

Вінницький національний технічний університет  
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**НОВИЦЬКИЙ ДМИТРО ВОЛОДИМИРОВИЧ**

УДК 681.121.4

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

Спеціальність 152 – «Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка»  
Галузь знань 15 – «Автоматизація та приладобудування»

Подається на здобуття ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело  
\_\_\_\_\_ Д. В. Новицький

Науковий керівник:

Білинський Йосип Йосипович,  
доктор технічних наук, професор

Вінниця – 2021



## АНОТАЦІЯ

*Новицький Д. В.* Надвисокочастотний метод і засіб вимірювання вологості природного газу. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 152 «Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка» (15 «Автоматизація та приладобудування»). – Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2021.

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню важливої науково-практичної задачі підвищення точності вимірювання вологості природного газу.

**Об'єктом дослідження** є процес вимірювання вологості природного газу.

**Предметом дослідження** є методи та засоби вимірювання вологості природного газу в процесі його транспортування.

Однією з найважливіших задач при транспортуванні природного газу є оцінка вмісту вологості як одного із основних показників його якості. Крім цього водяна пара збільшує вартість перекачування газу, погіршує якість кінцевого продукту, приводить до прискорення корозії трубопроводу, зменшує пропускну спроможність газопроводу, ушкоджує фільтри, крани, компресори. Для попередження цих процесів необхідно точно прогнозувати та контролювати вологість природного газу, що транспортується.

В роботі проаналізовано існуючі прилади та методи вимірювання вологості природного газу, визначено їх основні недоліки. Аналіз показав, що до найбільш поширених методів вимірювання вологості газів належать тільки п'ять основних практичних і найбільш поширених методи вимірювання вологості газів: діелькометричні, конденсаційні, електролітичні, ємнісні, мікровагові. Однак, ці методи мають ряд недоліків і вимагають подальшого вдосконалення.

Розроблено класифікацію сучасних вимірювачів вологості газів за конструктивним виконанням, фізикою процесу перетворення та особливостями вимірювання. За основну ознаку обрано фізику процесу перетворення, оскільки саме фізичний механізм роботи зумовлює різноманітність існуючих методів вимірювання та безпосереднє технічне виконання вимірювального пристрою.

Проаналізовано основні особливості вимірювання вологості природного газу. Детально описані найбільш поширені для практичного використання вимірювання вологості газів засоби за температурою точки роси. Аналіз показав, що існуючі алгоритми вимірювання не дозволяють з необхідною точністю виміряти вологість природного газу через складність детектування двох температур точок роси водночас. Виконано порівняльний аналіз методів і засобів, що мають найбільше практичне застосування для вимірювання вологості природного газу і які в повній мірі задовольняють умови, в яких виконується контроль вологості. Запропоновано шляхи подальших досліджень і взято за основу удосконалення дієлькометричного НВЧ методу та розробка на його основі засобу вимірювання вологості природного газу.

Проведені дослідження об'єкта вимірювання та впливу НВЧ випромінювання на газове середовище. Обґрунтовано вибір хвилеводного НВЧ методу вимірювання вологості природного газу, в якому на відміну від відомих, запропоновано використання біжучої хвилі у хвилеводі, при цьому оцінюються зміни діелектричних властивостей газів при їх взаємодії з хвилями НВЧ діапазону.

Запропоновано математичну модель НВЧ вимірювального перетворення вологості природного газу, суть якого полягає у вимірюванні зміни потужності НВЧ сигналу біжучої хвилі на виході хвилеводу, що відповідає вологості газу. Проведено дослідження залежності потужності біжучої хвилі від абсолютної вологості водяної пари при різних значеннях довжини проходження НВЧ сигналу у вологому середовищі з урахуванням температури та тиску.

Встановлено, що із зростанням абсолютної вологості водяної пари потужність випромінювання спадає за експоненціальним законом. Довжина електромагнітної хвилі, а також відстань проходження НВЧ сигналу визначає поріг чутливості вимірювального перетворення вологості. Крім цього встановлено, що значення похибки, яка вноситься впливом температури та тиску, є незначною. Запропоновано структурну схему НВЧ вимірювального перетворювача вологості природного газу, описано принцип його роботи.

Проведено моделювання процесу вимірювання вологості природного газу шляхом використання еквівалентної схеми, що описує бінарну гетерогенну систему, якій відповідає математична модель НВЧ вимірювального перетворювача. В результаті порівняння характеристики отриманої еквівалентної схеми та запропонованої математичної моделі НВЧ вимірювального перетворювача було встановлено, що похибка відхилення моделей не перевищує 3%.

Запропоновано двоканальний НВЧ вимірювальний перетворювач вологості природного газу та його математичну модель. Отримано функцію перетворення та статичну характеристику. Математична модель враховує значення діелектричної проникності газу вимірювального та опорного каналів, а також значення температури та тиску природного газу вимірювального каналу. Описано принцип роботи НВЧ вимірювального перетворювача, який містить НВЧ генератор, атенюатор, хвилеводний трійник, хвилеводну секцію порівняння, датчик температури та тиску, комутатори каналів, вимірювальну кювету, підсилювач, індикаторний пристрій. Наявність опорного каналу дозволило підвищити точність вимірювання, оскільки двоканальна система нівелює нестабільність вхідного НВЧ сигналу, що подається генератором, а також власні втрати потужності. Результати досліджень дають можливість стверджувати про перспективність НВЧ вимірювального перетворювача для практичного застосування вимірювання вологості природного газу з використанням біжучої хвилі.

На основі проведених досліджень запропоновано НВЧ засіб вимірювання вологості природного газу. Описано принцип роботи засобу вимірювання, який містить двоканальний НВЧ вимірювальний перетворювач сенсори температури та тиску, підсилювач, мікропроцесор блок обробки та індикаторний пристрій.

Розроблено математичну модель засобу вимірювального вимірювання вологості природного газу, яка враховує значення діелектричної проникності газу вимірювального та опорного каналів, та містить коефіцієнти корегування за температурою, використання яких дозволяє підвищити точність вимірювання вологості.

Проведено аналіз температурних похибок, на основі якого можна зробити висновок, що для підвищення точності вимірювання вологості природного газу необхідно у вимірювальній та порівняльній кюветах встановлювати температурні датчики.

Проаналізовано вплив коефіцієнтів корегування за температурою на похибку вимірювання вологості, на основі якого можна зробити висновок, що використання показника ослаблення сухого повітря  $K_c$ , поправочного коефіцієнта  $K_{n(0^\circ C)}$  при  $0^\circ C$  і температурного поправочного коефіцієнта  $K_t$  дозволяє з високою точністю компенсувати різницю діелектричної проникності сухого метану і сухого повітря. Похибка при зміні температури від  $0^\circ C$  до  $10^\circ C$  не перевищує  $0,01\%$ , а відносна похибка  $\Delta t$  при відсутності корегування за температурою і при зміні температури повітря відносно  $0^\circ C$  на  $+1^\circ C$  і  $-1^\circ C$  призводить до похибки  $\pm 0,18\%$ . Оцінено середній температурний поправочний коефіцієнт, що віднесений до  $1^\circ C$ , становить  $K_{t=1} = 0,000000535$ .

