

**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЗАСОБУ ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ КІЛЬКІСНОГО ВМІСТУ СКРАПЛЕНОГО НАФТОВОГО ГАЗУ**

*В роботі розроблено математичну модель, що адекватно описує засіб вимірювального контролю кількісного вмісту скрапленого нафтового газу, який дозволяє визначати не тільки вміст пропану й бутану, але й домішок. Наведено структурні схеми засобу та алгоритм вимірювального контролю.*

*Ключові слова: скраплений нафтовий газ, кількісний вміст, пропан, бутан, домішки.*

Y.Y. BILINSKIY, B.P. KNYSH, M.O. STASIUK  
Vinnytsia National Technical University, Ukraine

**THE MEASURING CONTROL OF LIQUEFIED PETROLEUM GAS QUANTITATIVE VALUE TOOL MATHEMATICAL MODEL**

*Purpose of the work is improving the accuracy of measuring quantitative value of liquefied petroleum gas by developing a tools of measuring control based on thermometric method.*

*A mathematical model, that describes the physical processes and transformation while the measuring control tool of quantitative value of liquefied petroleum gas based on thermometric method is in operation, that allows to determine the quantitative value not only the main components of the mixture (propane and butane), but the impurities (ethylene, propylene, butylene, amylene, heksylen, heptylen) under the different temperature conditions, was developed in this work. The sensitivity of tool was defined and the block diagram and measuring control algorithm was provided in this paper.*

*Preliminary calculations of the conversion function and sensitivity values showed the availability of the measuring control of liquefied petroleum gas quantitative value tool.*

*Keywords: liquefied petroleum gas, quantitative value, propane, butane.*

**Вступ**

На сьогодні знаходить широке використання скраплений нафтовий газ як паливо в двигунах автомобільного транспорту, так і установках муніципальних, промислових і сільськогосподарських об'єктів. Скраплений нафтовий газ (СНГ) – це суміш пропану (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>), бутану (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>) і домішок (приблизно 1%) – етилен, пропілен, бутилен, амілен, гексилен, гептилен тощо. Незважаючи на незначну частку домішок, 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, кількісний вміст тощо. Для визначення кількісного вмісту найбільш відомими методами є хроматографічний, який дає змогу визначити вміст як основних компонентів, так і домішок, хімічний, за допомогою якого визначаються наявність рідкого залишку, вільної води та лугу, радіохвильовий та радіочастотний методи, які дозволяють визначити масові частки складових СНГ [2].

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

Таким чином, метою роботи є підвищення точності вимірювання кількісного вмісту СНГ шляхом розробки засобу вимірювального контролю на основі термометричного методу.

**Основна частина**

В роботі [4] запропоновано термометричний метод визначення кількісного вмісту СНГ шляхом вимірювання його густини при нагріванні або охолодженні з певним кроком. Отримані таким чином характеристики порівнюються з еталонними та на їх основі шляхом математичних перетворень визначають кількісний вміст СНГ. Одну із схемних реалізацій функціональних перетворень термометричного методу визначення кількісного вмісту СНГ показано на рисунку 1.

