

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ МАСОВИХ ЧАСТОК КОМПОНЕНТІВ СКРАПЛЕНОГО НАФТОВОГО ГАЗУ

¹Вінницький національний технічний університет

Розв'язано задачу підвищення точності вимірювального контролю масових часток компонентів скрапленого нафтового газу шляхом удосконалення математичної моделі оптико-електронного вимірювального перетворювача, досліджено його основні параметри та отримано функцію перетворення.

Ключові слова: скраплений нафтовий газ, масова частка, пропан, бутан, ненасичені вуглеводні.

Вступ

Скраплений нафтовий газ на сьогодні знаходить широке використання як паливо в двигунах автомобільного транспорту, так і в установках муніципальних, промислових і сільськогосподарських об'єктів. Скраплений нафтовий газ — це суміш пропану (C_3H_8), бутану (C_4H_{10}) і ненасичених вуглеводнів — етилен, пропілен, бутилен, амілен, гексилен, гептилен тощо. Незважаючи на незначну частку ненасичених вуглеводнів, їх вплив на технологічне обладнання протягом довготривалого періоду приводить до погіршення його роботи та може привести до виходу з ладу. Це пов'язано з їх недостатньою розчинністю та активним окисленням [1].

Проведення вимірювального контролю масових часток компонентів скрапленого нафтового газу здійснюється за допомогою гідростатичного зважування, хроматографічного та рефрактометричного методів [2]. Гідростатичне зважування характеризується великою похибкою вимірювання, не піддається повній автоматизації і практично не захищене від людського фактора [3]. Хроматографічний метод найточніший, але його реалізація вимагає значних коштів [4]. Використання рефрактометричного методу теж недоцільно, оскільки вимірювання показника заломлення дає можливість безпосередньо встановити масові частки лише двокомпонентних сумішей, тоді як в скрапленому газі присутні пропан, бутан та ненасичені вуглеводні [5].

В роботі [6] запропоновано термооптичний метод вимірювального контролю масових часток компонентів скрапленого нафтового газу шляхом вимірювання його густини при нагріванні або охолодженні з певним кроком. Таким чином, температура є основним фактором, контроль якого надзвичайно важливий, оскільки впливає на точність вимірювання.

Метою роботи є підвищення точності вимірювального контролю масових часток компонентів скрапленого нафтового газу за рахунок врахування температурного режиму під час вимірювання.

Основна частина

В роботі запропоновано оптико-електронний вимірювальний перетворювач, структурна схема якого показана на рис. 1, в якому промінь світла 4 від джерела випромінювання 1 фокусується за допомогою оптичної системи 3, проходить через вертикальну 10 стінку спеціальної кювети 14, в якій знаходиться скраплений нафтовий газ, який подається через вхідний патрубок 7 за допомогою вентиля 8, причому рівень наповненості контролюється мірником 11, та через похилу 10' стінку спеціальної кювети 14, потрапляє на складений фотоприймач 15, який склада-

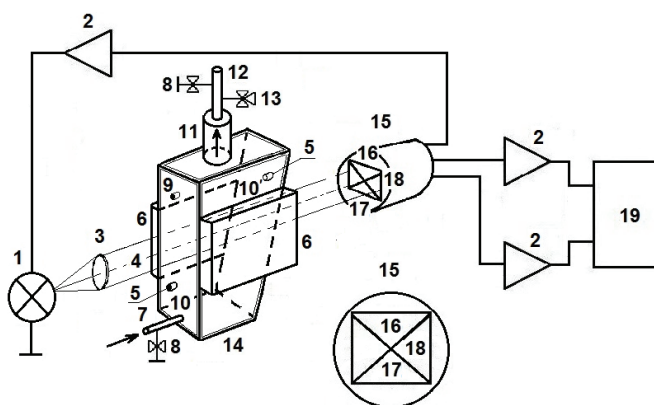


Рис. 1. Структурна схема оптико-електронного вимірювального перетворювача

ється з верхнього 16, нижнього 17 та опорного 18 сегментів, причому напруга від опорного 18 сегмента фотоприймача, який підтримує інтенсивність світлового потоку, надходить через підсилювач 2 до джерела випромінювання 1. Верхній 16 та нижній 17 сегменти фотоприймача дозволяють сформувати диференціальну напругу, що характеризує зміщення вгору чи вниз світлової смужки 6, через підсилювачі 2, надходять на блок порівняння 19. Під час вимірювального контролю відбувається зміна температури скрапленого нафтового газу елементами Пельтьє 6, причому сенсори температури 5 та тиску 9 контролюють процес вимірювання. Відпрацьований скраплений нафтовий газ виводиться завдяки вентилю 8 та клапану 13 через вивідний патрубок 12.

