



УДК 620.93

## Шляхи відтворення і передавання одиниць теплоти згоряння та густини природного газу в Україні

І. С. Петришин, О. А. Бас, Л. О. Присяжнюк

ДП "Івано-Франківськстандартметрологія", вул. Вовчинецька, 127, 76007, Івано-Франківськ, Україна  
alexandr.sanya@gmail.com

### Анотація

Наведено обґрунтування необхідності розвитку в Україні галузі метрологічного забезпечення засобів вимірювання теплоти згоряння та густини природного газу. Проведено аналіз діючих державних первинних еталонів одиниць енергії та молярної частки газових компонентів стосовно можливості реалізації відтворення зазначених одиниць. Надано аргументи щодо необхідності проведення оцінки відповідності зазначених засобів згідно з вимогами Технічних регламентів. Наведено приклад реалізації відтворення одиниць теплоти згоряння та густини природного газу в Німеччині в рамках реалізації GERG project. Запропоновано концепцію побудови еталонного комплексу на базі гравіметричної установки з перспективою відтворення одночасно одиниць густини газу, масової та об'ємної теплоти згоряння газу прямим методом із максимально можливою точністю, що забезпечить простежуваність до одиниць системи New SI. Обґрунтовано застосування методу диференційного зважування та забезпечення квазі-стабільного термодинамічного стану для реалізації еталонного густиноміра. Для забезпечення відтворення одиниці об'ємної теплоти згоряння газу застосовано калібратор об'ємної витрати газу поршневого типу, побудованого за принципом паралельного використання трьох ідентичних поршневих секцій. Така конструкція дасть можливість забезпечити стабільне значення об'ємної витрати газу, який потрапляє в калориметричну колонку для спалювання. Калориметрична колонка повинна містити елементи для контролю параметрів забезпечення стехіометричного горіння. Запропоновано використання набору еталонних газових сумішей у комплекті з компараторами прямої дії для реалізації передавання одиниць до нижчих шаблів ланцюга простежуваності.

**Ключові слова:** теплота згоряння, калориметр, густиномір, природний газ, відтворення, передавання.

Отримано: 12.12.2018

Відредаговано: 21.12.2018

Схвалено до друку: 26.12.2018

### Вступ

Міжнародне бюро мір та ваг (BIPM) аносувало, що 2018 рік стане роком переходу на принципово нову концепцію метрологічного забезпечення вимірювань у сфері відтворення основних фізичних одиниць та, відповідно, запровадження Нової міжнародної системи одиниць вимірювань New SI. В основу нової системи будуть покладені визначення основних одиниць вимірювань на основі законів фізики та хімії. Фактично, така зміна забезпечить прив'язку законів природи до визначення основних фізичних одиниць та дозволить позбутися попереднього зв'язку одиниць SI з визначенням на основі фізичних артефактів (наприклад, платино-іридієвий прототип кілограма). Безперечно, підвищення точності відтворення основних одиниць вимірювання "скотиться" по піраміді простежуваності до її нижньої ланки та забезпечить зменшення невизначеності на кожному зі шаблів, тобто графічно зменшить його ширину.

Звертаючись до вітчизняних реалій, слід відзначити, що в Україні затверджено Постановою Кабінету Міністрів України від 28.12.2016 р. № 1041 Державну програму розвитку еталонної бази України до 2022 року. В рамках виконання основних заходів цієї програми, які покладені на наукові метрологічні центри (ННЦ "Інститут метрології", ДП "Укрметртестстандарт", ДП НДІ "Система", ДП "Івано-Франківськстандартметрологія"), проводиться створення, удосконалення та дослідження щодо забезпечення збереження державних первинних еталонів, які призначені для відтворення та передавання одиниць вимірювання. Разом з тим, зважаючи на тенденції переформатування промислової галузі у світі, зокрема активний перехід у рамках концепції Industry 4.0, яка визначально стосується саме запровадження нових технологій у виробництві та пропагує комплексний перехід від масового загального виробництва до індивідуального, з метою задоволення потреб окремих

© ННЦ «Інститут метрології», 2018

споживачів, виникає необхідність гнучко реагувати на поточні тенденції та вносити зміни щодо розширення і доповнення переліку перспективних напрямків розвитку метрологічного забезпечення. Зокрема, йдеться про актуальний напрямок реалізації простежуваності засобів вимірювання теплоти згоряння природного газу до верхніх ланок ланцюга калібрування, які наразі відсутні, оскільки питання відтворення одиниці теплоти згоряння природного газу в Україні поки що не вирішено на державному рівні.

### Аналіз останніх досягнень і публікацій

Необхідно відзначити, що в Україні створений та зберігається в ННЦ "Інститут метрології" державний первинний еталон одиниці енергії згоряння ДЕТУ 06–04–97, до складу якого входить калориметр, призначений для визначення енергії твердого та рідкого палива. Також, у рамках виконання Державної програми розвитку еталонної бази України до 2022 року, цей еталон проходить удосконалення щодо розширення функціональних можливостей із метою визначення енергії згоряння рідкого палива. До того ж у ДП "Укрметрестандарт" зберігається державний первинний еталон одиниці молярної частки компонентів у газових середовищах ДЕТУ 05–01–15, який забезпечує можливість відтворення різноманітних газових сумішей для забезпечення збереження вказаної одиниці, в тому числі й типу "природний газ", на основі первинних еталонних чистих газів, за допомогою гравіметричної установки та передавання розміру цієї одиниці методом звірення за допомогою газоаналітичних компараторів [1]. Тобто з допомогою ДЕТУ 05–01–15 можливе відтворення еталонних сумішей із відомим компонентним складом, проте, на жаль, немає можливості з достатньою точністю забезпечення передавання одиниці теплоти згоряння методом звірення із застосуванням компаратора, яким у першу чергу є еталонний газовий калориметр прямої дії.

Слід зазначити, що в Україні поступово здійснюється перехід від обліку природного газу в одиницях об'єму до взаєморозрахунків за спожиту енергію, якою володіє природний газ. У цьому напрямку проведено великий обсяг робіт, пов'язаних із законодавчо встановленими нормами [2], розробкою галузевих документів [3, 4], гармонізацією цілого ряду європейських нормативів [5, 6], підписання міждержавних Угод [7], які регламентують визначення енергетичної цінності газу. Тобто в найкоротші терміни вся газопромислова галузь, починаючи від видобувної, транспортної та закінчуючи індивідуальним споживанням, буде змушена доукомплектувати автоматизовані системи обліку природного газу засобами вимірювання теплоти згоряння газу. Разом з тим запроваджен-

