

## 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-вимірювальна 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 діелькометричного 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 хвилевого 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  $K_{n(0^\circ\text{C})}$  при  $0^\circ\text{C}$  і температурного поправочного коефіцієнта  $K_t$  дозволяє з високою точністю компенсувати різницю діелектричної проникності сухого метану і сухого повітря. Похибка при зміні температури від  $0^\circ\text{C}$  до  $10^\circ\text{C}$  не перевищує  $0,01\%$ , а відносна похибка  $\Delta t$  при відсутності корегування за температурою і при зміні температури повітря відносно  $0^\circ\text{C}$  на  $+1^\circ\text{C}$  і  $-1^\circ\text{C}$  призводить до похибки  $\pm 0,18\%$ . Оцінено середній температурний поправочний коефіцієнт, що віднесений до  $1^\circ\text{C}$ , становить  $K_t = 0,000000535$ .

Встановлено, первинне градування засобу вимірювання можна здійснювати за двома точками: за точкою "нуль" абсолютної вологості і за точкою, що відповідає абсолютній вологості повітря в приміщенні, де проводиться градування 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 контрольної-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, двоканальний вимірювальний перетворювач, природний газ, НВЧ засіб вимірювання вологості природного газу, чутливість, похибка вимірювання.

## **ABSTRACT**

*Novitsky 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  $1^\circ\text{C}$ , 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 хвильового 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, Pomiarы 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 «Радіоелектроніка 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.