

УРАХУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ПРИРОДНОГО ГАЗУ ПРИ ЕКСПРЕС-ВИЗНАЧЕННІ ЙОГО ТЕПЛОТИ ЗГОРЯННЯ

І.В. Рибіцький¹, І.І. Височанський², О.М. Карнаш¹, М.О. Карнаш¹

¹ ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська 15,
e-mail: public@nimg.edu.ua

² Регіональна газова компанія «Івано-Франківськгаз»; м. Івано-Франківськ, вул. Ленкавського, 20,
тел.(0342) 501608, e-mail: snr@nimg.edu.ua

Подано результати експериментальних досліджень залежності швидкості поширення ультразвукових коливань у природному газі від його температури. За отриманими результатами досліджень розраховано температурний коефіцієнт швидкості, що дало змогу розширити можливості методу контролю енергетичних характеристик природного газу при різних діапазонах температури газу та навколишнього середовища, а також підвищити його точність.

Ключові слова: теплота згоряння природного газу, швидкість поширення ультразвукових коливань, температурний коефіцієнт швидкості.

Представлены результаты экспериментальных исследований зависимости скорости распространения ультразвуковых колебаний в природном газе от его температуры. По результатам исследований рассчитан температурный коэффициент скорости, что позволило расширить возможности метода контроля энергетических характеристик природного газа при различных диапазонах температур газа и окружающей среды, а также повысить его точность.

Ключевые слова: теплота сгорания природного газа, скорость распространения ультразвуковых колебаний, температурный коэффициент скорости.

The results of experimental research for dependence of the ultrasound velocity in natural gas from its temperature are presented. The research results gives it possible to calculate the temperature coefficient of speed, which allowed to expand the possibilities of natural gas energy characteristics method to controlling at different ranges of gas temperatures and the environment and increase its accuracy.

Key words: natural gas heating value, ultrasonic velocity, temperature-velocity factor.

Нова модель ринку природного газу в Україні, який на даний час перебуває на стадії значного реформування, повинна розроблятися з врахуванням кращих Європейських та світових практик. Роботи в цьому напрямку вже розпочаті з зобов'язання України імплементувати Третій енергетичний пакет (зокрема Директиву Європейського парламенту та Ради 2009/73/ЄС) про спільні правила внутрішнього ринку природного газу, відповідно до якої всі розрахунки за природний газ повинні базуватись на енергетичних одиницях.

Вступ

На даний час в Україні розрахунок за енергетичними показниками природного газу ведеться тільки на рівні контрактів між НАК «Нафтогаз України», європейськими постачальниками та ПАТ «Газпром». Продаж природного газу споживачам при цьому здійснюється за фактично спожитий об'єм у метрах кубічних.

З даних про якість українського газу, які ще з травня 2014 року щомісяця публікує ПАТ «Укртрансгаз» [1], можна побачити, що реально за останні роки нижча теплота згоряння природного газу в Україні становить 8300 ± 300 ккал/м³ і може суттєво відрізнитися в різних її областях. Зрозуміло, що енергія, одержана з одного метра кубічного природного газу безпосередньо залежить від теплоти його згоряння.

Так, зі зменшенням теплоти згоряння від 8400 ккал/м³ до 8000 ккал/м³ (більшість природного газу в Україні) саме такої теплоти згоряння) кількість енергії зменшується на 5 % [2].

В Україні з 2009 року набув чинності міжнародний стандарт ISO 15112 [3], який регламентує процедуру визначення енергії природного газу за значеннями теплоти його згоряння, як умовно сталої величини, та значенням об'єму газу, приведеними до стандартних умов. Визначення ж теплоти згоряння природного газу регламентується ДСТУ ISO 15971:2014 [4]. Згідно з даним нормативним документом для визначення теплоти згоряння природного газу застосовують три методи: прямий, непрямий та кореляційний.

Аналіз існуючих на даний час засобів вимірювання теплоти згоряння природного газу подано в роботі [5]. Основним недоліком згаданих технічних засобів є те, що їх подекуди неможливо, а в інших випадках занадто дорого використовувати для вимірювання в побутових умовах – на мережах низького тиску. Отже, розроблення приладу, який не потребуватиме для роботи розхідних матеріалів та спалювання газової проби, дасть змогу вимірювати теплоту згоряння природного газу і для мереж низького тиску, а також буде значно дешевшим за поточковий хроматограф, є надзвичайно актуальним на даний час.

