

АВТОМАТИКА ТА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА

УДК 616.71

Й. Й. Білинський¹
Б. П. Книш¹
Д. В. Шеванюк¹

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА КОМПОНЕНТІВ СКРАПЛЕНОГО НАФТОВОГО ГАЗУ

¹Вінницький національний технічний університет

Розроблено математичну модель, що адекватно описує вимірювальний перетворювач компонентів скрапленого нафтового газу. Перетворювач дозволяє визначати вміст не тільки пропану й бутану, але й ненасичених вуглеводнів.

Ключові слова: вимірювальний перетворювач, скраплений нафтовий газ, пропан, бутан, ненасичені вуглеводні.

Вступ

Скраплений нафтовий газ на сьогодні широко використовується як паливо в двигунах автомобільного транспорту, установках муніципальних, промислових і сільськогосподарських об'єктів. Скраплений нафтовий газ (СНГ) — це суміш пропану (C_3H_8), бутану (C_4H_{10}) і ненасичених вуглеводнів (приблизно 1 %) — етилен, пропілен, бутилен, амілен, гексилен, гептилен та ін. Незважаючи на незначну частку ненасичених вуглеводнів, їх вплив протягом довготривалого періоду на технологічне обладнання погіршує його роботу та може призвести до його виходу з ладу. Це пов'язано з їх недостатньою розчинністю (етилен, пропілен, бутилен) та активним окисленням (амілен, гексилен, гептилен) [1].

Дослідження СНГ передбачає наявність різноманітних методів вимірювання таких його параметрів як тиск, маса, густина, масова частка тощо. Для визначення масової частки найвідомішими методами є хроматографічний, який дає змогу визначити вміст як основних компонентів, так і ненасичених вуглеводнів, хімічний, за допомогою якого визначаються наявність рідкого залишку, вільної води та луку, радіохвильовий та радіочастотний методи, які дозволяють визначити масові частки складових СНГ [2].

На основі вищенаведених методів реалізовано сенсори, такі як одоріметри, хроматографи, різноманітні мірники тощо. Але основними недоліками зазначених сенсорів є висока вартість, складність процесу вимірювання та низька точність, що пов'язано з визначенням співвідношення лише суміші пропан-бутан, тоді як наявність ненасичених вуглеводнів не завжди враховується [3].

Метою роботи є підвищення точності вимірювального контролю компонентів СНГ шляхом розробки вимірювального перетворювача компонентів СНГ на основі термометричного методу.

Основна частина

В роботі [4] запропоновано термометричний метод визначення масової частки СНГ шляхом вимірювання його густини за нагрівання або охолодження з певним кроком. Отримані таким чином характеристики порівнюються з еталонними та на їх основі шляхом математичних перетворень визначають масові частки компонентів СНГ. Це описується функцією перетворення вимірювального перетворювача, яка є складною багатоступеневою залежністю напруги фотоприймача від зовнішнього впливу.

В роботі запропоновано вимірювальний перетворювач компонентів скрапленого нафтового газу, структурна схема якого показана на рис. 1.

В основу роботи вимірювального перетворювача компонентів СНГ покладена залежність показника заломлення від густини СНГ за певної температури. Тому основними елементами вимірювального перетворювача є джерело випромінювання 1, оптична система 2, вимірювальна кювета 8, в якій знаходиться СНГ, елементи нагрівання 5 та приймач випромінювання 9.

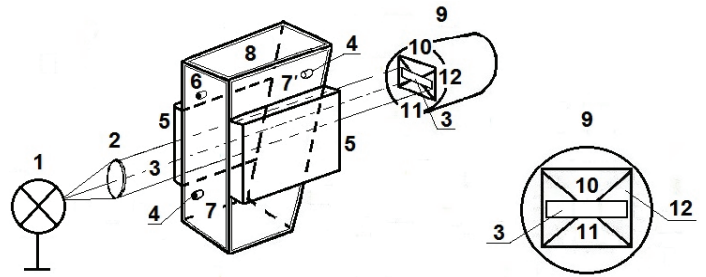


Рис. 1. Структурна схема вимірювального перетворювача компонентів СНГ

У вимірювальному перетворювачі компонентів СНГ промінь світла 3 від джерела випромінювання 1 фокусується за допомогою оптичної системи 2, проходить через вертикальну стінку 7 вимірювальної кювети 8, в якій знаходиться СНГ, та через похилу 7' стінку вимірювальної кювети 8, потрапляє на приймач випромінювання 9, який є системою верхнього 10, нижнього 11 та опорного 12 фотоприймачів. Під час вимірювального контролю відбувається нагрівання СНГ елементами нагрівання 5, причому сенсори температури 4 та тиску 6 контролюють процес вимірювання.