ня в Україні обліку природного газу в одиницях енергії безумовно спричинить розроблення та виготовлення коректорів енергії газу, для яких, у свою чергу, необхідно провести оцінку відповідності згідно з вимогами Технічного регламенту засобів вимірювальної техніки. Слід відзначити, що в стандарті ДСТУ EN 12405 [8] наведено таблицю переліку газових сумішей із відомим значенням теплоти згоряння для проведення повного спектру випробувань коректорів енергії газу. Крім того, аналогічні вимоги щодо набору еталонних газових сумішей із визначеними значеннями теплоти згоряння та густини наведено у нормативних документах ДСТУ OIML R 140 [9] та ДСТУ ISO 15971 [6], які стосуються вимірювальних систем обліку газу та визначення енергії газу. Водночас одним із ключових якісних параметрів природного газу, нормування якого здійснюється в тому числі в [3], є число Воббе, яке пов'язує через аналітичну залежність теплоту згоряння газу з його відносною густиною і є критерієм подібності режиму горіння та взаємозамінності газів різних типів, які визначаються у відповідності до [10]. Число Воббе також є показником для визначення коефіцієнта корисної дії газоспоживчого обладнання. З цього випливає, що водночас із розвитком метрологічного забезпечення засобів вимірювання теплоти згоряння природного газу є актуальним питання вимірювання густини природного газу, оскільки густиноміри природного газу входять до сфери законодавчо регульованих ЗВТ щодо їх оцінки відповідності. Разом з тим на ринку присутній ряд вітчизняних виробників засобів вимірювання густини природного газу (ТОВ "Слот", м. Івано-Франківськ; ПКФ "Курс", м. Дніпро). Фактично, забезпечення простежуваності перелічених якісних показників природного газу повинно бути одним із ключових напрямків у плані реалізації інтеграційних процесів вітчизняної метрологічної служби в європейській метрологічній простір, в тому числі й у рамках приєднання України до Метричної конвенції, яке відбулося 7 серпня 2018 року.

Аргументуючи необхідність забезпечення реалізації відтворення одиниць теплоти згоряння та густини природного газу в Україні, слід відзначити, що наразі у світі невпинно збільшується процентне співвідношення ролі природного газу як енергоресурсу. Під природним газом розуміється вся номенклатура паливних газів, у тому числі: піролізний, доменний, коксовий, попутний нафтовий та газове моторне паливо. Такий стрімкий ріст пов'язаний, насамперед, із розвитком галузі використання LNG (зрідженого природного газу), що в свою чергу дозволило підвищити ефективність транспортування газу та відкрило нові логістичні напрямки, наприклад, морський шлях з Африки до країн Північної Європи (LNG термінал у Роттердамі) та зі Східної Азії в Північну Аме-

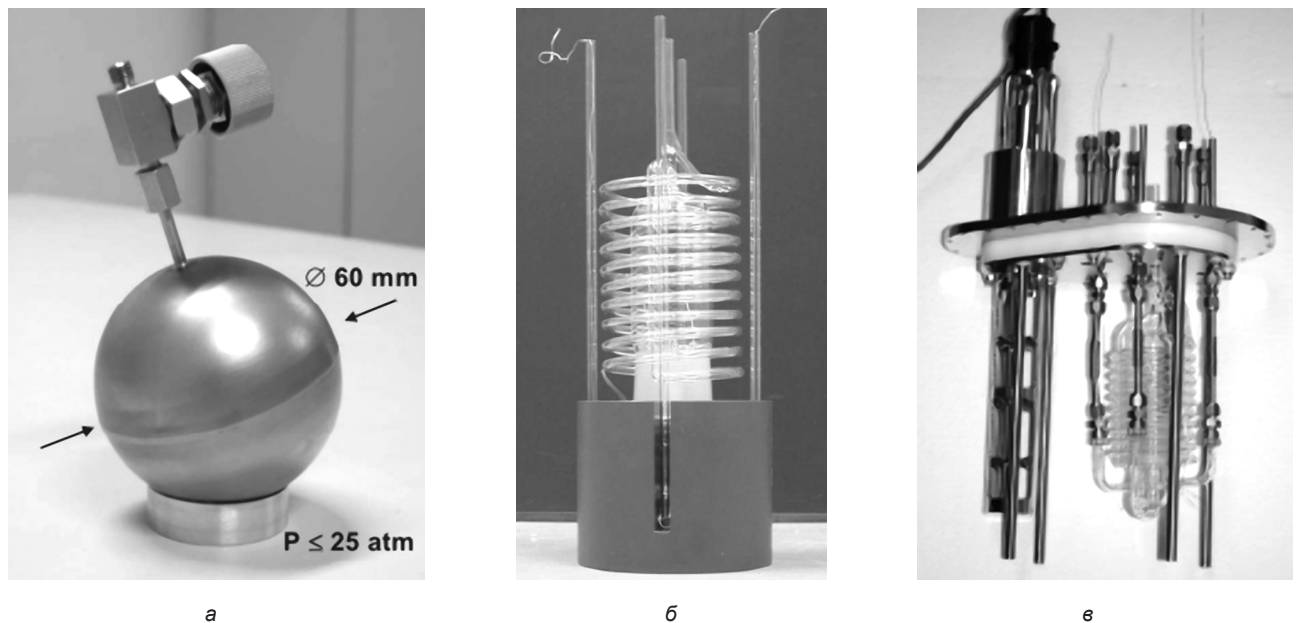


Рис. 1. Зовнішній вигляд сферичної ємності для газу (а), скляного пальника (б) та зібраного калориметра (в)

рику транстихоокеанським маршрутом. Фактично, компанії, які здійснюють постачання природного газу в різному вигляді та стані з різних континентів, і транспортні компанії, які зобов'язані забезпечувати якісні показники газу згідно з діючими нормативами, зіткнулися з проблемою, пов'язаною із забезпеченням високої точності визначення показників густини та теплоти згорання. З цією метою, наприклад, розроблено еталонний LNG густиномір [11], принцип якого побудований на основі прямого методу вимірювання маси газу. Водночас відкритим питанням залишаються визначені понад півстоліття тому прямим методом, шляхом спалювання в газових калориметрах [12], значення теплоти згорання чистих компонентів природного газу, які є показниками в стандартних довідкових даних при підрахунку теплоти згорання природного газу розрахунковим методом на основі компонентного складу, визначеного хроматографією. Відповідно, зважаючи на тенденції в рамках підвищення точності та достовірності обліку природного газу в одиницях енергії, провідні європейські метрологічні центри та регіональні газові компанії в 2002 році об'єдналися для створення нового газового калориметра з метою проведення вимірювань теплоти згорання чистого метану та інших компонентів природного газу в рамках так званого GERG project [13] та реалізації ланцюга простежуваності засобів вимірювання теплоти згорання природного газу до національних еталонів із можливістю внесення законодавчих змін до стандартних довідкових даних, наведених, наприклад, у [14].

Еталонний газовий калориметр, створений у рамках зазначеного GERG project, побудований за принципом відтворення прямим методом

одиниці масової теплоти згорання природного газу [13]. Для сферичної ємності (рис. 1а), яка заповнена метаном підвищеної чистоти, визначається маса газу, що міститься в ній, після чого здійснюється спалювання його визначеної частини в калориметричній колонці в середовищі інертного газу, причому пальник, для зменшення теплових втрат, виготовлений зі скла (рис. 1б). Задекларована точність еталонного калориметра 0,05 %. Зовнішній вигляд калориметра наведено на рис. 1в. Із застосуванням розробленого калориметра заплановано досягнення підвищення точності визначення теплоти згорання природного газу прямим методом.

Крім того, в РТВ (Фізико-технічному інституті Німеччини) розроблено еталонний газовий густиномір для проведення вимірювань густини природного газу прямим методом за допомогою безпосереднього зважування наповненої ним ємності [15]. Призначення еталонного густиноміра полягає у звірванні густини еталонних газових сумішей, які виготовлені за допомогою гравіметричної установки, з результатами, отриманими на основі розрахункового методу із застосуванням стандартних довідкових даних. Таке рішення прийнято на законодавчому рівні в Німеччині. Аналогічну процедуру, на думку авторів, доцільно запровадити в Україні.

