

УДК 621.311.25

Й. Й. Білінський, д. т. н., доц.; В. В. Онушко

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ АНАЛІЗАТОРА ВОЛОГОСТІ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

*Запропоновано математичну модель двоканального аналізатора вологості газу, а також методику визначення питомих молярних показників поглинання природного сухого газу та водяної пари, проведено експериментальні дослідження, виконано перевірку отриманих значень відносної вологості.*

**Ключові слова:** відносна вологість, водяна пара, сухий газ, довжина хвилі, тиск, температура, показник поглинання, коефіцієнт пропускання, питомий молярний показник поглинання, густина.

### Вступ

Вимірювання й контроль вологості газових середовищ залишається актуальним завданням як сучасної науки, так і її різних застосувань у народному господарстві й відіграє значну роль у забезпеченні якості та характеристик високотехнологічних процесів. Під час аналізу вологості технологічних газів найбільш інформативною величиною, яка характеризує безпосередньо кількість води в заданому об'ємі, є абсолютна вологість, або відносна вологість, що визначає споживчі властивості газів.

Контроль вологості можна розділити на три великі групи відповідно до технологічних процесів, а саме: у процесах осушки газу на родовищах; на газопереробних заводах; у комерційному обліку газу.

Серед аналізаторів, що використовуються для лабораторного аналізу вологості газу, лише лічені одиниці здатні працювати на потоці. Найперспективнішими вважаються інформаційно-вимірювальні системи конденсаційного типу, які реалізують прямий метод вимірювання температури точки роси. У цьому методі для достовірних вимірювань встановлюється рівновага по воді в аналізованому газі й на чутливому елементі аналізатора. Тому вимірювання, як правило, є довготривалими. Інші існуючі методи вимірювання мають такий самий недолік. Крім того, домішки, які втримуються в природному газі, такі як: метанол, розчиняються у воді, й температура точки роси розчину може значно відрізнятись від її значення для чистої води. Якщо в багатокомпонентному середовищі (а саме таким є природний газ) температура конденсації якого-небудь компонента вища точки конденсації парів води, то аналізатор може прийняти цю температуру за дійсну [1 – 5].

На основі вищезгаданого аналізатор вологості повинен задовольняти такі основні вимоги:

- швидкий відгук для уникнення перекачування великого обсягу некондиційного продукту;
- відсутність впливу агресивних домішок, а також перекручування результатів вимірювання газу від впливу спиртових з'єднань;
- низька похибка та висока відтворюваність результатів вимірювання;
- вбудовані засоби перевірки достовірності показів приладу без демонтажу польового блоку й зупинки процесу, які дозволяють швидко усунути розбіжності між постачальником і споживачем у спірних ситуаціях.

Останні роки спостерігається прогрес у створенні інфрачервоних (ІЧ) світло- і фотодіодів, придатних для застосування у спектральних аналізаторах вологості газу. Такі аналізатори задовольняють вищенаведені вимоги і найбільш повно реалізують переваги неконтактного методу. Використання інфрачервоного діапазону для вимірювання вологості газу є виправданим за умови реєстрації його тиску й температури.

**Метою роботи** є розробка математичної моделі інфрачервоного аналізатора вологості

газу, який забезпечує вищенаведені вимоги.

### Матеріали та результати досліджень

В основі методу абсорбційної спектроскопії лежить явище вибіркового поглинання багатоатомними молекулами випромінювання при його проходженні через середовище. Внаслідок поглинання відбувається послаблення світлового потоку, яке описується законом Бугера – Ламберта – Бера

$$I(\nu) = I_0 e^{-K(\nu)Cd}, \quad (1)$$

де  $K(\nu)$  – показник поглинання, що є функцією частоти  $\nu$ ;  $C$  – концентрація контрольованої речовини,  $d$  – товщина шару газу, через який проходить пучок інтенсивності світла  $I(\nu)$ .

