

непевності розробленого вимірювального каналу моменту перейдемо до безрозмірних величин та оцінимо сумарну відносну непевність за формулою

$$\delta = \sqrt{\left(\frac{u_1}{I}\right)^2 + \left(\frac{u_2}{Q_n}\right)^2 + \left(\frac{u_3}{\Delta U_{\text{вих}}}\right)^2 + \left(\frac{u_4}{N_{\text{max}}}\right)^2 + \left(\frac{u_5}{\Delta U_{\text{max}}}\right)^2} = (20)$$

$$= 4,32 \cdot 10^{-3} = 0,43 \%$$

Отже, сумарна відносна непевність вимірювального каналу моменту не перевищує 0,43 %.

Висновки. Запропонований засіб вимірювання динамічного моменту ЕМ будується на основі удосконалення методу визначення динамічного моменту шляхом вимірювання моменту інерції, що утворюється в статорі ЕМ та моменту інерції рухомої частини вимірювального перетворювача в режимі, коли ротор ЕМ загальмовано, а обмотки статора заживлені симетричною напругою номінальної частоти і до ротора ЕМ прикріплено вимірювальний важіль, що взаємодіє із сенсором зусилля. Момент, що діє на сенсор зусилля в режимі самогальмування, відповідає динамічному моменту ЕМ, який, своєю чергою, пропорційний до напруги на виході тензорезистивного вимірювального перетворювача. На основі отриманого

рівняння перетворення проаналізовано відносну методичну похибку (непевність) вимірювання динамічного моменту, яка не перевищує 3,5 % в діапазоні від 0 до 30 Нм. Також здійснено оцінювання непевностей, що вносять складові елементи засобу вимірювання динамічного моменту. В результаті оцінювання встановлено, що відносна сумарна інструментальна непевність ЗВ динамічного моменту не перевищує 0,43 %.

1. Башарин А.В. Управление электроприводами : [учебное пособие для вузов] / А.В. Банарин, В.А. Новиков, Г.Г. Соколовский. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 329 с. 2. Потапов Л.А. Измерение вращающихся моментов и скоростей вращения микроэлектродвигателей / Л.А. Потапов, Ф.М. Юферов. – М.: Энергия, 1976. – 121 с. 3. Кухарчук В.В. Элементы теории контр-ролю динамических параметров электрических машин : [монография] / В.В. Кухарчук. – Винница: Универсум-Винница, 1998. – 125 с. 4. Кучерук В. Ю. Развитие частотных методов определения моментных характеристик электрических машин / В. Ю. Кучерук, О. М. Наталич, О. М. Васілевський // Вісник інженерної академії України. – 2007. – № 3–4. – С. 149–154.

УДК 681.121.89.082.4

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ ЗВУКУ

© Матіко Федір, Роман Віталій, Федоришин Роман, 2012

Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра автоматизації теплових та хімічних процесів,
вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна

Викладено результати порівняльного аналізу методів розрахунку швидкості звуку в природному газі за їх сферою застосування, структурою алгоритму та методичною похибкою. Виконано аналіз можливості впровадження цих методів у системах вимірювання витрати та об'єму природного газу.

Изложены результаты сравнительного анализа методов расчета скорости звука в природном газе по их области применения, структуре алгоритма и методической погрешности. Выполнен анализ возможности внедрения этих методов в системах измерения расхода и объема природного газа.

The paper presents the results of a comparative analysis of methods for calculating the speed of sound in natural gas according to the field of application, the structure of the algorithm and the methodical error. The analysis of possible implementation of these methods in systems of natural gas flowrate and volume measurement is carried out.

Постановка проблеми. У зв'язку з постійним зростанням цін на природний газ все жорсткішими стають вимоги до точності та досконалості засобів його обліку. Підвищення якості обліку досягають

вдосконаленням засобів обліку, побудованих на основі традиційних методів вимірювання (змінного перепаду, тахометричних лічильників), а також застосуванням методів, що розвиваються та впроваджуються у

витратовимірювальну техніку, зокрема ультразвукового.

