повного внутрішнього відбивання (гігрометри «Конг-Пріма-2» і «Конг-Пріма-4»).

При схожому підході до реалізації оптичного методу гігрометри відрізняються алгоритмом вимірювання точки роси. Алгоритми функціонування автоматичних конденсаційних гігрометрів можна розділити на три групи: алгоритм, що реалізує відносно швидке зниження температури дзеркала до утворення плівки флюїду з подальшим утриманням заданої товщини плівки флюїду (при цьому температура утримання плівки і є температурою точки роси газу); алгоритм, що реалізує повільне охолодження температури дзеркала із заданою швидкістю (не більше 1...2 °C/хв) з подальшою реєстрацією температури утворення плівки флюїду (при цьому температура утворення плівки – точка роси) та алгоритм, що реалізує швидке охолодження дзеркала із заданою швидкістю (1...2 °C/с) з подальшою реєстрацією температури конденсації і температури випаровування плівки конденсату (при цьому температура точки роси визначається на підставі аналізу температур конденсації та випаровування залежно від товщини плівки флюїду) [20].

До представників першої групи відносяться гігрометри фірми «Michell» моделі CONDUMAX, S4000, DEWMET; фірми «Marquis» моделі GIGROMAT 1100-02, «Торос». До другої – гігрометри фірми «Vovan», модель 241. До третьої групи належать гігрометри серії «Конг-Пріма», що використовують волоконно-оптичний перетворювач інформації.

Практика показує, що жоден із цих алгоритмів вимірювання не може повною мірою відповідати вимогам, що висуваються до гігрометрів в газовій промисловості.

Алгоритм, який базується на утриманні заданої плівки конденсату, володіє високою точністю вимірювання точки роси. Як правило, точність цього алгоритму складає $\pm 0,1 \dots 0,5$ °С. При цьому, очевидно, що якщо в газі присутні вуглеводні, здатні конденсуватися раніше води, то це призведе або до вимірювання точки роси по вуглеводнях, або до вимірювання точки роси, яка лежить між вуглеводнями та вологою. Але визначити, що ж саме сконденсувалось на дзеркалі, цей алгоритм не дозволяє. Крім того, гігрометри, побудовані на цьому алгоритмі, схильні до частих забруднень конденсаційного дзеркала. Переважно його область застосування – це чисті гази, вільні від попередньо сконденсованих домішок. Цей алгоритм призначений для вимірювання лише точки роси по волозі.

Алгоритм, пов'язаний з повільним охолодженням дзеркала, менш чутливий до забруднень, але володіє меншою точністю. Похибка алгоритму складає, як правило, ± 1 °С, а за наявності вуглеводнів, що раніше конденсуються, вона може сягати трьох градусів і більше. Крім того, в цьому випадку з'являється нестабільність при вимірюванні точки роси по волозі.

Для диференціювання води та вуглеводнів в гігрометрах, які реалізують цей алгоритм, використовуються два вимірювальні канали, а конденсаційна поверхня поділена на два конденсаційні дзеркала. Одне дзеркало – поліроване, а друге – матове (має визначений ступінь шорсткості). Перший канал з полірованим дзеркалом призначений для вимірювання точки роси по волозі, а другий – для вимірювання точки роси по вуглеводнях. Вимірювання точки роси по вуглеводнях відбувається за рахунок просвітлення матового дзеркала при конденсації на ньому плівки вуглеводнів. Вимірювання точок роси по волозі та вуглеводнях відбувається за один цикл охолодження дзеркала. Проте за наявності вуглеводнів, що раніше сконденсувалися, з'являється значна нестабільність вимірювання точки роси по волозі.