Виклад основного матеріалу

На кафедрі «Енергетичного менеджменту і технічної діагностики» ІФНТУНГ з 2009 року ведуться роботи за напрямком «Розроблення нового методу контролю енергетичних характеристик природного газу». Розроблений експрес-метод полягає в отриманні за допомогою алгоритмів штучних нейронних мереж за виміряними фізичними параметрами (швидкість поширення ультразвукових коливань та вміст діоксиду вуглецю у газовій пробі) розрахункових значень теплоти згоряння природного газу [6-9].

Даний метод був неодноразово підтверджений численними експериментальними дослідженнями, які виконувались спільно з ПАТ «Івано-Франківськгаз». Дослідження показали, що за допомогою розробленого методу теплоту згоряння природного газу можливо контролювати в режимі експрес вимірювань зі зведеною до діапазону похибкою 4,1%.

Розроблений метод було реалізовано у вигляді дослідного взірця приладу для експрес контролю нижчої теплоти згоряння природного газу [10] та його удосконаленої версії [11]. Конструктивно прилад складається з: вимірювальної камери, де здійснюється процес вимірювання інформативних параметрів за допомогою двох ультразвукових перетворювачів; давачів тиску, температури, вологості та давача визначення вмісту вуглекислого газу; вхідного підсилювача; модуля узгодження рівнів акустичного блоку; програмно-цифрового модуля; блоку нормалізуючих підсилювачів; аналого-цифрового перетворювача; двох електромагнітних газових клапанів; блоку керування електромагнітними газовими клапанами; газового редуктора; інформаційного дисплею; клавіатури; блоку живлення; двох перетворювачів напруги.

Дослідний взірець приладу для експрес контролю теплоти згоряння природного газу (рис. 1) виконаний у зручному для транспортування пило-волого захисному корпусі з класом захисту IP67. Вага приладу – 15 кг.

На початковому етапі досліджень для перевірки запропонованого методу контролю енергетичних характеристик природного газу було розроблено експериментальну установку, в якій здійснювались вимірювання тільки двох параметрів, таких як швидкість поширення ультразвукових коливань та вміст діоксиду вуглецю у пробі природного газу. Інші фізичні параметри природного газу, такі як значення тиску та температура, приводились до нормальних умов. Це збільшувало час вимірювання однієї проби та похибку вимірювань, а також унеможливило використання методу за температури навколишнього середовища, що значно (більш ніж на 10⁰С) відрізняється за нормальних умов.

Численні експериментальні дослідження показали, що під час визначення швидкості поширення ультразвукових коливань в газовій пробі необхідно враховувати температуру природного газу у вимірювальній камері [12]. Це

дозволяє реалізувати оперативне визначення теплоти згоряння даної проби, на відміну від експериментальної установки, де витримувався ізотермічний режим досліджень.



Рисунок 1 – Зовнішній вигляд дослідного взірця приладу для експрес-контролю теплоти згоряння природного газу

З літературних джерел [13] відомо, що швидкість поширення ультразвукових коливань в газах залежить від багатьох параметрів газу, таких як показник адіабати, валентність газу, постійна Больцмана, універсальна газова постійна, молярна маса, температура газу.

Додаткове вимірювання згаданих параметрів значно здорожчує реалізацію даного методу та збільшує час проведення одного вимірювання. Проте в нашому випадку за значенням швидкості, отриманим методом вимірювання часу проходження ультразвукових коливань деякої відстані в газі, знаючи точно цю відстань та температуру природного газу на момент вимірювання, можна скористатись формулою, яка описує зміну швидкості акустичних коливань в газах зі зміною температури [14]:

$$v = v_0 + K_{uv} \cdot (t - t_0), \quad (1)$$

де v_0 – швидкість при початковій температурі t_0 , K_{uv} – температурний коефіцієнт швидкості.

Використання даної формули дозволить привести значення швидкості ультразвукових коливань в природному газі до нормальних умов. Проте для застосування даної формули необхідно отримати значення температурного коефіцієнта швидкості.