Відносну вологість газу з урахуванням стандартних умов тиску  $P_{(c)}$  й температури  $T_{(c)}$ , а також робочих умов тиску  $P$  й температури  $T$ , яка наводиться в роботі [6], визначаємо

$$\phi = \frac{\left( \mu_{c.z.} P_{(c)} T Z \cdot \ln \frac{I_0(\nu)}{I(\nu)} - d K^{c.z.}(\nu) T_{(c)} P \rho_{c.z.(c)} \right) \mu_{в.н.}}{\left( \mu_{c.z.} K^{в.н.}(\nu) \rho_{в.н.(c)} - \mu_{в.н.} K^{c.z.}(\nu) \rho_{c.z.(c)} \right) d T_{(c)} P_{в.н. \max}}, \quad (2)$$

де  $K^{c.z.}(\nu)$  і  $K^{в.н.}(\nu)$  – питомі молярні показники поглинання природного сухого газу та водяної пари на частоті  $\nu$  відповідно;  $\mu_{c.z.}$  і  $\mu_{в.н.}$  – молекулярні маси природного сухого газу та водяної пари відповідно;  $\rho_{c.z.(c)}$ ,  $\rho_{в.н.(c)}$  – густина сухої частини та густина водяної пари за стандартних умов відповідно.

Природний газ – це газова суміш, компонентами якої, крім суміші вуглеводнів ( $C_n H_{2n+2}$ ) та водяної пари, може бути азот, двоокис вуглецю, сірководень, кисень, водень, аргон, гелій тощо. Це означає, що густина суміші газу й відповідно молекулярна маса його за стандартних умов може змінюватися. Тому необхідно виконувати додаткові вимірювання. Такі вимірювання можна проводити як прямими методами (вимірювання густини в реальному часі), так і непрямими, опосередкованими (шляхом визначення густини як функції тиску й температури). Усе це ускладнює процес вимірювання відносної вологості [7].

Для усунення вищенаведених недоліків у роботі запропоновано аналізатор вологості, який містить два рівноцінних канали: перший – вимірювальний, налаштований на робочу довжину хвилі ( $\nu_1$ ); другий – на опорну ( $\nu_2$ ).

Вихідна інтенсивність вимірювального каналу згідно з [6] визначається

$$I(\nu_1) = I_0(\nu_1) e^{-d \left( K^{в.н.}(\nu_1) C_{в.н.} + K^{c.z.}(\nu_1) C_{c.z.} \right)} = I_0 e^{-d \left( K^{в.н.}(\nu_1) \frac{\rho_{в.н.}}{\mu_{в.н.}} + K^{c.z.}(\nu_1) \frac{\rho_{c.z.}}{\mu_{c.z.}} \right)}. \quad (3)$$

Вихідна інтенсивність опорного каналу визначається

$$I(\nu_2) = I_0(\nu_2) e^{-d \left( K^{в.н.}(\nu_2) C_{в.н.} + K^{c.z.}(\nu_2) C_{c.z.} \right)} = I_0 e^{-d \left( K^{в.н.}(\nu_2) \frac{\rho_{в.н.}}{\mu_{в.н.}} + K^{c.z.}(\nu_2) \frac{\rho_{c.z.}}{\mu_{c.z.}} \right)}, \quad (4)$$

де  $K^{c.z.}(\nu_1)$  і  $K^{в.н.}(\nu_1)$ ,  $K^{c.z.}(\nu_2)$  і  $K^{в.н.}(\nu_2)$  – питомі молярні показники поглинання природного сухого газу та водяної пари вимірювального та опорного каналу відповідно;  $\mu_{c.z.}$  і  $\mu_{в.н.}$  – молекулярні маси природного сухого газу та водяної пари відповідно.

