

УДК 681.121

## ЛАБОРАТОРНИЙ СТЕНД ДЛЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛИННИХ ПОТОКІВ ПРИ ДІАГНОСТУВАННІ ПРОМИСЛОВИХ ЛІЧИЛЬНИКІВ ГАЗУ

*В.В. Малісевич*

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська,  
15, м. Івано-Франківськ, [feivt@nung.edu.ua](mailto:feivt@nung.edu.ua)*

*Розроблена структурна схема лабораторного стенда для фізичного моделювання впливу компонентного складу газоповітряної суміші на функціонування парціального витратоміра з корекцією по енергетичних характеристиках. Здійснено математичне моделювання і кількісне оцінювання зміни інформативного сигналу парціального витратоміра при зростанні вмісту пароподібної пропан-бутанової компоненти до 10 % газоповітряної суміші при зміні тиску і температури робочого середовища, які відповідають умовам функціонування лабораторного стенда. Обґрунтовано можливість проведення лабораторних досліджень макету парціального витратоміра з корекцією щодо енергетичних характеристик плинних газоповітряних сумішей.*

*Ключові слова: лічильник газу, лабораторний стенд, діагностування, енергетична характеристика, експериментальне дослідження, порціальный витратомір, газоповітряна суміш.*

*Разработана структурная схема лабораторного стенда для физического моделирования влияния компонентного состава газовой смеси на функционирование парциального расходомера с коррекцией по энергетическим характеристикам. Проведено математическое моделирование и количественное оценивание изменения информативного сигнала парциального расходомера при росте содержания паробразной пропан-бутановой компоненты до 10 % газовой смеси при изменении давления и температуры рабочей среды, которые соответствуют условиям функционирования лабораторного стенда. Обоснована возможность проведения лабораторных исследований макета парциального расходомера с коррекцией по энергетическим характеристикам текущих газоздушных смесей.*

*Ключевые слова: счетчик газа, лабораторный стенд, диагностирования, энергетическая характеристика, экспериментальное исследование, порциальный расходомер, газоздушная смесь.*

*The flow diagram of laboratory bench for the physical modeling of influence of component composition of air-gas mixture on functioning of partial flowmeter with a correction on energy characteristics is developed. A mathematical modeling and quantitative evaluation of partial flowmeter's informative signal change with increasing content of propane-butane components vaporous to 10 % in air-gas mixture at the change of pressure and temperature of working environment, which comply with the functioning of the laboratory bench conditions are carried out. The possibility of laboratory researches realization of partial flowmeter's model with a correction on energy characteristics of flowing air-gas mixtures is grounded.*

*Keywords: gas meter, test machine, diagnostics, power characteristics, experimental studies partialny flowmeter gas mixture.*

### **Вступ**

Останнім часом у зв'язку з подорожанням енергоносіїв все більшої актуальності набуває питання підвищення точності їх обліку. Одним із напрямків для його вирішення може бути контроль метрологічних характеристик засобів обліку впродовж міжповірочного інтервалу безпосередньо за місцем експлуатації. При цьому поряд з вимірюванням об'єму чи витрати необхідно враховувати також якісні

характеристики природного газу, наприклад, густину, яка переважно визначається хроматографічним методом. На сьогодні основну характеристику газу, як енергоносія – теплотворну здатність – при повірці лічильників чи витратомірів газу не беруть до уваги. Так як природний газ є багатокомпонентною сумішшю, то за однакової густини його теплотворна здатність може бути різною. З урахуванням того, що у світовій практиці все в більших масштабах комерційний розрахунок за

спожитий газ здійснюється з урахуванням його енергетичної цінності, в Україні актуалізується питання щодо необхідності застосування нових підходів до вирішення питань з обліку природного газу, які сприяють вирішенню питань збереження енергоресурсів.

#### Аналіз попередніх досліджень

Аналіз останніх досліджень у сфері витратометрії природного газу показав, що на даний момент у складі вимірювальних комплексів витрати або об'єму природного газу для врахування його якісних параметрів (компонентного складу або густини) використовують переважно хроматографи або густиноміри [1], якими комплектуються інформаційно-вимірювальні системи обліку природного газу. Однак цей метод є довготривалим і вартісним внаслідок дороговизни хроматографів і реалізується на великовитратних вузлах обліку з періодичністю одного разу в декілька діб. Тому такий підхід не може бути застосований у засобах для діагностування лічильників у робочих умовах.