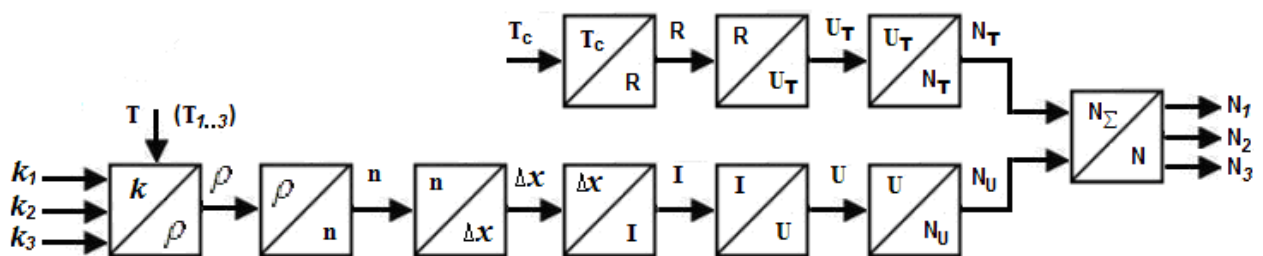


Рис. 1. Схема функціональних перетворень кількісного вмісту СНГ

Кількісний вміст пропану  $k_1$ , бутану  $k_2$  та домішок  $k_3$  визначається наступним чином. При зміні температури  $T$  ( $T_{1..3}$ ) СНГ змінюється його густина  $r$ , яка складається з густин пропану  $r_1$ , бутану  $r_2$  та домішок  $r_3$ , які можна представити в кількісних співвідношеннях як  $k_1, k_2, k_3$ , відповідно. Густина  $r$  СНГ при певній температурі прямо пропорційна показнику заломлення  $n$ , який може бути визначений на основі імерсійного методу за зміщенням променя  $\Delta x$ , який поступає на складений фотоприймач. Струм  $I$  фотоприймача дозволяє отримати на виході вимірювального каналу значення напруги  $U$ , що пропорційна густині  $r$ . При цьому температура СНГ  $T_c$  контролюється сенсором температури, що дає змогу через зміну величини його опору  $R$  отримати значення напруги  $U_T$  на його виході. В подальшому отримані значення напруг оцифровують за допомогою АЦП. Отримані значення кодів  $N_U$  та  $N_T$  для вимірювального каналу та сенсора температури обчислюються для декількох значень температури згідно [4], що дає змогу визначити концентрації пропану, бутану та домішок, відповідно.

Таким чином, на основі методу визначення кількісного вмісту густина СНГ описується як  $r = k_1 r_1 + k_2 r_2 + k_3 r_3$ , причому  $r = PM(0.153RT)^{-1}$ , де  $r_1$  – густина пропану;  $r_2$  – густина бутану;  $r_3$  – густина домішок;  $R$  – універсальна газова стала;  $M$  – молекулярна маса;  $P$  – абсолютний тиск СНГ при температурі  $T$ . [5].

Одним із основних методів визначення густини є рефрактометричний, який дозволяє її вимірювати через показник заломлення, причому  $n = 1.4752 - \frac{9.591}{M + 9.5}$  [4]. Тоді залежність показника заломлення СНГ від його густини описується як

$$n = 1.4752 - \frac{9.591}{0.153RT_r P^{-1} + 9.5}.$$

Процес перетворення показника заломлення  $n$  в зміщення променя  $\Delta x$ , зображений на рисунку 1, можна проілюструвати на основі імерсійного методу [6].

Проходження світла через товщу СНГ представлено на рисунку 2.

Бокове зміщення променя

$$x = d \sin a \left( 1 - \cos a (n^2 - \sin^2 a)^{\frac{1}{2}} \right),$$

де  $d$  – товщина шару СНГ.

Тоді зміщення променя

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

З урахуванням показника заломлення

$$\Delta x = d \cdot \operatorname{tg} a \left( 1 - \cos a \cdot \left( \left( 1.4752 - \frac{9.591}{0.153RT_r P^{-1} + 9.5} \right)^2 - \sin^2 a \right)^{\frac{1}{2}} \right).$$

Процес перетворення зміщення променя  $\Delta x$  в струм  $I$ , можна представити через залежність величини сигналу, який реєструється фотоприймачем, від потоку оптичного випромінювання  $\Phi_{np}$ , який поглинув фотоприймач за час накопичення

$$I = S_{\phi n} \int_0^{T_n} \Phi_{np}(t) dt,$$

де  $S_{\phi n}$  – інтегральна чутливість фотоприймача;

$T_n$  – час накопичення заряду.

Величина потоку випромінювання, що падає на поверхню фотоприймача

$$\Phi_{np} = S_{np} S_{зон}^{-1} \Phi_{дж},$$

де  $S_{np}$  – площа фотоприймача;

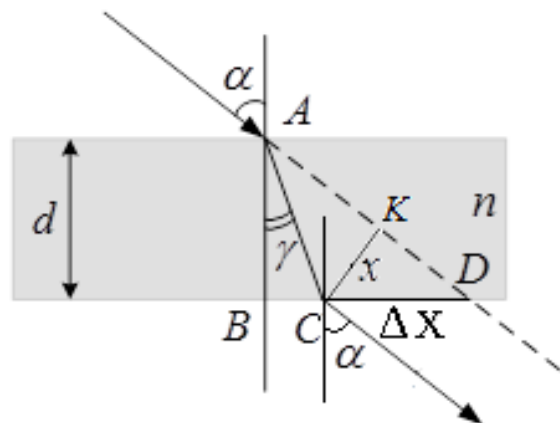


Рис. 2. Проходження світла через товщу СНГ

$S_{зон}$  – площа зони потрапляння променя в область розміщення фотоприймача;

$\Phi_{дж}$  – потік випромінювання від джерела світла.

