

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

Й. Й. Білинський, Д. В. Новицький, Б. П. Книш

**НАДВИСОКОЧАСТОТНИЙ МЕТОД
І ЗАСІБ ВИМІРЮВАННЯ
ВОЛОГОСТІ ПРИРОДНОГО ГАЗУ**

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2022

УДК 621.317.029.62:533.275+533.275.08

Б-61

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 2 від 30 вересня 2021 р.)

Рецензенти:

Ф. Д. Матіко, доктор технічних наук, професор

О. Є. Середюк, доктор технічних наук, професор

Білинський, Й. Й.

Б-61 Надвисокочастотний метод і засіб вимірювання вологості природного газу: монографія / Й. Й. Білинський, Д. В. Новицький, Б. П. Книш. – Вінниця : ВНТУ, 2022. – 109 с.

ISBN 978-9 66-641-904-3

В роботі розглядається варіант розв'язання актуальної задачі вимірювання вологості природного газу, яка є однією з найважливіших задач оцінювання його якісних характеристик під час видобування, переробки та транспортування. В роботі проведено аналіз існуючих приладів та методів вимірювання вологості природного газу, обґрунтовано вибір хвилеводного НВЧ методу вимірювання вологості природного газу, представлено результати розроблення засобу вимірювання вологості природного газу, розроблено інженерну методику проектування НВЧ засобу вимірювання вологості газу, виготовлено експериментальний зразок засобу вимірювання вологості природного газу.

УДК 621.317.029.62:533.275+533.275.08

ISBN 978-9 66-641-904-3

Й. Білинський, Д. Новицький, Б. Книш, 2022

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ ПРИРОДНОГО ГАЗУ	8
1.1 Класифікація методів вимірювання вологості природних і технологічних газів.....	9
1.2 Огляд сучасних засобів вимірювання вологості газів	18
1.3 НВЧ сенсори для гігрометрії та вологометрії газів	28
1.4 Порівняння характеристик засобів найбільш розповсюджених методів вимірювання вологості природного газу, що використовують в потоці.....	36
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ НВЧ ВИМРЮВАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ВОЛОГОСТІ ПРИРОДНОГО ГАЗУ	38
2.1 Дослідження газового середовища як об'єкта вимірювання його вологості та вплив НВЧ випромінювання.....	38
2.2 Розробка математичної моделі хвильового НВЧ вимірювального перетворення вологості природного газу.....	44
2.3 Моделювання процесу вимірювання вологості природного газу за допомогою бінарної гетерогенної системи	55
2.4 Розробка математичної моделі двоканального НВЧ вимірювального перетворювача вологості природного газу	58
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА ЗАСОБУ ВИМІРЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ ПРИРОДНОГО ГАЗУ	62
3.1 Розробка структурної схеми НВЧ засобу вимірювання вологості природного газу.....	62

3.2 Перетворення та обробка вимірювальної інформації. Виведення функції перетворення засобу вимірювання вологості природного газу	64
3.3 Математична модель засобу вимірювання вологості природного газу	69
3.4 Визначення нижньої та верхньої градуєвальної точки діапазону вимірювання вологості природного газу	70
3.5 Методика розрахунку вологості природного газу	72
3.6 Аналіз похибок засобу вимірювання вологості природного газу	74
3.6.1 Аналіз температурних похибок	75
3.6.2 Дослідження похибки квантування (похибки АЦП).....	76
РОЗДІЛ 4 АПАРАТНО-ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ НВЧ ЗАСОБУ ВИМІРЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ ПРИРОДНОГО ГАЗУ	
4.1 Розробка інженерної методики проектування засобу вимірювання вологості газів.....	79
4.2 Алгоритми роботи засобу вимірювання вологості природного газу	83
4.3 Експериментальні дослідження НВЧ вологоміра природного газу	86
4.4 Обробка результатів вимірювання вологості природного газу	94
4.5 Порівняльні характеристики розробленого засобу вимірювання вологості природного газу та потокового НВЧ вологоміра	95
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	97

ВСТУП

Вимірювання вологості – одна із найважливіших задач при контролі якості природного газу, зокрема, його енерговмісту при його видобуванні, газопереробленні та транспортуванні. Присутність води в газі небажана, оскільки при транспортуванні газу можуть спостерігатися випадки корозії трубопроводів і арматури, а також утворення гідратів (продуктів приєднання води до різних речовин) та конденсату [1].

Кількісно вологовміст у газі може характеризуватися різними фізичними величинами, серед яких найбільш широко розповсюдженими є абсолютна вологість, молярна (об'ємна) частка вологи, об'ємний вологовміст, температура точки роси, відносна вологість.

Умови транспортування не потребують повного видалення вологи з природного газу, а вимагають лише підтримки необхідної температури точки роси вологи та вуглеводнів, що не переводить газ при зниженні його температури, з ненасиченого стану в насичений, при якому можливе виділення конденсованої фази з його складу [2, 3]. Про власне сухий газ можна судити за значенням його вологості. Прийнято розрізняти абсолютну та відносну вологості газу. Правда, про сухість газу можна говорити і на основі вимірної температури точки роси по воді. Природний газ вважають сухим, коли його відносна вологість не перевищує 10 % [4]. Огляд методів вимірювання вологості газів виявив, що похибка вологомірів коливається від 0,1 % до 5 %. Це досить висока точність, але не у випадку коли йдеться про дуже великі об'єми газу [5, 6].