Для визначення температурного коефіцієнту швидкості ультразвукових коливань в природному газі було розроблено спрощену експериментальну установку, яка складається з вимірювальної камери з вхідним та вихідним штуцерами, двох газових кранів на вході та на виході, манометра, для вимірювання тиску в газовій камері та ультразвукового перетворювача, давача температури і вологості природного газу, які розміщені в порожнині вимірювальної камери (рис. 2). Для генерування ультразвукових коливань та вимірювання часу їх поширен-



Рисунок 2 – Зовнішній вигляд спрощеної експериментальної установки для визначення температурного коефіцієнту швидкості ультразвукових коливань у природному газі

ня в природному газі було використано промисловий ультразвуковий дефектоскоп DiO 562 (зав.№ 138). Для вимірювання температури та вологості природного газу був використаний термогігрометр OVT-7302 (сер. № 08082341, Ovtech).

Методика експериментальних досліджень полягала в наступному:

1) до вхідного штуцера вимірювальної камери приєднували пробовідбірник з пробую газу, відкривали вхідний і вихідний крани, і через газову камеру впродовж 30с пропускали пробу газу під невеликим тиском та витратою з метою видалення з вимірювальної камери повітря чи зразка проби газу з іншими характеристиками. Через 30с вихідний кран закривали, і в вимірювальній камері шляхом регулювання потоку газу за допомогою вхідного крану вимірювальної камери встановлювали тиск на рівні 4 кПа. Процедура пропускання газу через вимірювальну камеру проводилась тричі для кожної окремо взятої проби газу;

2) після заповнення вимірювальної камери пробую природного газу ультразвуковий дефектоскоп DiO 562 та термогігрометр OVT-7302 налаштовували в режим вимірювання;

3) вимірювальну камеру поміщали в морозильну камеру холодильної установки з виведенням кабелів зв'язку давачів та вимірювальних приладів назовні;

4) з досягненням температурою проби газу у вимірювальній камері значення 2°C процес охолодження зупиняли, вимірювальну камеру виймали з морозильної камери холодильної установки і записували початкові значення температури, а також реєстрували значення вологості та тиску проби газу та час поширення ультразвукових коливань у вимірювальній камері;

5) вимірювальну камеру розташовували на невеликій відстані від нагрівального приладу, і у міру нагрівання в ній проби природного газу зчитували згадані в п.4 параметри;

б) після досягнення температурою проби газу значення 60-80°C чи тиску понад 28 кПа нагрівальний прилад вимикали і проводили вимірювання розрахункових параметрів за кімнатної температури; відтак продовжували зчитування параметрів, охолоджуючи вимірювальну камеру у морозильній камері холодильника від кімнатної температури до значення 2°C (див. п. 4).

За виміряним за допомогою ультразвукового дефектоскопа DiO 562 значенням часу проходження ультразвукових коливань відомої відстані у вимірювальній камері було розраховано швидкість поширення ультразвукових коливань у досліджуваній пробі газу.

Зведені результати вимірювань наведені в таблиці 1.

Для проведення вимірювань за описаною вище методикою, було відібрано три проби газу з різними значеннями хімічного складу та теплоти згоряння. Кожна проба досліджувалась не менше трьох разів.

Після аналізу та оброблення результатів вимірювань було побудовано графічні залежності швидкості поширення ультразвукових коливань у досліджуваних пробах газу від температури останніх (рис 3).

Після аналізування графічних побудов було проведено лінійну апроксимацію отриманих залежностей методом найменших квадратів за функцією виду $y = kx + b$, де k і b є шуканим нами температурним коефіцієнтом швидкості ультразвукових коливань.

Згідно з розрахунками температурний коефіцієнт швидкості ультразвукових коливань в природному газі складає $K_w = 0,53$.

Таким чином, залежність приведення швидкості ультразвукових коливань в природному газі до нормальних умов за температурою, виходячи з формули (1), матиме вигляд:

$$v_0 = v - 0,53 \cdot (20 - t_0) . \quad (2)$$

Таблиця 1 – Зведені результати вимірювань швидкості поширення ультразвукових коливань в пробах природного газу