Ультразвукові витратоміри все більше застосовують в системах обліку енергоносіїв, зокрема й природного газу, завдяки їх очевидним перевагам: конструкція цих витратомірів не вимагає виконувати звуження перерізу трубопроводу чи вводити будь-які рухомі/нерухомі елементи у потік; внаслідок першого витрати тиску на секції витратоміра мінімальні; залежність між витратою (швидкістю потоку) та контрольованим параметром витратоміра лінійна, що дає змогу виконувати вимірювання у широкому діапазоні зміни витрати.

Однак зауважимо, що ультразвуковий метод є непрямим методом вимірювання витрати: за допомогою чутливих елементів вимірюють швидкість потоку, а витрату і об'єм газу обчислюють за допомогою мікропроцесорного обчислювача. Для реалізації рівняння витрати в обчислювачі необхідно виконувати розрахунок деяких властивостей природного газу: швидкості звуку (для деяких типів ультразвукових витратомірів) та коефіцієнта стисливості для приведення витрати та об'єму до стандартних умов.

Розрахунок швидкості звуку необхідно виконувати також і в деяких видах витратовимірювальної техніки, побудованої на основі сопел критичного витікання. Швидкість потоку в горловині сопла у критичному режимі витікання дорівнює швидкості звуку. Знаючи її, можна обчислити витрату газу через сопло [1].

Аналіз останніх досліджень. Для розрахунку швидкості звуку запропоновано методи, які побудовані на основі принципу відповідних станів та на основі спеціальних багатоконстантних рівнянь стану. На основі методів відомих світових центрів із дослідження фізичних властивостей розроблено стандарти ГОСТ 30319.1-96 [2], ГОСТ 30319.3-96 [3], ISO 20765-1:2005 [4]. Методи названих вище нормативних документів мають різні вимоги до формування вхідних даних для виконання розрахунку, різні алгоритми розрахунку, однак межі застосування багатьох із них є близькими. Тобто області застосування методів мають спільні підобласті. Тому виникає завдання вибору методу розрахунку швидкості звуку для окремої задачі із переліку тих, застосування яких дозволене нормативними документами для умов цієї задачі.

Формулювання цілей статті. Мета цієї роботи – виконати порівняльний аналіз методів визначення

швидкості звуку в природному газу, запропонованих відомими світовими центрами з визначення властивостей газів та рідин, за їх сферою роботи, точністю, та сформувати рекомендації щодо їх застосування у витратовимірювальній техніці.

Аналіз методів визначення швидкості звуку.

Робота ультразвукових витратомірів ґрунтується на вимірюванні швидкості газового потоку за допомогою акустичних коливань в ультразвуковому діапазоні (частоти понад 16 – 20 кГц). На основі вимірюного значення швидкості потоку обчислюють об'ємну чи масову витрату залежно від методики та типу ультразвукового пристрою.

Ультразвукові витратоміри поділяють, як правило, на три основні групи за методом вимірювання швидкості газового потоку [5].

1. Ультразвукові витратоміри, основані на принципі переміщення ультразвукових коливань рухомим газовим потоком (*transit time flowmeters*):

1.1. Основані на вимірюванні параметрів ультразвукових коливань, що поширюються за потоком і проти потоку:

1.1.1. Фазові витратоміри, основані на вимірюванні різниці фазових зсувів ультразвукових коливань, що поширюються за потоком і проти потоку.

1.1.2. Часо-імпульсні – на основі безпосереднього вимірювання різниці часу проходження коротких ультразвукових імпульсів за потоком і проти потоку.

1.1.3. Частотні витратоміри – на основі вимірювання різниці частот повторення коротких імпульсів або пакетів ультразвукових коливань, спрямованих за потоком і проти потоку.

1.2. Кореляційні методи, в яких ультразвукові коливання спрямовані перпендикулярно до потоку і вимірюється ступінь відхилення цих коливань від початкового напрямку.

2. Ультразвукові витратоміри, основані на явищі Доплера (*Doppler flowmeters*).

3. Довгохвильові витратоміри, які застосовують хвилі зі звукового діапазону частот.