Площа зони потрапляння променя

$$S_{зон} = \Delta x \cdot b,$$

де  $b$  – ширина світлової смуги.

Тоді значення струму на виході фотоприймача

$$I = \frac{S_{\phi n} \cdot S_{np}}{d \cdot b \cdot \operatorname{tg} a} \left( 1 - \cos a \cdot \left( \left( 1.4752 - \frac{9.591}{0.153RTrP^{-1} + 9,5} \right)^2 - \sin^2 a \right)^{\frac{1}{2}} \right)^{-1} \int_0^{T_n} \Phi_{дж}(t) dt.$$

Вихідний сигнал фотоприймача підсилюється за допомогою підсилювачів, вихідна напруга яких  $U_{вихбн}$  надходить на мікропроцесор і дорівнює добутку вхідної напруги  $U_{вхбн}$  на коефіцієнт перетворення  $K_{бн}$

$$U_{вихбн} = U_{вхбн} \cdot K_{бн}.$$

Оскільки вхідна напруга підсилювача  $U_{вхбн} = (U_{он} - I \cdot R) \cdot K_n$ , то вихідна його напруга визначається

$$U_{вихбн} = (U_{он} - I \cdot r) \cdot K_n \cdot K_{бн},$$

де  $r$  – опір підсилювача;

$K_n$  – коефіцієнт підсилення;

$U_{он}$  – опорна напруга.

Таким чином отримуємо напругу засобу вимірювального контролю кількісного вмісту СНГ

$$U_{вихбн} = \left( U_{он} - \frac{S_{\phi n} \cdot S_{np} \cdot r}{d \cdot b \cdot \operatorname{tg} a} \left( 1 - \cos a \cdot \left( \left( 1.4752 - \frac{9.591}{\frac{0.153RTr}{P} + 9,5} \right)^2 - \sin^2 a \right)^{\frac{1}{2}} \right)^{-1} \int_0^{T_n} \Phi_{дж}(t) dt \right) K_n K_{бн}.$$

АЦП, який міститься в мікропроцесорі, має  $n$  розрядів, причому максимальна напруга, яку він може оцифрувати, дорівнює  $U_{max}$ . Значення коду АЦП визначається

$$N = \frac{U_{max}}{U_{он}} (2^n - 1).$$

Оскільки максимальна напруга  $U_{max}$  є вхідною напругою на мікропроцесор  $U_{вихбн}$ , то значення коду АЦП набуває вигляду

$$N = \left( 1 - \frac{S_{\phi n} S_{np} r}{U_{он} d b \operatorname{tg} a} \left( 1 - \cos a \cdot \left( \left( 1.4752 - \frac{9.591}{\frac{0.153RTr}{P} + 9,5} \right)^2 - \sin^2 a \right)^{\frac{1}{2}} \right)^{-1} \int_0^{T_n} \Phi_{дж}(t) dt \right) K_n K_{бн} (2^n - 1).$$

Залежність напруги  $U$  від кількісних вмістів пропану, бутану та домішок зображено на рисунку 3.

Отримані залежності вказують на те, що із збільшенням кількісного вмісту компонентів СНГ напруга засобу вимірювального контролю збільшується. Отже, зміна функції перетворення має лінійний характер. Тобто напруга  $U$  збільшується в діапазоні від 1,75 до 2,08 В при збільшенні кількісного вмісту пропану від 0 до 1 відн. од. Напруга  $U$  збільшується в діапазоні від 1,81 до 2,15 В при збільшенні кількісного вмісту бутану від 0 до 1 відн. од. Напруга  $U$  збільшується в діапазоні від 1,95 до 2,28 В при збільшенні кількісного вмісту домішок від 0 до 1 відн. од.