Встановлено, первинне градуювання засобу вимірювання можна здійснювати за двома точками: за точкою "нуль" абсолютної вологості і за точкою, що відповідає абсолютній вологості повітря в приміщенні, де проводиться градуювання засобу (так як у вимірювальну кювету 8 закачується повітря з цією ж вологістю). Верхня межа діапазону вимірювання вологості

встановлюється за бажанням замовника, але при цьому необхідно враховувати вимогу роботи діода на предмет лінійності вольтамперної характеристики.

Виведені аналітичні залежності для оцінки основних статичних метрологічних характеристик засобу вимірювання вологості газу, оцінено можливі значення інструментальних та методичних похибок вимірювань концентрації газів за допомогою розробленого засобу. Встановлено, що загальна похибка вимірювань не перевищує 2,43 %, клас точності – 2,5.

Розроблено інженерну методику проектування НВЧ засобу вимірювання вологості газу, на основі якої розроблено функціональну та електричну принципову схеми, виготовлено експериментальний зразок засобу вимірювання та проведені його експериментальні дослідження.

Розроблено алгоритми та програмне забезпечення для отримання та обробки контрольовано-вимірювальної інформації: зчитування даних з USB порту та збереження в файл виведення результатів вимірювання в табличній формі та у вигляді графіків, що дозволяє скоротити трудомісткість та затрати часу на отримання, обробку та зберігання вимірювальної інформації.

Запропоновано методику експериментальних досліджень розробленого аналізатора. Проведені дослідження дали змогу отримати 256 значень у діапазоні абсолютної вологості від 0,454 г/м<sup>3</sup> до 17,0 г/м<sup>3</sup>. Встановлено, що засіб дозволяє вимірювати вологість в заданому діапазоні. Аналіз результатів експериментальних і теоретичних досліджень НВЧ вологоміра показав, що похибка запропонованої моделі не перевищує 7%.

При дослідженні характеристик засобу вимірювання проводились вимірювання абсолютної вологості газу при 1,167 г/м<sup>3</sup>, що відповідає – 19 °С температури точки роси. Протягом 30 хв. дослідження отримано 500 точок. Значення вологості газу задавалося калібрувальною системою *Michell Dew Point Calibration System*. За результатами вимірювань вологості оцінено основні статистичні характеристики та побудовано закони розподілу контрольованої величини, відносної похибки вимірювання вологості та сумісний закон

розподілу, при цьому абсолютна похибка не перевищує 0,029 г/ м<sup>3</sup>. Підтверджено високу збіжність результатів дослідження.

Наведено порівняльні характеристики розробленого засобу вимірювання вологості природного газу та потокового НВЧ вологоміра, розробником якого є ВолгоУралНИПИ-газ. Принцип роботи відомого вологоміра заснований на вимірюванні ступеня поглинання енергії електромагнітних хвиль надвисокої частоти водою і речовиною, що контролюється. За результатами порівняння, можна зробити висновок про відповідність розробленого засобу вимірювання вологості поставленим вимогам, оскільки розроблений засіб дав змогу підвищити чутливість і точність вимірювання.

*Ключові слова:* надвисокочастотний вимірювальний перетворювач, біжуча хвиля, діелектрична проникність, парціальний тиск, вологість, двокальний вимірювальний перетворювач, природний газ, НВЧ засіб вимірювання вологості природного газу, чутливість, похибка вимірювання.

## ABSTRACT

*Novytsky D. V.* Improved method and means of natural gas humidity control.  
– Qualification scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 152 "Metrology and information-measuring technology" (15 "Automation and instrumentation"). – Vinnytsia national technical university, Vinnytsia, 2021.

The dissertation is devoted to solving an important scientific and practical problem of improving the accuracy of measuring the humidity of natural gas.

The object of research is the process of measuring the humidity of natural gas.

The subject of research is the methods and means of measuring the humidity of natural gas during its transportation.



One of the most important tasks in the transportation of natural gas is the assessment of moisture content as one of the main indicators of its quality. In addition, water vapor increases the cost of pumping gas, degrades the quality of the final product, accelerates the corrosion of the pipeline, reduces the capacity of the pipeline, damages filters, taps, compressors. To prevent these processes, it is necessary to accurately predict and control the humidity of the transported natural gas.

The paper analyzes the existing devices and methods for measuring the moisture content of natural gas, identifies their main shortcomings. The analysis showed that the most common methods of measuring the humidity of gases are only five basic practical and most common methods of measuring the humidity of gases: dielectric, condensing, electrolytic, capacitive, micro-weight. However, these methods have a number of disadvantages and require further improvement.

The classification of modern gas humidity meters according to the design, physics of the transformation process and measurement features has been developed. The physics of the transformation process is chosen as the main feature, because it is the physical mechanism of operation that determines the variety of existing measurement methods and the direct technical implementation of the measuring device.

The main features of natural gas humidity measurement are analyzed. The most common for the practical use of measuring the humidity of gases means by dew point temperature are described in detail. The analysis showed that the existing measurement algorithms do not allow to measure the humidity of natural gas with the required accuracy due to the difficulty of detecting two temperatures of dew points at the same time. A comparative analysis of methods and tools that have the greatest practical application for measuring the humidity of natural gas and that fully satisfy the conditions in which moisture control is performed. Ways of further researches are offered and the basis of improvement of a dielectric microwave method and development on its basis of means of measurement of humidity of natural gas is taken.

Studies of the object of measurement and the impact of microwave radiation on the gaseous medium. The choice of waveguide microwave method for measuring the humidity of natural gas is substantiated, in which, in contrast to the known ones, the use of a traveling wave in a waveguide is proposed.

A mathematical model of microwave measurement of natural gas humidity conversion is proposed, the essence of which is to measure the change in microwave power of a traveling wave signal at the waveguide output corresponding to gas humidity. The dependence of the power of the traveling wave on the absolute humidity of water vapor at different values of the length of the microwave signal in a humid environment, taking into account temperature and pressure.

It is established that with the increase of absolute humidity of water vapor the intensity of radiation decreases exponentially. The length of the electromagnetic wave, as well as the distance of the microwave signal determines the sensitivity threshold of the measuring conversion of humidity. In addition, it was found that the value of the error introduced by the influence of temperature and pressure is insignificant. The structural scheme of the microwave measuring transducer of natural gas humidity is offered, the principle of its work is described.

