

УДК 621.311.25

Й. Й. Білинський, д. т. н., доц.;

М. Й. Юкиш, к. т. н.;

В. В. Онушко

## МОДЕЛЬ ПЕРЕНЕСЕННЯ ВИПРОМІНЮВАННЯ В СЕРЕДОВИЩІ ВОЛОГОГО ГАЗУ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЙОГО ВІДНОСНОЇ ВОЛОГОСТІ

Запропоновано модель перенесення випромінювання в середовищі вологого природного газу, отримано рівняння перетворення, яке дає змогу обчислити значення відносної вологості за відомою температурою й тиском газу, проведено експериментальні дослідження з вибору довжини хвилі, виконано перевірку отриманих значень відносної вологості.

### Вступ

Вологість газу є одним з основних параметрів в процесах видобутку, транспортування й переробки природного (або попутного нафтового) газу. Надійне й точне вимірювання цього параметра потрібно на всіх етапах — від свердловини до газопереробного заводу й суттєво впливає на економічність та ефективність процесів [1—4]. Застосування неконтактних методів вимірювання, до яких відноситься абсорбційний, дозволяє виключити вплив агресивних домішок, а також перекручування результатів вимірювання вологості газу від впливу спиртових сполук.

Абсорбційний оптичний метод аналізу базується на поглинанні випромінювання атомами і молекулами речовини та трансформуванні надлишкової енергії збудження. Найбільший інтерес становлять лінії електронних переходів ультрафіолетової частини спектра (довжина хвилі менша 120 нм) і лінії коливально-обертальних переходів з максимумами на довжинах хвиль інфрачервоного діапазону. Використання інфрачервоного діапазону, що впливають на параметри ліній поглинання, виправдано за умови реєстрації тиску й температури газу. При цьому слід враховувати той факт, що поглинання відбувається як за рахунок водяної пари, так і за рахунок газу. Тому для отримання необхідної чутливості й точності при побудові сенсора вологості важливими є: 1) вибір довжини хвилі з урахуванням того, що поглинання випромінювання відбувається як за рахунок водяної пари, так і за рахунок сухого газу; 2) визначення довжини ходу оптичного променя. У зв'язку з чим *метою роботи* є створення моделі перенесення випромінювання в газі, яка б враховувала вищенаведені параметри, для вимірювання його вологості.

### Матеріали та результати досліджень

Якщо через газ, що аналізується, проходить паралельний пучок випромінювання з інтенсивністю  $I_0(\nu)$ , то частина випромінювання поглинається. В загальному випадку поглинання відбувається за законом Бугера–Ламберта–Бера [5, 6]. Цей закон є універсальним і інтенсивність світла  $I(\nu)$  на виході шару газу товщиною  $d$  визначається як

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

де  $K(\nu)$  — показник поглинання (екстинції), що є функцією частоти  $\nu$  і залежить від природи речовини;  $C$  — концентрація речовини, що контролюється.

За умови тиску газу близького до  $10^5$  Па та малих густинях властивості його близькі до властивостей ідеального й добре описуються рівнянням Клапейрона–Менделєєва

$$PV = \frac{m}{\mu} RT,$$

де  $P$ ,  $V$ ,  $m$ ,  $\mu$ ,  $T$  — тиск, об'єм, маса, молярна маса та температура газу, відповідно;

$R$  — універсальна газова стала [7].

Оскільки поглинання випромінювання відбувається як за рахунок впливу водяної пари, так і за рахунок газу, тільки в різній мірі, то модель перенесення випромінювання в такому середовищі показано на рис. 1.