З розвитком технологій газорозподілу, нафтохімії та газоперероблення для забезпечення якості продукції, коли вимагається перейти до гранично низьких концентрацій, виникла необхідність у швидкому відгуку засобу вимірювання вологості, в тому числі і для газів змінного складу, при цьому задача вимірювання вологості значно ускладнилася. В цих випадках вимагається прийняття швидкого рішення, наприклад неконтрольований рівень вмісту води може призвести до аварійної ситуації, до отримання неякісного продукту. Складність вимірювання вологості природного газу також полягає у тому, що вона має визначатись у вибухонебезпечних умовах при різних тисках [5, 7]. Для природного газу неможливо точно визначити коефіцієнт стисливості, що також ускладнює вимірювання його вологості. Для визна-

чення вологості природного газу існує багато методів, але жоден са-
мостійно не може в повній мірі забезпечити вимірювання вологості
газу. Це пояснюється наявністю у природному газі таких компонентів,
як крапельної рідини, вуглеводневого конденсату, діетиленгліколю,
метанолу, компресорного масла, меркаптанів (сірки), сірководню. На-
громадження цих проблем потребує пошуку таких методів вимірю-
вання і засобів вимірювання вологості природного газу, які б відпові-
дали таким особливим вимогам. Окрім того сучасні засоби вимірю-
вання вологості мають задовольняти такі основні вимоги: забезпечу-
вати безперервний автоматичний контроль вологості; швидкий відгук;
виключення впливу агресивних домішок; низька похибка і відтворю-
ваність результатів вимірювання; вбудовані засоби перевірки достові-
рності показань приладу без демонтажу польового блока й зупинки
процесу.

Значний внесок у розвиток вітчизняної вологометрії, зокрема во-
логості природного газу, зробили такі провідні вчені: З. Ю. Готра,
Є. П. Пістун, В. В. Кухарчук, В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, М. А. Фі-
линюк, а також закордонні вчені: Г. Віглеб, О. Н. Негоденко,
М. А. Берлінер, Е. А. Тутов.

На сьогодні найбільшого застосування набули лише два методи
вимірювання вологості – сорбційний та конденсаційний. Ці методи за-
стосовуються для визначення температури точки роси вологи в газах,
що не містять крапельної рідини та точка роси вуглеводнів не переви-
щує точки роси вологи більше ніж на 5 °С. Крім того, температура на
пробовідбірній лінії має бути не менше ніж на 3 °С вище ймовірної
(очікуваної) температури точки роси газу. При недотриманні вище вка-
заних вимог суттєво зростає похибка вимірювання. Хоча дзеркальна
система вважається найбільш ефективним процесом вимірювання, його
недоліком є тенденція до забруднення. Оскільки апарат чутливий, не-
обхідно очистити пристрій для забезпечення постійних результатів, але
це може бути дорого для підтримки подальшої роботи [3, 8].

Для вимірювання відносної вологості природного газу широко ви-
користовують гігрометри та гігрографи різних типів з діапазоном від
5 % до 100 % і робочими температурами від -60 °С до +60 °С з грани-
чно допустимою абсолютною похибкою від 1 до 15 %. Такі сенсори
чутливі до факторів навколишнього середовища, що вимагає необхід-
ність регулярного повторного калібрування [9, 10].

Незважаючи на розбіжності в способах вимірювання, переважно всі вони реалізують рівноважний принцип вимірювання. Це означає, що для достовірних вимірювань необхідне встановлення рівноваги по воді в сенсорі й на чутливому елементі і вимагає значних затрат часу. Тривалий час вимірювання утруднює визначення малих концентрацій, 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 відрізнитися від її значення для чистої води. Якщо в багатоконпонентному середовищі, про що сказано вище, а саме таким є природний газ – температура конденсації будь-якого компонента вища точки конденсації парів води, то аналізатор може сприйняти цю температуру як дійсну. Отже, розвиток газової промисловості України потребує удосконалення методів та засобів вимірювання їхнього складу та якості, зокрема, його вологості.

Застосування неконтактних методів вимірювання дозволяє виключити вплив агресивних домішок, а також перекручування результатів вимірювання вологості газу внаслідок впливу спиртових сполук. На сьогодні одними із перспективних є надвисокочастні (НВЧ) вологоміри, що розвиваються з 50-х років ХХ століття, які задовольняють переважну більшість вище наведених вимог до таких засобів.

Основними недоліками НВЧ сенсорів є відсутність практично прийнятної теорії вимірювального перетворення сенсорів. Тому поряд з розробкою НВЧ вологомірів основну увагу приділено розробці теорії поширення НВЧ випромінювання у вологому газі.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

Метод вимірювання вологості природного газу обирається з врахуванням конкретних вимог, до яких відноситься точність, чутливість, час спрацювання, швидкодія, масо-габаритні параметри тощо, а також виходячи з вимірювального середовища.

При цьому вміст вологи в природному газі може бути виражений за допомогою декількох фізичних величин, які мають різні одиниці вимірювання [4, 11, 12].

Вологість газу – це якісна характеристика, яка відображає пропорцію кількості вологи, що розчинена в газі до найбільшої можливої кількості за таких умов (тиск, температура), тобто рівень насиченості газу водяною парою, визначається відсотками (%).

Найбільш широко використовуються в практичній гігрометрії об'ємна частка вологи і відносна вологість, точка роси. Існує ряд співвідношень, що дозволяють з якої-небудь однієї вимірної величини вологості газу розрахувати всі інші.