Моделювання впливу якісних характеристик природного газу при діагностуванні засобів обліку досліджено в [2], де показано, що зміна густини природного газу на 1 % приводить до зростання похибки вузла обліку не менше, ніж на 0,5 %. За таких умов пропорційно буде зростати похибка обліку газу за енергетичними характеристиками.

В роботі [3] запропоновано методику вимірювання концентрації основних компонент природного газу ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{C}_3\text{H}_8$ ) при вирішенні питань контролю енерговмісту природного газу. Це реалізується шляхом прямих вимірювань без попередньої підготовки проб, яка полягає у використанні трикувєтної схеми вимірювання одного компонента. За допомогою використання трикувєтної схеми підвищується точність вимірювань та чутливість. Однак в роботі [3] не досліджується питання інтегрального контролю енергетичних характеристик вимірюваних об'ємів газу.

Для вирішення завдання підвищення точності обліку природного газу з одночасним урахуванням його енергетичних характеристик автором запропоновано нове технічне рішення парціального витратоміра [4]. Він при вимірюванні витрати дає змогу опосередковано визначати якісні характеристики природного газу, а отже здійснювати контроль з урахуванням теплотворної здатності.

За участю автора розроблено математичну модель функціонування парціального

витратоміра [5]:

$$R_d = \frac{R_c p \lambda_g (k(T_c - T_g) - 1) \left( 0,42 \text{Pr}^{0,2} + 0,57 \text{Pr}^{0,33} \left( \frac{d(2\Delta p p_g)^{0,5}}{\mu_g} \right)^{0,5} \right)}{l^2 k R_c - p \lambda_g \left( 0,42 \text{Pr}^{0,2} + 0,57 \text{Pr}^{0,33} \left( \frac{d(2\Delta p p_g)^{0,5}}{\mu_g} \right)^{0,5} \right)}, \quad (1)$$

де  $R_d$  – активний електричний опір дротини;

$R_c$  – електричний опір дротини за стандартних умов;  $l$  – довжина дротини;  $k$  – температурний коефіцієнт опору;  $T_c$ ,  $T_g$  – температура за стандартних умов і температура газу, відповідно;  $\Delta p$  – різниця між динамічним і статичним тиском на трубіці Піто;  $\lambda_g$  – коефіцієнт теплопровідності газу при його температурі  $T_g$ ;  $\text{Pr} = \frac{c_p m_g}{l_g}$  – критерій Прандтля;

$c_p$  – питома теплоємність газу при постійному тиску;  $\mu_g$  – коефіцієнт динамічної в'язкості газу при температурі  $T_g$ ;  $\rho_g$  – густина газу при температурі  $T_g$ ;  $d$  – внутрішній діаметр трубопроводу.

Математична модель містить багато складових, які неможливо точно оцінити на стадії проектування і потребує проведення попередніх спеціальних експериментальних досліджень.

**Метою роботи** є розроблення лабораторного стенду для дослідження впливу компонентного складу робочого середовища, тиску, температури та швидкості потоку на інформативний параметр парціального витратоміра.

#### Виклад основного матеріалу

Розроблений лабораторний стенд (рис. 1) містить джерело витрати повітря 1, балон із скрапленим газом "Пропан-бутан" 2, редуктор 3, задавачі витрати 5, 6 і 12, лічильник 4 для вимірювання об'єму пароподібної фракції газу, що надходить на вхід лабораторного стенду з балона 2, джерело нагрівання потоку робочого середовища 7, трубку Піто 8, термоанемометричний перетворювач 9, еталонний лічильник 11 об'єму газоповітряної суміші, випускний патрубок 13 та ПЕОМ 14. Вузли 8 і 9 разом утворюють парціальний витратомір 10, інформація з якого про перепад тиску  $\Delta p$ , абсолютну температуру  $T$ , якісні характеристики  $q$  та електричну напругу на чутливому елементі парціального витратоміра (вольфрамовій дротинці)  $U$  поступає на ПЕОМ 14.