Густина вологого газу  $\rho_{в.г.}$ , в загальному випадку, визначається як сума густин сухої частини і водяної пари аналогічно їх парціальних тисків при відповідній температурі [8]

$$\rho_{в.г.} = \rho_{с.г.} + \rho_{в.п.}$$

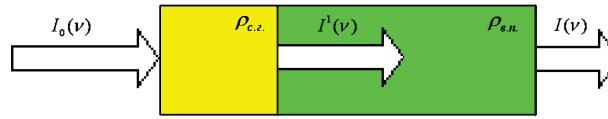


Рис. 1. Модель перенесення випромінювання в середовищі вологого газу

Відомо, що концентрація речовини пропорційна його густині  $C = \rho/\mu$ . Тоді закон Бугера–Ламберта–Бера набуде вигляду

$$I(\nu) = I_0 e^{-d \left( K(\nu) C_{в.п.} + K(\nu) C_{с.г.} \right)} = I_0 e^{-d \left( K(\nu) \frac{\rho_{в.п.}}{\mu_{в.п.}} + K(\nu) \frac{\rho_{с.г.}}{\mu_{с.г.}} \right)}, \quad (2)$$

де  $K(\nu)$  і  $K(\nu)$  — молярні питомі показники поглинання природного сухого газу та водяної пари на частоті  $\nu$ , відповідно;  $\mu_{с.г.}$  і  $\mu_{в.п.}$  — молекулярні маси природного сухого газу та водяної пари, відповідно;

Густина реального природного газу визначається з урахуванням фактора стисливості  $Z$  за формулою

$$\rho = \frac{\rho_i}{Z} = \frac{\mu P \cdot 10^3}{RTg}, \quad (3)$$

де  $\rho_i$  — густина чистого газу в ідеальному газовому стані.

Густина газу за стандартних умов визначається коли  $P = P_{(c)}$  і  $T = T_{(c)}$  згідно з відношенням

$$\rho_{(c)} = \frac{\mu P_{(c)} \cdot 10^3}{RT_{(c)}g_{(c)}}. \quad (4)$$

З рівняння (3) і (4) можна отримати практичну формулу визначення густини газу

$$\rho = \frac{\rho_{(c)} P T_{(c)}}{P_{(c)} T Z}. \quad (5)$$

Коефіцієнт стисливості визначається як  $Z = g/g_{(c)}$ , де  $g$  і  $g_{(c)}$  — фактори стисливості, відповідно, за робочих і стандартних умов [8].

Парціальний тиск сухої частини вологого газу (газової суміші) визначається як різниця між тиском суміші і парціальним тиском водяної пари при температурі  $T$

$$P_{с.г.} = P - P_{в.п.} = P - \varphi P_{в.п. \max},$$

де  $P_{в.п. \max}$  — максимальний тиск насиченої водяної пари у вологому газі при температурі  $T$ ,  $\varphi$  — відносна вологість газу, яка визначається в цьому випадку як відношення густини водяної пари у вологому газі до найбільшої можливої густини пари з тими самими значеннями  $P$  і  $T$  —

$$\varphi = \frac{\rho_{в.п.}}{\rho_{в.п. \max}}.$$

Тоді густина сухої частини вологого газу за робочих умов визначається

$$\rho_{с.г.} = \frac{\rho_{с.г.(c)} (P - \varphi P_{в.п. \max}) T_{(c)}}{P_{(c)} T Z}, \quad (6)$$

де  $\rho_{с.г.(c)}$  — густина сухого газу за стандартних умов.

Густина водяної пари за робочих умов визначається

$$\rho_{в.п.} = \frac{\rho_{в.п.(c)} \varphi P_{в.п. \max} T_{(c)}}{P_{(c)} T Z}, \tag{7}$$

де  $\rho_{в.п.(c)}$  — густина водяної пари за стандартних умов.