Таким чином, можна стверджувати, що з точки зору нормативного забезпечення існує чітка необхідність створення технічної бази метрологічного забезпечення вимірювання теплоти згорання та густини природного газу. В разі реалізації відтворення аналогічних одиниць Україна могла б претендувати на участь у міжнародних звіреннях із перспективою отримання СМС-рядків та занесення до бази даних VIPM.

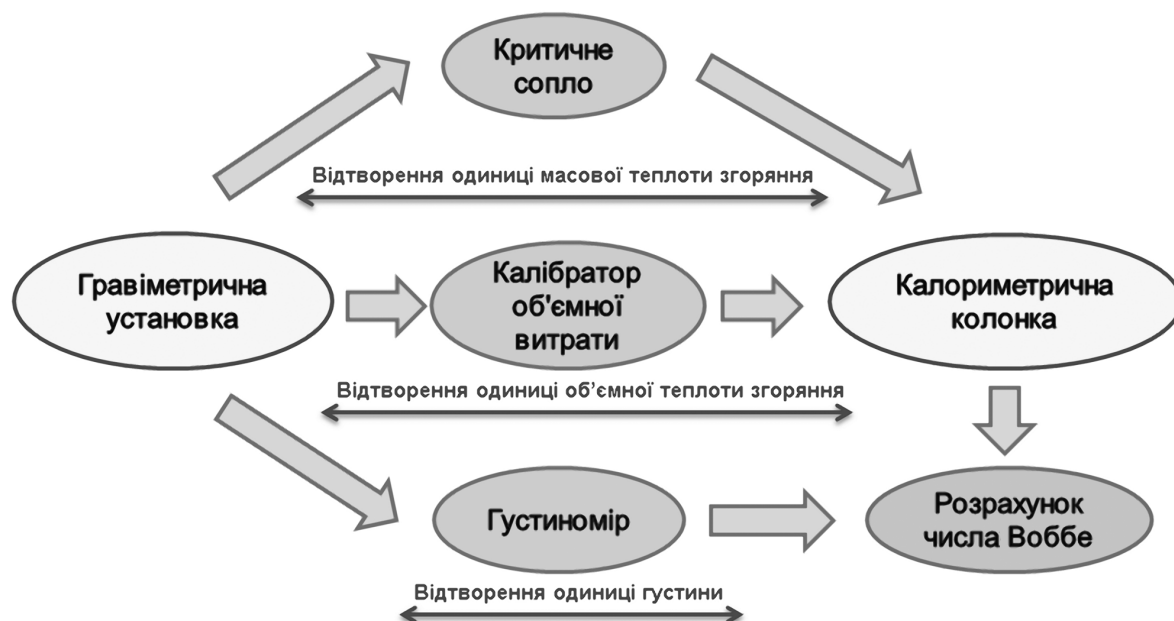


Рис. 2. Схематичне зображення відтворення одиниць теплоти згоряння та густини природного газу

### Мета роботи

Для реалізації можливості розвитку зазначеної галузі в Україні та забезпечення відтворення і передавання одиниць теплоти згоряння та густини природного газу авторами розроблено концепцію технічної реалізації найвищої ланки метрологічного забезпечення з максимально можливою точністю.

### Виклад основного матеріалу

Очевидним є той момент, що для реалізації відтворення фізичної одиниці теплоти згоряння та її зв'язку з одиницями системи New SI необхідно обрати прямий метод із застосуванням калориметра згоряння, оскільки хроматографічний (роздільний із точки зору компонентного складу природного газу) або опосередкований метод є недоцільним з міркувань точності та застосування для деяких газів, наприклад, піролізного або коксового. Крім того, застосування прямого, тобто нероздільного методу дає можливість провести дослідження газу в комплексі, оцінюючи таким чином, у тому числі, взаємодію його горючих та негорючих компонентів [16]. Для прямого методу доцільно виокремити волюметричний та гравіметричний методи, в результаті чого буде отримано одиницю об'ємної або масової теплоти згоряння природного газу. Проте слід відзначити, що чинний стандарт [6] рекомендує застосовувати гравіметричний метод для реалізації відтворення одиниці теплоти згоряння природного газу прямим методом за допомогою газового калориметра класу 0 з точністю на рівні 0,1 %. Аналогічно, для реалізації відтворення одиниці густини природного газу необхідно застосовувати теж прямий метод вимірювання маси газу. Таким чином, застосування в обох випадках

прямого методу реалізує безпосередню простежуваність первинної ланки метрологічного забезпечення до основних фізичних одиниць системи New SI.

Основними елементами найвищої ланки метрологічного забезпечення теплоти згоряння та густини природного газу в Україні, на думку авторів, повинні бути: гравіметрична установка для виготовлення газових сумішей, які будуть спалюватись; калібратор об'ємної витрати газу поршневого типу; калориметрична колонка для спалювання порції газу; газовий густиномір для визначення густини газових сумішей та метан підвищеної чистоти, який є реперним значенням для періодичного контролю відтворюваності та стабільності метрологічних характеристик. Стосовно функціональних обов'язків вказаного обладнання, то вони розподілені наступним чином: метан підвищеної чистоти та виготовлені за допомогою гравіметричної установки еталонні гази призначені для збереження одиниць теплоти згоряння та густини природного газу, а калориметрична колонка та газовий густиномір забезпечують відтворення та передавання вказаних одиниць. Таким чином буде реалізований неперервний ланцюг простежуваності засобів вимірювання теплоти згоряння та густини природного газу з допомогою набору еталонних газів із визначеними метрологічними характеристиками, які виконують функцію еталонів порівняння між двома щаблями ієрархії.

Такий комплекс елементів на базі гравіметричної установки дасть унікальну можливість забезпечувати одночасне відтворення одиниці густини газу, одиниці масової теплоти згоряння природного газу за рахунок застосування гравіметричної установки з критичними соплами для задання значення масової витрати газу та одиниці об'ємної



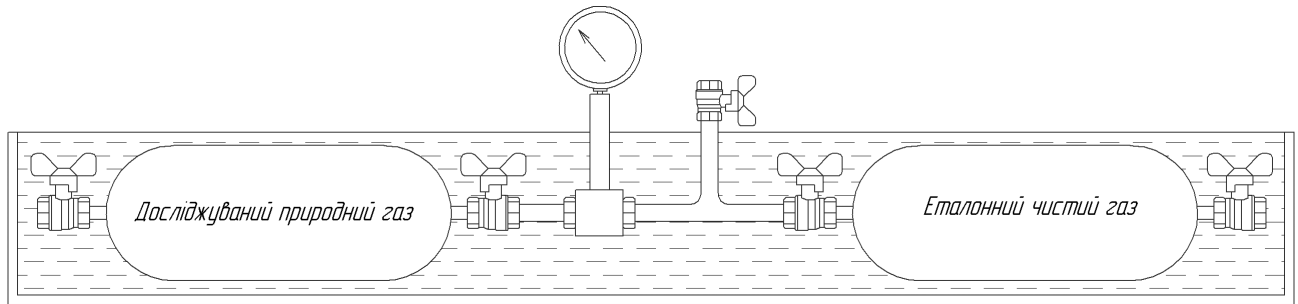


Рис. 3. Схема врівноваження значення тиску в балонах

теплоти згорання газу, шляхом введення до складу калібратора об'ємної витрати газу (рис. 2). Крім того, застосування густиніметра газу дасть додаткову можливість проводити визначення числа Воббе для природного газу.