Третій алгоритм, заснований на швидкому охолодженні дзеркала з фіксацією температур конденсації та випаровування, дозволяє зменшити чутливість сенсора до вуглеводнів, що раніше сконденсувалися, і за рахунок цього підвищити стабільність вимірювання точки роси по

ЛІТЕРАТУРА

1. Виглеб Т. Датчики ; пер. с нем. / Т. Виглеб. – М. : Мир, 1989. – 196 с.
2. Осипович Л. А. Датчики физических величин / Л. А. Осипович. – М. : Машиностроение. 1979. – 159 с.
3. Берлинер М. А. Измерения влажности. / М. А. Берлинер – М. : Энергия, 1973, – 400 с.
4. Математична модель вологочутливого елемента на МДН-структурі з двома діелектричними шарами / [В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Л. В. Крилик, К. Ю. Іоніна] // Вісник Хмельницького національного університету. – 2008. – № 4. – С. 163–167.
5. Перетворювачі вологості на основі напівпровідникових структур з від'ємним опором / Збірник матеріалів ХХХVІІ науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів університету) [Електронний ресурс] / К. Ю. Іоніна // Електронне наукове видання матеріалів конференції – 2008. Режим доступу : <http://conf.vstu.vinnica.ua/allvntu/inrzp/pka.html>
6. Пат. 44301 УКРАЇНА, МКІ G01N27/12. Перетворювач вологості з частотним виходом / Осадчук Володимир Степанович, Осадчук Олександр Володимирович, Крилик Людмила Вікторівна, Іоніна Катерина Юріївна (УКРАЇНА). – № 200904774; заявл. 15.05.2009; опубл. 25.09.2009, Бюл. № 18. – 2 с.
7. Осадчук О. В. Функція перетворення та рівняння чутливості мікроелектронного частотного перетворювача вологості на основі транзисторної структури з від'ємним опором / О. В. Осадчук, Л. В. Крилик, К. Ю. Іоніна // Вісник Хмельницького національного університету. – 2009. – № 3. – С. 145–147.
8. Пат. 42868 УКРАЇНА, МКІ G01N27/12. Вимірювач вологості / Осадчук Володимир Степанович, Осадчук Олександр Володимирович, Крилик Людмила Вікторівна, Іоніна Катерина Юріївна, Звягін Олександр Сергійович (УКРАЇНА). – № 200901543; заявл. 23.02.2009; опубл. 27.07.2009, Бюл. № 14. – 2 с.
9. Пат. 44927 УКРАЇНА, МКІ G01N27/12. Пристій для визначення вологості / Осадчук Володимир Степанович, Осадчук Олександр Володимирович, Крилик Людмила Вікторівна, Звягін Олександр Сергійович, Іоніна Катерина Юріївна (УКРАЇНА). – № 200902969; заявл. 30.03.2009; опубл. 26.10.2009, Бюл. № 20. – 2 с.
10. Мікроелектронні сенсори вологості : збірник матеріалів ХХХVІІІ науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів університету/ [Електронний ресурс] /

К. Ю. Іоніна // Електронне наукове видання матеріалів конференції. – 2009. Режим доступу : <http://conf.vstu.vinnica.ua/allvntu/inrzp/pka.html>

11. Влагометрия и гигрометрия. Термины и определения : ГОСТ 8.221 – 76. ГСИ. – М. : Издательство стандартов, 1976. – 12 с.

12. Биргер Г. И. Автоматические измерители малых влагосодержаний воздуха и газов / Г. И. Биргер, В. И. Калашников. – М. : ЦИНТИэлектропром, 1960. – 250 с.

13. Современные методы и приборы для измерения влажности материалов. Сборник научных трудов под редакцией к. т. н., доц. П. Р. Исмагулаева. – Ташкент, ТашПи, 1985, – 80 с.

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

15. Мухитдинов М. Оптические методы и устройства контроля влажности / М. Мухитдинов, Э. С. Мусаев. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 96 с.

16. Білінський Й. Й. Класифікація світловодних вимірювачів вологості газових середовищ / Й. Й. Білінський, К. Ю. Іоніна // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2010. – № 1. – С. 36–39.

17. 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.

18. Газы горючие природные. Методы определения влажности : ГОСТ 20060-83. – М. : Издательство стандартов, 1983. – 10 с.

19. Пат. 989252 СРСР, МКІ 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.

20. 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.