Густина реального природного газу з урахуванням чинника стисливості  $Z$  визначається за Наукові праці ВНТУ, 2010, № 4

формулою

$$\phi = \frac{\mu_{\text{в.н.}} P_c T Z \cdot \left( K(v_1) \ln \frac{I(v_2)}{I_0(v_2)} - K(v_2) \ln \frac{I(v_1)}{I_0(v_1)} \right)}{dT_c P_{\text{в.н.}}(\text{max}) \left( K(v_1) K(v_2) - K(v_1) K(v_2) \right) \rho_{\text{в.н.}}(c)} \quad (5)$$

Формула перетворення (5) дозволяє визначити відносну вологість газу без урахування густини суміші газів, його молекулярної маси, тиску, що суттєво спрощує процес вимірювання.

На рис. 1 наведено структурну схему двоканального аналізатора вологості. Сенсор складається з корпусу (1), оптичних схем введення випромінювання вимірювального та опорного каналів (2), (7), світлодіодів (3) і (6), які випромінюють монохроматичне світло відповідної частоти, оптичних схем виведення випромінювання вимірювального та опорного каналів (4), (9) і фотоприймачів (5), (8).

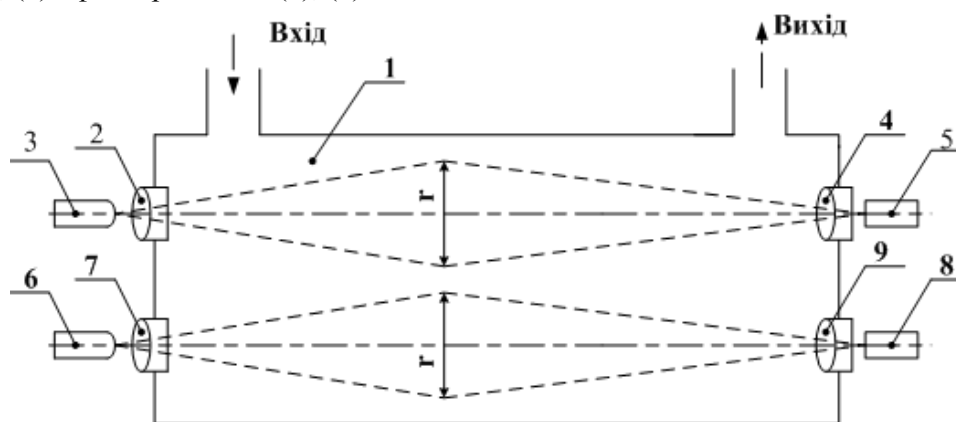


Рис. 1. Оптична схема двоканального аналізатора вологості газу

Корпус аналізатора представляє собою трубу, діаметр якої зумовлений габаритними розмірами оптичної системи, що забезпечує оптимальні параметри світлового потоку.

Для вибору габаритних розмірів сенсора, а також параметрів оптронної системи, які забезпечували б необхідну чутливість і точність вимірювання вологості газу, необхідно в лабораторних умовах провести експериментальні дослідження. У зв'язку з цим у роботі запропоновано методику визначення питомих молярних показників поглинання природного сухого газу та водяної пари й розроблено установку для дослідження характеристик аналізатора вологості газу, структурну схему якої наведено на рис. 2.

Схема установки містить лампу розжарювання (1), оптичну систему формування паралельного світлового потоку (2), кювету (3), у яку вставлені предметні скляні пластини (4), (6), між якими знаходиться досліджувана рідина (5), монохроматичний фільтр (7), фотоприймальний пристрій (8), підсилювач сигналу (9), індикатор (10).