Рівняння визначення швидкості потоку в ультразвукових витратомірах містить як аргумент швидкість звуку у вимірюваному середовищі [5]. Однак для витратомірів підгрупи 1.1 (основані на вимірюванні параметрів ультразвукових коливань, що поширюються за потоком і проти потоку) це рівняння подають як функцію часу поширення ультразвукової хвилі за потоком і проти потоку, тим самим усувають

із нього швидкість звуку як вхідний параметр [6]. Оскільки вимірювати час поширення ультразвукової хвилі можна сучасними технічними засобами із похибкою, меншою за похибку визначення швидкості звуку, то це підвищує точність витратоміра.

Однак вилучити швидкість звуку із рівняння визначення швидкості потоку газу не вдається для ультразвукових витратомірів кореляційного типу та доплерівських. Для цих типів необхідно визначати швидкість звуку у вимірюваному середовищі. Крім того, для моделювання ультразвукових витратомірів усіх типів необхідно розрахунково визначати швидкість звуку.

Швидкість звуку в газі залежить від параметрів стану газу (тиск, температура, густина), а у випадках суміші газів – і від складу суміші. Тому методи розрахунку швидкості звуку будують на основі спеціальних багатоконстантних рівнянь стану газів та газових сумішей.

Один із найпростіших методів розрахунку швидкості звуку запропоновано у ГОСТ 30319.1-96 [2]. Метод оснований на відомих термодинамічних залежностях між швидкістю звуку, показником адіабати газу та коефіцієнтом стисливості [7]. Основне рівняння методу подане [2] у вигляді

$$u = 18,591 \cdot \left(\frac{k \cdot T \cdot K}{\rho_c} \right)^{0.5}, \quad (1)$$

де u – швидкість звуку, м/с; k – показник адіабати; K – коефіцієнт стисливості природного газу; ρ_c – густина природного газу за стандартних умов ($\rho_c = 0,101325$ МПа і $T_c = 293,15$ К); T – температура газу, К.

Для розрахунку коефіцієнта стисливості та показника адіабати можна застосувати методи, що працюють на основі спрощеного набору параметрів складу (густини за стандартних умов, вмісту азоту, вмісту вуглекислого газу). Зокрема, для коефіцієнта стисливості це методи NX19 мод. та GERG-91 мод. із ГОСТ 30319.2-96 [3], для показника адіабати – метод Кабза із ГОСТ 30319.1-96 [2]. За такого підбору методів рівняння (1) можна застосувати для обчислення швидкості звуку на основі вказаного спрощеного набору параметрів складу природного газу.

Застосування методів, що працюють на основі спрощеного набору параметрів складу, має ще одну перевагу: такі методи реалізують за допомогою лінійного безітераційного алгоритму, що важливо для реалізації цих методів для обчислень у реальному часі.

Метод [2] застосовують для розрахунку швидкості звуку газу в діапазоні зміни температури від 240 до 360 К і діапазоні зміни тиску до 10 МПа.

У стандарті ГОСТ 30319.3-96 [4] запропоновано метод розрахунку швидкості звуку в природному газі на основі рівняння стану ВНИЦ СМВ, яке має вигляд залежності фактора стисливості Z від приведених густини та температури. Для застосування наведеного у [4] рівняння швидкості звуку необхідно підготувати такий набір вхідних даних: тиск, температуру газу і компонентний склад природного газу (8 компонентів), який виражається в молярних або об'ємних частках компонентів. Розробники обмежують область застосування методу такими діапазонами зміни молярних часток окремих компонентів: метан $\geq 0,50$; етан $\geq 0,20$; пропан $\geq 0,05$; н-бутан $\geq 0,03$; і-бутан $\geq 0,03$; азот $\geq 0,30$; діоксид вуглецю $\geq 0,30$; сірководень $\geq 0,30$; решта компонентів $\geq 0,01$. Метод можна застосувати для діапазону зміни тиску до 12 МПа та діапазону зміни температури 240 ÷ 480 К.