21. Пат. 851233 СССР, МКІ G01N25/66. Гігрометр точки роси / С. Н. Зеленин, В. Н. Гольцев, В. Г. Пилюс (СССР). – № 2828951; заявл. 23.10.79; опубл. 30.07.81, Бюл. № 28. – 3 с.

22. Пат. 1372223 СССР, МКІ G01N21/81. Гігрометр точки роси / С. Н. Зеленин, А. Д. Разговоров (СССР). – № 3996101; заявл. 29.12.85; опубл. 07.02.88, Бюл. № 5. – 3 с.

23. Пат. 19725 УКРАЇНА, МКІ G01N5/00, G01N19/00. Конденсаційний гігрометр / Білінський Йосип Йосипович, Онушко Василь Володимиро-

вич (УКРАЇНА). – № 200608580; заявл. 31.07.2006; опубл. 15.12.2006, Бюл. № 12. – 2 с.

24. Пат. 26496 УКРАЇНА, МКІ G01N19/00. Конденсаційний гігрометр/ Білінський Йосип Йосипович, Онушко Василь Володимирович, Долецький Віктор Анатолійович (УКРАЇНА). – № 200705201; заявл. 11.05.2007; опубл. 25.09.2007, Бюл. № 15. – 2 с.

25. Пат. 37416 РФ, МКІ G01N21/81. Оптический гигрометр для определения абсолютной влажности газов/ К. А. Томский, М. Г. Козлов (РФ). – № 2003137918; заявл. 29.12.2003; опубл. 20.04.2004. – 8 с.

26. Истомин В. А. Какую же температуру точки росы газа должны определять влагомеры конденсационного типа при наличии в природном газе паров метанола? / В. А. Истомин // Газификация. Природный газ в качестве моторного топлива. Подготовка, переработка и использование газа : сб. – М. : ИРЦ Газпром. – 2000. – № 12. – С. 39–46.

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

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

29. Елистратов А. В. Определение точки росы газа контактным методом / А. В. Елистратов, М. В. Елистратов, В. А. Истомин // Газификация. Природный газ в качестве моторного топлива. Подготовка, переработка и использование газа : сб. – М. : ИРЦ Газпром. – 2001. – № 1. – С. 36–44.

30. Лазарев И. В. Метод синтеза структур адаптивных измерителей временных параметров импульсов сложной формы по критерию «Эффективность – интегрированные затраты» в условиях параметрической априорной неопределенности // Вестник Воронежского института МВД России. – 2010. – № 1. – С. 144–148.

31. 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.

32. Проектирование датчиков для измерения механических величин / под ред. Е. П. Осадчого. – М. : Машиностроение, 1979. – 480 с.

33. Кучикян Л. М. Световоды / Л. М. Кучикян. – М. : Энергия, 1973. – 60 с.

34. Вейнберг В. Б. Оптика световодов. Изд. 2-е, перераб. и доп. / В. Б. Вейнберг, Д. К. Саттаров. –Л. : Машиностроение (Ленингр. отд-ние), 1977. – 320 с.