The process of measuring the humidity of natural gas by modeling an equivalent scheme describing a binary heterogeneous system, which corresponds to the mathematical model of the microwave measuring transducer. As a result of comparing the characteristics of the obtained equivalent circuit and the proposed mathematical model of the microwave transducer, it was found that the deviation error of the models does not exceed 3%.

A two-channel microwave measuring transducer of natural gas moisture and its mathematical model are proposed. The conversion function and static characteristic are obtained. The mathematical model takes into account the value of the dielectric constant of the gas of the measuring and support channels, as well as the value of temperature and pressure of natural gas of the measuring channel. The principle of operation of a microwave measuring transducer is described, which

contains a microwave generator, attenuator, waveguide tee, waveguide comparison section, temperature and pressure sensor, channel switches, measuring cuvette, amplifier, indicator device. The presence of a reference channel allowed to increase the accuracy of measurement, because the two-channel system does not control the instability of the input microwave signal supplied by the generator, as well as its own power losses. The results of the research make it possible to assert the prospects of a microwave measuring transducer for the practical application of measuring the humidity of natural gas using a traveling wave.

On the basis of the conducted researches the microwave means of measurement of humidity of natural gas are offered. The principle of operation of the measuring instrument is described, which contains a two-channel microwave measuring transducer, temperature and pressure sensors, an amplifier, a microprocessor, a processing unit and an indicator device.

A mathematical model of natural gas humidity measuring instrument has been developed, which takes into account the value of dielectric constant of gas of measuring and support channels, and contains temperature correction coefficients, the use of which allows to increase the accuracy of moisture measurement.

The analysis of temperature errors is carried out, on the basis of which it is possible to draw a conclusion that for increase of accuracy of measurement of humidity of natural gas it is necessary to establish temperature sensors in measuring and comparative cuvettes.

The influence of temperature adjustment coefficients on the humidity measurement error is analyzed, on the basis of which it can be concluded that the use of dry air attenuation index  $K_s$ , correction coefficient  $K_p$  ( $0^\circ\text{C}$ ) at  $0^\circ\text{C}$  and temperature correction factor  $K_t$  allows a high accurately compensate for the difference in dielectric constant of dry methane and dry air. The error when changing the temperature from  $0^\circ\text{C}$  to  $10^\circ\text{C}$  does not exceed 0.01%, and the relative error  $\Delta t$  in the absence of temperature adjustment and when the air temperature changes relative to  $0^\circ\text{C}$  by  $+1^\circ\text{C}$  and  $-1^\circ\text{C}$  leads to an error  $\pm 0.18\%$ .

The estimated average temperature correction factor, referred to 1°C, is  $K_t = 0,000000535$ .

It is established that the primary calibration of the measuring instrument can be performed at two points: at the point "zero" of absolute humidity and at the point corresponding to the absolute humidity in the room where the calibration is performed (as in the measuring cuvette 8 air is pumped with the same humidity). The upper limit of the humidity measurement range is set at the request of the customer, but it is necessary to take into account the requirement of the diode for the linearity of the current-voltage characteristic.

Analytical dependences for estimation of the basic static metrological characteristics of means of measurement of humidity of gas are deduced, possible values of instrumental and methodical errors of measurements of concentration of gases by means of the developed means are estimated. It is established that the total measurement error does not exceed 2.43%, accuracy class - 2.5.

An engineering method of designing a microwave instrument for measuring gas humidity has been developed, on the basis of which a functional and electrical schematic diagram has been developed, an experimental sample of the measuring instrument has been made and its experimental studies have been carried out.

Algorithms and software for obtaining and processing control and measuring information have been developed: reading data from the USB port and saving the measurement results to a file in tabular form and in the form of graphs, which reduces the complexity and time required to receive, process and store measuring information.

The technique of experimental researches of the developed analyzer is offered. The studies made it possible to obtain 256 values in the range of absolute humidity from 0.454 g / m<sup>3</sup> to 17.0 g / m<sup>3</sup>. It is established that the tool allows you to measure humidity in a given range. Analysis of the results of experimental and theoretical studies of the microwave hygrometer showed that the error of the proposed model does not exceed 7%.

When studying the characteristics of the measuring instrument, the absolute humidity of the gas was measured at 1.167 g / m<sup>3</sup>, which corresponds to - 19 0C dew point temperature. Within 30 minutes the study obtained 500 points. The value of gas humidity was set by the calibration system Michell Dew Point Calibration System. Based on the results of humidity measurements, the main statistical characteristics are evaluated and the laws of distribution of the controlled quantity, relative error of humidity measurement and compatible distribution law are constructed, while the absolute error does not exceed 0.029 g / m<sup>3</sup>. High convergence of research results was confirmed.

The comparative characteristics of the developed means of measuring the humidity of natural gas and the flow microwave moisture meter, the developer of which is VolgoUralNIPI-gas, are given. The principle of operation of the known hygrometer is based on measuring the degree of absorption of energy of electromagnetic waves of ultrahigh frequency by water and the controlled substance. Based on the results of the comparison, it is possible to draw a conclusion about the compliance of the developed means of measuring humidity with the set requirements, as the developed means allowed to increase the sensitivity and accuracy of measurement.

*Key words:* ultrahigh-frequency measuring transducer, traveling wave, dielectric constant, partial pressure, humidity, two-channel measuring transducer, natural gas, microwave means of measuring natural gas humidity, sensitivity, measurement error.

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

[1] 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.

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

[3] 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.

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

[5] 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.

[6] 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.

[7] Д. В. Новицький, Й. Й. Білінський, та О. С. Городецька, «НВЧ вологомір рідких і газоподібних вуглеводів», *МПК Н02М 3/00, № и 2019 08056*, Бер. 10, 2020.

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

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

[10] Д. В. Новицький, та Й. Й. Білінський, «НВЧ засіб вимірювального контролю вологості природного газу» на 1-й Міжнародній науково-технічній

конференції «Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем» (СПРН-2019), Вінниця, 2019, с. 177-178.

[11] Д. В. Новицький, «Експериментальні дослідження НВЧ вимірювального перетворювача вологості природного газу» на 7-й Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів і молодих вчених "Методи та засоби неруйнівного вимірювання промислового обладнання", Івано-Франківськ, 2019, с. 139-142.