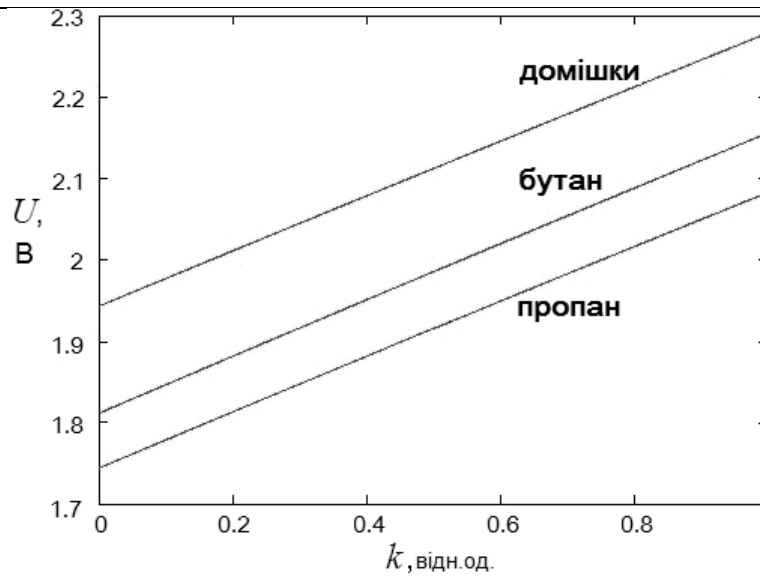


Рис. 3. Залежність напруги  $U$  від кількісних вмістів пропану, бутану та домішок

Взаємозалежність кількісних вмістів пропану  $k_1$ , бутану  $k_2$  та домішок  $k_3$  зображено на рисунку 4.

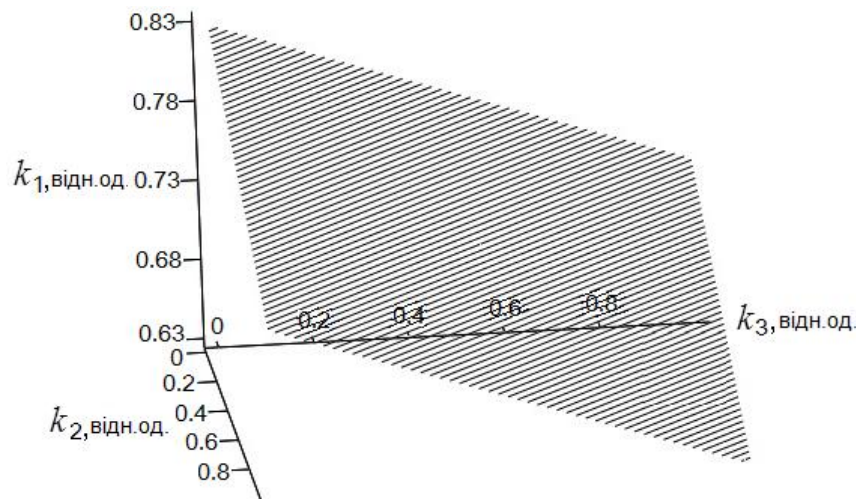


Рис. 4. Взаємозалежність кількісних вмістів пропану  $k_1$ , бутану  $k_2$  та домішок  $k_3$

Як видно з рисунку, із збільшенням одного кількісного вмісту інший зменшується і навпаки. Отже, зміна функції перетворення для кількісних вмістів пропану, бутану та домішок має лінійний характер. Тобто  $k_1$  зменшується при збільшенні  $k_2$  та  $k_3$  по всьому діапазону значень, а саме від 0 до 1 відн. од.  $k_2$  збільшується при зменшенні  $k_1$  та  $k_3$  по всьому діапазону значень, а саме від 0,83 до 0,7 відн. од. для  $k_1$  і від 1 до 0 відн. од. для  $k_3$ .  $k_3$  зменшується при збільшенні  $k_1$  та  $k_2$  по всьому діапазону значень, а саме від 0,7 до 0,83 відн. од. для  $k_1$  та від 0 до 1 відн. од. для  $k_2$ .