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

36. Како Н., Датчики и микро-ЭВМ: пер. с япон. / Н. Како, Я. Ямане. – Л. : Энергоатомиздат (Ленингр. отд-ние), 1986. – 120 с.
37. Аш Ж. Датчики измерительных систем. В 2-х книгах / Ж. Аш. – М. : Мир, 1992. – 424 с.
38. Азимов Р. К. Оптоэлектронные преобразователи больших перемещений на основе полых световодов / Р. К. Азимов, Ю. Г. Шипулин – М. : Энергоатомиздат , 1987. – 56 с.
39. Іоніна К. Ю. Математична модель світловодного гідрометра точки роси: збірник матеріалів V Міжнародної конференції з оптико-електронних інформаційних технологій «Фотоніка - ODS 2010» / К. Ю. Іоніна // Вінниця : ВНТУ, 2010. – С. 198.
40. Юкиш М. Й. Оптико-електронні засоби контролю параметрів обертального руху на основі методу просторової модуляції : монографія / М. Й. Юкиш, В. В. Кухарчук, Й. Й. Білинський. – Вінниця : ВНТУ, 2009. – 138 с.
41. Пат. 53496 УКРАЇНА, МКІ G01N19/00. Конденсаційний гігrometer / Білинський Йосип Йосипович, Іоніна Катерина Юріївна, Онушко Василь Володимирович (УКРАЇНА). – заявл. 06.04.2010; опубл. 11.10.2010; Бюл. № 19 – 2 с.
42. Іоніна К. Ю. Світловодний гігrometer точки роси з багаторазовим відбиттям : матеріали 6-ї міжнародної молодіжної науково-технічної конференції Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій «РТ-2010» / К. Ю. Іоніна // Севастополь : СевНТУ, 2010. – С. 306.
43. Білинський Й. Й. Сенсор вологості на основі світловодної структури : Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія» : тези доповідей / Й. Й. Білинський, К. Ю. Іоніна, В. В. Онушко – Вінниця : ВНТУ, 2010. – С. 289–290.
44. Іоніна К. Ю. Світловодний гігrometer точки роси з багаторазовим відбиттям : матеріали XXXIX науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів університету [Електронний ресурс] / К. Ю. Іоніна // Електронне наукове видання матеріалів конференції. – 2010. – Режим доступу : <http://conf.vstu.vinnica.ua/allvntu/inrzp/pka.html>
45. Пат. 55512 УКРАЇНА, МКІ G01N19/00. Аналізатор вологості газів / Білинський Йосип Йосипович, Іоніна Катерина Юріївна, Онушко Василь Володимирович (УКРАЇНА). заявл. 20.07.2010; опубл. 10.12.2010, Бюл. № 23. – 3 с.
46. Осадчук В. С. Сенсори вологості : монографія / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Л. В. Крилик – Вінниця : УНІВЕРСУМ, Вінниця, 2003. – 208 с.
47. Пат. 64355 Україна G01N 19/00. Конденсаційний гігrometer природного газу / Білинський Й. Й., Іоніна К. Ю.; заявник і патентовласник –

Вінницький національний технічний університет; заявл. 14.03.2011; опубл. 10.11.2011, Бюл. № 21. – 3 с.

48. Білінський Й. Й. Математична модель вимірювального перетворювача точки роси газу з вибірковістю вимірювань / Й. Й. Білінський, К. Ю. Іоніна // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2012. – № 3. – С. 170–175.

49. Ніколайчук А. Р. Макет світловодного сенсора вологості : ХІІ регіональна науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів університету з участю працівників науково-дослідних організацій та інженерно-технічних працівників підприємств: тези доповідей [Електронний ресурс] / Ніколайчук А. Р., Іоніна К. Ю. // Вінниця, 13–15 березня 2012 р. – Режим доступу : <http://conf.vntu.edu.ua/allvntu/2012/inrtzp/txt/nikolaychuk.pdf>

50. Пат. 71590 УКРАЇНА, МКІ G01N19/00. Конденсаційний гігрометр/ Білінський Йосип Йосипович, Іоніна Катерина Юріївна, Ніколайчук Андрій Романович (УКРАЇНА); заявл. 10.10.2011; опубл. 25.07.2012, Бюл. № 14. – 3 с.

51. Пат. 70911 УКРАЇНА, МКІ G01N19/00, G01N21/01. Газовий вологомір / Білінський Йосип Йосипович, Іоніна Катерина Юріївна, Ніколайчук Андрій Романович (УКРАЇНА); заявл. 26.12.2011; опубл. 25.06.2012, Бюл. № 12. – 2 с.

52. Білінський Й. Й. Світловодний вимірювач вологості газу / Й. Й. Білінський, К. Ю. Іоніна // Вісник вінницького політехнічного інституту. – 2012. – № 6. – С. 142–145.

53. Іоніна К. Ю. Вимірювач вологості газу на основі внутрішнього багаторазового відбиття : 16 Міжнародний молодіжний форум «РАДИОЕЛЕКТРОНИКА И МОЛОДЕЖЬ В ХХІ веке» : тези доповідей (17–19 квітня 2012 р., Харків, Україна). – С. 65–66.