[12] Д. В. Новицький, «Експериментальні дослідження НВЧ засобу вимірювання вологості природного газу» на XLIX Науково-технічній конференції підрозділів Вінницького національного технічного університету, Вінниця, 2020, с. 177-178.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	18
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ ПРИРОДНОГО ГАЗУ.....	28
Класифікація методів вимірювання вологості природних і технологічних і газів.....	29
Огляд сучасних засобів вимірювання вологості газів .....	39
НВЧ сенсори для гігрометрії та вологометрії газів... ..	50
Порівняння характеристик засобів найбільш розповсюджених методів вимірювання вологості природного газу, що використовують в потоці .....	60
Постановка задачі дослідження... ..	62
Висновки до розділу 1... ..	65
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ НВЧ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ВОЛОГOSTІ ПРИРОДНОГО ГАЗУ .....	66
Дослідження газового середовища як об'єкта вимірювання його вологості та вплив НВЧ випромінювання .....	66
Розробка математичної моделі хвилеводного НВЧ вимірювального перетворення вологості природного газу.....	73
Моделювання процесу вимірювання вологості природного газу за допомогою бінарної гетерогенної структури .....	86
Розробка математичної моделі двоканального НВЧ вимірювального перетворювача вологості природного газу.....	89
Висновки до розділу 2.....	95
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА ЗАСОБУ ВИМІРЮВАННЯ ВОЛОГOSTІ ПРИРОДНОГО ГАЗУ... ..	97
Розробка структурної схеми НВЧ засобу вимірювання вологості природного газу.....	97
Перетворення та обробка вимірювальної інформації. Виведення	



функції перетворення засобу вимірювання вологості природного газу	100
Математична модель засобу вимірювання вологості природного газу.....	106
Визначення нижньої та верхньої градуовальної точки діапазону вимірювання вологості природного газу.....	107
Методика розрахунку вологості природного газу.....	109
Аналіз похибок засобу вимірювання вологості природного газу.	111
Аналіз температурних похибок.....	113
Дослідження похибки квантування (похибки АЦП).....	114
Висновки до розділу 3... ..	117
<b>РОЗДІЛ 4 АПАРАТНО-ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ НВЧ ЗАСОБУ ВИМІРЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ ПРИРОДНОГО ГАЗУ... ..</b>	<b>119</b>
Розробка інженерної методики проектування засобу вимірювання вологості газів.....	119
Алгоритми роботи засобу вимірювання вологості природного газу .....	124
Експериментальні дослідження НВЧ вологоміра природного газу.....	126
Обробка результатів вимірювання вологості природного газу....	136
Порівняльні характеристики розробленого засобу вимірювання вологості природного газу та потокового НВЧ вологоміра.....	138
Висновки до розділу 4... ..	140
<b>ВИСНОВКИ .....</b>	<b>141</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....</b>	<b>145</b>
<b>ДОДАТКИ .....</b>	<b>157</b>
Додаток А Акти впровадження .....	158
Додаток Б Залежність коефіцієнта поглинання від абсолютної вологості водяної пари при декількох значеннях тиску.....	160

Додаток В Залежність коефіцієнта поглинання від абсолютної вологості водяної пари при декількох значеннях температури.....	161
Додаток Г Залежність коефіцієнта поглинання природного газу при зміні вологості при декількох значеннях тиску.....	162
Додаток Д Залежність коефіцієнта поглинання сухого газу при зміні вологості при декількох значень температури.....	163
Додаток Е Залежність відношення вхідної до вихідної потужності випромінювання від абсолютної вологості водяної пари при декількох значеннях довжини проходження НВЧ сигналу.....	164
Додаток Ж Залежність густини водяної пари природного газу від зміни вихідної потужності для різної довжини хвильоводного тракту.....	165
Додаток И Вихідна характеристика математичної моделі двоканального НВЧ вимірювального перетворення вологості.....	166
Додаток К Результати експериментальних досліджень.....	168
Додаток Л Дослідження законів розподілу контрольованої величини.....	170

## ВСТУП

**Обґрунтування вибору теми дослідження.** 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 вологість 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 вимага-

ється 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 повинна визначатись у вибухонебезпечних умовах при різних тисках [5], [7]. Для природного газу неможливо точно визначити коефіцієнт стисливості, що також ускладнює вимірювання його вологості. Для визначення вологості природного газу існує багато методів, але жоден 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. Нагромадження цих проблем потребує пошуку таких методів вимірювання і засобів вимірювання вологості природного газу, які б відповідали таким особливим вимогам. Окрім того сучасні засоби вимірювання вологості повинні задовольняти такі основні вимоги: забезпечувати безперервний автоматичний контроль вологості; швидкий відгук; виключення впливу агресивних домішок; низька похибка і відтворюваність результатів вимірювання; вбудовані засоби перевірки достовірності показань приладу без демонтажу польового блоку й зупинки процесу.

Значний внесок у розвиток вітчизняної вологометрії, зокрема вологості природного газу, зробили такі провідні вчені як З. Ю. Готра, Є. П. Пістун, В. В. Кухарчук, В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, М. А. Філінюк, 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. Дані методи застосовуються для визначення температури точки роси вологи в газах, що не містять крапельної рідини та точка роси вуглеводнів не перевищує точки роси вологи більше, ніж на 5°C. Крім того, температура на пробовідбірній лінії повинна бути не менше, ніж на 3°C вище ймовірної (очікуваної) температури точки роси газу. При недотриманні вище вказаних вимог суттєво зростає похибка

вимірювання. Хоча дзеркальна система широко вважається найбільш ефективним процесом вимірювання, його недоліком є тенденція до забруднення. Оскільки апарат чутливий, необхідно очистити пристрій для забезпечення постійних результатів, але це може бути дорогим для підтримки [3], [8].

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 від 1 до 15%. Такі сенсори чутливі до факторів навколишнього середовища, що вимагає необхідність регулярного повторного калібрування [9], [10].

Незважаючи на розбіжності в способах вимірювання, в основному, всі вони реалізують рівноважний принцип вимірювання. Це означає, що для достовірних вимірювань необхідне встановлення рівноваги по воді в сенсорі й на чутливому елементі. Це 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 відрізнятись від її значення для чистої води. Якщо в багатоконпонентному середовищі, про що уже було 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. Таким чином 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 одним із перспективних є надвисокочастні (НВЧ) вологоміри, що розвиваються з 50-х

років ХХ століття, який задовольняє переважну більшість вище наведених вимог до засобів, який і розроблявся в даній дисертаційній роботі.

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

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Основний зміст роботи складають результати досліджень, які проводилися відповідно до плану навчання в аспірантурі на кафедрі електроніки та наноситем протягом 2017–2019 років відповідно до тематичних планів виконання науково-дослідних робіт у Вінницькому національному технічному університеті (ВНТУ), а також за госпдоговірною темою з ПП «Кастор» м. Вінниця: «Розробка макета НВЧ вологоміра природного газу» (№ 4325 від 01.11.2018 р., № держреєстрації 0118U006655);

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є підвищення точності вимірювання вологості газу на основі використання відмінностей у поглинаючих властивостях НВЧ біжучої хвилі, що проходить через сухий природний газ і водяну пару.