Тепер зупинимось детальніше на складових елементах запропонованого комплексу. Установка гравіметричного типу для виготовлення газових сумішей шляхом змішування їх компонентів містить у собі набір еталонних ваг і гир та допоміжну вимірювальну апаратуру для контролю цього процесу.

Таким чином, після задання значення масової витрати газу для спалювання через сопло критичного витoku рівняння вимірювання процесу відтворення одиниці масової теплоти згорання природного газу  $H_m$  матиме наступний вигляд:

$$H_m = \frac{m_w \cdot c_w \cdot (T_{w2} - T_{w1})}{m_G}, \quad (1)$$

де  $m_w$  — маса рідини в калориметричній колонці, кг;  $m_G$  — маса газу, яка пройшла через критичне сопло протягом заданого часу, кг;  $c_w$  — теплоємність рідини, Дж/(кг·К);  $T_{w1}$ ,  $T_{w2}$  — температура рідини на початку і в кінці заміру, К.

Наступним елементом, введеним у систему, є газовий густиніметр для забезпечення відтворення одиниці густини газу, реалізований, за пропозицією авторів, методом диференційного зважування ємностей (балонів) з виготовленим за допомогою гравіметричної установки природним газом із певною густиною, який є досліджуваним та еталонним, у цьому випадку чистим газом [17]. Диференційний метод дозволяє проводити абсолютні вимірювання маси газу, нівелюючи при цьому масу балонів, що в свою чергу дає підвищення точності за рахунок зменшення відносної похибки (невизначеності). Підготовчим етапом проведення вимірювань є врівноваження мас обох балонів. В одній ємності міститься досліджуваний газ із відомими параметрами тиску та температури, а іншу ємність заповнюють до аналогічного тиску та температури чистим інертним газом з відомим значенням густини. Відповідно, під час диференційного зважування згідно з термодинамічним співвідношенням буде встановлено густину досліджуваного газу.

Процедура проведення вимірювань за допомогою розробленого густиніметра проводиться наступним чином: балони з досліджуваним та чистим газом, із попередньо визначеним та максимально ідентичним об'ємом (з цією метою вони виготовляються сферичної або циліндричної форми з компенсатором врівноваження їх маси до початку вимірювань), поміщають у ємність із рідиною для стабілізації, зменшення температурного градієнта та встановлення максимально ідентичної температури газів. Крім того, вихідні вентилі балонів під'єднують до протилежних камер вимірювача диференційного тиску. Вимірювання маси газу проводиться винятково в той момент, коли перепад тиску газу між вихідними вентилями балонів рівний нулю, тобто коли абсолютний тиск у двох балонах тотожний. Процедура досягнення такої рівності тисків полягає в наступному: на початковому етапі обидва балони занурені в ємність із рідиною, надалі балон, який заповнюється чистим газом, на основі відомого значення абсолютного тиску в балоні з досліджуваним газом заповнюється розрахунковим абсолютним тиском, більшим, ніж тиск досліджуваного газу. Наступним етапом виконують під'єднання давача диференційного тиску між виходами обох балонів і проводять вимірювання різниці тисків у балонах та за допомогою регулюючого клапана зменшують тиск у балоні з чистим газом до отримання нульових показів диференційного манометра, тобто встановлення умовного або ж квазістабільного термодинамічного стану (рис. 3). В результаті такої процедури отримують балони з умовно рівними термодинамічними характеристиками тиску та температури.

Завершальним етапом розрахунку густини природного газу проводиться диференційне зважування, з урахуванням виштовхувальної сили при зважуванні у повітрі, яка регламентується згідно з [18]. Відповідно, рівняння вимірювання процесу відтворення одиниці густини газу  $\rho_G$  проводиться за наступною формулою:

$$\rho_G = \rho_E + \frac{\Delta m}{V_G \cdot K}, \quad (2)$$

де  $\rho_E$  — густина еталонного (чистого) газу, кг/м<sup>3</sup>;  $\Delta m$  — різниця мас балонів із досліджуваним при-

родним та еталонним чистим газом, кг;  $K$  — коефіцієнт приведення об'єму природного газу до стандартних умов при тиску 101325 Па та температурі 293,15 К;  $V_G$  — об'єм досліджуваного природного газу, що міститься у балоні, м<sup>3</sup>, який визначається методом гідростатичного балансування як:

$$V_G = \frac{m_{WC} - m_A}{\rho_{WC} - \rho_A} \cdot \left( \frac{1 - \frac{\rho_A}{\rho_S}}{1 - \frac{\rho_A}{\rho_{WC}}} \right), \quad (3)$$

де  $m_{WC}$  — маса балона, наповненого дистильованою водою, кг;  $m_A$  — маса балона, зваженого в повітрі, кг;  $\rho_A$  — густина повітря, кг/м<sup>3</sup>, яка визначається згідно з [19];  $\rho_S$  — густина стандартних зважуваних об'єктів, приймається 8000 кг/м<sup>3</sup> [18];  $\rho_{WC}$  — густина дистильованої води, кг/м<sup>3</sup>, яка з урахуванням температурного розширення визначається як:

$$\rho_{WC} = \rho_{W0} \cdot (1 + \beta \cdot (293,15 - T_{WC})), \quad (4)$$

де  $\rho_{W0}$  — густина дистильованої води при 293,15 °К, кг/м<sup>3</sup>;  $\beta$  — коефіцієнт теплового розширення дистильованої води, 1/К;  $T_{WC}$  — температура дистильованої води, К.

Для реалізації відтворення одиниці об'ємної теплоти згорання газу, як зазначалося, застосовано калібратор об'ємної витрати спалюваного газу поршневого типу [20]. Установки поршневого типу за своїм принципом дії є дискретними, тобто в них послідовно проходять фази наповнення та витіснення контрольного об'єму газу. В нашому випадку вирішувалося поставлене завдання розроблення універсального калібратора об'ємної витрати газу, з обов'язковою умовою саме відтворення одиниць об'єму та об'ємної витрати газу за рахунок визначення геометричних розмірів циліндрів, такого, який буде спроможний функціонувати в неперервному режимі задання цих одиниць. Для реалізації калібратора запропоновано застосування комплексу з трьох ідентичних паралельно встановлених пневмоциліндрів, тобто установок поршневого типу, з незалежними приводами та засобами вимірювання пройденної відстані. На рис. 4 показано схему під'єднання трьох пневмоциліндрів для реалізації калібратора об'єму та об'ємної витрати газу.