Вологовміст газів є кількісною характеристикою та показує кількість вологи (вимірної в грамах), яку розчинено в 1 м³ вологого газу за нормальних атмосферних умов (+20 °С, 760 мм рт. ст.). Здебільшого вологовміст газів описують у ваговій кількості пари вологи, що випадає на одиницю ваги сухого газу, або кількістю молей пари вологи на моль сухого газу.

Температура точки роси вимірюється градусами Цельсія (°С) та її значення дорівнює температурі, за якої газ досягає найбільшого насичення розчиненою в ньому вологою при такому тиску. Серед зазначених одиниць вимірювання існує відомий зв'язок, тобто, якщо термодинамічні параметри системи відомі, то інші можуть бути розрахованими. Взаємозв'язок основних величин вологості природного газу визначається ГОСТом № 20060-83 «Гази горючі природні. Методи визначення вмісту водяної пари і точки роси вологи».

Останнім часом комерційну актуальність набуває і показник якості газу: «точка роси за вуглеводнями», так як багато імпортерів природного газу стали вносити цей показник в контракти на поставку газу і/або висувати більш жорсткі вимоги за цим параметром. Показник якості газу по точці роси за вуглеводнями визначається ГОСТом № 20061-84 «Гази горючі природні. Метод визначення температури точки роси вуглеводнів».

1.1 Класифікація методів вимірювання вологості природних і технологічних газів

Для визначення вологості природного газу існує багато методів, щоправда, жоден із них самостійно не може в повній мірі забезпечити вимірювання вологості газу. Це насамперед пояснюється наявністю у природному газі таких компонентів, як крапельної рідини, вуглеводневого конденсату, діетиленгліколю, метанолу, компресорного масла, меркаптанів (сірки), сірководню. До них відносяться спектрально-оптичні, сорбційні, електролітичні, хімічні, конденсаційні, акустичні, психрометричні та інші. Зараз найбільшого застосування набули лише два методи – сорбційний та конденсаційний. Як технічні засоби вимірювання відносної вологості природного газу широко використовують гігрометри та гігрографи різних типів з діапазоном від 5 % до 100 % і робочими температурами від $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ з гранично допустимою абсолютною похибкою $\Delta\varphi$ від 1 до 15 % [3].

Детальна класифікація методів вимірювання вологості природних і технологічних газів, яка показана на рис. 1.1, містить такі класифікаційні ознаки, як спосіб одержання результатів вимірювання, фізичні явища, що лежать в основі роботи, ефекти, що лежать в основі фізичних явищ. Класифікація містить близько двадцяти найменувань. Як і більшість методів вимірювання фізичних величин, всі методи вимірювання вологості газів можна поділити на прямі і непрямі методи [13, 14]. В основі прямих методів лежить розділення досліджуваної речовини чи матеріалу на вологий і сухий залишки. У цю категорію входять методи повного поглинання (гравіметричні та хімічні), конденсаційно-згущувальний, з виморожуванням вологи, з випарюванням тощо.

Складність видалення пари з газових сумішей робить першу групу методів малоперспективними для практичного використання для вимірювання технологічних газів в потоці.

Непрямі вимірювання ґрунтуються на використанні фізико-хімічних властивостей води, тобто на властивості явищ в поглинанні електромагнітних випромінювань, і таким способом вимірюється та чи інша фізична величина, функціонально пов'язана з вологовмістом газу або з фізичними властивостями матеріалів чи іншими величинами, функціонально пов'язаними з вологістю.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

[1] С. В. Лозинський, В. О. Бакастов, і І. А. Гордієнко, «Як виміряти вологість природного газу,» *Нафтова та газова промисловість*, № 5, с. 60-63, 1998.

[2] О. І. Бакуменко, «Нові розробки у галузі визначення температури точки роси природного газу,» *Трубопровідний транспорт*, № 4 (94), с. 16-26, 2015.

[3] О. В. Хвостова, «Методика прогнозування процесів конденсації вологи та гідратуутворення в газопроводах,» *Технологический аудит и резервы производства*, № 1/3 (15), с. 38-41, 2014.

[4] І. С. Крук, Я. В. Курило, і О. І. Крук, «Методика розрахунку вологості природного газу при визначенні його кількості,» *Методи та прилади вимірювання якості*, № 7, с. 100-102, 2001.

[5] РД 50-213-80. Правила измерения расхода газов и жидкостей стандартными сужающими устройствами. Изд-во стандартов, 1981, 319 с.

[6] І. С. Крук, О. М. Химко, і О. І. Крук, Якість природних газів: довідник, *Наука УЦЕБОП*, с. 407, 2010.

[7] Ж. А. Даев, и Л. Н. Латышев, «К вопросу измерения влажности природного газа,» *Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело»*, № 1 <http://www.ogbus.ru>, с. 1-4, 2013.

[8] Л. А. Витвицька, і С. А. Чеховський, «Метрологічний аналіз конденсаційного вологоміра природного газу,» *Системи обробки інформації*, № 2 (127), с. 72-74, 2015.

[9] ГОСТ 5542-87. Газ горючий природный для промышленного и коммунально-бытового назначения. Технические условия. Госстандарт России (01.01.1988), *ИПК Издательство стандартов*, 2000; 2004.

[10] Г. М. Йордан, «Методи та обладнання для визначення вологості, що використовуються в засобах автоматизації процесів висушування,» *Квалілогія книги, зб. наук. пр.*, № 2 (18), с. 67-77, 2010.