Відповідно до поставленої мети в дисертаційній роботі необхідно розв'язати такі задачі:

- проаналізувати існуючі методи та засоби вимірювання вологості природного газу;
- обґрунтувати, експериментально дослідити та розвинути НВЧ метод вимірювання вологості природного газу, оснований на використанні відмінностей поглинаючих властивостей випромінювання певної довжини хвилі в результаті проходження через вологе газове середовище;
- удосконалити математичну модель перенесення випромінювання в середовищі вологого газу та розробити математичну модель НВЧ вимірювального перетворювача вологості газу, виконати його дослідження;

– розробити математичну модель двоканалного НВЧ вимірювального перетворювача вологості газу, структурну схему для його здійснення та виконати його дослідження;

– розробити математичну модель НВЧ засобу вимірювання вологості природного газу;

– провести метрологічні дослідження та пронормувати похибки НВЧ вологоміра з використанням генератора газу та експериментально підтвердити отримані теоретичні результати.

**Об’єктом дослідження** є процес вимірювання вологості природного газу.

**Предметом дослідження** є методи та засоби вимірювання вологості природного газу в процесі його транспортування.

**Методи дослідження.** При виконанні поставлених задач використовувались: теорія поширення НВЧ хвиль в газових середовищах (для математичних моделей перенесення випромінювання та вимірювального перетворювача); теорія вологості речовини (для математичних моделей перенесення випромінювання та вимірювального перетворювача); методи фізичного та математичного моделювання (для підтвердження вихідної характеристики вимірювального перетворювача); теорії вимірювань, вимірювання та похибок (для визначення статичних метрологічних характеристик та похибок аналізатора вологості); теорію випадкових процесів (для визначення складових похибок засобу вимірювання вологості); методи математичної статистики при обробці результатів (для визначення похибок вологоміра в результаті експериментальних досліджень); методи метрологічної атестації і повірки не стандартизованих засобів вимірювання (для проведення атестації вологоміра).

**Наукова новизна отриманих результатів**, що виносяться на захист полягає в подальшому розвитку методу та засобу вимірювання вологості газу в НВЧ діапазоні, який дозволяє в промислових умовах у реальному часі за-

безпечити точність вимірювання вологості, що не поступається методу точки роси.

В роботі отримані такі наукові результати:

1. Удосконалено математичну модель перенесення випромінювання в середовищі вологого газу, яка адекватно описує фізичні процеси та в якій, на відміну від відомих, густина вологого газу в загальному випадку представляється як сума густин сухої частини природного газу та водяної пари при їх парціальних тисках і температурі з урахуванням показників поглинання природного сухого газу та водяної пари.

2. Отримав подальший розвиток метод вимірювання вологості природного газу в НВЧ області, який на відміну від відомих, відрізняється тим, що значення вологості газу отримують на основі співвідношення показників поглинання природного сухого газу та водяної пари в результаті використання «біжучої» НВЧ хвилі певної довжини, що дало змогу забезпечує підвищення точності та високої збіжності результатів вимірювання та запропонувати одноканальний та двоканальний вимірювальні перетворювачі для його здійснення.

3. Вперше запропоновано математичну модель НВЧ вимірювального перетворювача вологості на основі біжучої хвилі та на її основі отримано рівняння перетворення двоканального вимірювального перетворювача, яка однозначно пов'язує вихідну величину – співвідношення потужностей вимірювального та опорного каналів та вхідну – значення вологості, приведеної до нормальних умов. Доведено, що при використанні двоканальної схеми мультиплікативна похибка, яка виникає в процесі нестабільності джерела НВЧ сигналу, девіації частоти та власних втрат хвилеводів зменшується в 1,3-1,5 рази.

4. Отримала подальший розвиток математична модель НВЧ засобу вимірювання вологості, що дало змогу отримати рівняння перетворення, яке однозначно пов'язує вихідну величину – значення потужності певної довжини хвилі НВЧ генератора та вхідну – значення абсолютної вологості, що до-



зволило отримати статичну характеристику й розробити принципово новий засіб вимірювання вологості зі стабільними метрологічними та експлуатаційними характеристиками. Експериментально доведено, що засоби, які реалізують цей метод, характеризуються низькою похибкою вимірювання на рівні 2,5%

**Практичне значення отриманих результатів.** Одержані наукові результати впроваджені у вигляді експериментального зразка НВЧ засобу ви вимірювання вологості розроблені та впроваджені окремі результати дисертаційної роботи у АТ «Харківгаз», зокрема, методика обрахунку коефіцієнтів поглинання водяної пари та сухого газу, а також температурна корекція (акт впровадження від 15. 08. 2020 р.), що дозволило підвищити точність вимірювання вологості природного газу, та у навчальний процес кафедри електроніки та наносистем Вінницького національного технічного університету.

1. Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що на основі проведених теоретичних і експериментальних досліджень розроблено та впроваджено експериментальний зразок НВЧ засобу вимірювального вимірювання вологості, який відрізняється тим, що для підвищення точності вимірювання враховані поглинаючі властивості певних довжин хвиль як для сухого газу, так і водяної пари в результаті проходження через газове середовище. В результаті метрологічних досліджень експериментального засобу встановлено можливість вимірювання вологості в діапазоні температури точки роси (т. т. р.)  $-30^{\circ}\text{C} \dots +30^{\circ}\text{C}$ , що відповідає значенню абсолютної вологості  $0,454 \text{ г/м}^3 \dots 30,37 \text{ г/м}^3$ , максимальна зведена похибка засобу вимірювання вологості не перевищує 2,43%, а клас точності 2,5.

2. Експериментально досліджено закони розподілу контрольованих величин і похибки вимірювання. Доведено, що ці закони є нормальними. Встановлено, що даний засіб вимірювання вологості забезпечує отриману точність вимірювання вологості природного газу в межах 0,97–0,98. Такий результат є вищим, ніж при вимірюванні методом точки роси.

3. Розроблено методику експериментального визначення показників поглинання природного сухого газу та водяної пари, а також експериментального вибору довжини хвилі джерела випромінювання як для сухого газу, так і для водяної пари.

4. Розроблено методику проектування НВЧ засобу вимірювання вологості природного газу, яка складається з трьох основних частин: первинного вимірювального перетворювача, блока обробки сигналів і алгоритму автоматичного вимірювання. За цією методикою розроблено електричну принципову схему аналогового блока сумісно з первинним вимірювальним перетворювачем та виготовлено експериментальний зразок засобу, що забезпечує вимірювання та контроль вологості внаслідок перемикання вимірювального та опорного каналів і подальше обчислення отриманих результатів.

Результати лабораторних і метрологічних досліджень дозволили вважати НВЧ вологомір типовим засобом вимірювання, а результати промислових досліджень дозволили його практичне використання в складі системи неперервного вимірювання якості газу. Впровадження підтверджуються відповідними актами (Додаток А).