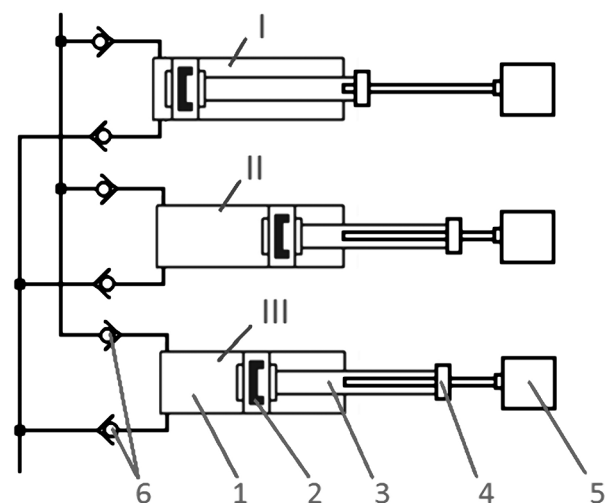


Рис. 4. Схема паралельного під'єднання пневмоциліндрів I, II і III для реалізації калібратора об'єму та об'ємної витрати газу: 1 — циліндр; 2 — поршневий розділювач; 3 — пустотілий шток; 4 — кульково-гвинтова пара; 5 — електродвигун; 6 — зворотні клапани

Для розробленого калібратора (рис. 4) діаграма руху пневмоциліндрів I, II та III буде мати наступний вигляд (рис. 5).

Основоположним моментом для реалізації калібратора об'єму та об'ємної витрати газу на базі трьох пневмоциліндрів є співрозмірна довжина ділянок 1–2, 2–3 та 3–4 для пневмоциліндра I (рис. 5), тобто кожна з них становить 1/3 всієї довжини ходу пневмоциліндра. Справедливим це твердження є і для пневмоциліндрів II і III, тобто всі ділянки, позначені на рис. 5, є однаковими і рівнодовжинними.

Процес стабільного задання значення об'ємної витрати газу згідно з рис. 5 буде здійснюватись на етапі витіснення наступним чином: спочатку розглянемо пневмоциліндри I і II, для них процес витіснення реалізований у межах ділянки 2–5, оскільки ділянка 3–4 є одночасно розгінною для пневмоциліндра II і ділянкою зупинки пневмоциліндра I; відповідно, наступна пара пневмоциліндрів II і III буде умовно генерувати стабільне значення об'ємної витрати газу в межах ділянки 5–7, із відмінністю в тому, що в цьому випадку ділянка 5–6 буде спільною для двох пневмоциліндрів II і III. Етап заповнення, у свою чергу, здійснюватиметься за наступною послідовністю: пневмоциліндр I після зупинки в т. 4 починає рухатись у зворотному напрямку для здійснення за-

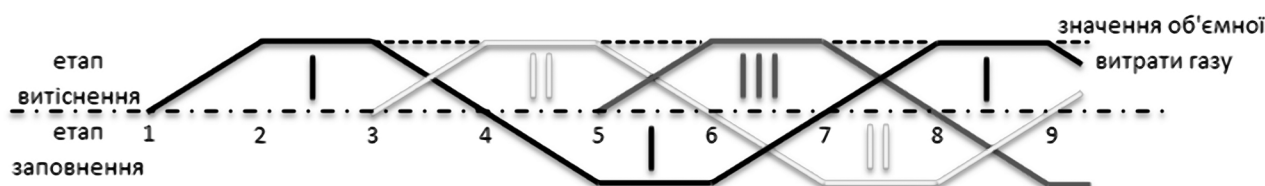


Рис. 5. Діаграма швидкості руху калібратора об'єму та об'ємної витрати газу на базі трьох ідентичних пневмоциліндрів

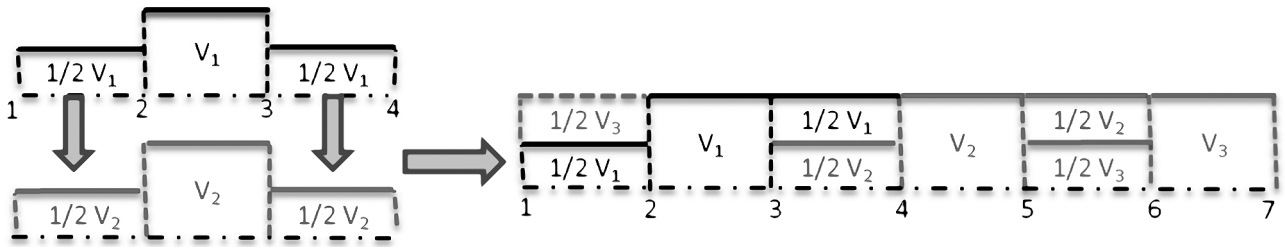


Рис. 6. Схема сумування об'ємів пневмоциліндрів при роботі калібратора

повнення новим об'ємом газу, його рух обмежений ділянками 4–7. Відповідно, в т. 7 пневмоциліндр I зупиняється і розпочинає рух в етапі витіснення на ділянці 7–8, яка є для нього розгінною і одночасно є ділянкою зупинки для пневмоциліндра III. Аналогічно для пневмоциліндра II етап заповнення новою порцією газу здійснюється на ділянці 6–9, причому в цей час на етапі витіснення здійснюється вихід газу з пневмоциліндрів III і I зі стабільним значенням об'ємної витрати газу.

На рис. 6 показано принцип накопичення об'єму витісненого газу із застосуванням методу сумування розподілених об'ємів пневмоциліндрів.

З урахуванням зазначеного, рівняння визначення об'єму природного газу  $V_{GP}$ , витісненого калібратором, матиме наступний вигляд:

$$V_{GP} = \sum_{i=1}^n V_P, \quad (5)$$

де  $n$  — кількість циклів;  $V_P$  — циклічний об'єм природного газу, витіснений пневмоциліндрами,  $m^3$ , який визначається як:

$$V_P = V_{1C} + V_{2C} + V_{3C}, \quad (6)$$

де  $V_{1C}$ ,  $V_{2C}$ ,  $V_{3C}$  — сумарний об'єм пневмоциліндрів I, II та III.

Визначення сумарного об'єму пневмоциліндрів проводиться згідно з рис. 6. Для прикладу наведемо розрахунок для пневмоциліндра I (аналогічно для II і III):

$$V_{1C} = \frac{1}{2}V_1 + V_1 + \frac{1}{2}V_1 = 2 \cdot V_1, \quad (7)$$

де  $V_1$  — об'єм пневмоциліндра I, який з урахуванням геометричних розмірів (радіуса  $r$  та довжини  $l$ ) визначається як:

$$V_1 = \pi \cdot R^2 \cdot \frac{l}{3}. \quad (8)$$

Відповідно, з урахуванням визначеного об'єму природного газу, рівняння вимірювання процесу відтворення одиниці об'ємної теплоти згорання природного газу  $H_V$  матиме наступний вигляд:

$$H_V = \frac{V_W \cdot c_W \cdot (T_{W2} - T_{W1})}{V_{GP} \cdot K}, \quad (9)$$

де  $V_W$  — об'єм рідини в калориметричній колонці,  $m^3$ , який визначається з урахуванням температурного розширення, формула (4).

На основі отриманих значень об'ємної теплоти згорання і густини газу та з урахуванням формул (2), (9) визначається також число Воббе для досліджуваного газу за наступною залежністю:

$$W_V = \frac{H_V}{\sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_A}}}. \quad (10)$$

Завершальним елементом системи має бути калориметрична колонка, яка, поряд з основними, повинна містити наступні елементи: давач вмісту залишкового кисню в димових газах; давач температури димових газів; регулятор кількості димових газів; давач вимірювання перепаду тиску між камерою подачі газу в пальник і вихідним трубопроводом димових газів для контролю процесу стехіометричного горіння [21] та розроблятися з урахуванням особливостей, зазначених у [22]. Конструкція калориметричної колонки показана схематично на рис. 7.