Функція перетворення в загальному вигляді визначається за формулою

$$U = P_{\text{вх}} P_i R_n f_{\text{фп}} \left(S \left(\Delta x \left(n(\rho(k)) \right) \right) \right), \quad (1)$$

де $P_{\text{вх}}$ — потужність сигналу на вході приймального пристрою; P_i — струмова чутливість фотоприймача; R_n — опір навантаження; $f_{\text{фп}}$ — функція перетворення фотоприймача; S — засвічена площа фотоприймача; Δx — зміщення променя; n — показник заломлення; ρ — густина СНГ; k — масова частка.

Масові частки компонентів СНГ, а саме пропану, бутану та ненасичених вуглеводнів k_1, k_2, k_3 , відповідно, можна визначити на основі термометричного методу вимірювального контролю компонентів СНГ, який пов'язує масові частки з густинами СНГ та його компонентів за відповідних температурних режимів

$$\frac{k_1}{\rho_n} + \frac{k_2}{\rho_б} + \frac{k_3}{\rho_{\text{нв}}} = \frac{1}{\rho}, \quad (2)$$

де $\rho_n, \rho_б, \rho_{\text{нв}}, \rho$ — густини пропану, бутану, ненасичених вуглеводнів та СНГ, відповідно.

Одноєю з характеристик СНГ є його показник заломлення, який знаходиться у строгій відповідності з густиною газу. Чим більша густина, тим більший показник заломлення, тобто залежність між ними є лінійною.

Густину СНГ можна визначити за допомогою рефрактометричного методу.

Оскільки показник заломлення СНГ описується як $n = 1,4752 - \frac{9,591}{M + 9,5}$, а густина —

$\rho = \frac{PM}{130RT}$ [5], то залежність показника заломлення СНГ від його густини описується як

$$n = 1,4752 - \frac{9,591}{130RT\rho P^{-1} + 9,5}, \quad (3)$$

де R — універсальна газова стала; M — молекулярна маса; P — тиск СНГ за температури T .

Також одним з методів визначення показника заломлення є імерсійний метод [6], який встановлює зв'язок між показником заломлення n та зміщенням Δx променя світла, що проходить крізь товщу СНГ (рис. 2).

Тоді зміщення променя

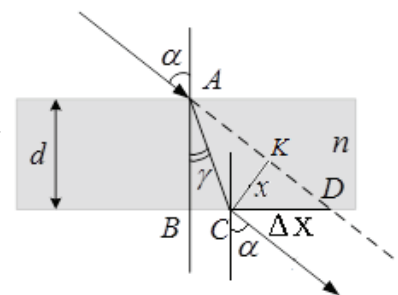


Рис. 2. Проходження світла, крізь шар СНГ

$$\Delta x = d \operatorname{tg} \alpha \left(1 - \cos \alpha \left(n^2 - \sin^2 \alpha \right)^{\frac{1}{2}} \right). \quad (4)$$

де d — товщина шару СНГ; α — кут падіння променя.

Враховуючи (3), вираз (4) можна подати у вигляді:

$$\Delta x = d \operatorname{tg} \alpha \left(1 - \frac{\cos \alpha}{\sqrt{\left(1,4752 - \frac{9,591}{0,153RT\rho P^{-1} + 9,5} \right)^2 - \sin^2 \alpha}} \right). \quad (5)$$

Промінь світла у вигляді світлової смужки, який пройшов крізь товщу СНГ, потрапляє на приймач випромінювання, який дозволяє зареєструвати просторовий розподіл освітленості. Принцип роботи приймача випромінювання демонструється схемою, показаною на рис. 3.

Якщо промінь закриває рівні ділянки на кожному фотоприймачі, то на виході буде нульовий сигнал. При зміщенні променя світла відбувається перерозподіл світлових потоків, тому на виході з'являється напруга U , пропорційна зміщенню Δx променя та, відповідно, густині СНГ ρ [7].

$$U_{mn} = k(S_1 - S_3), \quad (6)$$

де k — коефіцієнт пропорційності; S_1 і S_3 — засвічені площі протилежних фотоприймачів.