[11] В. В. Пеклер, и Г. М. Мамонтов, «Состояние и перспективы развития гигрометров и средств их метрологического обеспечения,» *Датчики и системы*, № 1, с. 33-38, 2006.

[12] А. В. Елистратов, М. В. Елистратов, и В. А. Истомин, «Определение точки росы газа контактным методом. Газификация. Природ-

ный газ в качестве моторного топлива. Подготовка, переработка и использование газа,» *ИРЦ Газпром*, № 1, с. 36-44, 2001.

[13] Й. Й. Білінський, Б. П. Книш, та В. В. Онушко, «Універсальна класифікація оптичних методів дослідження густини газу,» *Вісник Хмельницького національного університету*, № 4, с. 23-26, 2010.

[14] Д. В. Новицький, Й. Й. Білінський, та О. С. Городецька, «Аналіз методів та засобів визначення температури точки роси за вологою та вуглеводнями,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 4, с. 110-117, 2018.

[15] В. В. Плотников, и В. А. Подрешетников, *Контроль состава и качества природного газа*. Москва: Недра, 1983, 345 с.

[16] И. А. Соков, «Метрологическое обеспечение гигрометрии,» *Госстандарт СССР, обз. инф. Госстандарта СССР*, № 1, с. 56, 1987.

[17] Д. Л. Рогожинский, Ю. С. Гангнус, Ю. А. Малоземов, и Ю. А. Михайлин, «Конверсия и новые возможности измерения влажности в трубопроводах,» *Газовая промышленность*, № 10, с. 16-17, 1991.

[18] T. Schmidt, D. Rennemann, T. Shulz, *Natural Gas Treatment: Simultaneous Water and Hydrocarbon-Dew Point Control, Wissenschaft&Technic*, Bd. 46, Heft10, P. 366-374, 1993.

[19] Є. П. Пістун, «Облік та економія природного газу,» *Нафта і газова промисловість*, № 2, с. 51-53, 2000.

[20] М. Н. Мухитдинов, и Э. С. Мусаев, *Оптические методы и устройства контроля влажности*. М.: Энергоатомиздат, с. 96, 1986.

[21] Ю. А. Ивченко, и А. А. Федоров, «Чем измерить влажность?» *Датчики и системы*, № 8, с. 53-54, 2003.

[22] М. А. Берлинер, *Измерения влажности*. М.: Энергия, 1973, с. 400.

[23] А. Л. Халиф, Е. И. Туревский, и В. В. Сайкин, «Приборы для определения влажности газа. Подготовка, переработка и использование газа,» *ИРЦ Газпром*, с. 45, 1995.

[24] Laser-Two-Beam (L2B) Optical Gas Flow Meter: промисловий каталог, *COSA Instruments*. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.cosa-instrument.com/Products/Products.html>.

[25] Измерение влажности природного газа: промисловий каталог, *Artvik*. [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://www.artvik.ru/pdf/analyzers_appl/moisture_in_natural_gas_rev3.pdf.

[26] А. В. Поляков, И. Е. Заднепрянный, и В. Б. Поляков, Пьезоэлектрические кварцевые резонаторы и их применение в датчиках, ООО СКТБ ЭлПА. Режим доступа:

<http://www.sktbelpa.ru/quartzcrystalsandsensors.pdf>.

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

[28] Ассортимент выпускаемой продукции: промышленный каталог, Toros. [Электронный ресурс]. Режим доступа:

<http://toros.kiev.ua/prod.html>.

[29] В. А. Іщенко, та В. Г. Петрук, *Високочутливі засоби вимірювання малих концентрацій газів : монографія*. Вінниця: ВНТУ, 2010, с. 152.

[30] П. Р. Исмагуллаев, и А. Б. Гринвальд, *Теоретическое и экспериментальное исследование сверхвысокочастотного метода измерения влажности материалов*. Ташкент, 1982, с. 84.

[31] В. К. Бензарь, *Техника СВЧ-влажнометрии*. М: Высшая школа, 1974, с. 352.

[32] Г. М. Мутанов, Г. К. Шадрин, и Н. В. Аринова, «Измерение влагосодержания силикатной смеси,» на *II-ой Междунар. науч.-практ. конф. Состояние, проблемы и перспективы информатизации в РК*. Усть-Каменогорск, 2005, с. 80-87.

[33] Р. Уоррен, *Психометрическое определение относительной влажности воздуха при температуре, превышающей 100 °С*. Гидрометеиздат, 1967, с. 300.

[34] Ц. Н. Рогинская, и А. И. Финкельштейн, «Промышленные ИК-спектрометры,» *Аналитическая химия*, № 3, с. 360-361, 1959.

[35] З. Ю. Готра, В. Вуйцік, та О. З. Готра, *Мікроелектронні сенсори фізичних величин : науково-навчальне видання*, т. 2. Львів: Ліга-Прес, 2003, с. 595.

[36] В. А. Зайцев, А. А. Ледохович, и Г. Т. Никандрова, *Влажность воздуха и ее измерение*. Л.: Гидрометеиздат, 1974, с. 112.

[37] И. А. Соков, и Г. Д. Вапняр, «Метрологическое обеспечение гигрометрии: Обзорная информация,» *Сер. Метрологическое обеспечение измерений, ВНИИКИ*, № 5, с. 211, 1982.