Разом з тим для реалізації повноцінного ланцюга простежуваності засобів вимірювання теплоти згорання та густини природного газу необхідно забезпечити технічну можливість передавання відтворених одиниць до нижчих ланок ланцюга, тобто до робочих еталонів та робочих ЗВТ. З цією метою пропонується для здійснення передавання одиниць застосувати набори еталонних газових сумішей, звірені за допомогою компаратора прямої дії, для встановлення значення теплоти згорання. При цьому співвідношення між границями невизначеностей для засобів вимірювання теплоти згорання між ланками повинно бути тотожним із класами точності від 0 до 3 (від 0,1 до 1,0 %), які зазначені в нормативному документі [5]. Відповідно, для засобів вимірювання густини необхідно застосувати набір газових сумішей зі значенням густини, пропорційно розподіленим відносно діапазону вимірювання густиномірів.

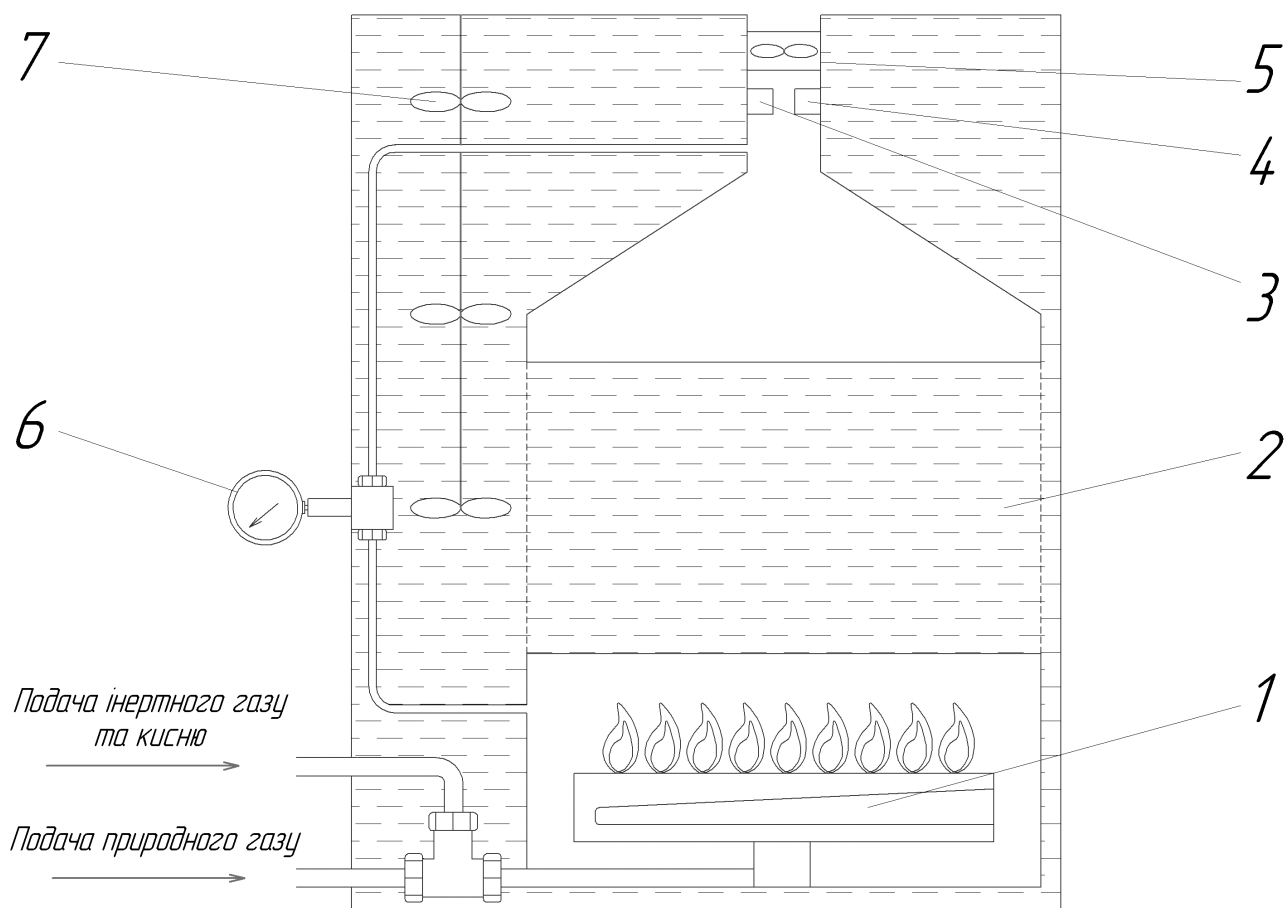


Рис. 7. Конструкція калориметричної колонки: 1 — пальник; 2 — теплообмінник; 3 — давач вмісту залишкового кисню в димових газах; 4 — давач температури димових газів; 5 — регулятор кількості димових газів; 6 — давач вимірювання перепаду тиску; 7 — механічний перемішувач рідини

### Висновки

Обґрунтовано необхідність і запропоновано концепцію реалізації системи відтворення, зберігання та передавання одиниць масової і об'ємної одиниці теплоти згорання, одиниці густини природного газу та визначення числа Воббе. Це у свою чергу дасть можливість забезпечення простежуваності робочих засобів вимірювання теплоти згорання та густини природного газу до основних фізичних одиниць систе-

ми New SI. В Україні створені та зберігаються державний первинний еталон одиниці енергії згорання ДЕТУ 06–04–97 та державний первинний еталон одиниці молярної частки компонентів у газових середовищах ДЕТУ 05–01–15. Вважаємо за доцільне розглянути пропозицію щодо включення до Державної програми розвитку еталонної бази України за напрямом проведення удосконалення зазначених державних первинних еталонів.

## Пути воспроизведения и передачи единиц теплоты сгорания и плотности природного газа в Украине

И.С. Петришин, А.А. Бас, Л.А. Присяжнюк

ГП "Івано-Франковскстандартметрологія", ул. Вовчинецкая, 127, 76007, Івано-Франковск, Украина  
alexandr.sanya@gmail.com

### Аннотация

Приведено обоснование необходимости развития в Украине отрасли метрологического обеспечения средств измерения теплоты сгорания и плотности природного газа. Выполнен анализ действующих государственных первичных эталонов единиц энергии и молярной доли газовых компонентов относительно возможности реализации воспроизведения указанных единиц. Предоставлены аргументы о необходимости проведения оценки соответствия



указанных средств согласно требованиям Технических регламентов. Приведен пример реализации воспроизведения единиц теплоты сгорания и плотности природного газа в Германии в рамках реализации GERG project. Предложена концепция построения эталонного комплекса на базе гравиметрической установки с перспективой воспроизведения одновременно единиц плотности газа, массовой и объемной теплоты сгорания газа прямым методом с максимально возможной точностью, что обеспечит прослеживаемость к единицам системы New SI. Обосновано применение метода дифференциального взвешивания и обеспечения квазистабильного термодинамического состояния для реализации эталонного плотномера. Для обеспечения воспроизведения единицы объемной теплоты сгорания газа применен калибратор объемного расхода газа поршневого типа, построенного по принципу параллельного использования трех идентичных поршневых секций. Такая конструкция позволит обеспечить стабильное значение объемного расхода газа, который попадает в калориметрическую колонку для сжигания. Калориметрическая колонка должна содержать элементы для контроля параметров обеспечения стехиометрического горения. Предложено использование набора эталонных газовых смесей в комплекте с компараторами прямого действия для реализации передачи единиц к низшим ступеням цепи прослеживаемости.