Функція вимірювального перетворення в загальному вигляді описується формулою

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

де U — диференціальна напруга; $P_{\text{вх}}$ — потужність сигналу на вході складеного фотоприймача; P_i — струмова чутливість складеного фотоприймача; R_n — опір навантаження; $f_{\text{пв}}$ — функція перетворення складеного фотоприймача; S — освітлена площа складеного фотоприймача; Δx — зміщення світлової плями; n — показник заломлення; ρ — густина скрапленого нафтового газу; k — масова частка компонента скрапленого нафтового газу.

У спеціальній кюветі 14 розташовуються сенсори температури 5, причому їхнє розміщення має важливе значення. Використання одного сенсора або кількох, але розташованих на одному рівні, не дозволить зафіксувати температуру скрапленого нафтового газу по всьому об'єму. Потрібно використовувати два сенсори температури 5, які розташовані на різних рівнях спеціальної кювети 14. Проведення вимірювального контролю вимагає однакової температури по всьому об'єму скрапленого нафтового газу. Тому потрібно використовувати в конструкції оптико-електронного вимірювального перетворювача два елемента Пельтьє 6, розташованих на протилежних гранях спеціальної кювети 14, що дозволить досягнути однакової температури в об'ємі скрапленого нафтового газу. Виходячи з цього, теплота передається від елементів Пельтьє 6 по об'єму скрапленого нафтового газу (рис. 2), причому $dV = dx dy dz$.

До грані $dydz$ за час $d\tau$ підводиться теплота dQ_1 , яка є різницею між теплотою від елемента Пельтьє dQ_x та теплотою від центру спеціальної кювети dQ_{x+dx} . Згідно з законом Фур'є теплота від елемента Пельтьє dQ_x визначається за формулою

$$dQ_x = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} dy \cdot dz \cdot d\tau. \quad (2)$$

Теплота в центрі спеціальної кювети dQ_{x+dx} визначається як

$$dQ_{x+dx} = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} dy \cdot dz \cdot d\tau + \left(-\lambda \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} dx \cdot dy \cdot dz \cdot d\tau \right). \quad (3)$$

З урахуванням (2) та (3) теплота dQ_1 визначатиметься

$$dQ_1 = dQ_x - dQ_{x+dx} = \lambda \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} dx \cdot dy \cdot dz \cdot d\tau. \quad (4)$$

До грані $dydz$ за час $d\tau$ підводиться протилежно осі Ox теплота dQ_2 , яка є різницею між теплотою від елемента Пельтьє $-dQ_x$ та від центру спеціальної кювети $-dQ_{x+dx}$.

Згідно з законом Фур'є теплота від елемента Пельтьє $-dQ_x$ визначається за формулою

$$-dQ_x = \lambda \frac{\partial t}{\partial x} dy \cdot dz \cdot d\tau. \quad (5)$$

Теплота в центрі спеціальної кювети $-dQ_{x+dx}$ визначається як

$$-dQ_{x+dx} = \lambda \frac{\partial t}{\partial x} dy \cdot dz \cdot d\tau - \left(-\lambda \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} dx \cdot dy \cdot dz \cdot d\tau \right). \quad (6)$$

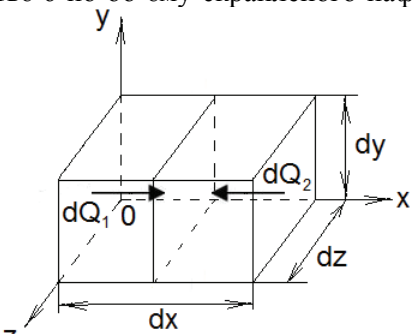


Рис. 2. Об'єм скрапленого нафтового газу, через який поширюється тепло від одного елемента Пельтьє та від іншого

З урахуванням (5) та (6) теплота dQ_2 визначатиметься

$$dQ_2 = -dQ_x + dQ_{x+dx} = -\lambda \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} dx \cdot dy \cdot dz \cdot d\tau. \quad (7)$$

