

В результаті отримані значення теплопровідності, Вт/м·К:	
пінополістирол	0,036
гіпсокартон	0,22,

що відповідає даним, наведеним в [7].

**Висновки.** Отже, запропонований алгоритм обробки інформації методом вимірювальних матриць дасть можливість підвищити точність вимірювання теплопровідності, оскільки в результаті проведення одного експерименту отримуємо паралельно шукане значення  $R_x$  як за методикою [2], так і за алгоритмом, наведеним у цій роботі

1. Пістун Є.П., Крих А.Б. Принципи побудови гідродинамічних вимірювальних перетворювачів на базі дросельних матриць // *Методи та прилади контролю якості.* – Івано-Франківськ.: Вид-во “Простір-М”, 2000. – Вип. 5. – С. 56–59. 2. Васильківський І.С., Юсик Я.П. Метод вимірювання теплопровідності будівельних та теплоізоляційних матеріалів // *Вимірювальна техніка та метрологія: Міжвідомчий науково-технічний збірник.* – Львів: Вид-во при Львів. ун-ті. – Вип. 64. – С. 119–122. 3. *Теплофизические измерения и приборы / Под общей ред. Е.С. Платунова.* – Л.: Машиностроение, 1986. – 256 с. 4. *Сергеев О.А. Метрологические основы теплофизических измерений.* – М.: Изд-во стандартов, 1972. – 154 с. 5. ДСТУ 2568- 94. *Метрологія. Державна служба стандартних довідкових даних України. Основні положення.* – К.: Держстандарт України, 1994. 6. Крейт Ф., Блек У. *Основы теплопередачи.* – М.: Мир, 1983. – 346 с. 7. Хоменко В.П., Фаренюк Г.Г. *Справочник по теплозащите зданий.* – К.: Будівельник, 1986. – 216 с.

УДК 539.3

Г.Т. Сулим, С.Р. Сіверс, Р.І. Байцар

Львівський національний університет імені Івана Франка,  
кафедра механіки,  
Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра метрології, стандартизації та сертифікації

## ВИМІРЮВАННЯ ІМПУЛЬСНОГО ПЕРЕМІЩЕННЯ ПОВЕРХНІ ТОРЦЯ СТРИЖНЯ ГОПКІНСОНА

© Сулим Г.Т., Сіверс С.Р., Байцар Р.І., 2007

Методом одноразового поздовжнього удару кульки зі стрижнем Гопкінсона виміряно імпульсне переміщення поверхні торця стрижня. Подано результати обчислень та вимірювань параметрів ударного навантаження та характеристик імпульсу переміщення поверхні торця стрижня.

The measuring impulse superficial butt displacement of the rod Hopkinson is made with method on-once longitudinal impact of ball and rod. The results of calculation and investigation of the parameters impact loading and haracteristic of impulse superficial butt displacement are presented.

**Постановка проблеми.** Проблеми динамічних вимірювань все частіше розглядаються у роботах з метрологічного забезпечення наукових досліджень, техніки і виробництва. У створенні нових конструкційних матеріалів і їх використанні для вимірювання динамічних властивостей за стиску стрижень Гопкінсона знайшов найширше застосування [1, 3–5]. Це викликало необхідність вдосконалення вже відомого методу вимірювання малих переміщень у стрижні Гопкінсона за ударного навантаження ємнісним методом.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Широкому застосуванню приладів з ємнісними перетворювачами, що працюють за ударних навантажень, заважає відсутність інформації про сучасні досягнення в галузі їх конструювання та використання. Література з ємнісних перетворювачів переважно розглядає типи ємнісних перетворювачів, їх вимірювальні схеми та застосування для вимірювання тиску, рівня, високочастотних механічних коливань тощо [6] або теорію фізичних процесів, які відбуваються на молекулярному рівні в електричному полі, та аналітичний опис їх поведінки під дією електричних сил [2]. У [6] показано, що більшість типів ємнісних перетворювачів мають малу сталу часу. Тому у зв'язку з розробкою пристрою для динамічного градування тензорезисторів [5, 10], де зокрема ємнісний перетворювач пропонується як еталонний, виникає необхідність дослідження динамічних характеристик ємнісного перетворювача за ударного навантаження під час вимірювання хвиль напружень у стрижні Гопкінсона.

**Мета роботи** – розроблення пристрою та методики вимірювання і обчислення параметрів удару та характеристик імпульсу переміщення, протилежної щодо удару поверхні торця стрижня Гопкінсона генерованим у стрижні імпульсом напруження за поздовжнього одноразового удару кулькою.