У міжнародному стандарті ISO 20765-1 [8] запропоновано дещо інший підхід до визначення термодинамічних властивостей природного газу, зокрема й швидкості звуку в газі. В стандарті подано фундаментальне рівняння, яке визначає зв'язок вільної енергії Гельмгольца із приведеними густиною, температурою та компонентним складом газу. Рівняння для визначення термодинамічних властивостей отримані на основі рівнянь часткових похідних від вільної енергії Гельмгольца. Метод, запропонований в ISO 20765-1 [8], призначений для розрахунку властивостей сумішей у газоподібному стані і має широкую область застосування за зміною тиску ($p \leq 30$ МПа) та температури ($250 \text{ К} \leq T \leq 350 \text{ К}$). При цьому компонентний склад природного газу враховує вміст двадцять одного компонента.

Щодо структури названих методів, тільки рівняння (1) можна реалізувати за лінійним безітераційним алгоритмом. Метод на основі рівняння стану ВНИЦ СМВ та метод ISO 20765-1 мають ряд недоліків. Обидва методи реалізовані на основі рівнянь із взаємозалежними параметрами (Z , ρ), (p , ρ), які можна розв'язати тільки ітераційним шляхом, що збільшує обчислювальне навантаження процесорів у обчислювачах. Методи потребують введення даних про повний компонентний склад газу, що вимагає переробки програмного забезпечення сучасних обчислю-

вачів, переважна більшість яких орієнтована на введення спрощених даних про склад газу.

Порівняльний аналіз методів розрахунку швидкості звуку автори виконали відносно високоточної бази експериментальних даних швидкості звуку у вуглеводневих сумішах та природних газах типових складів, наведеної у [1]. Експериментальні дані, подані у [1], отримані в лабораторії Національного інституту стандартів і технологій (США) методом циліндричного резонатора для діапазону тиску до 10 МПа та температури від 250 К до 350 К. Невизначеність отриманих експериментальних даних швидкості звуку автори [1] оцінюють як 0,05 %.

Порівняння результатів розрахунку за [2], [4], [8] виконано відносно експериментальних даних про швидкість звуку в природному газі двох складів, названих у [1] GulfCoast та Amarillo (див. табл. 1).

Таблиця 1

Компонентний склад природних газів [1]

Назва компонента	Молярна частка	
	Gulf Coast	Amarillo
Метан	0,96561	0,90708
Етан	0,01829	0,04491
Пропан	0,00410	0,00815
н-бутан	0,00098	0,00141
ізо-бутан	0,00098	0,00106
н-пентан	0,00032	0,00065
ізо-пентан	0,00046	0,00027
н-гексан	0,00067	0,00034
Азот	0,00262	0,03113
діоксид вуглецю	0,00597	0,00500

Густина за стандартних умов ρ_c цих природних газів становить: Gulf Coast - $\rho_c = 0,69996 \text{ кг/м}^3$, Amarillo - $\rho_c = 0,73199 \text{ кг/м}^3$. Такий діапазон зміни густини ρ_c характерний також для природних газів, які транспортують газотранспортними та газорозподільними мережами в Україні.

Для застосування методу ВНИЦ СМВ наведені в табл. 1 варіанти складу переформатовано відповідно до вимог цього методу із застосуванням правил комбінування компонентів, наведених у [4].

Результати порівняння розрахункових значень за методами [2, 4, 8] із експериментальними значеннями швидкості звуку [1] для газу GulfCoast наведено у табл. 2. Значення відносного відхилення δ , наведені у табл. 2, обчислено за формулою:

$$\delta = (c_{\text{розра}} - c_{[1]}) / c_{[1]} * 100, \quad (2)$$

де $c_{\text{розра}}$ – розрахункові значення за методами [2, 4, 7]; $c_{[1]}$ – експериментальні значення швидкості звуку із [1].

За результатами, наведеними у табл. 2, можна оцінити область зміни значень швидкості звуку в природному газі та методичну похибку аналізованих методів розрахунку. Зокрема, область значень швидкості звуку для природного газу GulfCoast подана на рис.1. Із рис. 1 видно, що градієнт зміни швидкості звуку за тиском є набагато меншим від градієнта її зміни за температурою. До того ж значний градієнт зміни швидкості звуку за температурою характерний для всього діапазону зміни тиску.