Чутливість засобу вимірювального контролю кількісного вмісту компонентів СНГ, а саме пропану, бутану та домішок, визначається як

$$\frac{\partial U}{\partial k} = \frac{0.73S_{fn}S_{np}K_R\Phi_{дос}^2 \cos a \left( 1.4752 - \frac{9.591}{0.153RT_rP^{-1} + 9.5} \right)}{dbtga \left( 1 - \cos a \cdot \left( \left( 1.4752 - \frac{9.591}{0.153RT_rP^{-1} + 9.5} \right)^2 - \sin^2 a \right)^{\frac{1}{2}} \right)^2}.$$

$$\cdot RTr_1 K_n K_{\text{он}}$$

$$\cdot \left( \sqrt{\left( 1.4752 - \frac{9.591}{0.153RTrP^{-1} + 9,5} \right)^2 - \sin^2 a} \right)^3 (0.153RTrP^{-1} + 9,5)^2 P$$

Графік чутливості засобу вимірювального контролю кількісного вмісту компонентів СНГ, а саме пропану, бутану та домішок, зображено на рисунку 5.

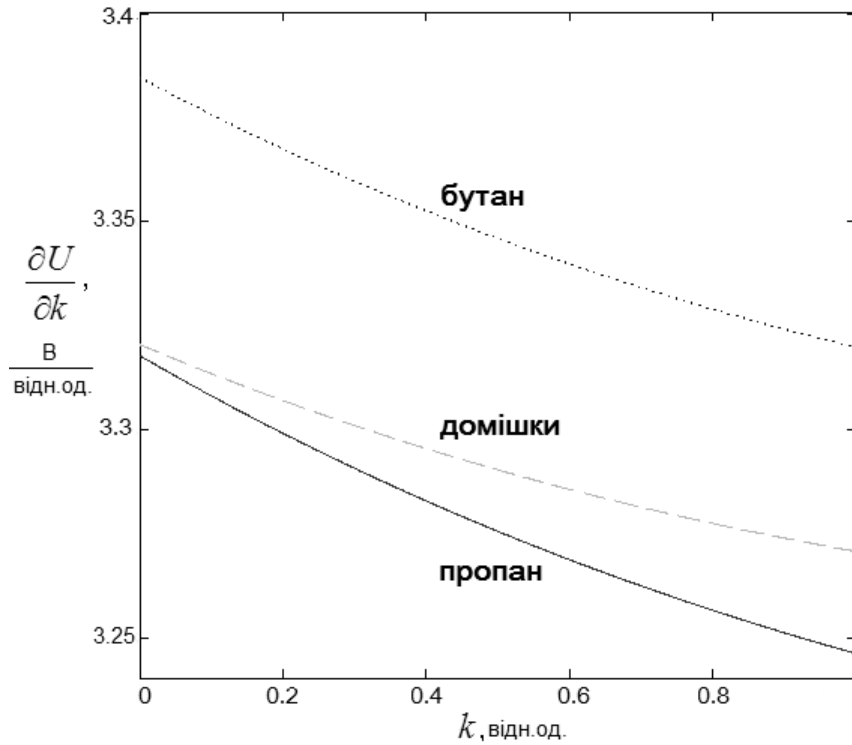


Рис. 5. Графік чутливості засобу вимірювального контролю кількісних вмістів пропану, бутану та домішок