**Ключевые слова:** теплота сгорания, калориметр, плотномер, природный газ, воспроизведение, передача.

## Ways of reproduction and transfer of the natural gas combustion heat and density units in Ukraine

I. S. Petryshyn, O. A. Bas, L. O. Prysyzhnyuk

SE "Ivano-Frankivskstandartmetrolohiya", Vovchynetska Str., 127, 76007, Ivano-Frankivsk, Ukraine  
alexandr.sanya@gmail.com

### Abstract

The article presents the rationale for the need to develop in Ukraine the industry of metrological support for measuring the heat of combustion and density of natural gas. The analysis of available state primary measurement standards of energy units and molar fraction of gas components regarding the possibility of implementing the reproduction of these units has been carried out. The arguments on the need to perform a conformity assessment of these measuring instruments in accordance with the requirements of Technical Regulations have been provided. The example of the implementation of the reproduction of units of heat of combustion and density of natural gas in Germany in the framework of the implementation of the GERG project. The concept of building a reference complex based on a gravimetric setup with the prospect of simultaneously reproducing the units of gas density, mass and volumetric heat of gas combustion direct method with the highest possible accuracy has been proposed, that will insure traceability to units of the New SI system. The use of the method of differential weighing and providing a quasi-stable thermodynamic state for the implementation of the reference densimeter is justified. To ensure the reproduction of the gas volumetric heat combustion unit, a piston-type volumetric gas flow calibrator is used, constructed on the principle of parallel use of three identical piston sections. Such a design will enable to provide a stable value of the volumetric flow of gas entering the calorimeter burning column. The calorimeter should contain elements to control the security parameters the stoichiometric combustion. It is proposed to use a set of standard gas mixtures together with direct-acting comparators to realize the transfer of units to the lower levels of the traceability chain.

**Keywords:** combustion heat, calorimeter, densimeter, natural gas, reproduction, transfer.

### Список літератури

1. ДСТУ ISO 6143–2003. Аналіз газів. Методи компарування для визначення та перевіряння складу повітряних газових сумішей (ISO 6143:2001, IDT) [Чинний від 2003–07–01]. Київ: Держспоживстандарт України, 2003. 31 с.
2. Закон України "Про ринок природного газу". Відомості Верховної Ради (ВВР). 2015. № 27. С. 234.
3. Правила визначення обсягів та фізико-хімічних показників природного газу при комерційному обліку. Міністерство енергетики та вугільної промисловості України. 20 с.

4. Кодекс газотранспортної системи, затверджений Постановою Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг від 30.09.2015 № 2493.
5. ДСТУ ISO 15112:2009. Природний газ. Визначення енергії (ISO 15112:2007, IDT) [Чинний від 2011–01–01]. Київ: Держспоживстандарт України, 2010. 54 с.
6. ДСТУ ISO 15971:2014. Природний газ. Вимірювання властивостей. Теплота згоряння та число Воббе (ISO 15971:2008, IDT) [Чинний від 2015–05–01]. Київ: Держспоживстандарт України, 2014. 50 с.
7. Договір про заснування Енергетичного Співтовариства [Дата набрання чинності для України: 01.02.2011].
8. ДСТУ EN 12405:2006. Коректори до лічильників газу електронні. Загальні технічні умови (EN 12405:2002, IDT) [Чинний від 2007–01–01]. Київ: Держспоживстандарт України, 2006. 46 с.
9. ДСТУ OIML R 140:2014. Вимірювальні системи для газоподібного палива (OIML R 140, edition 2007, IDT) [Чинний від 2016–01–01]. Київ: Мінекономрозвитку, 2014. 111 с.
10. ДСТУ ГОСТ EN 437:2014. Випробувальні гази. Випробувальний тиск. Категорії приладів (ГОСТ EN 437–2012, IDT; EN 437:2003, IDT) [Чинний від 2014–11–01]. Київ: Мінекономрозвитку, 2014. 48 с.
11. Richter M., Kleinrahm R., Lentner R., Span R. Development of a special single-sinker densimeter for cryogenic liquid mixtures and first results for a liquefied natural gas (LNG). *The Journal of Chemical Thermodynamics*, 2016, vol. 93, pp. 205–221.
12. Hyde C.G., Jones M.W. Gas Calorimetry: The Determination of the Calorific Value of Gaseous Fuels. London, Ernest Benn Ltd, 2nd edition, 1960. 456 p.
13. Schley P., Beck M., Uhrig M., Sarge S.M., Rauch J., Haloua F., Filtz J.-R., Hay B., Yakoubi M., Escande J., Benito A., Cremonesi P.L. Measurements of the Calorific Value of Methane with the New GERG Reference Calorimeter. *International Journal of Thermophysics*, 2010, vol. 31, issue 4–5, pp. 665–679.
14. ДСТУ ISO 6976:2009. Природний газ. Обчислення теплоти згоряння, густини, відносної густини і числа Воббе на основі компонентного складу (ISO 6976:1995/Cor.2:1997, Cor.3:1999, IDT) [Чинний від 2011–01–01]. Київ: Держспоживстандарт України, 2010. 55 с.
15. Richter M., Kleinrahm R., Glos S., Wagner W., Span R., Schley P., Uhrig M. A Two-Sinker Densimeter for Accurate Measurements of the Density of Natural Gases at Standard Conditions. *International Journal of Thermophysics*, 2010, vol. 31, issue 4–5, pp. 680–697.
16. Петришин І.С., Присяжнюк Т.І., Бас О.А. Дослідження енергетичної цінності природного газу в споживачів комунально-побутового сектору. *Метрологія та прилади*. 2015. № 6 (56). С. 42–49.
17. Петришин І.С., Бас О.А., Присяжнюк Л.О. Еталонний густиномір природного газу. *Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія–2018): тези доп. XI Міжнар. наук.-техн. конф. Харків, 2018. С. 34.*
18. ДСТУ OIML D 28:2008. Умовне значення зважування в повітрі (OIML D 28:2004, IDT) [Чинний від 01–01–2010]. Київ: Держспоживстандарт України, 2010. 13 с.
19. ДСТУ OIML R 111–1:2008. Гирі класів E1, E2, F1, F2, M1, M1–2, M2, M2–3 та M3. Частина 1. Загальні технічні вимоги та методи випробувань (OIML R 111–1:2004, IDT) [Чинний від 01–01–2010]. Київ: Держспоживстандарт України, 2010. 72 с.
20. Петришин І.С., Бас О.А., Присяжнюк Л.О. Калібратор об'ємної витрати газу поршневого типу. *Техніка і прогресивні технології у нафтогазовій інженерії — 2018: тези доп. Міжнар. наук.-практ. конф. Івано-Франківськ, 2018. С. 21–24.*
21. Poinot T., Veynante D. Theoretical and Numerical Combustion. Second Edition. Erdwards, 2005. 540 p.
22. Петришин І.С., Присяжнюк Л.О., Бас О.А. Калориметр природного газу прямої дії. *Метрологія та прилади*. 2017. № 6. С. 8–15.