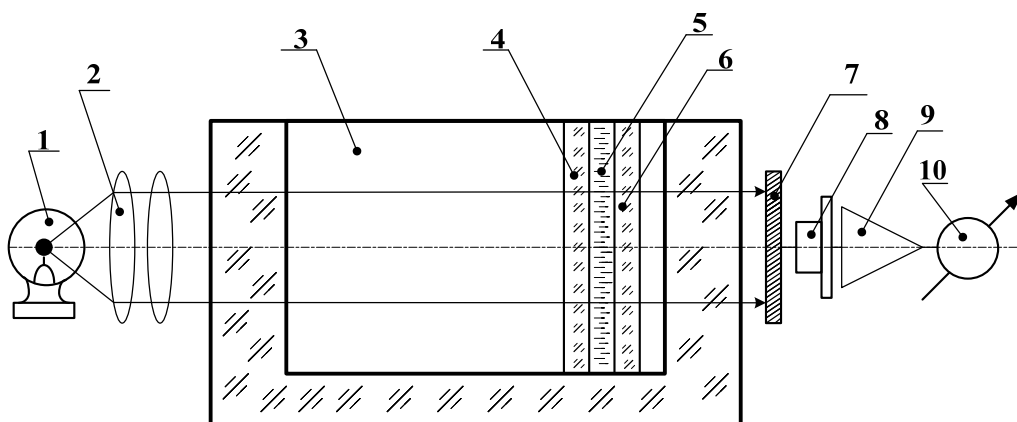


Рис. 2. Структурна схема установки для дослідження характеристик аналізатора вологості газу

Світловий потік від лампи накаливання (1) за допомогою оптичної схеми (2) направляється на систему скляних пластин (4), (6), проходячи шар рідини (5), за рахунок якої відбувається послаблення потоку. Далі послаблений світловий промінь проходить монохроматичний фільтр (7), за допомогою якого виділяється з потоку спектральний складник з потужною лінією поглинання рідини. На виході фільтра формується промінь, що потрапляє на фотоприймач (8). Світловий потік, який є функцією параметрів затухання вологого газу, перетворюється в електричний сигнал і подається на вторинний вимірювальний перетворювач. Функція перетворення цього процесу описується як

$$U = \Phi_e \tau_{осв} \tau_k \tau_m \tau_{cc} \tau_{оф} S K_{ПП} , \quad (6)$$

де  $\Phi_e$  – світловий потік випромінювача;  $\tau_{осв}, \tau_{оф}$  – коефіцієнти пропускання оптичної системи аналізатора газу та фотоприймального пристрою відповідно;  $\tau_k$  – коефіцієнт пропускання кювети та скляних пластин;  $\tau_m$  – коефіцієнт пропускання рідини;  $\tau_{cc}$  – коефіцієнт пропускання фільтра виділення спектрального інтервалу;  $S$  – інтегральна чутливість фотоприймального пристрою;  $K_{ПП}$  – коефіцієнт передачі попереднього підсилювача.

Для проведення досліджень використовувалася дистильована вода та уайт-спірит, як вуглеводнеподібна сполука. Вода та уайт-спірит поміщалися між предметними скляними пластинами. Товщина шару визначалася за допомогою мікроскопа і становила 0,01 мм. Діаметр кристала фотоприймача був відомим і складав 0,3 мм. Це дало змогу обчислити об'єм рідини між пластинами та відповідно їхні маси, які становили для води  $7,065 \cdot 10^{-7}$  г і  $5,581 \cdot 10^{-7}$  г для уайт-спіриту. Використання набору скляних пластин дозволило поступово збільшувати маси досліджуваних рідин. Такий підхід дав змогу отримати експериментально характеристики світлопропускання води та уайт-спіриту при збільшенні маси досліджуваної рідини, яку пронизує світловий промінь, та визначити коефіцієнти пропускання  $T(\nu)$  води та уайт-спіриту. При цьому коефіцієнт пропускання визначався як відношення інтенсивності світлового потоку, який пройшов через кювету з рідиною, до інтенсивності світлового потоку, який пройшов через кювету без рідини з урахуванням поглинання кювети та оптронної системи

$$T(\nu) = \frac{I(\nu)}{I_0(\nu)} \cdot 100\% .$$

Це означає, що визначення  $T(\nu)$  зводиться до незалежного послідовного вимірювання

величин  $I_0(\nu)$  і  $I(\nu)$ . Отримані коефіцієнти пропускання води будуть відповідати коефіцієнтам пропускання водяної пари  $T(\nu)^{в.п.}$  у визначеному об'ємі, а коефіцієнти пропускання уайт-спіриту – коефіцієнтам пропускання сухого природного газу  $T(\nu)^{с.г.}$  у визначеному об'ємі. При цьому враховано втрати на відбиття від вікон кювети та скляних пластин, що знаходяться на шляху монохроматичного променя.