Згідно з першим законом термодинаміки теплота dQ витрачається на зміну внутрішньої енергії dU або ентальпії dH . Для dU і dH отримаємо

$$dU = C_v \rho \frac{\partial t}{\partial \tau} dV d\tau, \quad dH = C_p \rho \frac{\partial t}{\partial \tau} dV d\tau. \quad (8)$$

На основі (5)—(8) та з урахуванням $C_v \approx C_p = C$ матимемо

$$\begin{cases} C_p \frac{\partial t}{\partial \tau} = \lambda \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}; \\ C_p \frac{\partial t}{\partial \tau} = -\lambda \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}. \end{cases} \quad (9)$$

Систему (9) можна також представити як

$$\begin{cases} \frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}; \\ \frac{\partial t}{\partial \tau} = -a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}. \end{cases} \quad (10)$$

Для прийнятих граничних умов другого роду послідовне інтегрування формул (10) дає

$$\begin{cases} t_x^1 = C_1 e^{a_1 x} + C_2 e^{a_2 x}; \\ t_x^2 = C_1 e^{-a_1 x} + C_2 e^{-a_2 x}, \end{cases} \quad (11)$$

де C_1 і C_2 — константи інтегрування; a_1 і a_2 — корені рівнянь системи (11) [7].

Вираз показує експоненційну залежність температури в об'ємі скрапленого нафтового газу.

Графічно розподіл температури в об'ємі скрапленого нафтового газу від елемента Пельтьє до середини спеціальної кювети 1 та від середини спеціальної кювети до елемента Пельтьє 2 наведено на рис. 3, з якого видно, що температура поширюється за експоненціальним законом і встановлюється по всьому об'єму практично однаковою, причому чим менший цей об'єм, тим рівномірніший розподіл температури в ньому.

Однією з характеристик скрапленого нафтового газу є його показник заломлення, який знаходиться у відповідності з густиною газу.

Оскільки показник заломлення скрапленого нафтового газу описується як

$$n = 1,3497 - \frac{9,591}{M_r + 9,5}, \quad \text{а густина — } \rho = \frac{PM}{RT} \quad [8],$$

причому $M = M_r \eta$, то залежність показника заломлення скрапленого газу від його густини буде мати вигляд

$$n = 1,3497 - \frac{9,591}{RT\rho(\eta P)^{-1} + 9,5}, \quad (12)$$

де R — універсальна газова стала; M — молярна маса; M_r — молекулярна маса; η — коефіцієнт пропорційності (10^{-3} кг/моль); P — тиск скрапленого нафтового газу за температури T .

На рис. 4 показана оптична схема оптико-електронного вимірювального перетворювача, згідно з якою промінь світла проходить крізь товщу скрапленого нафтового газу, показник заломлення

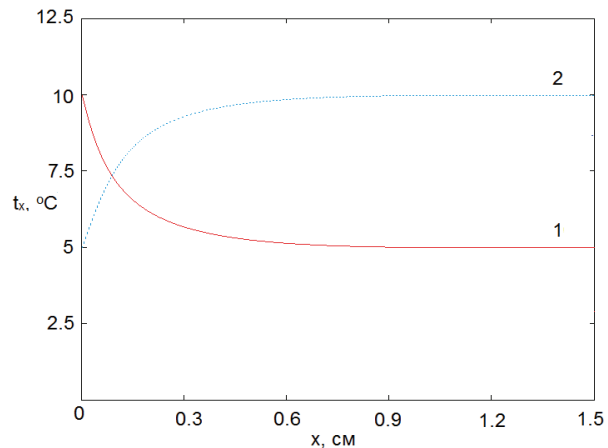


Рис. 3. Розподіл температури t_x в об'ємі скрапленого нафтового газу: 1 — від елемента Пельтьє до середини спеціальної кювети; 2 — від середини спеціальної кювети до елемента Пельтьє

якого знаходиться в діапазоні $n'_2 \dots n''_2$, скляну стінку спеціальної кювети (n_c), прошарок повітря ($n_n = 1$) та потрапляє на фотоприймач. Зміщення світлової плями Δx можна визначити як

$$\Delta x = d \left(\frac{n''_2 \sin \alpha}{\sqrt{n_c^2 - (n''_2 \sin \alpha)^2}} - \frac{n'_2 \sin \alpha}{\sqrt{n_c^2 - (n'_2 \sin \alpha)^2}} \right) + l \left(\frac{n''_2 \sin \alpha}{\sqrt{1 - (n''_2 \sin \alpha)^2}} - \frac{n'_2 \sin \alpha}{\sqrt{1 - (n'_2 \sin \alpha)^2}} \right), \quad (13)$$

де d — товщина скла; l — відстань від складеного фотоприймача до скла; α — кут падіння променя.