[38] Н. П. Федоров, П. А. Федюнин, и В. А. Русин, *Поверхностные волны и микроволновые устройства контроля электрофизических па-*

раметров магнитодиэлектрических покрытий на металле. М: Издательство «Машиностроение-1», 2004, с. 196.

[39] J. Wang, et. al., “Humidity sensor base on the ZnO nanorods and fiber modal interferometer. *Proc. SPIE 9685*,” in *8th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Design, Manufacturing, and Testing of Micro- and Nano-Optical Devices and Systems; and Smart Structures and Materials*, 968516. 2016. <https://doi.org/10.1117/12.2244482>.

[40] А. А. Єфіменко, та А. М. Науменко, «Вимірювання вологості в області гігromетрії високих тисків,» *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил*, № 3 (44), с. 85-87, 2015.

[41] Jin-Kwan Park, Tae-Gyu Kang, Byung-Hyun Kim, Hee-Jo Lee, Hyung Hee Choi, and Jong-Gwan, Real-time Humidity Sensor Based on Microwave Resonator Coupled with PEDOT:PSS Conducting Polymer Film, *Scientific REPORTS*, 2018, P. 1-8.

[42] ДСТУ ISO 10101-1:2007, Природний газ. Визначення вмісту води методом Карла Фішера. Ч. 1. Вступ (ISO 10101-1:1993, IDT).

[143] ДСТУ ISO 10101-2:2007, Природний газ. Визначення вмісту води методом Карла Фішера. Ч. 2. Методика титрування (ISO 10101-2:1993, IDT).

[44] ДСТУ ISO 10101-3:2007, Природний газ. Визначення вмісту води методом Карла Фішера. Ч. 3. Методика кулонометричного визначення (ISO 10101-3:1993, IDT).

[45] R. S. Jachowicz, and D. Zalewski, «Hygrometer with fibre optic dew point detector», *Sens. Actuators A*, vol. 42, pp. 503-507, 1994.

[46] Moisture Measurement in Natural Gas Rolf Kolass. Michell Instruments GmbH, Friedrichsdorf, Germanu, Cris Parker, Michell Instruments Ltd, Cambridge, UK., 2016. [Online]. Available: <http://www.ebookpp.com/mo/mositure-doc.html>.

[47] О. Л. Швейкін, О. О. Прокопенко, та А. В. Пономарьов, *Вимірювальна система для визначення показників якості природного газу*. Харків: УПА, 2013, с. 131.

[48] С. В. Селезнев, «Разработка информационно-измерительной системы для оперативного контроля влажности природного газа,» дис. канд. техн. наук : 05.11.16, Саратов, 2006.

[49] В. А. Истомина, «Влагомеры конденсационного типа,» *Газовая промышленность*, № 12, с. 39-41, 2000.

[50] Zhi Chen, and Chi Lu, «Humidity sensors: a review of materials and mechanisms», *Sensor Lett.*, vol. 3, no. 4, 2005. doi:10.1166/sl.2005.045.

[51] M. Kunze, J. Merz, W-J. Hummel, H. Glosch, S. Messner, and R. Zengerle, «A micro dew point sensor with a thermal detection principle,» *Measurement science and technology*, vol. 23, 2012, pp. 1-10. doi:10.1088/0957-0233/23/1/014004.

[52] В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, та А. Ю. Савицький, *Радіовимірювальні перетворювачі вологості на основі МДН-структур*. Вінниця: ВНТУ, 2015, с. 159.

[53] А. В. Поляков, И. Е. Заднепрянный, В. Б. Поляков, Пьезоэлектрические кварцевые резонаторы и их применение в датчиках. *СКТБ ЭлПА*. Режим доступа: <http://www.sktbelpra.ru/quartzcrystalsandsensors.pdf>.

[54] G. Korotcenkov, Handbook of Humidity Measurement, Volume 1: Spectroscopic Methods of Humidity Measurement, *CRC Press Published, Reference*, 2018, 372 P.

[55] Й. Й. Білінський, В. В. Онушко, О. С. Городецька, та М. Й. Юкиш, «Математична модель інфрачервоного аналізатора вологості газу на основі використання частотно-імпульсної модуляції,» *Методи та прилади вимірювання якості*, № 26, с. 38-44, 2011.

[56] А. М. Деревягин, С. В. Селезнев, А. Г. Агальцов, и В. А. Истомин, «Анализаторы точек росы углеводородных газов по влаге и углеводородам,» *Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности*, № 3, с. 6-12, 2004.

[57] Л. А. Міхеєнко, та І. І. Синявський, «Аналіз оптичних систем малогабаритних віддзеркалювальних вологомірів,» *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, № 4, с. 27-31, 2000.

[58] Л. В. Лесовий, та Ф. Д. Матіко, «Визначення відносної вологості газу для вузлів обліку із застосуванням засобів вимірювання температури точки роси,» *Вісник національного університету «Львівська політехніка»*, № 659, с. 84-91, 2009.

[59] П. Р. Исматуллаев, *СВЧ-преобразователи влажности*. Ташкент: ТашПИ, 1985, 55 с.

[60] А. А. Брандт, *Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах*. М.: Физматгиз, 1963, 404 с.

[61] А. Н. Железняков, Р. И. Сайтов, и Р. Г. Абдеев, «Микроволновый влагомер», *Автоматизация, телемеханизация и связь нефтяной промышленности*, № 4, с. 78-80, 2012.