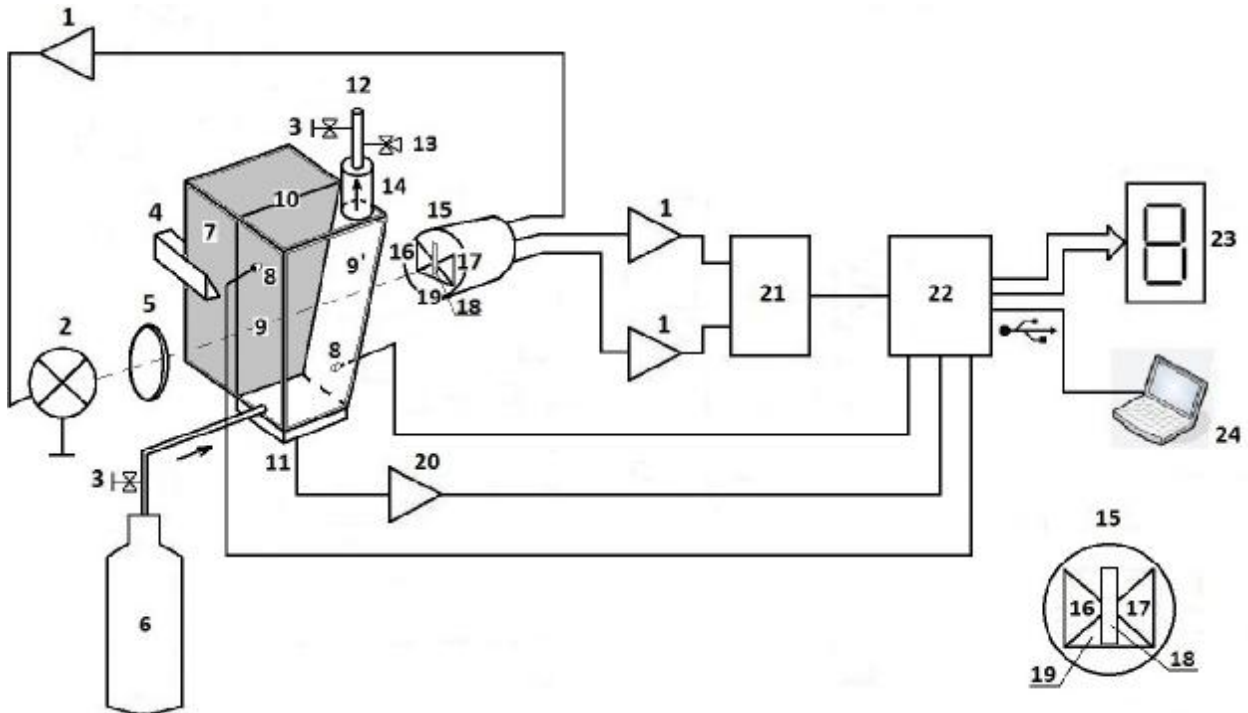


Рис. 6. Структурна схема засобу вимірювального контролю кількісного вмісту СНГ

Як слідує з аналізу графіка, чутливість засобу вимірювального контролю кількісних вмістів пропану, бутану та домішок знаходиться в межах 0,02 В/відн.од., що забезпечує високу точність вимірювання кількісного співвідношення не тільки пропану й бутану, але й домішок.

Для визначення кількісного вмісту СНГ розроблено засіб вимірювального контролю, структурна схема якого наведена на рисунку 6, що містить джерело випромінювання 2, оптичну систему 5, яка формує паралельний світловий потік у вигляді світлової смужки 18, кювету 10, яка містить вертикальну 9 та похилу  $9^\circ$  стінки, поршень 7, що рухається за допомогою штока 4, мірник 14 з вивідним патрубком 12, який містить вентиль 3 та клапан 13, балон 6, який за допомогою вентиля 3 подає у кювету 10 СНГ, сенсори температури 8, елемент нагрівання 11, підсилювачі 1, підсилювач елемента нагрівання 20, систему фотоприймачів 15, яка складається з лівого 16, правого 17 та опорного 19 фотоприймачів, блок порівняння 21, мікропроцесорний пристрій 22, індикаторне табло 23, комп'ютер 24.