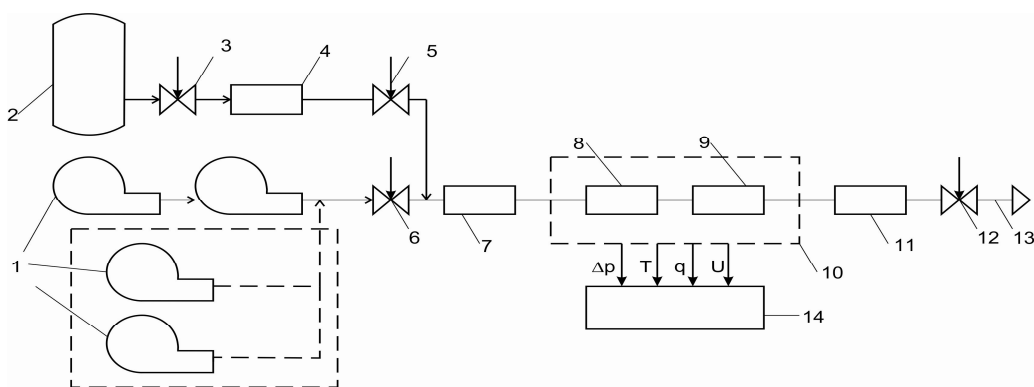


Рисунок 1 – Структурна схема лабораторного стенду

Як робоче середовище для досліджень використовується газоповітряна суміш. В стенді застосовано два джерела витрати повітря, які можуть з'єднуватися послідовно або паралельно для отримання більшого діапазону тисків у першому випадку та витрат у другому. Вентиліями 6 та 12 регулюють параметри потоку робочого середовища.

В процесі функціонування стенду до потоку повітря додають пароподібну фракцію газу "Пропан-бутан". Для цього використано балон із скрапленим газом 2, редуктор 3, задавач витрати 5 та лічильник 4 для вимірювання об'єму пароподібного газу, що змішується з потоком повітря від джерела 1. В результаті у трубопроводі стає можливим змінювати концентрацію парів скрапленого газу, яка буде змінювати теплоенергетичні характеристики потоку. Газоповітряна суміш із відомою об'ємною долею газу служить для парціального витратоміра робочим середовищем, витрату і теплотворну здатність якого можна моделювати.

Для вимірювання швидкості потоку робочого середовища у стенді використовується трубка Піто 8. Перепад тиску на ній вимірюється за допомогою диференційного манометра виробництва фірми "Honeywell", вихідний сигнал якого підсилюється інструментальним підсилювачем. Отримане значення електричної напруги на виході підсилювача переводиться в значення тиску шляхом використання його калібрувальної характеристики.

Згідно з [4] чутливим елементом парціального витратоміра є термоанемометричний перетворювач, в якості якого у лабораторному стенді використано спіралеподібну вольфрамову дротину довжиною 30 мм і діаметром 30 мкм, яка розміщується у вимірювальному трубопроводі з внутрішнім діаметром 18 мм. При роботі витратоміра

дротина нагрівається шляхом пропускання через неї стабілізованого постійного електричного струму силою 300 мА. При протіканні робочого середовища по трубопроводі дротина охолоджується, внаслідок чого змінюється її електричний опір, який є інформативним параметром парціального витратоміра.

З урахуванням того, що математична модель функціонування парціального витратоміра включає електричний опір  $R_C$  дротини за стандартних умов, розрахуємо його, використовуючи відому формулу:

$$R_C = r \cdot l / S, \quad (2)$$

де  $r$  – питомий електричний опір (для вольфраму  $r = 5,5 \cdot 10^{-8}$  Ом·м);  $l$  – довжина дротини;  $S$  – площа поперечного перетину дротини.

Виконавши розрахунки за формулою (2), електричний опір дротини з вказаними геометричними розмірами буде становити  $R_C = 2,335$  Ом.

Парціальний витратомір працює у режимі постійного струму в колі вольфрамової дротини, що забезпечує стабілізоване за струмом джерело живлення. З урахуванням того, що на практиці важко точно визначити безпосередньо опір дротини без використання спеціальних вимірювальних схем, то доцільно вимірювати значення електричної напруги в колі дротини, що буде одним із інформативних параметрів витратоміра. Тому визначити електричний опір дротини при протіканні електричного струму силою  $I = 200$  мА можна за наступною формулою:

$$R_d = U / I. \quad (3)$$

В стенді використано два лічильники типорозміру G 1,6: один для вимірювання об'єму газу "Пропан-бутан", інший для

вимірювання об'єму суміші цього газу з повітрям. За показами цих лічильників визначають контрольне значення об'єму газу, що проходить через вимірювальний трубопровід, та отримане значення концентрації газу "Пропан-бутан" у повітрі.

Для моделювання впливу зміни температури робочого середовища на функціонування парціального витратоміра у стенді передбачено пристрій 7 для підігрівання повітря, виконаний у вигляді спіралі, що знаходиться всередині труби. Живлення для спіралі подається через додатковий блок електричного живлення.