Тобто, з погляду визначення швидкості звуку у витративимірювальній техніці, навіть якщо тиск природного газу на ділянці роботи витратоміра може бути порівняно постійним, то температура змінюється, як правило, у широких межах залежно від місця встановлення витратоміра, пори року, режиму газопостачання й інших факторів. Отже, швидкість звуку не можна прийняти умовно-постійною для витратоміра навіть в умовах окремої інсталяції.

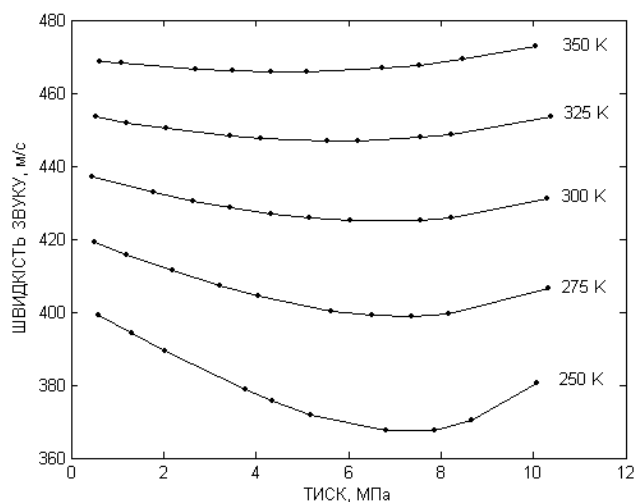


Рис.1. Ізотерми швидкості звуку для природного газу GulfCoast

Щоб наочно проілюструвати поведінку аналізованих методів [2, 4, 8] у практично важливій області зміни температури та тиску газу, побудовано графіки залежностей відносного відхилення δ від тиску (див. рис. 2) для трьох аналізованих методів. Залежності побудовані для двох природних газів: GulfCoast – суцільна лінія, Amarillo – штрихова лінія.

Таблиця 2

Результати порівняння методів [2], [4], [8] із експериментальними значеннями швидкості звуку [1]
для природного газу GulfCoast

Параметри газу		Швидкість звуку та відносні відхилення значень методів від [1]						
		[1]	ГОСТ 30319.1 [2]		ГОСТ 30319.3 [4]		ISO 20765-1:2005 [7]	
T, K	p, МПа	$c_{[1]}$, м/с	$c_{розр}$, м/с	δ , %	$c_{розр}$, м/с	δ , %	$c_{розр}$, м/с	δ , %
1	2	3	4	5	6	7	8	9
250	10,065	380,41	362,62	-4,906	382,53	0,554	380,65	0,063
250	8,672	370,18	362,69	-2,065	371,62	0,387	370,27	0,024
250	7,853	367,62	364,18	-0,944	368,78	0,314	367,67	0,013
250	6,802	367,43	367,22	-0,057	368,29	0,233	367,37	-0,016
250	5,195	371,79	373,54	0,468	372,48	0,185	371,71	-0,021
250	4,366	375,64	377,40	0,466	376,18	0,143	375,50	-0,037
250	3,763	378,84	380,43	0,417	379,32	0,126	378,71	-0,034
250	2,036	389,44	390,12	0,174	389,71	0,069	389,32	-0,030
250	1,317	394,19	394,58	0,098	394,49	0,076	394,14	-0,012
250	0,591	399,23	399,31	0,020	399,51	0,070	399,15	-0,012
275	10,325	406,91	402,79	-1,022	408,68	0,433	406,65	-0,063
275	8,165	399,69	399,14	-0,137	401,07	0,344	399,48	-0,052
275	7,369	399,00	399,02	0,005	400,25	0,312	398,79	-0,052
275	6,521	399,19	399,53	0,085	400,35	0,289	399,03	-0,040
275	5,623	400,41	400,74	0,082	401,39	0,244	400,22	-0,047
275	4,047	404,36	404,40	0,009	405,10	0,182	404,24	-0,029
275	3,213	407,26	407,07	-0,046	407,84	0,142	407,14	-0,029
275	2,197	411,32	410,95	-0,090	411,76	0,106	411,24	-0,019
275	1,209	415,73	415,34	-0,093	416,11	0,091	415,69	-0,009
275	0,5	419,16	418,82	-0,081	419,52	0,085	419,12	-0,009
300	10,309	431,53	432,42	0,205	433,19	0,383	431,13	-0,092
300	8,233	426,29	426,76	0,110	427,65	0,318	425,92	-0,086
300	7,567	425,53	425,77	0,056	426,79	0,295	425,17	-0,084
300	6,053	425,25	424,90	-0,082	426,28	0,241	424,93	-0,075
300	5,15	425,94	425,28	-0,155	426,82	0,206	425,66	-0,065
300	4,322	427,04	426,18	-0,201	427,81	0,180	426,81	-0,053
300	3,433	428,72	427,72	-0,233	429,34	0,144	428,53	-0,044
300	2,631	430,59	429,58	-0,235	431,10	0,118	430,44	-0,034
300	1,78	432,98	432,03	-0,219	433,33	0,080	432,80	-0,041
300	0,468	437,14	436,64	-0,114	437,47	0,075	437,03	-0,025
325	10,382	454,25	456,44	0,479	455,70	0,3182	453,59	-0,145
325	8,224	448,99	449,51	0,115	450,42	0,3175	448,64	-0,078
325	7,575	448,18	448,15	-0,006	449,45	0,2826	447,78	-0,089
325	6,213	447,22	446,37	-0,190	448,28	0,2365	446,85	-0,082
325	5,535	447,08	446,00	-0,242	448,10	0,2276	446,80	-0,062
325	4,103	447,85	446,34	-0,338	448,53	0,1516	447,52	-0,073
325	3,453	448,48	446,96	-0,340	449,06	0,1292	448,18	-0,066
325	2,065	450,42	449,24	-0,262	450,85	0,0954	450,23	-0,042