**Викладення основного матеріалу.** Поширення імпульсних напружень у стрижні від одноразового поздовжнього удару кулькою викликає поверхневе переміщення як бічної [7], так і протилежної щодо удару торцевої поверхні стрижня [5]. Одним з електричних способів вимірювання поверхневих переміщень є використання ємнісного перетворювача [3, 4–8]. У роботі ємнісним методом вимірюють імпульсне переміщення поверхні торця стрижня, протилежного щодо місця удару кулькою. Поверхня цього торця вільно рухається, тоді як ізольована друга обкладка ємнісного перетворювача залишається нерухомою, оскільки вона розміщена у корпусі кріплення. Схему навантаження показано на рис. 1.

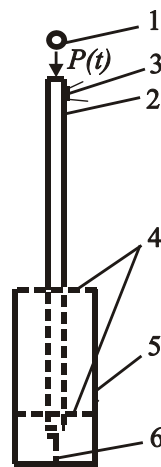


Рис. 1. Схема навантаження:

1 – кулька; 2 – стрижень; 3 – тензорезистор; 4 – утримувальні товсті гумки;  
5 – корпус кріплення; 6 – ємнісний перетворювач

Розглянемо одноразовий поздовжній співудар короткого сталевого однорідного стрижня круглого поперечного перерізу завдовжки  $L$  і діаметром  $D$  та кульки радіусом  $R_k$ . Для запуску кульки використано магнітний пускач, встановлений співвісно на заданій висоті  $h$  від торця стрижня. Швидкість  $v$  удару кульки визначається за формулою  $v = \sqrt{2gh}$ , де  $g$  – пришвидшення вільного падіння,  $m/c^2$ ;  $h$  – відстань від магнітного пускача до стрижня, м. Максимальна величина ударної сили  $P_{\max}$  у (Н), що виникла під час взаємодії кульки зі стрижнем, визначається за формулою [3]

$$P_{\max} = 1,71 \cdot 10^7 R_k^2 v^{1,2}, \quad (1)$$

а тривалість  $\tau$  удару у (с)

$$\tau = 7,05 \cdot 10^{-3} R_k v^{-0,2}, \quad (2)$$

де  $R_k$  – радіус кульки, м;  $v$  – швидкість кульки в момент удару, м/с. У припущенні рівномірного розподілу навантаження по торцю максимальне напруження  $\sigma_{\max}$  у (Па) в зоні контакту визначається виразом

$$\sigma_{\max} = 2,27 \cdot 10^9 \cdot v^{0,4}. \quad (3)$$

Після удару напруження  $\sigma_1$  у далекій зоні для першої падаючої хвилі, згідно з принципом Сен-Венана, приблизно дорівнює

$$\sigma_1 = \sigma_{\max} (a/r)^2, \quad (4)$$

де  $a$  – радіус зони контакту, м;  $r$  – радіус стрижня, м. Максимальний радіус  $a$  зони контакту визначається за формулою

$$a = 0,049 R_k v^{0,4}. \quad (5)$$

В основу роботи ємнісного перетворювача покладено залежність зміни ємності від зміни прозору між торцем стрижня та другою обкладкою ємнісного перетворювача. Розглянемо ланцюжок, який містить ємнісний перетворювач  $C$ , послідовний опір  $R$ , джерело постійної напруги  $U_{\text{=}}$  та вимикач  $K$  (рис. 2). Для зарядки ємнісного перетворювача вимикач  $K$  замикається і у момент замикання струм  $I$  через опір  $R$  досягає значної величини  $I = dq/dt$ , а на обкладках з'являються заряди  $q_o = C_o U_{\text{=}}$ , де  $C_o$  – початкова ємність. При переміщенні торця стрижня за ударного навантаження ємність перетворювача  $C(t)$  змінюється і відповідно змінюється і різниця потенціалів  $\Delta V(t)$  на його електродах. Схема, показана на рис. 2, описує процес лінійним диференціальним рівнянням першого порядку. За зміни ємності ємнісного перетворювача у момент  $t$  матимемо

$$IR + \Delta V(t) = U_{\text{=}} \quad \text{або} \quad \frac{dQ}{dt} + \frac{Q(t)}{RC(t)} = \frac{U_{\text{=}}}{R}. \quad (6)$$