Продовження таблиці 1

Час поширення ультразвукових коливань, мкс	Температура проби газу, °С	Швидкість поширення ультразвукових коливань, м/с	Тиск у камері, кПа	Відносна вологість, %
Проба газу № 1				
232,237	2	400,45	2	
232,092	2,5	400,7	2	
233,737	3	397,88	2,5	
234,174	3,5	397,14	2,5	
233,462	4	398,35	2,7	
232,224	4,5	400,48	3	66
231,274	5	402,12	3	
231,462	5,5	401,79	3,5	
234,387	6	396,78	3,5	
232,782	6,5	399,52	3,5	
231,099	7	402,42	4	
231,948	7,5	400,95	4	
231,921	8	401	4,5	
230,959	8,5	402,67	4,5	
231,699	9	401,38	4,5	64
229,999	9,5	404,35	5	
230,799	10	402,95	5	
230,149	10,5	404,09	5	66
230,224	11	403,95	5,5	
229,099	11,5	405,94	5,5	
229,915	12	404,5	6	
229,017	12,5	406,08	6	
228,977	13	406,15	6	
228,962	13,5	406,18	6	
228,973	14	406,16	6,5	
228,962	14,5	406,18	6,5	
228,986	15	406,14	6,5	60
229,903	15,5	404,52	6,5	
229,092	18	405,95	7	
226,97	19	409,75	9,5	
228,24	20	407,47	10	
226,664	23	410,3	10	
226,162	24	411,21	11	
224,324	24	414,58	12	
225,574	26	412,28	12	
225,237	27	412,9	12	
223,982	28	415,21	12	
224,312	29,5	414,6	13	
222,972	30	417,09		
224,162	31	414,88		
222,399	32,5	418,17		
222,137	33	418,66		
221,962	34	418,99		
221,799	35	419,3		
222,737	36	417,53		
221,124	37	420,58		
220,774	38	421,25	17	
221,499	39	419,87		
220,137	39,5	422,46		
219,984	40	422,76		
217,687	49	427,22	22	
217,312	50	427,96		
217,062	51	428,45		58
217,031	52	428,51		
216,299	53	429,96		58
216,441	54	429,68		
215,499	55	431,56		
215,012	56	432,53		

Час поширення ультразвукових коливань, мкс	Температура проби газу, °С	Швидкість поширення ультразвукових коливань, м/с	Тиск у камері, кПа	Відносна вологість, %
Проба газу № 2				
221,812	60	431,764	27	55
221,812	59	431,764	27	59
222,187	58	431,023	26	60
222,562	57	430,284	26	62
222,749	56	429,917	25	62
223,124	55	429,182	24	63
223,624	54	428,206	23	64
223,874	53	427,72	22	64
224,249	52	426,993	22	65
224,432	51	426,639	21	66
224,665	50	426,189	20	66
224,999	49	425,545	20	67
225,187	48	425,184	19	67
225,512	47	424,561	19	68
225,749	46	424,108	18	68
225,937	45	423,749	17	67
226,312	44	423,035	17	68
226,499	43	422,68	16	69
226,687	42	422,324	16	70
226,889	41	421,941	15	70
227,249	40	421,262	15	71
227,437	39	420,908	14	71
227,812	38	420,203	14	71
227,999	37	419,853	14	71
228,374	36	419,152	13	72
228,562	35	418,802	12	72
228,799	34	418,361	12	73
229,124	33	417,757	12	74
229,312	32	417,409	11	74
229,499	31	417,063	10	75
229,874	30	416,372	10	75
230,162	29	415,842	10	75
230,437	28	415,338	9	75
230,687	27	414,88	8	75
230,862	26	414,561	7,5	75
230,999	25	414,311	7	75
231,374	24	413,628	6,5	74
231,737	23	412,97	6	74
232,124	22	412,27	6	74
232,312	21	411,931	5,5	75
232,687	20	411,256	5	75
232,847	19	410,969	5	76
233,249	18	410,249	4	76
233,437	17	409,913	3,5	76
233,812	16	409,245	3	76
233,999	15	408,913	2,5	76
234,374	14	408,248	2	75
235,813	13	405,717	1,5	75
236,299	12	404,869	1	75
237,374	11	403,006	1	75
239,437	10	399,479	1	75
238,474	9	401,118	0,5	75
240,499	8	397,687	0,5	76
239,437	7	399,479	0	75
241,687	6	395,702	0	75
241,876	5	395,388	0	75
241,124	4	396,64	0	75
215,012	56	432,53		