Характеристика напруги приймального пристрою утворюється різницею напруги електричних сигналів, отриманих від протилежних фотоприймачів

$$U_{mn} = U_2 - U_4 = P_{\text{вх}} P_i R_n (S_1 - S_3), \quad (7)$$

де $P_{\text{вх}}$ — потужність сигналу на вході приймального пристрою; P_i — струмова чутливість фотоприймача; R_n — опір навантаження.

За малих лінійних зміщень променя на поверхні приймального пристрою зміну засвічених площ протилежних фотоприймачів можна оцінити як

$$S_1 = b(a + \Delta x); \quad (8)$$

$$S_3 = b(a - \Delta x), \quad (9)$$

де a — ширина смужки світла; b — довжина смужки світла [8, 9].

Тоді напруга (7) з урахуванням (8) та (9) буде мати вигляд:

$$U_{mn} = 2P_{\text{вх}} P_i R_n b \Delta x. \quad (10)$$

Враховуючи рівняння (5) і (10), напруга приймального пристрою (5) набуде вигляду:

$$U_{mn} = 2P_{\text{вх}} P_i R_n b d \operatorname{tg} \alpha \left(1 - \cos \alpha \left(\left(1,4752 - \frac{9,591}{130RT\rho P^{-1} + 9,5} \right)^2 - \sin^2 \alpha \right)^{\frac{1}{2}} \right). \quad (11)$$

Результати дослідження функції перетворення (11) показано на рис. 4 у вигляді залежності напруги вимірювального перетворювача СНГ від зміни густини за різних температур.

Отримані залежності вказують на те, що зі збільшенням густини СНГ напруга вимірювального перетворювача збільшується. Тобто напруга вимірювального перетворювача збільшується в діапазоні від 3,48 до 3,72 В за температури -10 °С, від 3,5 до 3,75 В за температури 0 °С та від 3,52 до 3,76 В за температури 10 °С.

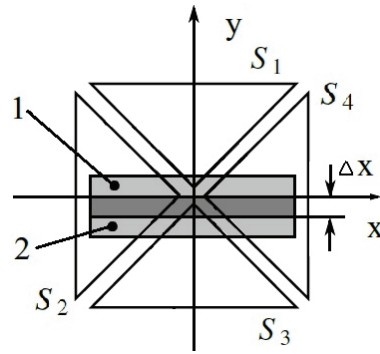


Рис. 3. Схема роботи приймача випромінювання: 1 — смужка світла, розміщена на оптичній осі; 2 — зміщена смужка світла; Δx — величина зміщення променя; S_1 , S_2 , S_3 , S_4 — частини площин фотоприймачів, засвічені променем світла

На основі вимірювального перетворювача розроблено засіб вимірювального контролю компонентів СНГ та проведено його експериментальні дослідження.

Проведення досліджень в лабораторних умовах з використанням СНГ досить вартісний і складний процес, оскільки скраплений нафтовий газ є двофазним середовищем, яке складається з киплячої рідини та сухих насичених парів, що перебувають у рівноважному стані, а процеси випаровування та конденсації відбуваються за сталого тиску і температури. Дослідження такого середовища вимагає спеціальних високоточних засобів вимірювання або проведення моделювання у формі використання модельних систем на основі подібності СНГ до певних вуглеводнів. Тому в роботі для підтвердження адекватності вимірювального перетворювача компонентів СНГ запропоновано використовувати модельні рідинні системи, такі як толуол, ізооктан та гексан, які визначені з урахуванням близькості їх характеристик до СНГ, доступності ціни, токсичності та відомими значеннями густини [10].

Порівняння температурних залежностей густин запропонованих модельних рідинних систем та компонентів СНГ показано на рис. 5.

Як впливає з рис. 5, при зіставленні температурних залежностей густин пропану, бутану та ненасичених вуглеводнів з аналогічними для гексану, ізооктану та толуолу встановлено, що характеристики для гексану, ізооктану та толуолу симетричні характеристикам для пропану, бутану та ненасичених вуглеводнів відповідно. Це означає, що для визначення густини СНГ можна використовувати модельні рідинні системи, зокрема, гексан, ізооктан та толуол.