54. Пат. 67181 Україна G01N 19/00. Конденсаційний гігрометр / Білінський Й. Й., Іоніна К. Ю., Павлюк А. О.; заявник і патентовласник – Вінницький національний технічний університет; заявл. 14.06.2011; опубл. 10.02.2012, Бюл. № 3. – 2 с.

55. Білінський Й. Й. Методика калібрування світловодного гігрометра : VI Міжнародна науково-технічна конференція «Інформаційно-комп'ютерні технології 2012» : тези доповідей / Й. Й. Білінський, К. Ю. Іоніна – Житомир, 2012. – С. 30–32.

56. Аналіз похибок оптико-електронного засобу вимірювання вологості газів : Конференція «Фізика, Електроніка, Електротехніка : 2013» : тези доповідей / Білінський Й. Й., Іоніна К. Ю. – Суми, 2013. – 1 с., електронний ресурс. Режим доступу: <http://www.elitconf.sumdu.edu.ua/index.php/electronics/fee13/paper/view/712/666>

57. Світловодний газовий вологомір з гідрофільним полімерним покриттям : 9 Международная молодежная научно-техническая конференция «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2013» : тези доповідей / Білинський Й. Й., Іоніна К. Ю. – Севастополь, 2013. – С. 234.

58. Білинський Й. Й. Контроль температур точок роси природного газу за вологою та вуглеводнями / Й. Й. Білинський, К. Ю. Іоніна // Сборник научных трудов SWorld. – Т. 5. – 2013. – С. 50–53.

59. Білинський Й. Й. Вимірювач точок роси природного газу за вологою та вуглеводнями : матеріали конференції «Сучасні напрямки теоретичних і прикладних досліджень «2013» / Й. Й. Білинський, К. Ю. Іоніна – Одеса, 2013. – 4 с. – [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.sworld.com.ua/konfer30/765.pdf>

60. Білинський Й. Й. Контроль вологості природного газу на основі методу точки роси : матеріали XII міжнародної науково-технічної конференції «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах» (ВОТТП-12_2013) (3–8 червня, Одеса) / Й. Й. Білинський, К. Ю. Іоніна – Одеса, 2013. – С. 32–33.

61. Білинський Й. Й. Світловодний аналізатор вологості газу / Й. Й. Білинський, К. Ю. Іоніна, Б. П. Книш // Методи та прилади контролю якості. – Івано-Франківськ. – 2011. – № 27. – С. 44–47.

62. Білинський Й. Й. Світловодний вимірювач вологості газу: матеріали XI Міжнародної конференції «КОНТРОЛЬ І УПРАВЛІННЯ В СКЛАДНИХ СИСТЕМАХ» (КУСС-2012) (Вінниця, 9–11 жовтня 2012 року) / Й. Й. Білинський, К. Ю. Іоніна – Вінниця, 2012. – С. 61–62.

63. Білинський Й. Й. Інфрачервоний триканальний сенсор концентрації газу / Й. Й. Білинський, Б. П. Книш, К. Ю. Іоніна // Вісник Хмельницького національного університету. – 2011. – № 6. – С. 41–49.

64. Білинський Й. Й. Математична модель світловодного гігрометра точки роси / Й. Й. Білинський, К. Ю. Іоніна, О. Є. Скерський // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – 2011. – № 4. – С. 42–46.

65. Білинський Й. Й. Пристрій для вимірювання точки роси природного газу по волозі та вуглеводням : I Міжнародна наукова конференція пам'яті професора Володимира Поджаренко «ВИМІРЮВАННЯ, КОНТРОЛЬ ТА ДІАГНОСТИКА В ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ (ВКДТС-2011)» : тези доповідей (18–20 жовтня 2011 р.) / Й. Й. Білинський, К. Ю. Іоніна // Вінниця, 2011. – С. 69.

66. Білинський Й. Й. Вимірювач вологості газів : матеріали 8-ї Міжнародної молодіжної науково-технічної конференції «Сучасні проблеми радіотехніки і телекомунікацій РТ-2012» (23–27 квітня 2012 р.) / Й. Й. Білинський, К. Ю. Іоніна – Севастополь, 2012. – С. 260.