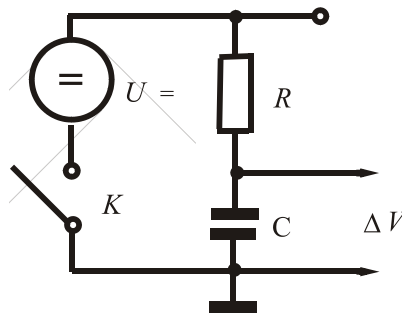


Рис. 2. Схема кола з вимірювальним ємнісним перетворювачем:  
 $C$  – вимірювальний ємнісний перетворювач;  $R$  – послідовний опір;  
 $K$  – вимикач;  $U_{\text{=}}$  – джерело постійної напруги

Початкові умови у момент  $t$  :

$$t = \frac{L}{c}, \quad q_o = C_o U_{\text{=}}, \quad (7)$$

де  $L$  – довжина стрижня, м;  $c$  – швидкість поздовжніх хвиль, м/с;  $C_o = \epsilon_o \epsilon_{\text{відн}} S/d$ , причому  $\epsilon_o = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м;  $\epsilon_{\text{відн}}$  – відносна діелектрична проникність середовища прозору (для повітря  $\epsilon_{\text{відн}} = 1$ );  $S = \pi r^2$  – площа обкладок,  $\text{м}^2$ ;  $d$  – прозор між обкладками, м.

У момент  $t$

$$C(t) = \frac{\varepsilon_o \varepsilon_{\text{відн}} S}{d - u(L, t)}, \quad (8)$$

де  $u(L, t)$  – переміщення поверхні торця стрижня. Розв'язком рівняння (6) буде

$$q(t) = e^{-F(t)} \left( q_o + \frac{U_{\pm}}{R} \int_{t_o}^t e^{F(t)} dt \right), \quad (9)$$

де

$$F(t) = \int_{t_o}^t \frac{dt}{RC(t)} = \frac{1}{R \varepsilon_o \varepsilon_{\text{відн}} S} \int_{t_o}^t (d - u(L, t)) dt. \quad (10)$$

Запишемо вираз для  $\Delta V(t)$ :

$$\Delta V(t) = \frac{q(t)}{C(t)} = \frac{d - u(L, t)}{\varepsilon_o \varepsilon_{\text{відн}} S} \left[ e^{-F(t)} \left( C_o U_{\pm} + \frac{U_{\pm}}{R} \int_{t_o}^t e^{F(t)} dt \right) \right]. \quad (11)$$

Якщо вибрати параметри вимірювального ланцюжка так, щоб стала часу  $\tau = RC_o$  була малою та  $\tau \gg t_{\text{вим}}$ , де  $t_{\text{вим}} = (L/a) + \tau_{\text{прив}}$ , то максимальну зміну ємності  $\Delta C_{\text{max}}$  ємнісного перетворювача визначає вираз

$$\Delta C_{\text{max}} = C \Delta V_{\text{max}} / U_{\pm}, \quad (12)$$

де  $C = C_o + C_n + C_{\text{уз}}$ . Тут  $C_o$  – початкова ємність ємнісного перетворювача, Ф;  $C_n$  – ємність під'єднувальних дротів перетворювача, ф;  $C_{\text{уз}}$  – вхідна ємність схеми узгодження, ф;  $\Delta V_{\text{max}}$  – максимальна зміна напруги ємнісного перетворювача за ударного навантаження, В;  $U_{\pm}$  – постійна напруга живлення, В.

Абсолютна зміна максимальної ємності  $\Delta C_{\text{max}}$  подається у вигляді [5, 9]

$$\Delta C_{\text{max}} = \varepsilon_o \varepsilon_{\text{відн}} S u_{\text{max}} / d (d - u_{\text{max}}), \quad (13)$$

для якої  $u_{\text{max}}$  – максимальне переміщення поверхні торця стрижня, м.

Величину максимального імпульсного переміщення  $u_{\text{max}}$  поверхні торця стрижня у (м) дає вираз

$$u_{\text{max}} = C \Delta V_{\text{max}} \cdot d^2 / (\varepsilon_o \cdot \varepsilon_{\text{відн}} \cdot S U_{\pm} + C \Delta V_{\text{max}} \cdot d). \quad (14)$$

Експериментальне визначення амплітуди, часу зростання та тривалості імпульсу переміщення поверхні торця стрижня здійснюється за допомогою експериментального пристрою для динамічного градування тензорезисторів [10], у якому як еталонний перетворювач, зокрема пропонується ємнісний перетворювач.