Продовження табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
325	1,201	452,11	451,25	-0,190	452,41	0,0663	451,89	-0,048
325	0,542	453,53	453,05	-0,105	453,82	0,0639	453,34	-0,041
350	10,051	473,09	474,87	0,374	474,77	0,353	472,67	-0,088
350	8,481	469,54	469,63	0,019	471,06	0,322	469,18	-0,076
350	7,544	468,07	467,35	-0,154	469,43	0,289	467,70	-0,079
350	6,741	467,14	465,89	-0,268	468,36	0,260	466,78	-0,077
350	5,104	466,13	464,30	-0,394	467,09	0,205	465,82	-0,066
350	4,336	466,04	464,17	-0,402	466,89	0,182	465,77	-0,058
350	3,509	466,21	464,45	-0,378	466,94	0,156	465,99	-0,047
350	2,692	466,65	465,15	-0,322	467,27	0,132	466,47	-0,038
350	1,101	468,16	467,62	-0,115	468,65	0,104	468,08	-0,017
350	0,633	468,79	468,59	-0,042	469,24	0,095	468,72	-0,014

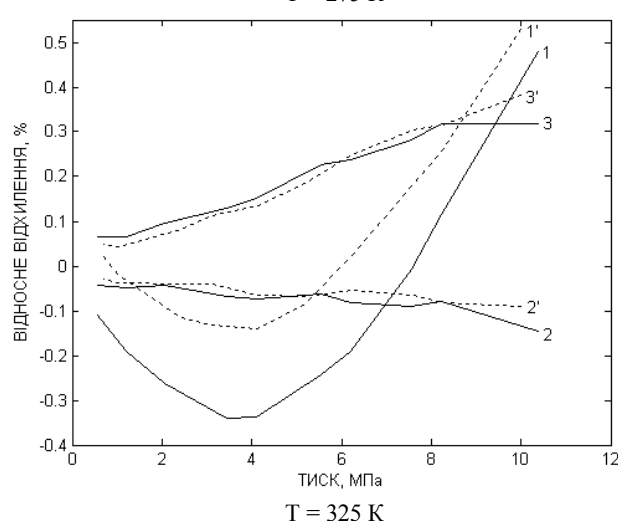
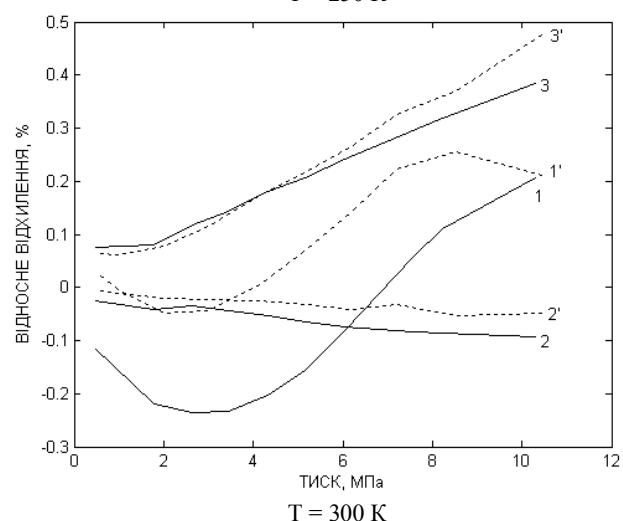
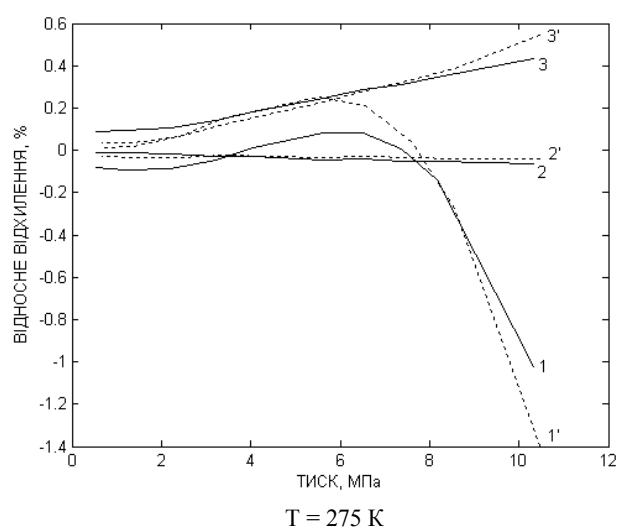