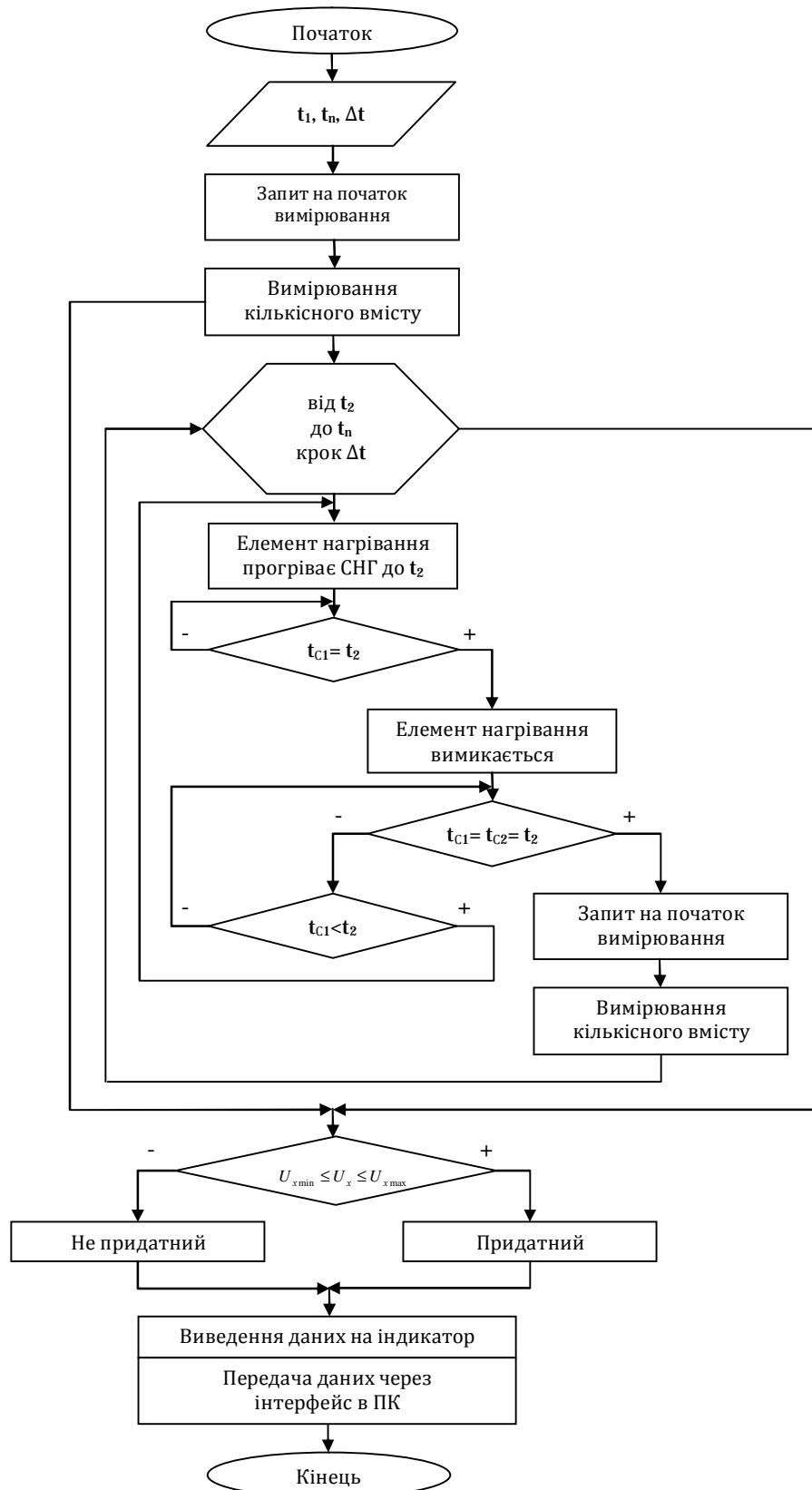


Рис. 7. Алгоритм вимірювального контролю кількісного вмісту СНГ

СНГ подається з балону 6 за допомогою вентиля 3 у вимірювальну кювету 10, де відбувається його нагрівання елементом нагрівання 11, завдяки напрузі, яка задається мікропроцесорним пристроєм 22 та підсилюється за допомогою підсилювача елемента нагрівання 20. У випадку досягнення однакової температури СНГ по всьому об'єму вимірювальної кювети 10 сенсори температури 8 направляють сигнали до мікропроцесорного пристрою 22 і розпочинається процес вимірювання. Світловий потік від джерела випромінювання 2 фокусується за допомогою оптичної системи 5, яка формує світлову смужку 18, проходить через вертикальну 9 стінку вимірювальної кювети 10, в якій знаходиться СНГ та через похилу 9 стінку вимірювальної кювети 10 потрапляє на приймач випромінювання 15, який представляє собою систему фотоприймачів, причому напруга від опорного фотоприймача 19 надходить через підсилювач 1 до джерела випромінювання 2. Значення напруги лівого 16 та правого 17 фотоприймачів, що характеризує зміщення вліво чи вправо світлової смужки 18, через підсилювачі 1, надходить на блок порівняння 21, обробляється мікропроцесорним пристроєм 22 і виводиться на цифрове індикаторне табло 23 та через інтерфейс USB на комп'ютер 24. Відпрацьований СНГ витискається поршнем 7 за допомогою штока 4 спочатку у мірник 14, а потім завдяки вентилю 3 та клапану 13 виводиться через вивідний патрубок 12.