У масивну основу, що опирається на три регульовальні гвинти, перпендикулярно встановлено стояк. Стрижень з наклеєним запусним тензорезистором вміщується у корпус кріплення. Друга обкладка ємнісного перетворювача розміщена у корпусі паралельно до протилежного щодо удару торця стрижня і з'єднана з прецизійною регульовальною гайкою. Відстань між його обкладками регульовано змінюється за допомогою прецизійної гайки та ноніуса, розміщеного на нижній його частині. Ціна поділки ноніуса – 5 мкм.

Пускач ударника закріплюється співвісно над стрижнем на кронштейні і забезпечує нормальний центральний удар. Для зміни швидкості удару висота пускача над ним регульовано змінюється.

Структурну схему пристрою для вимірювання імпульсного переміщення поверхні торця стрижня зображено на рис. 3.

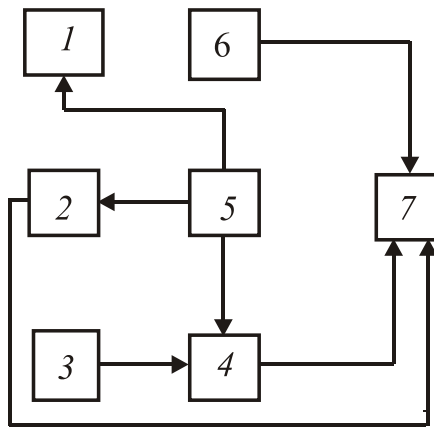


Рис. 3. Структурна схема:

1 – блок збудження для запуску ударника; 2 – блок перетворення вихідного сигналу запускового тензорезистора; 3 – ємнісний перетворювач; 4 – схема узгодження вихідного сигналу ємнісного перетворювача; 5 – джерело живлення; 6 – генератор каліброваних імпульсів; 7 – реєструвальний прилад

Пристрій для вимірювання імпульсного переміщення поверхні торця стрижня працює так. За допомогою блока збудження ударника 1 забезпечується одноразовий удар кулькою по торцю стрижня. У стрижні виникає і поширюється імпульс напруження, що у відповідний момент часу діє на запускний тензорезистор, розташований у безпосередній близькості до торця стрижня. Викликана деформацією стрижня зміна опору запускового тензорезистора перетворюється у зміну напруги, підсилюється у блоці перетворення і запуску 2 та упереджено запускає розгортку реєструвального приладу 7. Імпульс напруження, дійшовши до поверхні протилежного щодо удару торця стрижня, її переміщає, і це переміщення сприймається ємнісним перетворювачем 3. Схема узгодження 4 забезпечує узгодження високого вихідного опору ємнісного перетворювача з входом реєструвального приладу 7. Градування за часом здійснюються за допомогою калібрувальних міток часу від прецизійного генератора каліброваних імпульсів 6.

Збуджувач удару виконаний у вигляді навитки (шпулі) електромагніта, через який пропускається постійний струм. Напруга подається від стабілізованого джерела живлення 5 типу ВИП-010. Для центрування удару на нижній частині навитки (шпулі) закріплено ізольовану плексигласову пластинку з заглибленням сферичної форми. Кулька падає після вимикання струму у навитці (шпулі) електромагніта, який утримує кульку у початковому стані. Падаюча кулька передає свою кінетичну енергію упродовж короткого часу контакту мас кульки та стрижня. Потім кулька відскакує і з цим моментом у місці удару в стрижні завершується формування імпульсу напруження.

Як запускний тензорезистор використовували напівпровідниковий тензорезистор на основі ниткового монокристалу з  $p$ -GaSb завдовжки  $2,975 \cdot 10^{-3}$  м, наклеєного на початку стрижня зв'язувачем типу ВЛ-931.

Блок перетворення і підсилення вихідного сигналу запускового тензорезистора 2 складається з потенціометричного ланцюжка та підсилювача. Для накладання міток часу на зображення вихідного сигналу ємнісного перетворювача використано прецизійний генератор каліброваних імпульсів 6 типу Г5-60. Живлення блока збудження ударника та блока перетворення вихідного сигналу запускового тензорезистора і схеми узгодження вихідного сигналу ємнісного перетворювача проводиться стабілізованими джерелами живлення 5 типу ВИП-010.

Як реєструвальний пристрій 7 використано запам'ятовувальний двопробеневий осцилограф типу С8-І4 з часом зростання перехідної характеристики, не більшим від 65 нс. Для фотографування, отриманого на екрані запам'ятовувального осцилографа вихідного сигналу ємнісного перетворювача, використовується фотоапарат, закріплений на лямуванні його екрана.