Використовуючи вирази (2), (6), (7), визначимо відносну вологість газу з урахуванням парціальних густин і концентрацій:

$$\varphi = \frac{\left( \mu_{с.г.} P_{(c)} T Z \cdot \ln \frac{I_0(\nu)}{I(\nu)} - d K^{с.з.}(\nu) T_{(c)} P \rho_{с.г.(c)} \right) \mu_{в.п.}}{\left( \mu_{с.г.} K^{в.п.}(\nu) \rho_{в.п.(c)} - \mu_{в.п.} K^{с.з.}(\nu) \rho_{с.г.(c)} \right) d T_{(c)} P_{в.п. \max}}. \tag{8}$$

Таким чином, для вимірювання вологості природного газу необхідно контролювати як температуру, так і тиск газу, а також встановити залежність поглинальних властивостей водяної пари та газу від частоти  $\nu$  (або довжини хвилі  $\lambda$ ). У зв'язку з цим в роботі розроблено методику визначення показників поглинання природного сухого газу та водяної пари за допомогою двопробеневого спектрофотометра.

Показник поглинання, який визначається як

$$K(\nu) = \frac{D(\nu)}{C d},$$

де  $D(\nu)$  — оптична густина, яка дорівнює  $D(\nu) = \ln \frac{I_0(\nu)}{I(\nu)} = \ln \frac{1}{T(\nu)}$ ,  $T(\nu)$  — коефіцієнт пропускання.

Визначення  $T(\nu)$  і  $D(\nu)$  зводиться до незалежного послідовного вимірювання величин  $I_0(\nu)$  і  $I(\nu)$  з подальшим визначенням  $\frac{I_0(\nu)}{I(\nu)} = \beta(\nu) T^{в.п.}(\nu) T^{с.г.}(\nu)$ , де  $T^{в.п.}(\nu)$ ;  $T^{с.г.}(\nu)$ ;  $\beta(\nu)$  — коефіцієнти пропускання водяної пари, сухого газу та самої кювети з набором скляних пластин, відповідно, які враховують втрати на відбиття від вікон кювети та скляних пластин, що знаходяться на шляху монохроматичного променя.

Для проведення досліджень з метою визначення робочої довжини хвилі та показників поглинання використовувалася вода, а сухий газ замінював уайт-спірит як вуглеводнеподібна сполука. Така заміна вимушена, оскільки зріджений газ за нормальних умов використовувати немає можливості. Дослідження проводилися в монохроматичному світлі в діапазоні довжин 1...1,5 мкм за допомогою плоскопаралельних скляних пластин. Ширина простору між пластинами, який заповнювався рідиною, визначалася за допомогою мікроскопа. Це дозволило розрахувати об'єми, а, отже, й маси даних рідин, які пронизуються світловим променем. Збільшення кількості пластин, між якими знаходилась рідина, призводило до затухання світлового потоку, оскільки збільшувався шлях проходження променя. Таким чином, отримані значення послаблення для води, уайт-спіріта, та кювети з набором скляних пластин. Коефіцієнти послаблення для води визначалися як  $T^{в.п.}(\nu) = \frac{I_0(\nu)}{I(\nu)} \beta(\nu)$ , для уайт-спіріта —  $T^{с.г.}(\nu) = \frac{I_0(\nu)}{I(\nu)} \beta(\nu)$ .

Концентрації водяної пари й газу при відповідних послабленнях визначалися через значення мас рідин, які знаходяться в газоподібному стані й містяться в об'ємі світлового потоку. Об'єм світлового потоку визначався, виходячи з відомих габаритів оптичної схеми та розмірів чутливої площадки фотоприймача.

Залежності коефіцієнтів пропускання  $T(\nu)$  від маси води, яку проходить промінь, отриманих в монохроматичному світлі на дожинах хвиль 1; 1,33; 1,45 мкм, показані на рис. 2, від маси уайт-спіріту — на рис. 3, розраховане значення концентрації водяної пари — на рис. 4.

Результати досліджень показали, що робочою довжиною хвилі, на якій відбувалося максимальне затухання є 1,45 мкм. Найменше послаблення спостерігалось на довжині хвилі 1 мкм.