Дослідження проводились в монохроматичному світлі на довжинах від 1 до 1,5 мкм, що дало змогу виявити найбільшу та найменшу чутливість до води. Встановлено, що світлодіод опорного каналу має працювати на довжині хвилі, що відповідає 1,33 мкм, а вимірального – на 1,45 мкм.

На рис. 3 наведено експериментальні залежності коефіцієнта пропускання від маси рідини, яку проходить світловий потік.

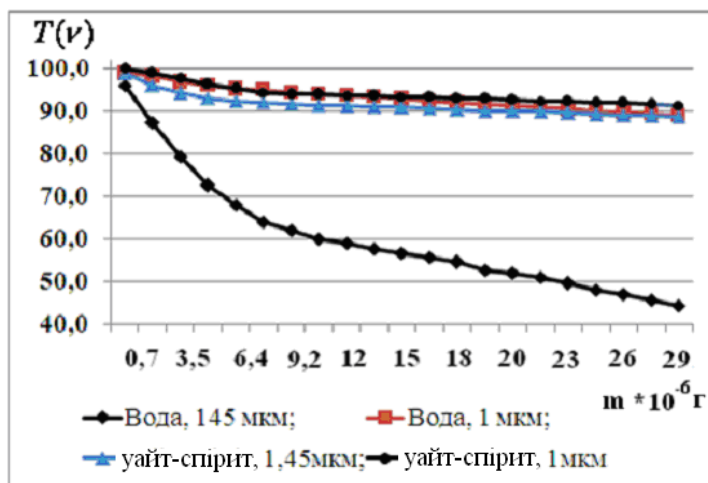


Рис. 3. Експериментальні залежності коефіцієнта пропускання від маси рідини, яку проходить світловий потік

Отримані експериментально коефіцієнти пропускання дозволили визначити питомі молярні показники поглинання, які на довжині хвилі 1,45 мкм становлять для води –  $1710 \frac{\text{л}}{\text{см} \cdot \text{моль}}$ , для уайт-спіриту –  $29 \frac{\text{л}}{\text{см} \cdot \text{моль}}$ , на довжині хвилі 1,33 мкм для води –  $18,1 \frac{\text{л}}{\text{см} \cdot \text{моль}}$  для уайт-спіриту –  $23,6 \frac{\text{л}}{\text{см} \cdot \text{моль}}$ . При цьому, виходячи з допустимо можливих мас водяної пари та газу, базова відстань проходження світлового променя аналізатора становила 0,5 м.

На рис. 4 наведено характеристику відносної вологості газу, отриману на основі формули 5.

Дослідження показали, що вплив опорного каналу на результати вимірювання незначний, але має місце. Це дало змогу підвищити точність вимірювання, оскільки двоканальна система, на відміну від одноканальної, не вимагає додаткових вимірювань тиску газу та його молекулярної маси. Крім цього, використання додаткового каналу дозволяє виключити вплив агресивних домішок. Абсолютна похибка відносної вологості становить не більше 0,5%.