Достовірність та обґрунтованість положень, отриманих в роботі наукових результатів, зумовлена виконанням теоретичних досліджень з використанням теорії вимірювального перетворення, теорії похибок і обробки результатів вимірювань. Достовірність отриманих в роботі результатів підтверджується також доброю збіжністю результатів математичного і фізичного моделювання та результатами метрологічних досліджень. При цьому система припущень є коректною, а справедливість висновків підтверджується також впровадженням експериментального зразка в промислові умови.

**Особистий внесок здобувача.** Всі дослідження, представлені в дисертації проведені особисто здобувачем під керівництвом наукового керівника. У наукових працях, написаних у співавторстві, автору належить: у роботах [14] – розробка універсальної класифікації методів дослідження вологості газу; у роботах [91], [92] – розробка математичної моделі перенесення НВЧ

випромінювання в середовищі вологого газу та вимірювального перетворювача; [97] – розробка структурної схеми вимірювального перетворювача і патентний пошук; [100] – розробка еквівалентної схеми вимірювального перетворювача та проведення його моделювання; [102] – розробка математичної моделі двоканального НВЧ вимірювального перетворювача вологості газу; [106], [109], [127] – дослідження статичних метрологічних характеристик аналізатора вологості; [128], [131], [132] – методика повірки аналізатора вологості.

Роботи з розробки вимірювальних перетворювачів і аналізатора [14], [91], [92], [97], [102], [106] проводились на базі Вінницького національного технічного університету. Роботи з дослідження аналізатора вологості [109], [127], [128], [131], [132] проводились спільно на базі Вінницького національного технічного університету та ДП «Укрметрдержстандарту».

**Апробація матеріалів дисертації.** Основні положення та результати виконаних у дисертаційній роботі досліджень доповідались та обговорювались на науково-технічних та науково-практичних конференціях, а саме: 1) 23 міжнародному молодіжному форуму «Радіоелектроніка та молодь у 21 столітті», Харків, 2019 р.; 2) 5-й Міжнародній науковій конференції «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах» (ВКДТС-2019), Вінниця, 2019 р.; 3) 1-й Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем» (СПРН-2019), Вінниця, 2019 р.; 4) 7-й Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів і молодих вчених "Методи та засоби неруйнівного вимірювання промислового обладнання" Івано-Франківськ 2019 р.; 5) XLIX Науково-технічній конференції підрозділів Вінницького національного технічного університету, Вінниця, 2020 р.

**Публікації.** Результати дисертації викладені в 12 публікаціях, у тому числі в 5-х наукових працях у виданнях, що входять до переліку ВАК України, в 7-х статтях у збірниках матеріалів і тезах доповідей науково-технічних конференцій та одному патенту України на корисну модель.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів основної частини, що містять 49 рисунків і 8 таблиць, висновків, списку використаних джерел (134 найменувань) та 10 додатків. Загальний обсяг дисертації складає 169 сторінок, з яких основний зміст викладено на 125 сторінках.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] С.В. Лозинський, В. О. Бакастов, 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, 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*, 319 с. 1981.
- [6] І. С. Крук, О. М. Химко, О. І. Крук, Довідник, Якість природних, *Наука-УЦЕБОП*, 407 с. 2010.
- [7] Ж. А. Даев, 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, 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» Збірник наукових праць*, №2 (18), с. 67-77, 2010.
- [11] В. В. Пеклер, Г. М. Мамонтов, Состояние и перспективы развития гигрометров и средств их метрологического обеспечения, *Датчики и системы, Недра*, №1, с. 33-38, 2006.
- [12] А. В. Елистратов, М. В. Елистратов, В. А. Истомин, Определение точки росы газа контактным методом, *Газификация. Природный газ в качестве моторного топлива. Подготовка, переработка и использование газа, «ИРЦ Газ-пром»*, № 1, с. 36-44, 2001.

- [13] Й. Й. Білінський, Б. П. Книш, 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, В. А. Подрешетников, Контроль состава и качества природного газа, *Недра*, 345 с., 1983.
- [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, 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, Э. С Мусаев, Оптические методы и устройства контроля влажности, *Энергоатомиздат*, с. 96, 1986.
- [21] Ю. А. Ивченко, А. А. Федоров, Чем измерить влажность? Датчики и системы, № 8, с. 53 – 54, 2003.
- [22] М. А. Берлинер, Измерения влажности, *Энергия*, с. 400 1973.
- [23] А. Л. Халиф, Е. И. Туревский, 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 [Електронний ресурс]: промисловий каталог, *COSA Instruments*. Режим доступу : <http://www.cosa-instrument.com/Products/Products.html>.
- [25] Измерение влажности природного газа [електронний ресурс] : промисловий каталог, *Artvik*, Режим доступу: [http://www.artvik.ru/pdf/analyzers\\_appl/moisture\\_in\\_natural\\_gas\\_rev3.pdf](http://www.artvik.ru/pdf/analyzers_appl/moisture_in_natural_gas_rev3.pdf).

- [26] А. В. Поляков, И. Е. Заднепрянный, В. Б. Поляков Пьезоэлектрические кварцевые резонаторы и их применение в датчиках, *ООО, СКТБ ЭлПА*, Режим доступа до журн. : <http://www.sktbelpa.ru/quartzcrystalsandsensors.pdf>.
- [27] Анализатор влажности природного газа, модель 5812 [Электронный ресурс] : промышленный каталог, *Artvik*, Режим доступа: [http://www.artvik.ru/pdf/analyzers\\_appl/moisture\\_in\\_natural\\_gas\\_rev3.pdf](http://www.artvik.ru/pdf/analyzers_appl/moisture_in_natural_gas_rev3.pdf).
- [28] Ассортимент выпускаемой продукции [Электронный ресурс]: промышленный каталог, *Toros*, Режим доступа: <http://toros.kiev.ua/prod.html>.
- [29] В. А. Ищенко, В. Г. Петрук, Високочутливі засоби вимірювання малих концентрацій газів : монографія /– *Вінниця : ВНТУ*, с. 152, 2010.
- [30] П. Р. Исмагуллаев, А. Б. Гринвальд Теоретическое и экспериментальное исследование сверхвысокочастотного метода измерения влажности материалов, *Ташкент*, с. 84, 1982.
- [31] Бензарь В. К. Техника СВЧ-влажнометрии, *Высшая школа*, с. 352, 1974.
- [32] Г. М. Мутанов, Г. К. Шадрин, Н. В. Аринова, Измерение влагосодержания силикатной смеси, на *II-ой Международ. науч.-практ. Конф. Состояние, проблемы и перспективы информатизации в РК*, Усть-Каменогорск, с. 80–87, 2005.
- [33] Р. Уоррэл, Психрометрическое определение относительной влажности воздуха при температуре, превышающей 100 °С, *Гидрометеоиздат*, с. 300, 1967.
- [34] Ц. Н. Рогинская, А. И. Финкельштейн, Промышленные ИК-спектрометры, *Аналитическая химия*, № 3, с. 360–361, 1959.
- [35] З. Ю. Готра, В. Вуйцик, О. З. Готра Мікроелектронні сенсори фізичних величин : науково-навчальне видання, Том 2, *Львів: Ліга, Прес*, с. 595, 2003.
- [36] В. А. Зайцев, А. А. Ледохович, Г. Т. Никандрова, Влажность воздуха и ее измерение, *Машиностроение*, с. 112, 1974.
- [37] И. А. Соков, Г. Д. Вапняр. Метрологическое обеспечение гигрометрии: Обзорная информ., Сер. «Метрологическое обеспечение измерений», *ВНИИКИ*, с. №5–211. 1982.
- [38] Н.П. Федоров, Н.П. Федоров, П.А., Федюнин, В.А. Русин Поверхностные волны и микроволновые устройства контроля электрофизических параметров магнетодиэлектрических покрытий на металле, *«Издательство Машиностроение-1»*, с. 196, 2004.