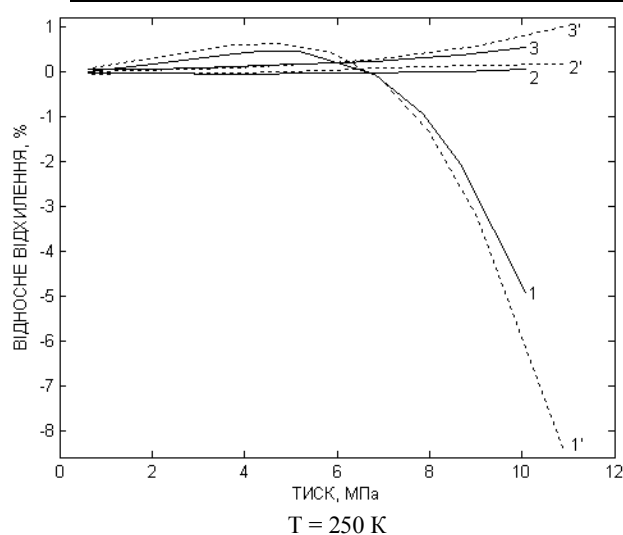


Рис.2. Залежності відносного відхилення значень швидкості звуку відносно даних [1] від тиску для методів: 1, 1' - ГОСТ 30319.1; 2, 2' - ISO 20765-1:2005; 3, 3' - ГОСТ 30319.3. Криві побудовано суцільною лінією – газ Gulf Coast, штриховою – газ Amarillo

Із результатів порівняння, наведених у табл. 2 та на рис. 2, видно, що найкращу збіжність із експериментальними даними [1] має метод ISO 20765-1. Відносні відхилення значень, отриманих за цим методом, від експериментальних значень не перевищують 0,14 % при тестуванні щодо природних газів Gulf Coast, Amarillo для області тестування за зміною тиску від 0,1 до 8,0 МПа та температури – від 250 К до 350 К. У цій самій області тестування відносні відхилення значень методу ВНИЦ СМВ [4] досягають 0,43 %, а спрощеного методу ГОСТ 30319.1[2] – 1,32 % відносно значень швидкості звуку для двох вказаних вище природних газів.