67. Білинський Й. Й. Підвищення точності вимірювання вологості газу за рахунок вибіркового визначення точки роси водяної пари та домішок : матеріали 5-ї Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування СПРТП-2011» (19–21 травня 2011 р.) / Й. Й. Білинський, К. Ю. Іоніна – Вінниця, 2011. – С. 109.

68. Пат. 76456 Україна G01N 19/00. Газовий вологомір / Білинський Й. Й., Іоніна К. Ю.; заявник і патентовласник – Вінницький національний технічний університет; заявл. 14.05.2012; опубл. 10.01.2013, Бюл. № 1. – 2 с.

69. Іоніна К. Ю. Гігрометр для вимірювання точки роси природного газу по волозі та вуглеводням : матеріали 7-ї Міжнародної молодіжної науково-технічної конференції «Сучасні проблеми радіотехніки і телекомунікацій РТ-2011» (11–15 квітня 2011 р.) / Іоніна К. Ю. – Севастополь, 2011. – С. 279.

70. Construction and application of platinum temperature sensors [Електронний ресурс] : Data Sheet / JUMO GmbH & Co. KG. – 2005. – 11 с. – Режим доступу : [http://www.jumo.de/C1256CE50036DD09.nsf/4C48EFC7025D021CC1256CF300480F4A/74BE0F7CC1A71EEBC1256D04002C78F7/\\$file/t90.6000gb.pdf?OpenElement](http://www.jumo.de/C1256CE50036DD09.nsf/4C48EFC7025D021CC1256CF300480F4A/74BE0F7CC1A71EEBC1256D04002C78F7/$file/t90.6000gb.pdf?OpenElement)

71. Вуйцік В. Мікроелектронні сенсори фізичних величин: Науково – навчальне видання. В 3 томах. Том 2 / [В. Вуйцік, З. Ю. Готра, О. З. Готра та ін.] за редакцією З. Ю. Готри. – Львів : Ліга–Прес, 2003. – 595 с.

72. Ємнісний сенсор вологості гребінцевої структури на основі полімерних матеріалів / [В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Л. В. Крилик, М. В. Євсєєва] // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2006. – № 2(12). – С. 229–234.

73. Пат. 811995 СРСР, МКІ G01N25/56. Датчик вологості / Ч. М. Джуварли, Є. М. Нанобашвілі, Ц. Д. Габісонія, Б. Г. Тагієв, П. В. Леонов, Г. М. Ніфтієв, І. А. Гасанов, А. Б. Меджидов (СРСР). – № 2780147; заявл. 22.09.1977; опубл. 18.10.1979, Бюл. № 5. – 3 с.

74. Проектування інформаційних систем : посібник ; за ред. В. С. Пономаренка. – К. : Академія, 2002. – 488 с.

75. Завадский В. А. Компьютерная электроника / В. А. Завадский. – К. : ВЕК, 1996. – 368 с.

76. Локазюк В. М. Мікропроцесори та мікроЕОМ у виробничих системах : посібник / В. М. Локазюк. – К. : Академія, 2002. – 368 с.

77. Агуров П. В. Интерфейсы USB. Практика использования и программирования / П. В. Агуров. – СПб. : БХВ-Петербург, 2004. – 576 с.

78. Партала О. Н. Цифровая электроника / О. Н. Партала. – СПб. : Наука и техника, 2000. – 208 с.