[62] А. М. Деревягин, С. В. Селезнев, и А. Р. Степанов, «Анализатор точки росы по влаге и углеводородам «КОНГ-Прима-4»,» *Наука и техника в газовой промышленности*, № 1, с. 15-22, 2002.

[63] А. А. Фаткуллин, и Э. И. Глушков, «Проблемы поверки точных влагомеров «PhaseDynamics»,» *Автоматизация, телемеханизация и связь нефтяной промышленности*, № 3, с. 15-16, 2006.

[64] Переносные автономные гигрометры взрывобезопасного исполнения ТОРОС-3-2В, ТОРОС-3-2ВУ. [Электронный ресурс]. Режим доступа :

<http://toros.kiev.ua/prod2.html>.

[65] Zhi Chen, and Chi Lu, «Humidity sensors: a review of materials and mechanisms», *Sensor Lett.*, vol. 3, no. 4, 2005. doi:10.1166/sl.2005.045.

[66] M. Kunze, J. Merz, W-J. Hummel, H. Glosch, S. Messner, and R. Zengerle, «A micro dew point sensor with a thermal detection principle», *Measurement science and technology*, vol. 23, pp. 1-10, 2012. doi:10.1088/0957-0233/23/1/014004.

[67] M. Kimura, «A new method to measure the absolute – humidity independently of the ambient temperature», *Sens. Actuators B*, vol. 33, pp. 156-160, 1996.

[68] B. Sorli, F. Pascal-Delannoy, A. Giani, A. Foucaran, and A. Boyer, «Fast humidity sensor for high range 80–95 % RH», *Sens. Actuators A: Physical*, vol. 100, 2002, pp. 24–31.

[69] А. М. Деревягин и др., «КОНГ-Прима-10» – интерференционный анализатор точки росы и газа по влаге и углеводородам», *Наука и техника в газовой промышленности*, № 1, с. 70-78, 2005.

[70] Y. Y. Bilynsky, «The control of natural gas dew point temperatures by water and hydrocarbons: Modern scientific research and their practical application», *SWorld*, November, Issue № 5, pp. 199-203, 2013. [Online]. Available:

<http://www.sworld.com.ua/index.php/en/e-journal/the-content-of-journal/j213/20948-j21310>.

[71] Й. Й. Білінський, та К. Ю. Іоніна, «Світловодний вимірювач вологості газу», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 6, с. 142-145, 2012.

[72] J. Weremczuk, «Dew/Frost Point Recognition With Impedance Matrix of Fingerprint Sensor,» *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 57, issue 8, pp. 1791-1795, 2008.

[73] How to choose the right instrument for measuring humidity and dew point. *Vaisala*, 2016. [Online]. Available: <https://www.vaisala.com/en/media/3026>.

[74] J. Gronblad, «New DMT242 dewpoint transmitter for low dewpoint OEM measurements,» *Vaisala News*, vol. 154, pp. 4-5, 2000.

[75] П. А. Федюнин, Д. А. Дмитриев, А. А. Воробьев, и В. Н. Чернышов, *Микроволновая термовлагометрия*. М.: «Издательство Машиностроение-1», 2004, с. 208.

[76] Ю. О. Гордієнко, С. В. Ленков, Я. І. Лепіх, та В. О. Проценко, «Мікрохвильові датчики для гігрометрії та вологометрії,» *Збірник наукових праць військового інституту київського національного університету імені Тараса Шевченка*, № 30, с. 14-20, 2011.

[77] Ю. Е. Гордиенко, А. В. Пашков, Н. И. Слипченко, «Развитие прямого СВЧ диэлектрического метода в гигрометрии,» *Радиотехника*, № 135, с. 206-210, 2003.

[78] Я. І. Лепіх та ін., *Створення мікроелектронних датчиків нового покоління для інтелектуальних систем*. Одеса: Астропринт, 2011, с. 351.

[79] Ю. Е. Гордиенко, и Ф. М. Хаммуд, «Оценка направлений оптимизации СВЧ резонаторных датчиков контроля влагосодержания порошковых материалов электронной технологии,» *Радиоэлектроника и информатика*, № 2, с. 34-38, 2004.

[80] Ю. О. Гордієнко, та О. І. Кочержин, Спосіб вимірювання вологості діелектричних матеріалів, № 52126А України, GO1N22/04, 16.12.02, Бюл. № 12.

[81] Ю. О. Гордієнко, О. І. Кочержин, А. А. Потапов, та Е. А. Ку克林, «Микроволновый гигрометр,» *Измерительная техника*, № 3, с. 36-37, 1986.

[82] М. И. Горлов, А. В. Андреев, и Л. П. Ануфриев, «Микроэлектронный датчик влажности поверхностно-конденсационного типа», *Патент РФ № 2224246, Заявл. 10.07.02, Опубл. 20.02.2004, Бюл. № 5*.

[83] А. А. Коробко, и В. В. Рудаков, «Исследования метрологических характеристик измерительных преобразователей в виде ступенчатого коаксиального неоднородного резонатора для диэлькометрии

жидких сред в СВЧ діапазоні», *Вісник Національного технічного університету ХПІ*, № 51 (1160), с. 91-95, 2015.

[84] В. П. Лісовець, та І. А. Мартиненко, «Деякі питання при визначенні точки роси природного газу», на *Всеукр. семінар-нараді «Облік природного газу та метрологія»* (збірка тез доповідей), смт. Лазурне, 2018, с. 18-20.