Однак, порівнюючи метод ВНИЦ СМВ та спрощений метод ГОСТ 30319.1, відзначимо, що діапазон відхилень їх значень від експериментальних даних практично однаковий, якщо обмежитись діапазоном зміни тиску до 6,0 МПа та температури від 275 К до 350 К. Для температури газу 250 К відхилення методу ГОСТ 30319.1 перевищують відхилення методу ВНИЦ СМВ: максимальне відхилення для ГОСТ 30319.1 становить 0,65 %, максимальне відхилення для ВНИЦ СМВ – 0,26 %.

Тобто для області застосування за зміною тиску від 0,1 до 6,0 МПа та температури – від 250 К до 350 К методи ГОСТ 30319.1 та ГОСТ 30319.3 (ВНИЦ СМВ) є близькими за точністю обчислення швидкості звуку.

Висновки. За результатами аналізу можна сформулювати такі висновки:

1) для забезпечення високої точності розрахунку швидкості звуку та за наявності даних про повний компонентний склад газу слід застосовувати метод ISO 20765-1; метод дає змогу обчислити значення швидкості звуку із загальною невизначеністю, не більшою за $\pm 0,2$ % [8] для області застосування за зміною тиску від 0,1 до 8,0 МПа та температури – від 250 К до 350 К;

2) для умов, коли склад газу вводиться в обчислювач за допомогою спрощеного набору параметрів (густина за стандартних умов, вміст азоту, вміст вуглекислого газу), які вважаються умовно-постійними упродовж інтервалу їх введення, доцільно застосувати спрощений метод розрахунку швидкості звуку, наведе-

дений в ГОСТ 30319.1 [2]; для області застосування за зміною тиску від 0,1 до 6,0 МПа та температури – від 250 К до 350 К відхилення значень методу від високоточних експериментальних даних [1] не перевищують 0,65 %; метод можна реалізувати за допомогою лінійного безітераційного алгоритму, що важливо з погляду його реалізації для обчислень у реальному часі;

3) порівняно зі спрощеним методом [2] метод ВНИЦ СМВ [4] забезпечує вищу точність обчислення швидкості звуку для низьких температур газу ($T < 270$ К) та природних газів із густиною за стандартних умов $\rho_c > 0,73$ кг/м³.

Отримані в цій роботі результати дають змогу обґрунтовано вибрати метод розрахунку швидкості звуку для заданих умов вимірювання витрати чи для задач проектування витратовимірювальної техніки.

1. Younglove B.A., Frederick N.V., and McCarty R.D. *Speed of Sound Data and Related Models for Mixtures of Natural Gas Constituents: NIST Monograph 178.* – Chicago: United States Department of Commerce. 2. ГОСТ 30319.1-96 Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение физических свойств природного газа, его компонентов и продуктов его переработки. – М.: Изд-во стандартов. 3. ГОСТ 30319.2-96 Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение коэффициента сжимаемости. – М.: Изд-во стандартов. 4. ГОСТ 30319.3-96 Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение физических свойств по уравнению состояния. – М.: Изд-во стандартов. 5. Кремлевский П.П. *Расходомеры и счетчики количества вещества: справочник: кн. 2 / Под общ. ред. Е.А. Щорникова.* – 5-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Политехника, 2004. – 412 с. 6. ISO 17089-1:2010 *Measurement of fluid flow in closed conduits - Ultrasonic meters for gas. Part 1: Meters for custody transfer and allocation measurement.* 7. Лойцянский Л.Г. *Механика жидкости и газа: учеб. для вузов.* – 7-е изд., испр. – М.: Дрофа, 2003. – 840 с. 8. ISO 20765-1:2005. *Natural gas – Calculation of thermodynamic properties. Part 1: Gas phase properties for transmission and distribution applications.*