79. Сопряжение датчиков и устройств ввода данных с компьютерами IBM PC / Под ред. У. Томпкинса и Дж. Уэбстери. – М. : Мир, 1997. – 450 с.
80. Гитис Э. И. Аналогоцифровые преобразователи : учеб. пособие для вузов / Э. И. Гитис, Е. А. Пискулов. – М. : Энергоиздат, 1981. – 360 с.
81. Федорков Б. Г. Микросхемы ЦАП и АЦП: функционирование, параметры, применение / Б. Г. Федорков, В. А. Телец – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.
82. Лавренчик В. Н. Постановка физического эксперимента и статистическая обработка его результатов / В. Н. Лавренчик – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 272 с.
83. Браславский Д. А. Точность измерительных устройств / Д. А. Браславский, В. В. Петров. – М. : Машиностроение, 1976. – 312 с.
84. Дунаев Б. Б. Точность измерений при контроле качества / Б. Б. Дунаев. – К. : Техніка, 1981. – 152 с.
85. 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.
86. Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю : навчальний посібник / [Є. Т. Володарський, В. В. Кухарчук, В. О. Поджаренко, Г. Б. Сердюк]. – Вінниця : Велес, 2001. – 219 с.
87. Коган Л. М. Полупроводниковые светоизлучающие диоды / Л. М. Коган. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 208 с.
88. Иванов В. И. Полупроводниковые оптоэлектронные приборы : справочник / В. И. Иванов, А. И. Аксенов, А. М. Юшин. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 448 с.
89. Латыев С. М. Компенсация погрешностей в оптических приборах / С. М. Латыев. – Л. : Машиностроение, 1985. – 248 с.
90. Джексон Р. Г. Новейшие датчики / Р. Г. Джексон. – М : Техносфера, 2007. – 384 с.
91. Крук І. С. Довідник. Якість природних газів / І. С. Крук, О. М. Химко, О. І. Крук. – К.–Х. : Наука УЦЕБОП, 2010. – 407 с.
92. Вимірювання витрат та кількості газу : довідник / [М. П. Андрійшин, С. О. Канєвський, О. М. Карпаш, та ін.] — Івано-Франківськ : Сімик, 2004. – 160 с.
93. Енохович А. С. Справочник по физике / А. С. Енохович. – М. : Просвещение, 1978. – 415 с.
94. 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.

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

96. Лыков А. В. Теория сушки / А. В. Лыков – М. : Энергия, 1986. – 472 с.

97. Пістун Є. П. Облік та економія природного газу / Є. П. Пістун // Нафта і газова промисловість. – 2000. – № 2. – С. 51–53.

98. Бекиров Т. М. Основные положения отраслевого стандарта / Т. М. Бекиров // Газовая промышленность. – 1994. – № 7. – С. 24–26.

99. Зайцев В. А. Влажность воздуха и ее измерение / В. А. Зайцев, А. А. Ледохович, Г. Т. Никандрова. – 1974. – 112 с.

100. Заболотний О. В. Методи та засоби вимірювання фізико-хімічних величин. Контроль якості та складу природного газу : навч. посібник до курсового та дипломного проектування / О. В. Заболотний, М. В. Цеховський. – Харків : Нац. аерокосм. ун-т «Харк. авіац. ін-т», 2008. – Ч. 1. – 92 с.

101. Митчел Дж. Акватметрия / Митчел Дж., Смит Д. – М. : Химия, 1980. – 600 с.

102. Чепурний М. М. Застосування теорії подібності для розв'язання задач тепломасообміну / М. М. Чепурний, С. Й. Ткаченко, В. В. Бужинський. – Вінниця : ВДТУ, 2001. – 110 с.

103. Энергетическое топливо СССР (ископаемые угли, горючие сланцы, торф, мазут и горючий природный газ) / [В. С. Вдовченко, М. И. Мартынова, Н. В. Новицкий, Г. Ю. Юшина]. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 184 с.

104. Шкута А. А. Российский газ на европейском рынке энергоносителей / А. А. Шкута. – М. : Изд. центр «Классика», 2004. – 216 с.

105. Уоррэл Р. Психрометрическое определение относительной влажности воздуха при температуре, превышающей 100 °С / Р. Уоррэл – Л. : Гидрометеиздат. – 1967. – 300 с.

106. Зуев В. В. Физика и химия полимеров / В. В. Зуев, М. В. Успенская, А. О. Олехнович – СПб. : СПбГУ ИТМО, 2010. – 45 с.

107. Гвоздева Н. П. Физическая оптика : учебник для учащихся высших и средних специальных учебных заведений / Н. П. Гвоздева, В. И. Кульянова, Т. М. Леушина ; 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1991. – 304 с.