Для проведення експериментальних досліджень вирішено зафіксувати параметри робочого середовища в наступних межах: об'ємна доля газу в газоповітряній суміші (0...10)%; температура робочого середовища (10...30)°С; абсолютний тиск робочого середовища (100...150) кПа; швидкість потоку робочого середовища (0,5...5) м/с.

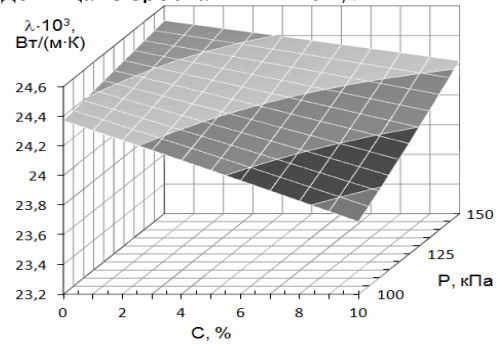
Для цих умов проведено моделювання зміни теплопровідності, теплоємності, динамічної в'язкості та густини робочого середовища в залежності від зміни концентрації в ньому газу "Пропан-бутану" для можливості подальшого застосування їх значень в математичній моделі (1).

Враховуючи те, що дані про теплопровідність робочого середовища як суміші повітря і газу "Пропан-бутан" в довідковій літературі відсутні, то здійснено моделювання зміни термодинамічних параметрів суміші для наведених вище умов експлуатації лабораторного стенду. Для змішування вибрано скраплений газ "Пропан-бутан" з вмістом пропану 60 % і бутану 40 %. При змішуванні газу з повітрям в наперед заданих співвідношеннях концентрації пропану та бутану в газі залишалися незмінними. Наприклад, якщо концентрація газу в газоповітряній суміші рівна 10%, то концентрації пропану і бутану в ній рівні 6 % і 4 %, відповідно.

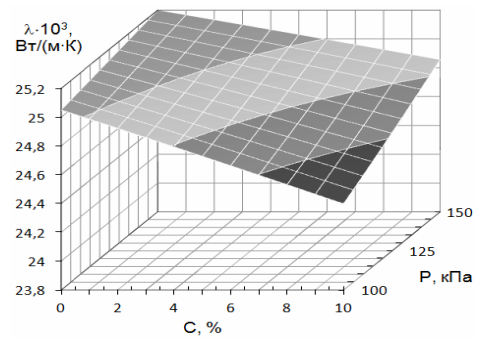
Теплопровідність робочого середовища розраховувалася як теплопровідність суміші газів, що входять до його складу [6]. Числові значення теплопровідності компонентів суміші визначалися з [7] із застосуванням методу інтерполяції.

Результати моделювання наведено на рис. 2. Вони відображають зміну теплопровідності робочого середовища для умов лабораторного стенда у функціональній залежності від вмісту в ньому газу для модельованого діапазону робочих тисків та фіксованих температурах 10 °С (а), 20 °С (б) і 30 °С (в). З графіків видно, що

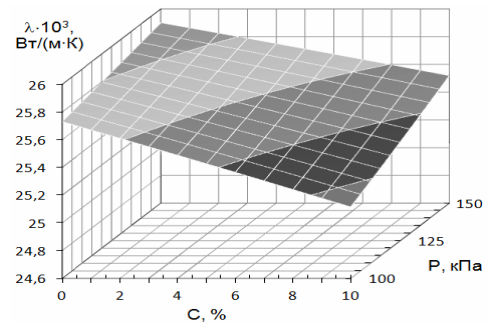
значення теплопровідності суміші газу "Пропан-бутан" із повітрям зменшується пропорційно із збільшенням кількості газу в робочому середовищі. Також спостерігається збільшення значення теплопровідності робочого середовища із зростанням тиску.