Основним джерелом похибок під час використання стрижня з ємнісним перетворювачем є його градування, тобто визначення залежності між ємністю перетворювача і прозором. Як

правило, ця залежність може бути наближено обчисленою за розмірами перетворювача [3]. Залежність відносної зміни ємності  $\Delta C_{\max} / C$  від відносної зміни прозора  $u_{\max} / d$  була розрахована за розмірами використаного ємнісного перетворювача, і з'ясовано, що вона має лінійний характер (рис. 4).

Використаний вимірювальний канал дав можливість за допомогою запам'ятовувального осцилографа С8-14 зареєструвати вихідний сигнал ємнісного перетворювача. Вихідний сигнал реєструвався для кожного окремого удару. Мітки часу з періодом  $10^{-6}$  с накладалися на зображення вихідного сигналу ємнісного перетворювача за допомогою генератора імпульсів Г5-60. Для кожного виду ударного навантаження здійснювали серію з 12 дослідів. Відстань між його обкладками становила  $2 \cdot 10^{-5}$  м. Час зростання імпульсу переміщення поверхні торця стрижня нормувався як час, потрібний для зміни імпульсного переміщення від 0,1 до 0,9 його амплітудного значення. Тривалість імпульсу переміщення визначалася, як час на 0,5-рівні його амплітуди. За осцилограмою вихідного сигналу ємнісного перетворювача за формулою (14) обчислювався імпульс переміщення, протилежного щодо удару торця стрижня (рис. 5). В результаті вимірювань і обчислень імпульсу переміщення, протилежного щодо удару торця для стрижня завдовжки 0,15 м і діаметром  $7 \cdot 10^{-3}$  м за максимальної сили удару 120 Н тривалістю 8,75 мкс кулькою радіусом  $1,5 \cdot 10^{-3}$  м, отримано середні значення максимальної амплітуди переміщення  $(9,2 \pm 0,25) \cdot 10^{-7}$  м, часу зростання по рівню 0,1 – 0,9 –  $4,4 \pm 0,15$  мкс тривалістю –  $16,3 \pm 0,8$  мкс. При цьому напруження у стрижні становили  $1,02 \cdot 10^8$  Па, а максимальний радіус зони контакту –  $0,107 \cdot 10^{-3}$  м.

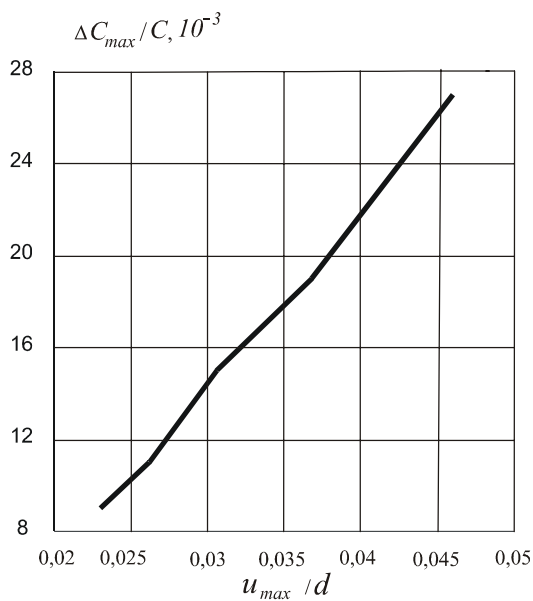


Рис. 4. Залежність відносної зміни максимальної ємності  $\Delta C_{\max} / C$  від відносної зміни прозора  $u_{\max} / d$

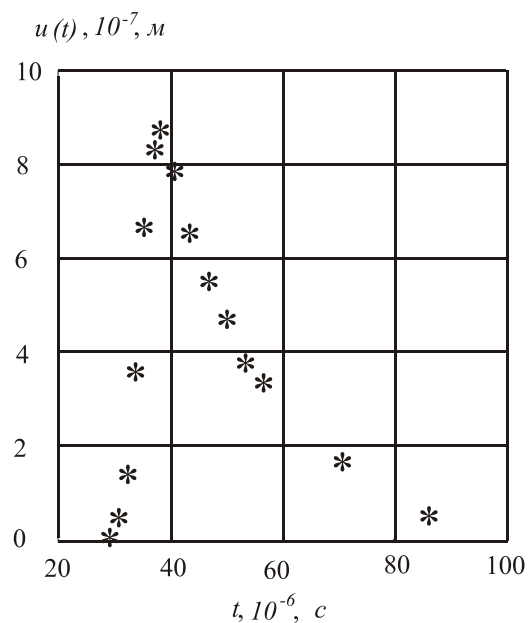


Рис. 5. Експериментальний імпульс переміщення поверхні торця стрижня для  $L=0,15$  м:  
 $D = 7 \cdot 10^{-3}$  м;  $R_k = 1,5 \cdot 10^{-3}$  м;  $v = 2,58$  м/с