[85] І. М. Бондаренко, Ю. О. Гордієнко, та О. Ю. Панченко, *Напрями та проблеми мікрохвильових досліджень вологовмісних матеріалів та структур*. Харків: ФОП Панов А. М., 2019, с. 320.

[86] Ю. М. Поплавко, В. І. Молчанов, та В. А. Казміренко, *Мікрохвильова діелектрична спектроскопія*. Київ: КПІ, 2011, с. 304.

[87] О. В. Заболотний, «Розвиток теорії діелькометричної вологометрії та алгоритмічних методів підвищення точності вимірювання вмісту вологи речовин». [Електронний ресурс], автореф. дис. д-ра техн. наук : спец. 05.11.13. *Нац. техн. ун-т Харків*, 2019, с. 43.

[88] М. П. Андрієшин, С. О. Каневський, О. М. Карпаш, та Я. С. Марчук, *Вимірювання витрат та кількості газу*. Івано-Франківськ, 2004, с. 160.

[89] Й. Й. Білинський, та В. В. Онушко, *Метод і оптико-електронний засіб вимірювального вимірювання вологості природного газу*. Вінниця: ВНТУ, 2014, с. 132.

[90] О. П. Костюк, «Особливості конструкції та методика теплового розрахунку контактного утилізатора теплоти відхідних газів із проточним барботажем шаром», *Вісник НТУ «ХПІ», Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*, № 17(1126), с. 125-134, 2015.

[91] Д. В. Новицький, Й. Й. Білинський, та О. С. Городецька, «Розробка математичної моделі хвилеводного НВЧ вимірювального перетворення вологості природного газу», *Вісник Хмельницького Національного Університету*, № 3, с. 131-136, 2019.

[92] Д. В. Новицький, та Й. Й. Білинський, «НВЧ вимірювальний перетворювач вологості природного газу», на *23 міжнародному молодіжному форумі «Радіоелектроніка та молодь у 21 столітті»*, Харків, 2019, с. 79-80.

[93] Ю. А. Гусев, *Основы диэлектрической спектроскопии*. Казань: КГУ, 2008, с. 112.

[94] Е. С. Кричевский, В. К. Бензарь, и М. В. Венедиктов, *Теория и практика экспрессного контроля влажности твердых и жидких материалов*. М.: Энергия, 1980, с. 240.

[95] П. М. Якібчук, та М. М. Клим, *Молекулярна фізика*. Львів: ЛНУ ім. Івана Франка, 2013, с. 584.

[96] Н. П. Богородицкий, В. В. Пасынков, Б. М. Тареев, *Электротехнические материалы*. Л.: Энергоатомиздат, 1985, с. 384.

[97] Д. В. Новицький, Й. Й. Білінський, та О. С. Городецька, НВЧ вологомір рідких і газоподібних вуглеводів, № 140675 України, GO1N22/04, 10.03.22, Бюл. № 5.

[98] Л. Р. Калапуша, *Комп'ютерне моделювання фізичних явищ і процесів*. Луцьк: РВВ «Вежа», 2007, с. 190.

[99] Ю. М. Поплавко, *Фізика диелектриків*. Киев: Вища школа, 1980, с. 398.

[100] Д. В. Новицький, Й. Й. Білінський, та Б. П. Книш, «Моделювання та експериментальні дослідження НВЧ вимірювального перетворювача вологості природного газу,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 1 (154), с. 7-13, 2021.

[101] В. Б. Бенедицький, Л. Ю. Козак, А. В. Яворська, «Радіохвильовий метод вимірювання вологості матеріалів,» *ВІСНИК ЖДТУ*, № 4 (59), с. 33-40, 2011.

[102] Д. В. Новицький, Й. Й. Білінський, та О. С. Городецька, «Розробка математичної моделі двоканального НВЧ вимірювального перетворювача вологості природного газу,» *Вісник вінницького політехнічного інституту*, № 4 (145), с. 19-24, 2019.

[103] С. А. Лыжникова, *Приборы для измерения влажности газов и их поверка*. М.: Изд-во стандартов, 1988, с. 59.

[104] А. Б. Зайцев, и В. В. Мокряков, *Полупроводниковые диоды. Диоды высокочастотные, диоды импульсные, оптоэлектронные приборы*. М.: Радио и связь, 1988, с. 592.

[105] Основы Arduino для начинающих. Arduino изнутри – структура, составляющие и их назначение. Микроконтроллер ATmega328P. URL: https://pikabu.ru/story/vyipusk_3_osnovyi_arduino_dlya_nachinayushchikh_arduino_iznutri_struktura_sostavlyayushchie_i_ikh_naznachenie_mikrokontroller_atmega328p_4497606?fbclid=IwAR12p2g7hUTRgp9CkWMmVRk6vfkfRmIZy5T9Mml69ZOXn1LHc_1YxGw_zqKAA. Дата звернення: 19.11.2019.

[106] D. Novytskyi, Y. Bilynsky, O. Horodetska, and O. Voytsekhovska, «Development of a mathematical model of measuring control device of natural gas humidity,» *Technology audit and production reserves*, № 2/1(52), pp. 42-45, 2020.

[107] D. I. Bilenko, *Kompleksnaya dielektricheskaya pronitsaemost. Plazmennyy rezonans svobodnyih nositeley zaryada v poluprovodnikah*. Izdatelstvo Sarat. Un., 44, 1999.

[108] Z. Chen and C. Lu, Humidity sensors: a review of materials and mechanisms. *Sensor Lett.*, vol. 3, no. 4. doi:10.1166/sl.2005.045.