а)



б)

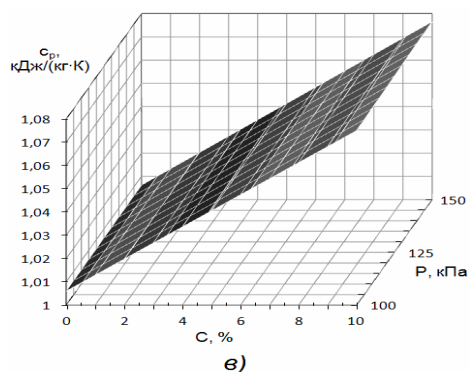
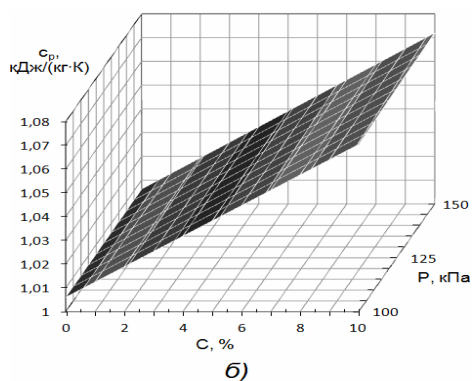
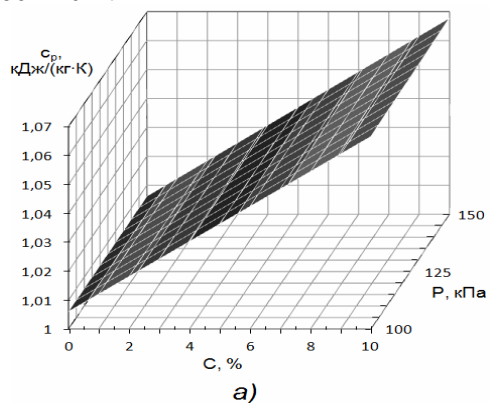


в)

**Рисунок 2 – Графічна залежність зміни теплопровідності робочого середовища від концентрації в ньому газу "Пропан-бутан" в межах (0-10) % для діапазону тиску (100-150) кПа при температурах 10 °С (а), 20 °С (б) і 30 °С (в)**

Теплоємність робочого середовища розраховувалася з урахуванням теплоємностей кожного із компонентів газу і їх об'ємних долей. Числові значення теплоємності кожного з компонентів взято з [8, 9].

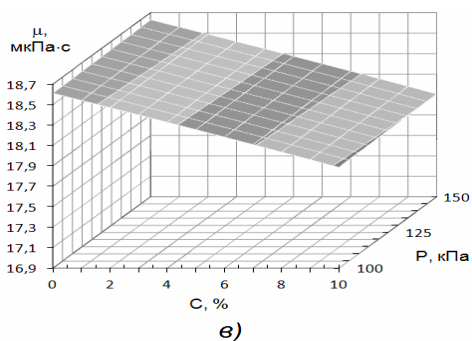
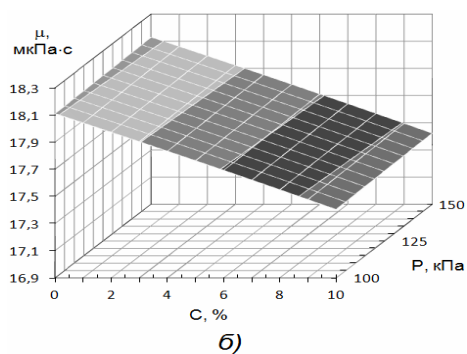
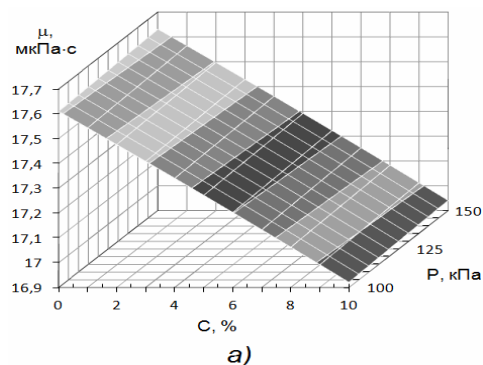
Результати моделювання (рис. 3) свідчать про однаковий вид закономірностей впливу компонентного складу робочого середовища і його фізичних параметрів (тиску і температури) на зміну теплоємності газоповітряної суміші. При цьому теплоємність зростає із зростанням вмісту газу "Пропан-бутан" в суміші. Отримані результати дозволяють кількісно оцінити ступінь впливу компонентного складу і параметрів робочого середовища на його теплоємність.



**Рисунок 3 – Графічна залежність зміни теплоємності робочого середовища від концентрації в ньому газу "Пропан-бутан" в межах (0-10) % для діапазону тиску (100-150) кПа при температурах 0 °С (а), 10 °С (б) і 20 °С (в)**

Динамічна в'язкість робочого середовища розраховувалась за методикою, наведеною в [10].

Результати моделювання, зображені на рис. 4, свідчать про однаковий вид залежностей динамічної в'язкості від компонентного складу природного газу і його фізичних характеристик. Вони дають змогу кількісно оцінити вплив компонентного складу робочого середовища на його динамічну в'язкість.