- [39] Wang, J., Zhang, H., Cao, Z., Zhang, X., Yin, C., Li, K., Zhang, G., & Yu, B. (2016). Humidity sensor base on the ZnO nanorods and fiber modal interferometer. *Proc. SPIE 9685, 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. <https://doi.org/10.1117/12.2244482>
- [40] А. А. Єфіменко, А.М. Науменко, Вимірювання вологості в області гігрометрії 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, Hyang Hee Choi, Jong-Gwan, Real-time Humidity Sensor Based on Microwave Resonator Coupled with PEDOT:PSS Conducting Polymer Film, *Scientific REPORTS*, P. 1-8, 2018.
- [42] ДСТУ ISO 10101-1:2007 Природний газ. Визначення вмісту води методом Карла Фішера. Частина 1. Вступ (ISO 10101-1:1993, IDT);
- [143] ДСТУ ISO 10101-2:2007 Природний газ. Визначення вмісту води методом Карла Фішера. Частина 2. Методика титрування (ISO 10101- 2:1993, IDT);
- [44] ДСТУ ISO 10101-3:2007 Природний газ. Визначення вмісту води методом Карла Фішера. Частина 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: УІПА*, с. 131, 2013,
- [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, pp. 1-10. 2012. doi:10.1088/0957-0233/23/1/014004.
- [50] Т Виглеб. Датчики, *Мир*, с. 196 1989.
- [51] Л. А. Осипович Датчики физических величин, *Машиностроение*. с. 159, 1979.
- [52] В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, та А. Ю. Савицький, Радіовимірювальні перетворювачі вологості на основі МДН-структур, *Вінниця : ВНТУ*, с. 159, 2015.
- [53] А. В. Поляков, И. Е. Заднепрянный, В. Б. Поляков, Пьезоэлектрические кварцевые резонаторы и их применение в датчиках, *СКТБ ЭлПА*, Режим доступа до журн. : <http://www.sktbelpa.ru/quartzcrystalsandsensors.pdf>
- [54] G. Korotcenkov, Handbook of Humidity Measurement, Volume 1: Spectroscopic Methods of Humidity Measurement, *CRC Press Published, Reference* 372 P. 2018.
- [55] Й .Й. Білінський, В. В. Онушко, О. С. Городецька, 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, В. А. Истомин, Аналитаторы точек росы углеводородных газов по влаге и углеводородам, *Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности*, № 3, с. 6–12, 2004.
- [57] Л. А. Міхеєнко, 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 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. Исмагуллаев СВЧ-преобразователи влажности, *Таи.ПИ*, 55с. 1985.
- [60] А. А. Брандт Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах, *Физматгиз*, 404 с. 1963.

- [61] А. Н. Железняков, Р. И. Сайтов, Р. Г. Абдеев, Микроволновой 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, Э. И. Глушков, Проблемы поверки поточных 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], *Toros*. – 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, pp. 24-31. 2002.
- [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, В. и Н. Чернышов, Микроволновая термовлагодетрия, «Издательство Машиностроение-1», с. 208, 2004.
- [76] Ю. О. Гордієнко, С.В. Ленков, Я. І. Лепіх, В. О. Проценко, Мікрохвильові датчики для гігromетрії та вологодетрії, *Збірник наукових праць військового інституту кийського національного університету імені Тараса Шевченка*, №30, с. 14–20, 2011.
- [77] Ю.Е. Гордиенко, А.В. Пашков, Н. И. Слипченк, Развитие прямого СВЧ диэлектрического метода в гигromетрии, *Радиотехника*, №135, с. 206 – 210, 2003.
- [78] Я. І. Лепіх, Ю.О. Гордієнко, С.В. Дзядевич, А.О. Дружинін, А.А. Євтух, С.В. Ленков, В.Г. Мельник, В.О. Романов, Створення мікроелектронних датчиків нового покоління для інтелектуальних систем, «Астропринт», с. 351 2011.
- [79] Ю. Е. Гордиенко, Ф.М. Хаммуд, Оценка направлений оптимазации СВЧ резонаторных датчиков контроля влагосодержания порошковых материалов электронной технологи, *Радиоэлектроника и информатика*. №2, с. 34 – 38, 2004.
- [80] Ю. О. Гордієнков, О. І. Кочержин, Спосіб вимірювання вологодеті діелектричних матеріалів, № 52126А України, GO1N22/04, грудень, 16.12.02, Бюл. №12.
- [81] Ю.О. Гордієнков, О. І. Кочержин, А.А Потапов, Е. А. Куклин, Микроволновый гигromетр, *Измерительная техника*, № 3, с. 36 – 37, 1986.
- [82] М. И. Горлов, А. В. Андреев, Л. П. Ануфриев, Микроелектронный датчик влажності поверхностно-конденсационного типа, Патент РФ № 2224246, Заявл. 10.07.02; Опубл. 20.02.2004. Бюл, № 5.
- [83] А. А. Коробко, В. В. Рудаков Исследования метрологических характеристик измерительных преобразователей в виде ступенчатого коаксиального неоднородного резонатора для диэлькометрии жидких сред в СВЧ диапазоне, *Вісник Національного технічного університету “ХПІ”*, № 51 (1160), с. 91–95, 2015.