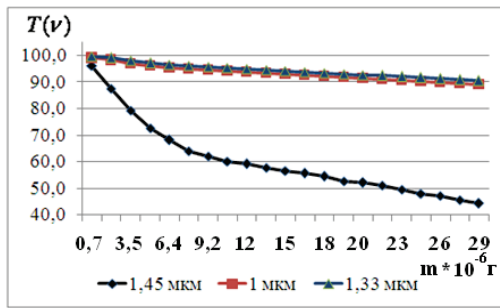


Рис. 2. Залежність коефіцієнта пропускання від маси води, яку проходить промінь

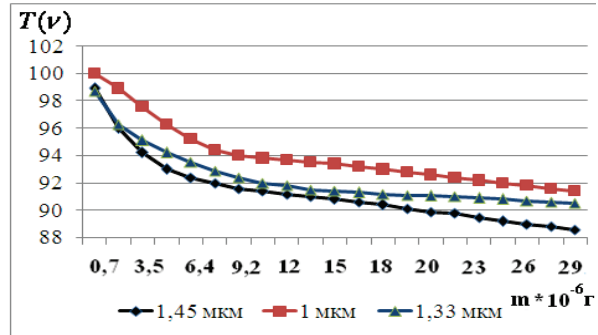


Рис. 3. Залежність коефіцієнта пропускання від маси уайт-спіріту, яку проходить промінь

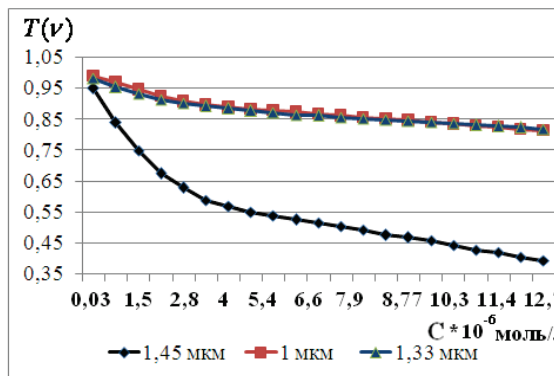


Рис. 4. Залежність коефіцієнта пропускання від концентрації водяної пари

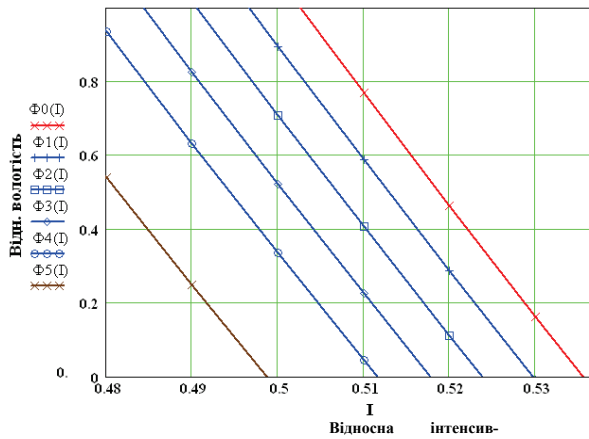


Рис. 5. Характеристика відносної вологості газу

Молярні питомі показники поглинання на довжині хвилі 1,45 мкм становлять для водяної пари  $1,7 \frac{\text{л}}{\text{см} \cdot \text{моль}}$ , для уайт-спіріту —  $0,3 \frac{\text{л}}{\text{см} \cdot \text{моль}}$ .

Слід зазначити, що довжина проходження променя визначалася, виходячи з допустимої маси рідини згідно з даними Free Professional Online Humidity Calculator, і становить 0,5 м. При цьому маса водяної пари в одиниці об'єму становила  $0,0144 \text{ г/м}^3$ , що відповідає  $-60 \text{ }^\circ\text{C}$  точки роси. Це значення й прийнято за поріг чутливості.

Отримані значення показників поглинання дали змогу згідно з формулою (8) розрахувати залежність відносної вологості від вихідної інтенсивності, графік якої показано на рис. 5 для декількох значень тиску, й температури вологого газу. Характеристика відносної вологості газу для одиничного коефіцієнта стисливості та атмосферного тиску  $P = 0,101325 \text{ МПа}$  відповідає таким параметрам:  $\Phi_0(I) — T = 293 \text{ К}$ ;  $\Phi_1(I) — T = 288 \text{ К}$ ;  $\Phi_2(I) — T = 283 \text{ К}$ ;  $\Phi_3(I) — T = 278 \text{ К}$ ;  $\Phi_4(I) — T = 273 \text{ К}$ ;  $\Phi_5(I) — T = 268 \text{ К}$ .