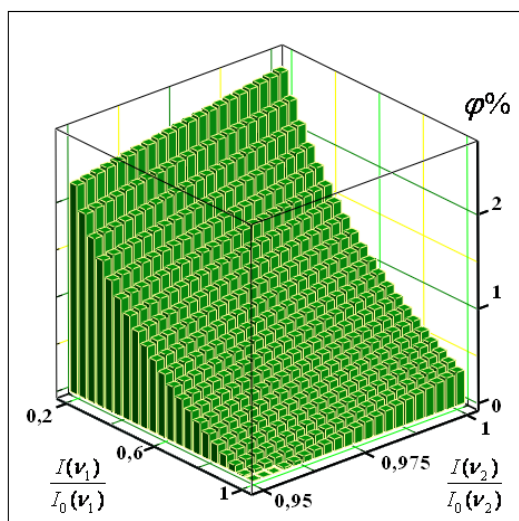


Рис. 4. Характеристика відносної вологості

Перевірка отриманих значень відносної вологості на основі (5) і даних концентрацій водяної пари згідно з рис. 3 і рис. 4 виконана відносно рівняння, яке використовує значення температури точки роси у [8, 9]. Максимальне відхилення розрахованих значень відносної вологості від значень на основі залежностей із [8, 9] не перевищує 8%.

### Висновки

За результатами проведених досліджень можна зробити такі висновки.

1. Запропоновано математичну модель двоканального аналізатора вологості газу, яка, на відміну від одноканальної, не вимагає додаткових вимірювань тиску газу та його молекулярної маси.

2. Запропоновано методику визначення питомих молярних показників поглинання природного сухого газу та водяної пари, розроблено установку для дослідження характеристик аналізатора вологості газу.

3. Проведено експериментальні дослідження з визначення максимальної чутливості в ближньому ІЧ діапазоні, виконано вибір довжини хвилі, яка становить 1,45 мкм для вимірювального каналу та 1,33 мкм для опорного.

4. Виконано перевірку отриманих значень відносної вологості згідно з формулою (5) відносно рівняння визначення температури точки роси у [8, 9] (максимальне відхилення не перевищує 8%).

5. Отримані результати дозволяють зробити висновок про те, що використання двоканальної системи дає змогу покращити метрологічні характеристики інфрачервоного аналізатора.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Селезнев С. В. Анализ методов и средств измерения влажности и точек росы природного газа / С. В. Селезнев // Геология, бурение, разработка и эксплуатация газовых и газоконденсатных месторождений : Научно-технический сб. – 2005. – № 2. – С. 10 – 22.
2. Мухитдинов М. Оптические методы и устройства контроля влажности / М. Мухитдинов, Э. С. Мусаев – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 96 с.
3. Пеклер В. В. Состояние и перспективы развития гигрометров и средств их метрологического обеспечения / В. В. Пеклер, Г. М. Мамонтов // Датчики и системы. – 2006. – № 1. – С. 33 – 38.
4. Сайдов Г. В. Практическое руководство по абсорбционной молекулярной спектроскопии / Г. В. Сайдов, О. В. Свердлов. – Л.: ЛГУ, 1973. – 86 с.
5. Котяхов Ф. И. Физика нефтяного и газового коллектора / Ф. И. Котяхов. – М.: Недра, 1997. – 288 с.
6. Білінський Й. Й. Модель перенесення випромінювання в середовищі вологого газу та визначення його відносної вологості / Й. Й. Білінський, В. В. Онушко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2010. – № 5. – Наукові праці ВНТУ, 2010, № 4

С. 18 – 22.

7. Андрійшин М. П. Вимірювання витрат та кількості газу: Довідник/ М. П. Андрійшин, С. О. Каневський, О. М. Карпаш, Я. С. Марчук, І. С. Петришин, А. А. Руднік, О. Є. Сердюк, С. А. Чеховський. – Івано-Франківськ: ПП «Сімік», 2004. – 160 с.

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

9. ГОСТ 20060-83. Газы горючие природные. Методы определения содержания водяных паров и точки росы влаги, 1984, 11 с.

**Білинський Йосип Йосипович** – д. т. н., завідувач кафедри електроніки.  
Вінницький національний технічний університет.

**Онушко Василь Володимирович** – заступник начальника відділу ДП «Укрметртестстандарт».