#### References

1. DSTU ISO 6143–2003. *Analiz haziv. Metody komparuvannya dlya vyznachennya ta pereviryannya skladu povirochnykh hazovykh sumishei* [Gas analysis. Comparison methods for determining and checking the composition of calibration gas mixtures] (ISO 6143:2001, IDT). Kyiv, Derzhspozhyvstandart of Ukraine, 2003. 31 p. (in Ukrainian).
2. The Law of Ukraine “On the Natural Gas Market”. *Vidomosti Verkhovnoi Rady — State Paper of Verkhovna Rada*, 2015, no. 27, p. 234 (in Ukrainian).
3. *Pravyla vyznachennya obsyahiv ta fizyko-khimichnykh pokaznykiv pryrodnoho hazu pry komertsii-notu obliku* [Rules for determining volumes and physico-chemical parameters of natural gas in commercial accounting]. Ministry of Energy and Coal Industry of Ukraine. 20 p. (in Ukrainian).
4. *Kodeks hazotransportnoi systemy* [The Code of the gas transmission system]. Approved by the Resolution No. 2493 of the National Commission, which carries out state regulation in the spheres of energy and utilities from 30.09.2015 (in Ukrainian).

5. DSTU ISO 15112:2009. *Pryrodnyi haz. Vyznachen-nya enerhii* [Natural gas. Energy determination] (ISO 15112:2007, IDT). Kyiv, Derzhspozhyvstandart of Ukraine, 2010. 54 p. (in Ukrainian).
6. DSTU ISO 15971:2014. *Pryrodnyi haz. Vymiryuvannya vlastyvostei. Teplota zhoryannya ta chyslo Vobbe* [Natural gas. Measurement of properties. Calorific value and Wobbe index] (ISO 15971:2008, IDT). Kyiv, Derzhspozhyvstandart of Ukraine, 2014. 50 p. (in Ukrainian).
7. *Dohovir pro zasnuvannya Enerhetychnoho Spivtovarystva* [Treaty on the Establishment of the Energy Community] [For Ukraine effective from 2011–02–01] (in Ukrainian).
8. DSTU EN 12405:2006. *Korektory do lychnykyk hazu elektronni. Zahalni tekhnichni umovy* [Gas meters — Gas-volume electronic conversion devices. General specifications] (EN 12405:2002, IDT). Kyiv, Derzhspozhyvstandart of Ukraine, 2006. 46 p. (in Ukrainian).
9. DSTU OIML R 140:2014. *Vymiryvalni systemy dlya hazopodibnoho palyva* [Measuring systems for gaseous fuel] (OIML R140, edition 2007, IDT). Kyiv, Ministry of Economic Development and Trade of Ukraine, 2014. 111 p. (in Ukrainian).
10. DSTU GOST EN 437:2014. *Vyprobuvalni hazy. Vyprobuvalnyi tysk. Katehoriy pryladiv* [Test gases. Test pressure. Appliance categories] (GOST EN 437–2012, IDT; EN 437:2003, IDT). Kyiv, Ministry of Economic Development and Trade of Ukraine, 2014. 48 p. (in Ukrainian).
11. Richter M., Kleinrahm R., Lentner R., Span R. Development of a special single-sinker densimeter for cryogenic liquid mixtures and first results for a liquefied natural gas (LNG). *The Journal of Chemical Thermodynamics*, 2016, vol. 93, pp. 205–221.
12. Hyde C.G., Jones M.W. *Gas Calorimetry: The Determination of the Calorific Value of Gaseous Fuels*. London, Ernest Benn Ltd, 2nd edition, 1960. 456 p.
13. Schley P., Beck M., Uhrig M., Sarge S.M., Rauch J., Haloua F., Filtz J.-R., Hay B., Yakoubi M., Escande J., Benito A., Cremonesi P.L. Measurements of the Calorific Value of Methane with the New GERG Reference Calorimeter. *International Journal of Thermophysics*, 2010, vol. 31, issue 4–5, pp. 665–679.
14. DSTU ISO 6976:2009. *Pryrodnyihaz. Obchyslennya teploty zhoryannya, hustyny, vidnosnoi hustyny i chysla Vobbe na osnovi komponentnoho skladu* [Natural gas. Calculation of calorific values, density, relative density and Wobbe index from composition] (ISO 6976:1995/Cor.2:1997, Cor.3:1999, IDT). Kyiv, Derzhspozhyvstandart of Ukraine, 2010. 55 p. (in Ukrainian).
15. Richter M., Kleinrahm R., Glos S., Wagner W., Span R., Schley P., Uhrig M. A Two-Sinker Densimeter for Accurate Measurements of the Density of Natural Gases at Standard Conditions. *International Journal of Thermophysics*, 2010, vol. 31, no. 4, pp. 680–697.
16. Petryshyn I.S., Prysiazhniuk T.I., Bas O.A. *Doslidzhennya enerhetychnoi tsinnosti pryrodnoho hazu v spozhyvachiv komunalno-pobutovoho sektoru* [Investigation of Energy Value of Natural Gas for Consumers of the Utility Sector]. *Metrolohiia ta Prylady — Metrology and Instruments*, 2015, no. 6 (56), pp. 42–49 (in Ukrainian).
17. Petryshyn I.S., Bas O.A., Prysiazhniuk L.O. Etalonnyi hustynomir pryrodnoho hazu [Standard gas density meter]. *Metrology and Measurement Techniques (Metrology–2018): Proceedings of XI International Scientific and Technical Conference*. Kharkiv, 2018, p. 34 (in Ukrainian).
18. DSTU OIML D 28:2008. *Umovne znachennya zvezhuvannya v povitri* [Conventional value of the result of weighing in air] (OIML D 28:2004, IDT). Kyiv, Derzhspozhyvstandart of Ukraine, 2010. 13 p. (in Ukrainian).
19. DSTU OIML R 111–1:2008. *Gyri klasiv E1, E2, F1, F2, M1, M1–2, M2, M2–3 ta M3. Chastyna 1. Zahalni tekhnichni vymohy ta metody vyprovuvan* [Weights of classes E1, E2, F1, F2, M1, M1–2, M2, M2–3 and M3. Part 1: Metrological and technical requirements] (OIML R 111–1:2004, IDT). Kyiv, Derzhspozhyvstandart of Ukraine, 2010. 72 p. (in Ukrainian).
20. Petryshyn I.S., Bas O.A., Prysiazhniuk L.O. *Kalibrator obiemnoi vytraty hazu porshnevoho typu* [Calibrator of volumetric gas consumption of a piston type]. *Engineering and advanced technologies in oil and gas engineering — 2018: Proceedings of International scientific and practical conference*. Ivano-Frankivsk, 2018, pp. 21–24 (in Ukrainian).
21. Poinot T., Veynante D. *Theoretical and Numerical Combustion*. Second edition. Erdwards, 2005. 540 p.
22. Petryshyn I.S., Prysiazhniuk L.O., Bas O.A. *Kalorymetr Pryrodnoho Hazu Priamoi Dii* [Calorimeter of direct action for natural gas]. *Metrolohiia ta Prylady — Metrology and Instruments*, 2017, no. 6, pp. 8–15 (in Ukrainian).