Зміщення світлової плями Δx залежить від товщини скла d та відстані від складеного фотоприймача до скла l , що проілюстровано на рис. 5а та б, відповідно.

Як видно з рис. 5, допустиме зміщення світлової плями Δx , яке не повинно перевищувати 1,8 мм, оскільки це лінійні розміри фоточутливої частини складеного фотоприймача, відповідає значенням товщини скла до 10 мм, коли відстань від складеного фотоприймача до скла в 1 мм.

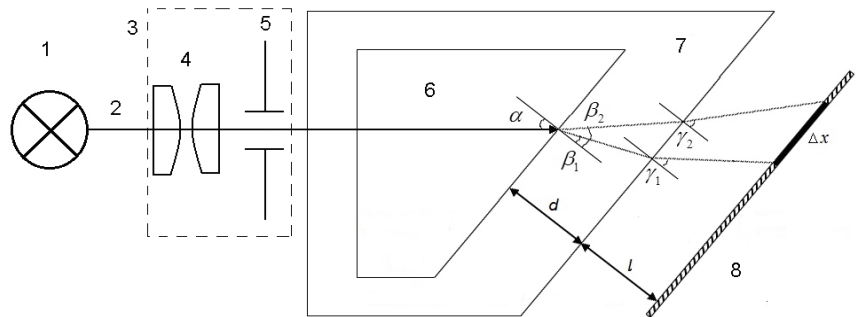


Рис. 4. Оптична схема оптико-електронного вимірювального перетворювача: 1 — джерело світла; 2 — промінь світла; 3 — оптична система; 4 — лінзи; 5 — діафрагма; 6 — скраплений нафтовий газ; 7 — скляна кювета; 8 — фотоприймач

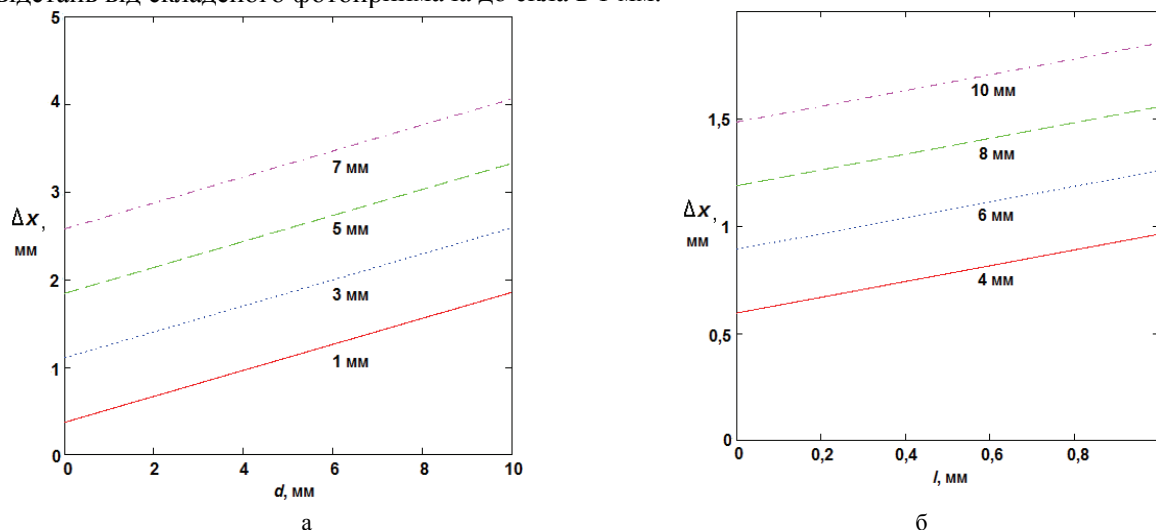


Рис. 5. Залежність зміщення Δx від: а — товщини скла d ; б — відстані від складеного фотоприймача до скла l

Таким чином, товщину скла доцільно обрати 10 мм, а відстань від складеного фотоприймача до скла — 1 мм.

Графік чутливості зміщення світлової плями, яка проходить крізь товщу скрапленого нафтового газу, скляну стінку спеціальної кювети товщиною 10 мм та прошарок повітря товщиною 1 мм, від кута падіння, показано на рис. 6.