- [84] В. П. Лісовець, І. А. Мартиненко «Деякі питання при визначення точки роси природного газу» на *ВСЕУКРАЇНСЬКОМУ СЕМІНАР-НАРАДІ «Облік природного газу та метрологія»* (збірка тез доповідей) смт. Лазурне, 2018, с. 18-20.
- [85] І. М. Бондаренко, Ю. О. Гордієнко, О. Ю. Панченко, Напрями та проблеми мікрохвильових досліджень вологовмісних матеріалів та структур, *ФОП Панов А.М.*, – 320 с. 2019.
- [86] Ю.М. Поплавко, В. І. Молчанов, В. А.Казміренко, Мікрохвильова діелектрична спектроскопія, *«КПІ»*, 304 с. 2011.
- [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. політехн. ін-т"*, с. 43 2019.
- [88] М. П. Андріішин, С. О. Каневський, О. М. Карпаш, Я. С. Марчук, *Вимірювання витрат та кількості газу*, Івано-Франківськ, с.160, 2004.
- [89] Й. Й. Білінський, В. В. Онушко, Метод і оптико-електронний засіб вимірювального вимірювання вологості природного газу, *Вінниця : ВНТУ*, с. 132 2014.
- [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. Білінський, 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. Білінський, «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 спектроскопи *КГУ*, с. 112 2008.
- [94] Е. С. Кричевский, В. К. Бензарь, М. В. Венедиктов, Теория и практика экспрессного контоля влажности твердых и жидких материалов, *Энергия*, с. 240 1980.
- [95] П. М. Якібчук, М. М. Клим, Молекулярна фізика, *ЛНУ імені Івана Франка*, с. 584, 2013.

- [96] Н. П. Богородицкий, В. В. Пасынков, Б. М. Тареев, Электротехнические материалы, *Энергоатомиздат*, с. 384 1985.
- [97] Д. В. Новицький, Й. Й. Білінський, та О. С. Городецька, «НВЧ вологомір рідких і газоподібних вуглеводів», *МПК Н02М 3/00, № и 2019 08056*, Бер. 10, 2020.
- [98] Калапуша Л.Р. Комп'ютерне моделювання фізичних явищ і процесів / Л.Р.Калапуша, В.П. Муляр, А.А. Федонюк – Луцьк: РВВ «Вежа», 2007. 190 с.
- [99] Ю. М. Поплавко Физика диэлектриков, *Вища школа*, с. 398, 1980.
- [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, *Изд-во стандартов*, с. 59, 1988.
- [104] А. Б. Зайцев, В. В. Мокряков Полупроводниковые диоды. Диоды высокочастотные, диоды импульсные, оптоэлектронные приборы, *Радио и связь*, .- с. 592, 1988.
- [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=IwAR12p2g7hUTRgp9CkWMmVRk6vkfRmIZy5T9Mml69ZOXn1LHc1YxGw\\_zqKAA](https://pikabu.ru/story/vyipusk_3_osnovyi_arduino_dlya_nachinayushchikh_arduino_iznutri__struktura_sostavlyayushchie_i_ikh_naznachenie_mikrokontroller_atmega328p_4497606?fbclid=IwAR12p2g7hUTRgp9CkWMmVRk6vkfRmIZy5T9Mml69ZOXn1LHc1YxGw_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] Bilenko, D. I. (1999) *Kompleksnaya dielektricheskaya pronitsaemost. Plazmenniy rezonans svobodnykh nositeley zaryada v poluprovodnikakh*. Izdatelstvo Sarat. Un., 44.
- [108] Chen, Z. & Lu, C. (2005). 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 Міжнародній науковій конференції «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах» (ВКДТС-2019), Вінниця, 2019, с. 87-88.
- [110] Б. Б Дунаев, Точность измерений при контроле качества, *Техніка*, с. 152, 1981.
- [111] Є. Т. Володарський, І. П. Москаленко, Підвищення вірогідності вимірювання з застосуванням адаптивного алгоритму, *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*, № 3, с. 111–114, – 1999.
- [111] В. П. Куценко, 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] Sorli, B., Pascal-Delannoy, F., Giani, A., Foucaran, A. & Boyer, A. (2002). Fast humidity sensor for high range 80–95% RH. *Sensors and actuators. A, Physical*, vol 100, 24-31.
- [114] Luo, S., Yang, L., & Liu, J. (2020). 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, Е. А. Пискулов Аналогоцифровые преобразователи, *Энергоиздат*, с. 360, 1981.
- [116] Б. Г. Федорков, В. А. Телец, Микросхемы ЦАП и АЦП: функционирование, параметры, применение, *Энергоатомиздат*, с. 320, 1990.
- [117] В. Н. Лавренчик Постановка физического эксперимента и статистическая обработка его результатов, *Энергоатомиздат*, с. 272, с 1986.
- [118] Полішко С. П. Точність засобів вимірювань, *Вища школа*, с. 173, 1992.

- [119] Е.С. Венцель, Л. А. Овчаров, Теория случайных процессов и ее инженерные приложения, *Наука*, –с. 384, 1991.
- [120] В. Д. Фрумкин, Н. А. Рубичев, Теория вероятностей и статистика в метрологии и измерительной технике, *Машиностроение*, с.168, 1987.
- [120] Є. Т. Володарський, В. В. Кухарчук, В. О. Поджаренко, Г.Б Сердюк, Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю, *Вінниця ВДТУ*, с. 201, 2019.
- [121] В. О. Поджаренко, П. І. Кулаков, О. Г. Ігнатенко, Основи метрології та вимірювальної техніки, *Вінниця: ВНТУ*, с. 151, 2006.
- [122] Ю.В. Куц, А.Г. Протасов, Ю.Ю. Лисенко 43 «Проектування засобів електромагнітного неруйнівного контролю» на І науково-технічна конференція –НК в контексті асоційованого членства України в ЄС| Люблін, Польща, 2017, с. 43-48.
- [123] В. С. Пономаренко, Проектування інформаційних систем, Академія, с. 488 2002.
- [124] Завадский В. А. Компьютерная электроника *ВЕК*, –с. 368,1996.
- [125] Локазюк В. М. Мікропроцесори та мікро ЕОМ у виробничих системах, *Академія*, с. 368 2002.
- [126] Агуров П. В. Интерфейсы USB. Практика использования и программирования, *БХВ-Петербург*, с. 576 2004.
- [127] D. Novytskyi, Y. Bilynsky, O. Horodetska, and S. Sirenko, «Experimental study of natural gas humidity control device», *Informatyka, Automatyka, Pomiaru W Gospodarce I Ochronie Środowiska*, №10(3), pp. 86-90, 2020.
- [128] Д. В. Новицький, та Й. Й. Білінський, «НВЧ засіб вимірювального контролю вологості природного газу» на 1-й Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем» (СПРН-2019), Вінниця, 2019, с. 177-178.
- [129] Шенк Х. Теория инженерного эксперимента / Под ред. Н. П. Буслиенко, *Мир*, с. 381, 1972.
- [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 науково-практичній конференції 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 Науково-технічній конференції підрозділів Вінницького національного технічного університету*, Вінниця, 2020, с. 177-178.