Зіставлені характеристики гексану з пропаном, ізооктану з бутаном та толуолу з ненасиченими вуглеводнями показано на рис. 6, з якого випливає, що коли зіставити характеристики гексану з пропаном, ізооктану з бутаном, а толуолу з ненасиченими вуглеводнями, то вони майже збігаються в діапазоні проведення вимірювального контролю. Сумарна похибка зіставлення не перевищує 1 %, що свідчить про високу адекватність запропонованого вимірювального перетворювача компонентів СНГ.

Таким чином, використання модельних рідинних систем як еталонів дозволить калібрувати засіб вимірювального контролю компонентів скрапленого нафтового газу.

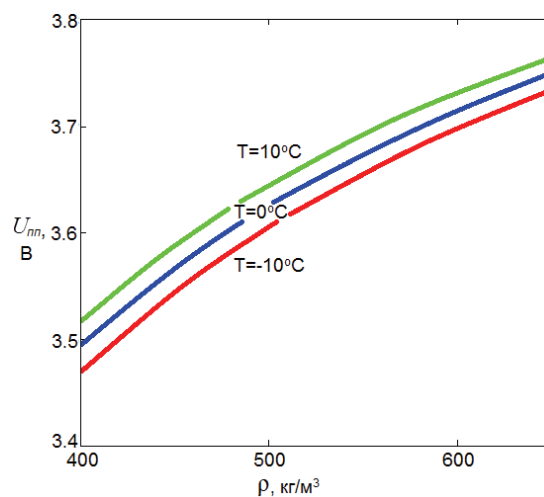


Рис. 4. Залежність напруги вимірювального перетворювача від змін густини СНГ за різних температур

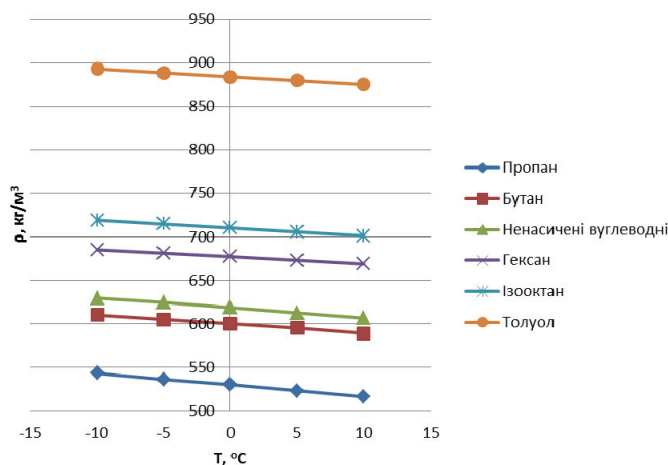


Рис. 5. Залежності густин модельних рідинних систем та компонентів скрапленого нафтового газу від температури

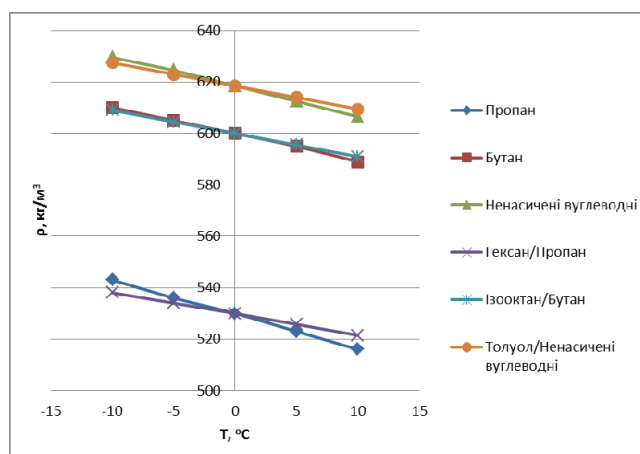


Рис. 6. Температурні залежності густин компонентів скрапленого нафтового газу та зіставлені характеристики гексану з пропаном («гексан/пропан»), ізооктану з бутаном («ізооктан/бутан») та толуолу з ненасиченими вуглеводнями («толуол/ненасичені вуглеводні»)