Продовження таблиці 1

Література

Час поширення ультразвукових коливань, мкс	Температура проби газу, °С	Швидкість поширення ультразвукових коливань, м/с	Тиск у камері, кПа	Відносна вологість, %
Проба газу № 3				
216,849	80	441,82	19	38
217,924	75	439,6	16	44
218,799	73	437,81	14	45
219,249	71	436,9	13	47
220,112	70	435,16	12	47
220,887	69	433,6	12	48
221,399	68	432,58	11	49
222,587	65	430,24	9,5	51
222,83	63	429,76	8,5	53
223,787	60	427,89	12	56
224,762	57	426	10	58
225,187	55	425,18	9	59
225,937	53	423,75	10	60
226,312	51	423,04	11	61
226,499	50	422,68	10	61
227,812	45	420,2	9	63
229,562	39	416,95	8,5	64
229,847	35	416,42	7	65
231,049	34	414,22	6	65
232,874	32	410,92	5,5	65
233,874	30	409,14	6,5	66
233,999	27	408,91	5	67
234,749	24	407,59	4	67
235,724	15,6	405,87	4	72
236,324	15	404,83		72
236,649	14	404,26		73
236,317	13	404,84		73
238,374	10,7	401,29		74
237,962	9,6	401,99		74
237,562	8	402,68		73
239,107	7	400,04		73
238,487	6	401,1		74
239,812	5	398,84		73
239,368	4	399,6		73
240,112	3	398,34		71
242,437	2,6	394,46		71

Виходячи з цієї формули, для визначення швидкості поширення ультразвукових коливань в природному газі за температури газу за нормальних умов, достатньо виміряти значення температури природного газу та швидкості поширення ультразвукових коливань у природному газі при даній температурі.

Висновки

Введення даної залежності в алгоритм розрахунку теплоти згорання природного газу дозволило удосконалити технологію вимірювання та сам прилад: зокрема зменшився час вимірювання однієї проби, оскільки немає потреби догрівати чи охолоджувати пробу, розширились можливості використання приладу при різних діапазонах температури газу та навколишнього середовища, а також зменшилась похибка вимірювань при температурах газу, які відрізнялись від значення за нормальних умов.

1 Якість газу. ПАТ «Укртрансгаз». [електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://utg.ua/utg/business-info/yakst-gazu.html>.

2 Енергія природного газу - фізико-хімічні показники. НАК «Нафтогаз України» [електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.naftogaz.com/www/3/nakweb.nsf/0/5D4AEE4281E6DE24C2257F5000437426?OpenDocument&Expand=5.2&>.

3 ДСТУ ISO 15112:2009. Природний газ. Визначення енергії.

4 ДСТУ ISO 15971:2014. Природний газ. Вимірювання властивостей. Теплота згорання та число Воббе.

5 Огляд сучасного стану технологій та розробок для експрес-контролю теплоти згорання природного газу / А.В. Яворський, І.Р. Вашишак, І.І. Височанський, М.О. Карпаш // Методи та прилади контролю якості. – 2016. – № 37(2). – С. 51-66.

6 Rybitskyi I., Karpash O., Darvai I., Karpash M. New low-cost method for determination of heating value of natural gas. *Wiertnictwo. Nafta. Gaz.* Vol. 28, Issue 1-2. Krakow, 2011, p.333-338, ISSN 1507-0042.

7 O.Karpash, I.Darvai, M.Karpash. New approach to natural gas quality determination // *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 71, Issues 3-4, April 2010, pages 133-137.

8 Development of new instant technology of natural gas quality determination, Koturbash T. Karpash M., Darvai I., Rybitskyi I., Kutcherov V.) *Proceedings of the ASME 2013 Power Conference*, Boston MA, USA, July 29-August 1, 2013, Power 2013-98089.

9 Патент на винахід UA 92846. Спосіб експрес-визначення теплоти згорання природного газу / Карпаш О.М., Дарвай І.Я., Карпаш М.О., Яворський А.В., Рибіцький І.В. (Україна). – Опубл. 10.12.2010, Бюл.№ 23, 2010р.

10 Яворський А.В. Досвід розробки і впровадження пристрою для експрес-контролю теплоти згорання природного газу / А.В. Яворський, І.І. Височанський, М.О. Карпаш, П.М. Райтер, І.В. Рибіцький // *Неруйнівний контроль та технічна діагностика – UkrNDT-2016* : 8-а національна науково-технічна конф., 22 – 24 листопада 2016 р. : матеріали конференції. – К.: УТ НКТД, 2016. – С. 203-205.

11 Височанський І.І. Технічна реалізація і апробація удосконаленої технології експрес-контролю теплоти згорання природного газу / І.І. Височанський, О.М. Карпаш, М.О. Карпаш, І.В. Рибіцький, П.М. Райтер, А.В. Яворський // *Збірник доповідей 1-шої науково-технічної конференції з міжнародною участю «Неруйнівний контроль в контексті асоційованого членства України в Європейському Союзі – NDT-UA 2017»*. 24–27 жовтня 2017 року / Люблін, Польща: УТ НКТД, 2017 – С. 11-14.