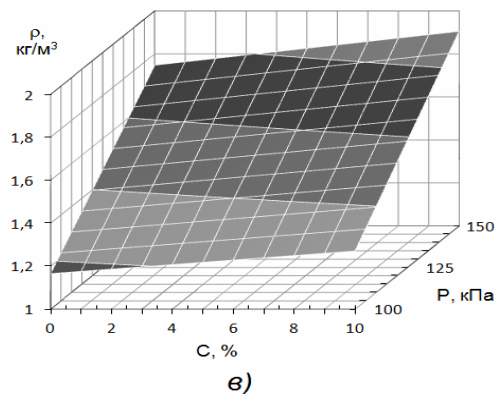
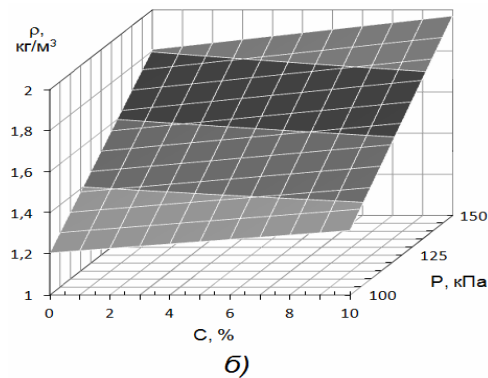
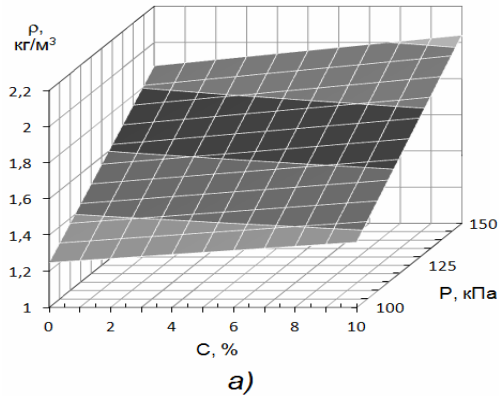


**Рисунок 4 – Графічна залежність зміни в'язкості робочого середовища від концентрації в ньому газу "Пропан-бутан" в межах (0-10) % для діапазону тиску (100-150) кПа при температурах 10 °С (а), 20 °С (б) і 30 °С (в)**

Густина робочого середовища розраховувалась як густина суміші його компонентів методом адитивності за

стандартних умов. Розрахунок густини робочого середовища за робочих умов виконано за методикою, викладеною в [11].

Результати моделювання зміни густини робочого середовища при зміні його компонентного складу зображено на рис. 5.



**Рисунок 5 – Графічна залежність зміни густини робочого середовища від концентрації в ньому газу "Пропан-бутан" в межах (0-10) % для діапазону тиску (100-150) кПа при температурах 10 °С (а), 20 °С (б) і 30 °С (в)**

Після кількісного дослідження зміни теплофізичних характеристик робочого середовища від зміни його компонентного складу встановлено, що за умови зміни

концентрації  $C$  в складі робочого середовища газу "Пропан-бутан" в межах (0–10 %) при абсолютному тиску 103 кПа та температурі 10 °С теплопровідність природного газу змінюється в межах від  $23,68 \cdot 10^{-3}$  Вт/(м·К) до  $24,37 \cdot 10^{-3}$  Вт/(м·К), теплоємність – в межах від  $1,006 \cdot 10^3$  Дж/(кг·К) до  $1,067 \cdot 10^3$  Дж/(кг·К), густина – в межах від  $1,25$  кг/м<sup>3</sup> до  $1,36$  кг/м<sup>3</sup>, динамічна в'язкість – в межах від  $16,92 \cdot 10^{-6}$  Па·с до  $17,61 \cdot 10^{-6}$  Па·с.