З графіка рис. 6 випливає, що найбільша крутизна чутливості спостерігається поблизу критичного кута падіння променя, який складає 42° , за якого відбувається повне внутрішнє відбиття. Тому кут падіння повинен знаходитись в межах від 20° до 40° .

Таким чином, кут падіння променя на похилу стінку спеціальної кювети доцільно обрати 40° . Це значення кута забезпечує нахил стінки в 130° .

Промінь світла у вигляді світлової плями, який пройшов крізь товщу скрапленого нафтового газу, скляну стінку спеціальної кювети та прошарок повітря, потрапляє на складений фотоприймач (рис. 7), який дозволяє зареєструвати просторовий розподіл освітленості.

Якщо світлова пляма закриває поверхню всіх сегментів фотоприймача, то на виході буде нульовий сигнал. Зі зміщенням світлової плями відбувається перерозподіл світлових потоків, що аналізується

блоком порівняння. Внаслідок цього з'являється диференціальна напруга $U_{\text{пв}}$, яка пропорційна зміщенню Δx світлової плями та, відповідно, густині скрапленого нафтового газу ρ [9].

$$U_{\text{пв}} = U_1 - U_3 = P_{\text{вх}} P_i R_n (S_1 - S_3). \quad (14)$$

Тоді диференціальна напруга (1) з урахуванням (4) набуде вигляду:

$$U_{\text{пв}} = P_{\text{вх}} P_i R_n b \Delta x. \quad (15)$$

Результати дослідження функції перетворення (15) наведено на рис. 8.

Отримані залежності вказують на те, що зміна температури скрапленого нафтового газу приводить до суттєвої зміни вихідної диференціальної напруги оптико-електронного вимірювального перетворювача, причому за температури -4°C диференціальна напруга змінюється від 3,65 до 3,705 В, за 4°C — від 3,67 до 3,725 В, а за 12°C — від 3,685 до 3,74 В.

Таким чином, функція вимірювального перетворення відображає залежність показника заломлення скрапленого нафтового газу із заданою температурою й тиском від диференціальної напруги, отриманої в результаті проходження світлового випромінювання через спеціальну кювету зі скрапленим газом і детектованої складеним фотоприймачем внаслідок зміщення світлової плями, один із каналів якого є опорним для стабілізації випромінювання, що дозволило зменшити зведену похибку вимірювання в 1,2 рази в порівнянні з дослідженнями, наведеними в роботі [10].

Висновок

В ході виконання роботи розв'язано важливу науково-практичну задачу підвищення точності вимірювального контролю масових часток компонентів скрапленого нафтового газу, шляхом удосконалення математичної моделі оптико-електронного вимірювального перетворювача. В основу його роботи покладена залежність показника заломлення від густини скрапленого газу за певної температури.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Рачевский Б. С. Сжиженные углеводородные газы / Б. С. Рачевский. — М. : Нефть и газ, 2009. — 640 с.
2. Білінський Й. Й. Порівняльна характеристика методів експертно-аналітичного контролю якості скрапленого нафтового газу / Й. Й. Білінський, Б. П. Книш // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2014. — № 5. — С. 142—147.
3. Методи измерения плотности жидкости [Электронный ресурс] / LEMIS: эксперты измерения плотности. — Режим доступа : <http://www.lemis-baltic.ru/?mid=60>.
4. Визначення якості хроматографічними методами [Електронний ресурс]. — Режим доступу : http://intranet.tdmu.edu.ua/data/kafedra/internal/pharma_2/classes_stud/uk/pharm/prov_pharm/ptn.
5. Иоффе Б. В. Рефрактометрические методы химии / Б. В. Иоффе. — Л. : Химия, 1983. — 352 с.
6. Білінський Й. Й. Визначення кількісного вмісту компонентів скрапленого нафтового газу / Й. Й. Білінський, Б. П. Книш, М. В. Гладішевський // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2014. — № 1. — С. 112—119.
7. Чепурний М. М. Застосування теорії подібності для розв'язання задач тепломасообміну / М. М. Чепурний, С. Й. Ткаченко, В. В. Бужинський. — Вінниця : ВДТУ, 2001. — 110 с.