Опис роботи засобу вимірювального контролю кількісного вмісту СНГ можна проілюструвати алгоритмом, який зображено на рисунку 7.

Процес вимірювання кількісного вмісту СНГ відбувається при температурі навколишнього середовища  $t_1$ . Після цього СНГ нагрівається за допомогою елемента нагрівання в межах попередньо заданих температур  $t_2 \dots t_n$  з кроком  $\Delta t$ . Під час нагрівання мікропроцесорний пристрій безперервно отримує сигнали з сенсорів температури  $C_1$  та  $C_2$  і в разі, якщо значення температур  $t_{C_1}$  (сенсор  $C_1$ ) та  $t_{C_2}$  (сенсор  $C_2$ ) рівні між собою та співпадають із заданою температурою, то розпочинається процес вимірювання кількісного вмісту СНГ. Після його закінчення для заданої температури здійснюються аналогічні операції для наступних температур.

В разі, якщо умова одночасної рівності заданої температури та  $t_{C_1}$  і  $t_{C_2}$  не виконується, то СНГ охолоджується нижче заданої температури і елемент нагрівання знов підігріває його. Цей процес відбувається до тих пір, поки умова одночасної рівності температур не буде виконуватись.

Після проведення заданої кількості вимірювань дані виводяться на індикаторне табло та через інтерфейс USB на комп'ютер.

### Висновки

В роботі запропоновано математичну модель, що описує фізичні процеси та перетворення під час роботи засобу вимірювального контролю кількісного вмісту СНГ. Визначено чутливість засобу вимірювального контролю кількісного вмісту СНГ, яка знаходиться в межах 0,02 В/відн.од. Наведено структурну схему засобу вимірювального контролю та алгоритм, який описує його роботу. Попередні розрахунки функції перетворення та значення чутливості показали перспективність засобу вимірювального контролю кількісного вмісту СНГ.

### Література

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. Книш Б. П. Визначення кількісного вмісту компонентів скрапленого нафтового газу / Б. П. Книш, Й. Й. Білинський, М. В. Гладішевський // 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.

### Reference

1. Raachevsky B. S. Szhizhenye uglerodnye gazy / B. S. Raachevsky. – M.: Neft i gaz, 2009. – 640 s.
2. Radiochastotny metod izmereniya massy szhizhennogo uglerodnogo gaza [Elektronny resurs] : Ukrainian Context Optimizer. – Rezhym dostupu : <http://uteoss2012.ipu.ru/procdngs/0654.pdf>. – 03.07.2014.
3. Astahov A. Analiz nefteproduktov s pomoshchyu hromatograficheskikh metodov / A. Astahov // Oborudovanie i materialy. – 2013. – №3. – S. 48 – 53.
4. Knysh B. P. Vyznachennya kilkisnogo vmistu komponentiv skraplenogo naftovogo gazu [Text] / B. P. Knysh, Y. Y. Bilinskiy, M. V. Gladyshevsky // Visnyk Vinniczskogo politehnichnogo institutu. – 2014. – №1. – S. 112 – 119.
5. Preobrazhensky N. I. Szhizhenye uglerodnye gazy / N. I. Preobrazhensky. – L.: Nedra, 1975. — 279 s.
6. Ioffe B. V. Refraktometricheskie metody himii / B. V. Ioffe. – L. : Himiya, 1983. – 352 s.

Рецензія/Peer review : 22.4.2015 р.

Надрукована/Printed : 14.5.2015 р.

Рецензент: д.т.н., проф. В.Г. Петрук