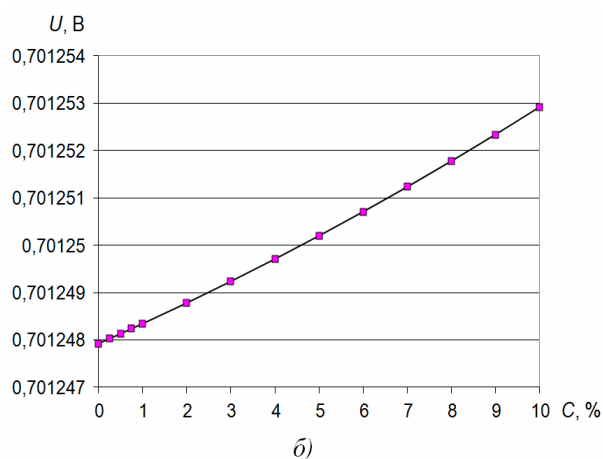
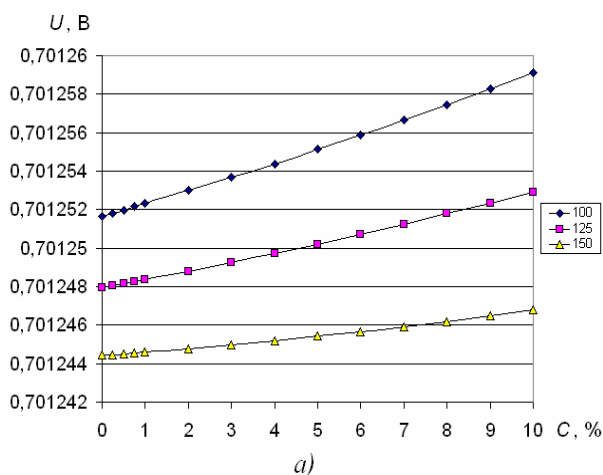
Оцінимо кількісний вплив зміни густини природного газу і його теплофізичних характеристик на вихідний сигнал парціального витратоміра в умовах функціонування лабораторного стенду.

Проведено моделювання зміни інформативного параметру (електричної напруги) при зміні компонентного складу робочого середовища, швидкості його потоку, температури та тиску. Математичне моделювання проводилося в програмі Excel за допомогою середовища програмування Visual Basic шляхом одночасної підстановки в рівняння (1) та (4) даних про параметри робочого середовища.

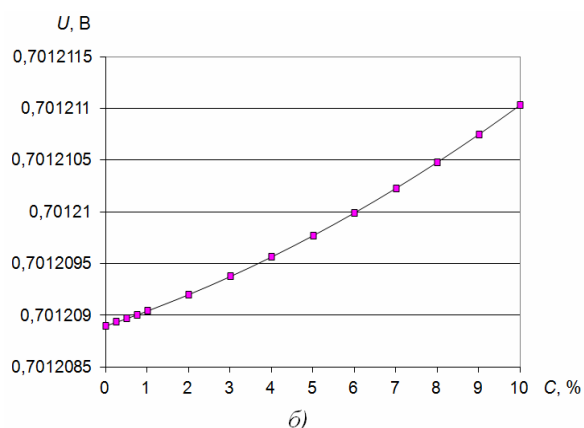
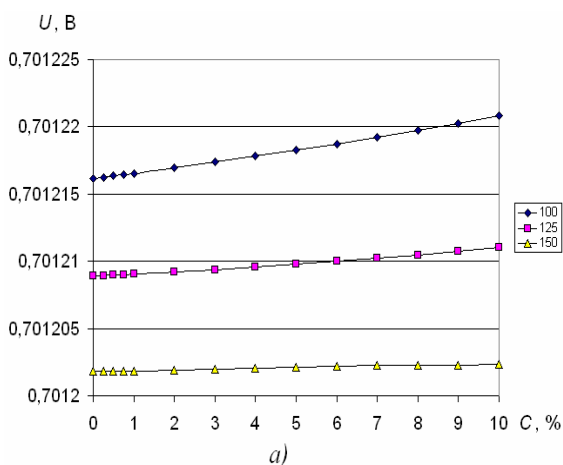
З результатів (рис. 6 і рис. 7) видно, що із зростанням вмісту газу зростає вихідний сигнал. При цьому при зміні концентрації від 0 до 10 % при абсолютному тиску 103 кПа і температурі 20 °С зростання вихідного сигналу становить 7,43 мкВ при швидкості 0,5 м/с (рис. 6, а) і 4,64 мкВ при швидкості 5,0 м/с (рис. 7, а). При цьому із зростанням тиску до 150 кПа це зростання буде зменшуватися і становитиме 2,36 мкВ (рис. 6, а) і 0,5 мкВ (рис. 7, а), відповідно.