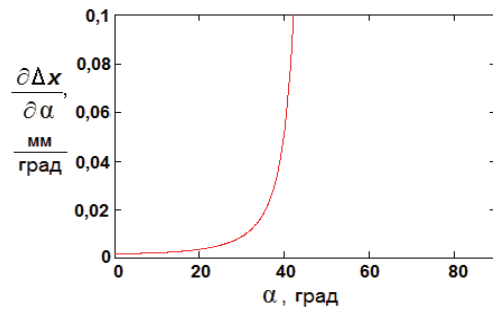


Рис. 6. Графік чутливості зміщення світлової плями від кута падіння

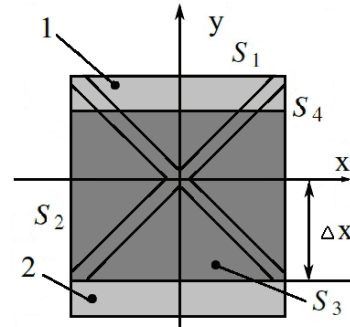


Рис. 7. Принцип роботи складеного фотоприймача: 1 — смужка світла, розміщена на оптичній осі; 2 — зміщена смужка світла; Δx — величина зміщення світлової плями; S_1, S_2, S_3, S_4 — частини площини сегментів фотоприймача, освітлені променем світла

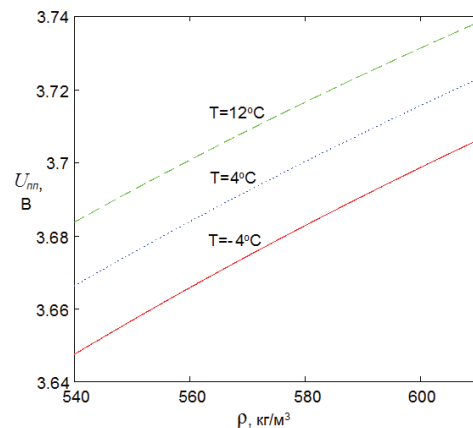


Рис. 8. Залежність диференціальної напруги оптико-електронного вимірювального перетворювача від густини скрапленого нафтового газу

8. Преображенский Н. И. Сжиженные углеводородные газы / Н. И. Преображенский. — Л. : Недра, 1975. — 279 с.
9. Иванов В. И. Полупроводниковые оптоэлектронные приборы : справочник / В. И. Иванов, А. И. Аксенов, А. М. Юшин. — М. : Энергоатомиздат, 1989. — 448 с.
10. Совлуков А. С. Сравнительный анализ существующих методов измерений массы светлых нефтепродуктов в резервуарах / А. С. Совлуков, В. И. Терешин // Актуальные вопросы метрологического обеспечения измерений расхода и количества жидкостей и газов : 3-я Международная метрологическая конференция : тезисы докл. — Казань, 2015. — С. 72—78.

Рекомендована кафедрою електроніки та наносистем ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 4.04.2017

Білінський Йосип Йосипович — д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри електроніки та наносистем;
Книш Богдан Петрович — канд. техн. наук, асистент кафедри електроніки та наносистем, e-mail: tutmos-3@i.ua .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

Yo. Yo. Bilynskiy¹
B. P. Knysh¹

Advanced Mathematical Model of Optoelectronic Measuring Transducers

¹Vinnitsia National Technical University

The task of increase of exactness of measuring control of mass particles of components of the liquefied petroleum gas has been solved by the improvement of mathematical model of electrooptic measuring transducer, its basic parameters have been investigated and the function of transformation has been got.

Keywords: liquefied petroleum gas, the mass fraction, propane, butane, unsaturated hydrocarbons.

Bilynskiy Yosyp Yo. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Electronics and Nanosystems;

Knysh Bohdan P. — Cand. Sc. (Eng.), Assistant of the Chair of Electronics and Nanosystems, e-mail: tutmos-3@i.ua

И. И. Билинский¹
Б. П. Кныш¹

Повышение точности измерительного контроля массовых частиц компонентов сжиженного нефтяного газа

¹Винницкий национальный технический университет

Решена задача повышения точности измерительного контроля массовых частиц компонентов сжиженного нефтяного газа путем усовершенствования математической модели оптико-электронного измерительного преобразователя, исследованы его основные параметры и получена функция преобразования.

Ключевые слова: сжиженный нефтяной газ, массовая доля, пропан, бутан, ненасыщенные углеводороды.

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

Кныш Богдан Петрович — канд. техн. наук, ассистент кафедры электроники и наносистем, e-mail: tutmos-3@i.ua