**Висновки.** Розглянуто схему пристрою для вимірювання імпульсного переміщення поверхні торця стрижня. У роботі запропоновано методику розрахунку параметрів удару та визначення амплітуди, часу зростання та тривалості імпульсу переміщення торця стрижня генерованим у стрижні імпульсом напруження за позовдвжнього одноразового удару кулькою. Отримані результати дають змогу рекомендувати використаний ємнісний перетворювач як

еталонний для динамічного тарування довгобазових тензорезисторів. Пропонується аналітичний підхід для визначення зміни напруги ємнісного перетворювача за ударного навантаження.

1. Field J.E., Walley S.M., Proud W.G., Goldrein H.T., Siviour C.R. Review of experimental techniques for high rate deformation and shock studies. *International journal of impact Engineering*. – № 30. – 2004. – P. 725–775. 2. Матис И.Г. Электроемкостные преобразователи для неразрушающего контроля. – Рига: Знание, 1982. – 302 с. 3. Дейвис Р.М. Волны напряжений в твёрдых телах. – М.: ИЛ, 1955. – 102 с. 4. Белл Дж. Ф. Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел. Ч. 1. – М.: Наука, 1984. – 597 с. 5. Сіверс С. Вимірювання деформацій в імпульсному режимі // Математичні проблеми механіки неоднорідних структур. – Львів, 2000. – Т. 2.– С. 267–269. 6. Форейт Й. Емкостные датчики незлектрических величин. – М.: Энергия, 1966. – 160 с. 7. Степанов Г.В., Ващенко А.П. Методика измерения деформаций в стержнях емкостным тензодатчиком // Проблемы прочности. – № 12. – 1975. – С. 104–105. 8. Commerford G.L. and Whittier J.S.. Uniaxial-strain wave-propagation experiments using short-tube loading // *Experimental Mechanics*. – 1970. – Vol. 10, № 3. – P. 120–126. 9. Логинов В.Н. Электрические измерения механических величин. – М.: Энергия, 1976. – 104 с. 10. Патент України. Пристрій для динамічного градування тензорезисторів / І.Я. Підстригач, С.Р. Сіверс. – 25.12.1997. – № 19120.

УДК 681.121: 543.544-032.31: 665.72.033

І.С. Крук, О.М. Химко\*

ДК “Укртрансгаз”, м. Київ

\*Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра автоматизації теплових і хімічних процесів

## НОВІ АСПЕКТИ ПІД ЧАС ВИЗНАЧЕННЯ ПИТОМОЇ ТЕПЛОТИ ЗГОРЯННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

© Крук І.С., Химко О.М., 2007

**Проаналізовано процес визначення компонентного складу природного газу та його питомої теплоти згоряння. Запропоновано методи врахування дійсної концентрації усіх компонентів природного газу під час визначення питомої теплоти згоряння.**

**The process of defining natural gas composition and its specific heat of combustion is analyzed. Methods for taking into account the actual concentrations of all natural gas components during defining specific heat of combustion are proposed.**

**Постановка проблеми.** Для вимірювання витрати та кількості природного газу необхідно додатково знати ще й його компонентний склад, який визначають хроматографічним методом [1]. За результатами аналізу розраховують питому теплоту згоряння (ПТЗ), густину газу в стандартних умовах вимірювання (СУВ), відносну густину та число Воббе [2].

Сьогодні достовірність отриманих результатів під час визначення компонентного складу хроматографічним методом є надзвичайно важлива.

При використанні лабораторних і потокових хроматографів визначають концентрацію в молярних (частках) процентах (мол. %) або об’ємних (частках) процентах, приведених до стандартних умов вимірювання (об.%) таких основних компонентів, як метану, інших вуглеводнів від С<sub>2</sub> до С<sub>6</sub>, азоту, вуглекислого газу та кисню.

Природний газ можна вважати сухим, якщо молярна частка парів води не перевищує 0,00005 (0,005 мол. %) [3].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Для сухого природного газу молярну концентрацію метану в % визначають як різницю