Вплив робочої температури на функціонування стенда характеризують графіки (рис. 6,б і рис 7,б). Так при 20 °С при збільшенні концентрації газу до 10 % приводить до збільшення вихідного сигналу на 4,99 мкВ при швидкості 0,5 м/с (рис. 6, б) і на 2,13 мкВ при швидкості 5,0 м/с (рис. 7, б). Відповідно при температурі газу 10 °С це зростання буде дещо зменшуватися і становитиме 4,79 мкВ при швидкості 0,5 м/с і 2,04 мкВ при швидкості 5,0 м/с. На рис. 6,б і 7,б ця зміна окремих графіком не показана внаслідок обмеженості масштабу графіка, бо початкова точка графіка при цій температурі зміщується вниз до 0,672 В.

Ці результати обґрунтовують можливість проведення лабораторних досліджень для вивчення закономірностей функціонування парціального витратоміра. Крім того, вони дають можливість експериментальним чином визначати теплофізичні властивості потоку  $c_p$  і  $\lambda$  за умов функціонування парціального витратоміра.



**Рисунок 6 – Графічні залежності вихідного сигналу від зміни компонентного складу робочого середовища і його теплотворної здатності при швидкості потоку 0,5 м/с, температурі 20 °С (а) і тиску 125 кПа (б)**



**Рисунок 7 – Графічні залежності вихідного сигналу від зміни компонентного складу робочого середовища і його теплотворної здатності при швидкості потоку 5 м/с, температурі 20 °С (а) і тиску 125 кПа (б)**

## ВИСНОВКИ

Розроблено лабораторний стенд для дослідження впливу компонентного складу робочого середовища, тиску, температури та швидкості потоку на інформативний параметр парціального витратоміра.

Проведено числове моделювання впливу компонентного складу робочого середовища і його робочих параметрів на непостійність теплопровідності, теплоємності, динамічної в'язкості та густини природного газу, яке обґрунтовує можливість дослідження зміни інформативного параметра парціального витратоміра.

Отримані результати моделювання є необхідними для проведення експериментальних досліджень математичної моделі парціального витратоміра нової конструкції [4] та обґрунтовують можливість його застосування для вимірювання витрати з коригуванням щодо якісних параметрів природного газу.

1. Облік природного газу: довідник / М.П.Андрійшин, О.М.Карпаш, О.Є.Сердюк [та ін.]; за ред. С.А.Чеховського. – Івано-Франківськ: ПП «Сімик», 2008. – 180 с. 2. Малісевич В.В. Моделювання впливу густини і компонентного складу природного газу при діагностуванні засобів його обліку / В.В. Малісевич, О.Є. Сердюк // Методи та прилади контролю якості. – 2011. – №27. – С.56–62. 3. Романів В. М. Удосконалення оптичного методу контролю визначення енерговмісту природного газу / В. М. Романів // Науковий вісник

Івано-Франківського національного університету нафти і газу. – 2013. - № 1(34). – с. 179-187. 4. Пат. 99887 С2 Україна, МПК (2012.01) G 01 F 1/00. Парціальний витратомір / Середюк О.Є., Малісевич В.В. – №а 201114278; заявл. 02.12.11; опубл. 10.10.12, Бюл. № 19. 5. Малісевич В.В. Контроль метрологічних характеристик лічильників газу з урахуванням якісних параметрів робочого середовища / В.В. Малісевич, О.Є. Середюк // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2013. – №74. – С.158–163. 6. Рид Р. Свойства газов и жидкостей: Справочное пособие / Р. Рид, Дж. Праусниц, Т. Шервуд: Пер. с англ.: под ред. Б.И. Соколова. – Л.: Химия, 1982. – 592 с. 7. Справочник по теплопроводности жидкостей и газов / Н.Б. Варгафтик, Л.П. Филиппов, А.А. Тарзиманов [и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с. 8. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н.Б. Варгафтик. – М.: Наука, 1972. – 720 с. 9. Чиркин В.С. Теплофизические

свойства материалов / В.С. Чиркин. – М.: Госуд. изд-во физико-матем. литературы, 1959. – 356 с. 10. Глумов Д.Н. Способ расчета динамической вязкости газов в широком диапазоне давлений / Д.Н. Глумов, А.В. Стрекалов // Нефтегазовое дело. – 2011. – №1. – С.194–209. 11. Шишко Г.Г. Учет расхода газа / Г.Г. Шишко, П.М. Енин. – К.: Урожай, 1993. – 312 с.

**Поступила в редакцію 03.12.2013р.**

**Рекомендували до друку Оргкомітет 4-ої н/п конференції студентів і молодих учених «Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання» (26-27.11.2013р., ІФНТУНГ) та докт. техн. наук, проф. Середюк О. Є.**