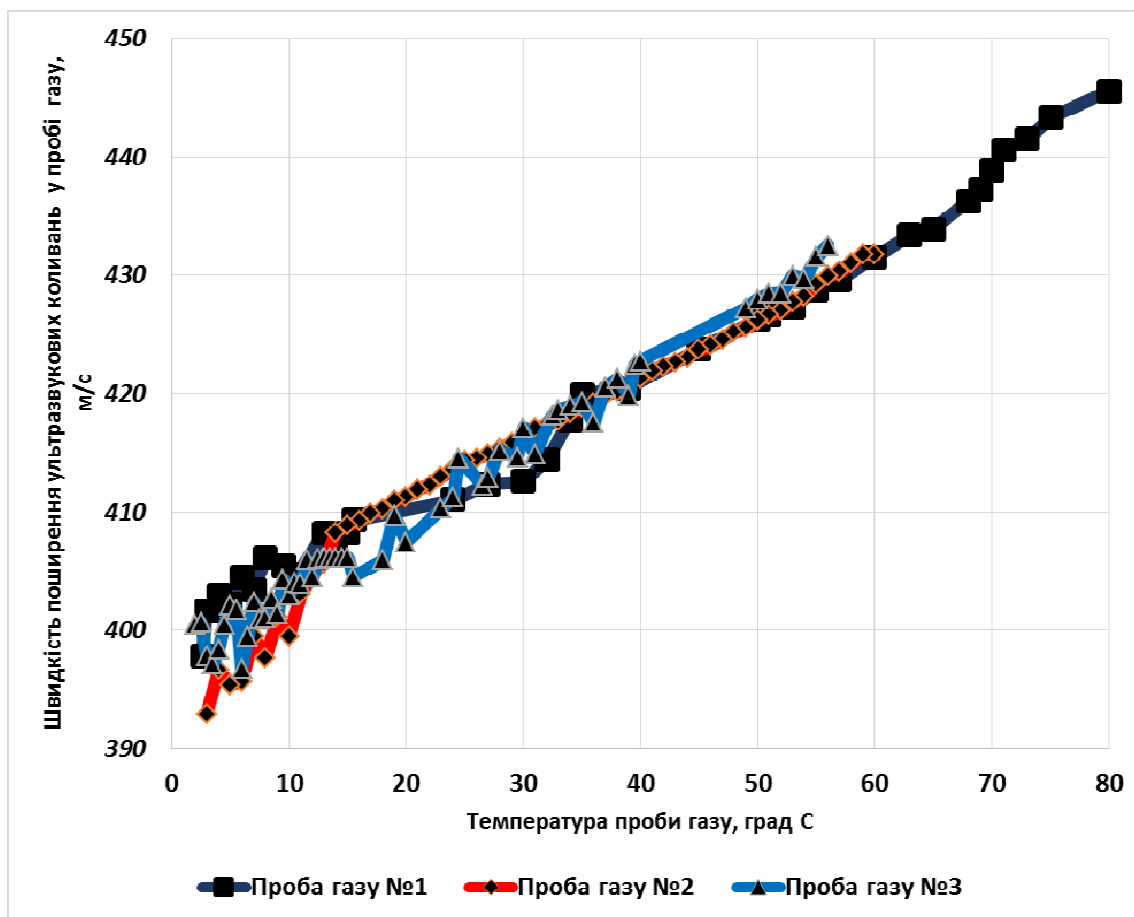


Рисунок 3 – Залежності швидкості поширення ультразвукових коливань від температури газу

12 Патент на корисну модель UA 114212 U. Спосіб експрес визначення теплоти згорання природного газу з урахуванням температури / Карпаш О.М., Рибіцький І.В., Карпаш М.О., Дарвай І.Я., Яворський А.В., Височанський І.І. (Україна). – Опубл. 10.03.2017, Бюл. №5, 2017 р.

13 Скорость звука / Под. ред. А. М. Прохорова // Физическая энциклопедия. – М.: Советская энциклопедия, 1988. – Т. 4.

14 Білокур І. П. Основи дефектоскопії : [підручник] / І. П. Білокур. – К.: Азимут-Україна, 2004. – 496 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії
17.10.17

Рекомендована до друку
професором **Райтером П.М.**
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
д-ром техн. наук **Банахевичем Ю.В.**
(ЛЧМГ ПАТ «Укртрансгаз», м. Львів)