Висновки

В роботі запропоновано математичну модель вимірювального перетворювача компонентів СНГ, яка відображає залежність напруги фотоприймача від кута падіння променя, що проходить крізь скраплений нафтовий газ, з урахуванням розподілу температури всередині СНГ, що дозволило підвищити чутливість та точність вимірювань. Попередні розрахунки функції перетворення та значення чутливості показали перспективність засобу вимірювального контролю компонентів СНГ. Для підтвердження адекватності вимірювального перетворювача компонентів скрапленого нафтового газу запропоновано використовувати модельні рідинні системи, такі як толуол, ізооктан та гексан, які визначені, з урахуванням близькості їх характеристик до СНГ, доступності, ціни, токсичності та відомими значеннями густини. Проведено дослідження запропонованих модельних рідинних систем та встановлено, що їх використання як еталонів дозволить калібрувати засіб вимірювального контролю компонентів скрапленого нафтового газу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Рачевский Б. С. Сжиженные углеводородные газы / Б. С. Рачевский. — М. : Нефть и газ, 2009. — 640 с.
2. Радиочастотный метод измерения массы сжиженного углеводородного газа [Электронный ресурс] // Ukrainian Context Optimizer. — Режим доступа : <http://uteoss2012.ipu.ru/procdngs/0654.pdf>. — 03.07.2014.
3. Астахов А. Анализ нефтепродуктов с помощью хроматографических методов / А. Астахов // Оборудование и материалы. — 2013. — № 3. — С. 48—53.
4. Білінський Й. Й. Визначення кількісного вмісту компонентів скрапленого нафтового газу / Й. Й. Білінський, Б. П. Книш, М. В. Гладишевський // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2014. — № 1. — С. 112—119.
5. Преображенский Н. И. Сжиженные углеводородные газы / Н. И. Преображенский. — Л. : Недра, 1975. — 279 с.
6. Иоффе Б. В. Рефрактометрические методы химии / Б. В. Иоффе. — Л. : Химия, 1983. — 352 с.
7. Иванов В. И. Полупроводниковые оптоэлектронные приборы : справ. / В. И. Иванов, А. И. Аксенов, А. М. Юшин. — М. : Энергоатомиздат, 1989. — 448 с.
8. Гильярди Р. М. Оптическая связь / Р. М. Гильярди, Ш. Карп. — М. : Связь, 1978. — 456 с.
9. Гринев А. Ю. Построение передающих устройств оптического диапазона волн / А. Ю. Гринев, А. М. Братчиков, Е. Н. Воронин. — М. : МАИ, 1985. — 560 с.
10. Білінський Й. Й. Дослідження кількісного вмісту скрапленого газу шляхом використання модельних рідинних систем / Й. Й. Білінський, Б. П. Книш, М. Й. Юкиш // Технологічний аудит і резерви виробництва. — 2014. — № 4/1 (18). — С. 23—26.

Рекомендована кафедрою електроніки ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 9.02.2016

Білінський Йосип Йосипович — д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри електроніки;

Книш Богдан Петрович — асистент кафедри електроніки, e-mail: tutmos-3@i.ua;

Шеванюк Денис Валентинович — студент факультету менеджменту.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

Yo. Yo. Bilynskiy¹
B. P. Knysh¹
D. V. Shevaniuk¹

Mathematical Model of Measuring Transducer of Liquefied Petroleum Gas Components

¹Vinnitsia National Technical University

This paper contains a developed mathematical model that properly describes the measuring transducer of liquefied petroleum gas components, which allows determining not only the content of propane and butane but also unsaturated hydrocarbons.

Keywords: liquefied petroleum gas, propane, butane.

Bilinskiy Yosyp Y. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Electronics;

Knysh Bohdan P. — Assistant of the Chair of Electronics, e-mail:tutmos-3@i.ua;

Shevaniuk Denys V. — Student of the Department of Management

И. И. Билинский¹
Б. П. Кныш¹
Д. В. Шеванюк¹

Математическая модель измерительного преобразователя компонентов сжиженного нефтяного газа

¹Винницкий национальный технический университет

Разработана математическая модель, адекватно описывающая измерительный преобразователь компонентов сжиженного нефтяного газа, который позволяет определять не только содержание пропана и бутана, но и ненасыщенных углеводородов.

Ключевые слова: сжиженный нефтяной газ, пропан, бутан.

Билинский Иосиф Иосифович — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой электроники;

Кныш Богдан Петрович — ассистент кафедры электроники, e-mail: tutmos-3@i.ua;

Шеванюк Денис Валентинович — студент факультета менеджмента