При цьому розраховане значення коефіцієнта пропускання концентрації водяної пари визначається як добуток  $T(v) \cdot T(v)$ .

Отже, отримане рівняння (8) дає змогу обчислити відносну вологість газу в діапазоні температур  $-60, +60 \text{ }^\circ\text{C}$ . Перевірка отриманих значень відносної вологості згідно з формулою (8) і даних концентрацій водяної пари згідно з рис. 2 і рис. 3 виконана відносно рівняння, яке використовує значення температури точки роси із [9, 10]. Максимальне відхилення розрахованих значень відносної вологості від значень, отриманих за допомогою залежностей із [9, 10] не перевищує 11 %. Таке відносне відхилення дозволяє зробити висновок про можливе використання запропонованої моделі перенесення випромінювання в середовищі вологого природного газу та методики вибору основних параметрів для подальшого створення сенсора вологості.

## Висновки

1. Запропоновано модель перенесення випромінювання в середовищі вологого природного газу, яка розглядає окремо складові газу — водяну пару й сухий газ;
2. Отримано рівняння перетворення, яке дає змогу обчислити значення відносної вологості в діапазоні температур  $-60...+60$  °С за відомими температурою й тиском газу;
3. Проведено експериментальні дослідження з визначення максимальної чутливості в ближньому ПЧ діапазоні та виконано вибір довжини хвилі, яка становить 1,45 мкм, а також визначено максимальну довжину проходження світлового променя, яка становить 0,5 м;
4. Виконано перевірку отриманих значень відносної вологості згідно з формулою (8) відносно рівняння, яке використовує значення температури точки роси із [9, 10]. Максимальне відхилення не перевищує 10 %.

## 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-тех. сб. — 2005. — № 2. — С. 10 —22.
2. Берлинер М. А. Измерения влажности / М. А. Берлинер. — М. : Энергия, 1973, — 400 с.
3. Мухитдинов М. Оптические методы и устройства контроля влажности / М. Мухитдинов, Э. С. Мусаев — М. : Энергоатомиздат, 1986. — 96 с.
4. 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.
5. Сайдов Г. В. Практическое руководство по абсорбционной молекулярной спектроскопии / Г. В. Сайдов, О. В. Свердлова. — Л., 1973.
6. Котяхов Ф. И. Физика нефтяного и газового коллектора / Ф. И. Котяхов. — М. : Недра, 1997 г.
7. Енохович А. С. Справочник по физике / А. С.Енохович. — М. : Просвещение, 1978. — 415 с.
8. Андрійшин М. П. Вимірювання витрат та кількості газу : довідник / [М. П. Андрійшин, С. О. Канєвський, О. М. Карпаш, та ін.] — Івано-Франківськ: ПП «Сімик», 2004. — 160 с.
9. Лесовий Л. В. Визначення відносної вологості газу для вузлів обліку із застосуванням засобів вимірювання температури точки роси / Лесовий Л. В., Матіко Ф. Д. // Вісник національного університету «Львівська політехніка». — 2009. — № 659. — С. 84 —91.
10. ГОСТ 20060-83. Газы горючие природные. Методы определения содержания водяных паров и точки росы влаги. — М. : Госстандарт.

Рекомендована кафедрою електроніки

Надійшла до редакції 16.09.10  
Рекомендована до друку 30.09.10

**Білинський Йосип Йосипович** — завідувач кафедри електроніки, **Юкиш Марина Йосипівна** — доцент кафедри теоретичної електротехніки та електричних вимірювань.

Вінницький національний технічний університет;

**Онушко Василь Володимирович** — заступник начальника відділу ДП «Укрметртестстандарт», м Вінниця.