108. Яворский Б. М. Справочник по физике / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф ; 2-е изд., перераб. – М. : Наука. Гл. редакция физико-математической литературы, 1985. – 512 с.

109. Селезнев С. В. Разработка информационно-измерительной системы для оперативного контроля влажности природного газа : автореферат диссертации на соискание степени кандидата технических наук : 05.11.16 / Селезнев Сергей Викторович. – Саратов, 2006. – 26 с.

110. Истомин В. А. Влагомеры конденсационного типа / В. А. Истомин // Газовая промышленность. – 2000. – № 12. – С. 39–41.
111. Будзуляк Б. В. Конденсационный гигрометр «КОНГ-Прима-2» / Б. В. Будзуляк, А. М. Деревягин, С. В. Селезнев // Газовая промышленность 1999. – № 7. – С. 57–59.
112. Соков И. А. Метрологическое обеспечение гигрометрии / И. А. Соков. – М. : Госстандарт СССР, 1987. – 56 с.
113. Schmidt T. Natural Gas Treatment: Simultaneous Water and Hydrocarbon-Dew Point Control / T. Schmidt, D. Rennemann, T. Shulz. – // Wissenschaft & Technic. – 1993. – Bd. 46, Heft 10. – S. 366–374
114. Плотников В. В. Контроль состава и качества природного газа / В. В. Плотников, В. А. Подрешетников. – Л. : Недра, 1983. – 345 с.
115. Ткаченко М. Ф. Приборы для определения качества подготовки газа / М. Ф. Ткаченко, В. П. Плехотин, А. А. Бондаревский // Измерительная техника. – 1982. – № 10. – С. 69–70.
116. Конверсия и новые возможности измерения влажности в трубопроводах / [Д. Л. Рогожинский, Ю. А. Малоземов, Ю. А. Михайлин, И. Н. Москалев] // Газовая промышленность. – 1991. – № 10. – С. 16–17.
117. Шайхутдинов А. З. Направления развития системы обеспечения качества газа, поставляемого потребителям, в том числе на экспорт, природного газа / А. З. Шайхутдинов // О ходе работ по обеспечению качества добываемого, транспортируемого и поставляемого потребителям, в том числе на экспорт, природного газа. : сб. – М. : «ИРЦ Газпром», 1998. – С. 3–24.
118. A New Approach for Measuring Water and Heavy Hydrocarbon Dew Points of Natural Gases by using a Three-channel Laser Interferometer / [А. М. Деревягин, С. В. Селезнев, А. Р. Степанов и др.] // Материалы 23 Мирового Газового Конгресса на CD, Амстердам, 2006. – Доклад № 99.16.
119. Вукалович М. П. Таблица значений влажности насыщения / М. П. Вукалович и др. Таблицы тепло-физических свойств воды и водяного пара. – М. : Издательство стандартов, 1969. – 89 с.
120. Ничуговский Г. Ф. Определение влажности химических веществ / Г. Ф. Ничуговский– Л. : Химия, 1977. – 200 с.
121. РД 50-213-80. Правила измерения расхода газов и жидкостей стандартными сужающими устройствами. – М. : Изд-во стандартов, 1981. – 319 с.
122. Анализаторы точек росы углеводородных газов по влаге и углеводородам / [А. М. Деревягин, С. В. Селезнев, А. Г. Агальцов, В. А. Истомин] // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2004. – № 3. – С. 6–12.

Наукове видання

Білінський Йосип Йосипович

Іоніна Катерина Юріївна

**СВІТЛОВІДНІ СЕНСОРИ ТЕМПЕРАТУРИ ТОЧКИ
РОСИ ПРИРОДНОГО ГАЗУ**

Монографія

Редактор Н. Мазур

Оригінал-макет підготовлено К. Іоніною

Підписано до друку 22.10.2014 р.

Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.

Гарнітура Times New Roman.

Друк різнографічний. Ум. др. арк. 7,85.

Наклад 300 (1-й запуск 1–75) пр. Зам № В2014-50.

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.