[109] Д. В. Новицький, та Й. Й. Білінський, «Двоканальний НВЧ вимірювальний перетворювач вологості природного газу», на 5-й Міжнарод. наук. конф. «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах» (ВКДТС-2019). Вінниця, 2019, с. 87-88.

[110] Є. Т. Володарський, та І. П. Москаленко, «Підвищення вірогідності вимірювання з застосуванням адаптивного алгоритму,» *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*, № 3, с. 111-114, 1999.

[111] В. П. Куценко, та О. П. Яненко, «Зразковий генератор шуму НВЧ-діапазону для метрологічного забезпечення радіометричних приладів контролю,» *Искусственный интеллект*, № 2, с. 6-13, 2013.

[112] Вольфганг Райс, «Как работают аналогово-цифровые преобразователи и что можно узнать из спецификации на АЦП,» *Компоненты и технологии*, № 3, с. 20-24, 2005.

[113] B. Sorli, F. Pascal-Delannoy, A. Giani, A. Foucaran, and A. Boyer, Fast humidity sensor for high range 80–95 % RH. *Sensors and actuators. A, Physical*, vol 100, 2002, 24-31.

[114] S. Luo, L. Yang, and J. Liu, Statistical characteristics analysis of global specific humidity vertical profile. *Proc. SPIE 11439, 2019 International Conference on Optical Instruments and Technology: Optoelectronic Measurement Technology and Systems*, 1143911. <https://doi.org/10.1117/12.2544132>.

[115]. Э. И. Гитис, и Е. А. Пискулов, *Аналогоцифровые преобразователи*. М.: Энергоиздат, 1981, с. 360.

[116] Б. Г. Федорков, и В. А. Телец, *Микросхемы ЦАП и АЦП: функционирование, параметры, применение*. М.: Энергоатомиздат, 1990, с. 320.

[117] В. Н. Лавренчик, *Постановка физического эксперимента и статистическая обработка его результатов*. М.: Энергоатомиздат, 1986, с. 272.

[118] С. П. Полішко, *Точність засобів вимірювань*. К.: Вища школа, 1992, с. 173.

[119] Е. С. Вентцель, и Л. А. Овчаров, *Теория случайных процессов и ее инженерные приложения*. М.: Наука, 1991, с. 384.

[120] Є. Т. Володарський, В. В. Кухарчук, В. О. Поджаренко, та Г. Б. Сердюк, *Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю*. Вінниця: ВДТУ, 2019, с. 201.

[121] В. О. Поджаренко, П. І. Кулаков, та О. Г. Ігнатенко, *Основи метрології та вимірювальної техніки*. Вінниця: ВНТУ, 2006, с. 151.

[122] Ю. В. Куц, А. Г. Протасов, та Ю. Ю. Лисенко «Проектування засобів електромагнітного неруйнівного контролю», на *1-й наук.-техн. конф. НК в контексті асоційованого членства України в ЄС*, Люблін, Польща, 2017, с. 43-48.

[123] В. С. Пономаренко, *Проектування інформаційних систем*. Київ: Академія, 2002, с. 488.

[124] В. А. Завадский, *Компьютерная электроника*. К.: ВЕК, 1996, с. 368.

[125] В. М. Локазюк, *Мікропроцесори та мікроЕОМ у виробничих системах*. К.: Академія, 2002, с. 368.

[126] П. В. Агуров, *Интерфейсы USB. Практика использования и программирования*. БХВ-Петербург, 2004, с. 576.

[127] D. Novytskyi, Y. Bilynsky, O. Horodetska, and S. Sirenko, «Experimental study of natural gas humidity control device», *Informatyka, Automatyka, Pomiarы W Gospodarce I Ochronie Środowiska*, № 10(3), 2020, pp. 86-90.

[128] Д. В. Новицький, та Й. Й. Білінський, «НВЧ засіб вимірювального контролю вологості природного газу», на *1-й Міжнародній наук.-техн. конф. Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем (СПРН-2019)*, Вінниця, 2019, с. 177-178.

[129] Х. Шенк, *Теория инженерного эксперимента*, под ред. Н. П. Бусленко. М.: Мир, 1972, с. 381.

[130] 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.

[131] Д. В. Новицький, «Експериментальні дослідження НВЧ вимірювального перетворювача вологості природного газу», на *7-й Всеукраїнській наук.-практ. конф. студентів і молодих вчених, Методи та засоби неруйнівного вимірювання промислового обладнання*, Івано-Франківськ, 2019, с. 139-142.

[132] Д. В. Новицький, «Експериментальні дослідження НВЧ засобу вимірювання вологості природного газу», на *XLIX наук.-техн. конф. підрозділів Вінницького національного технічного університету*, Вінниця, 2020, с. 177-178.

Наукове видання

**Йосип Йосипович Білінський
Дмитро Володимирович Новицький
Богдан Петрович Книш**

**НАДВИСОКОЧАСТОТНИЙ МЕТОД І ЗАСІБ
ВИМІРЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ ПРИРОДНОГО ГАЗУ**

Монографія

Редактор С. Сідак

Оригінал-макет підготовлено авторами

Підписано до видання 04.04.2022
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Ум. др. арк. 6,35.
Наклад 25 пр. Зам № В2022-03

Вінницький національний технічний університет,
редакційно-видавничий відділ,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 65-18-06.

press.vntu.edu.ua; email: irvc.vntu@gmail.com.

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

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