

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-60-01>

УДК 681.121.6:615.84

Дементьєв Сергій Юрійович, к.т.н.

<https://orcid.org/0009-0006-1322-6756>

Дементьєв Юрій Вікторович, к.т.н.

Яремко Світлана Анатоліївна, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0002-0605-9324>

Вінницький торговельно-економічний інститут Державного торговельно-економічного університету, м. Вінниця, Україна

КАЛІБРУВАННЯ ВИТРАТОМІРА МЕДИЧНОГО КИСНЮ

Дементьєв С. Ю., Дементьєв Ю. В., Яремко С. А. Калібрування витратоміра медичного кисню. У статті вирішується задача калібрування витратоміра кисню для подальшого точного та надійного обліку медичного кисню в лікувальних закладах, де кисень транспортується трубопроводами у газоподібному стані. Описано доцільність застосування теплових масових перетворювачів витрати, які забезпечують високу чутливість, широкий діапазон вимірювань і можливість визначення витрати за стандартних умов без додаткових сенсорів тиску й температури. Запропоновано методику калібрування витратоміра на спеціалізованому стенді, що дозволяє підвищити точність вимірювань до 2%. У статті детально описано побудову математичної моделі коефіцієнта стисливості кисню. Також наведено алгоритм побудови та реалізації коректуючої функції витратоміра, що враховує відхилення його показів від реальних значень. Продемонстровано ефективність запропонованого підходу, що дозволяє інтегрувати отримані результати в мікропроцесорну систему витратоміра та досягти високої точності при вимірюванні та підрахунку спожитого кисню за стандартних умов.

Ключові слова: медичний кисень, витратомір, тепловий масовий перетворювач, калібрування, коефіцієнт стисливості, стандартні умови, облік витрати, математичне моделювання, мікропроцесор, корекція витрати.

Dementiev S., Dementiev Y., Yaremko S. Medical oxygen flowmeter calibration. The article solves the problem of calibrating an oxygen flowmeter for subsequent accurate and reliable accounting of medical oxygen in medical institutions, where oxygen is transported through pipelines in a gaseous state. The feasibility of using thermal mass flow converters is described, which provide high sensitivity, a wide measurement range and the ability to determine the flow rate under standard conditions without additional pressure and temperature sensors. A method for calibrating a flowmeter on a specialized stand is proposed, which allows increasing the measurement accuracy to 2%. The article describes in detail the construction of a mathematical model of the oxygen compressibility coefficient. An algorithm for constructing and implementing a corrective function of a flowmeter that takes into account the deviation of its readings from real values is also given. The effectiveness of the proposed approach is demonstrated, which allows integrating the obtained results into the microprocessor system of the flow meter and achieving high accuracy in measuring and calculating the consumed oxygen under standard conditions.

Keywords: medical oxygen, flow meter, thermal mass flowmeter, calibration, compressibility coefficient, standard conditions, flow accounting, mathematical modeling, microprocessor, flow correction.

Постановка проблеми. В лікувальних закладах активно використовується медичний кисень (в подальшому кисень), який зберігається у кисневих балонах або в рідкому стані в резервуарі лікувального закладу і після випарника надходить до відділень по трубопроводах. Тиск кисню в трубопроводах не перевищує 600 кПа, а температура може змінюватись від 0°C до 30°C. Витрата кисню по окремому трубопроводу структурного підрозділу лікарні, як правило, може змінюватись від 10 літрів за хвилину до 180 літрів за хвилину за стандартних умов.

Витрату кисню по окремим структурним підрозділам лікувального закладу потрібно контролювати, а його загальну спожиту кількість для взаємних розрахунків приводити до стандартних умов – тиск $P_c = 101.0325$ кПа та температура $T_c = 293.15$ °K.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомо досить багато методів обліку кількості газів включаючи кисень [1], [2], [4]. Але більшість описаних методів орієнтовані на значно більші значення витрати кисню, потребують додаткових перетворювачів тиску та температури та мають високу вартість. Задача надійного, компактного, прийняттого по вартості приладу витрати та кількості кисню із застосуванням сучасних приладів та технологій на сьогодні є актуальною.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Актуальною є задача створення методики та стенду для калібрування та перевірки витратомірів кисню з перекриттям витрат кисню, характерних для окремих підрозділів лікувальних закладів, що дасть змогу підвищити їх точність.

Формулювання мети дослідження. Метою дослідження є створення стенду для калібрування витратомірів кисню лікувальних закладів, отримання методики калібрування та моделей коректуючої функції витратоміра для підвищення його точності, а також експериментальна перевірка отриманих результатів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Попередній теоретичний аналіз, а також практичні експерименти показали, що для вирішення задачі обліку кисню з прийнятною точністю найбільш оптимально використовувати тепловий масовий первинний перетворювач (в подальшому перетворювач) витрати. Такі перетворювачі мають високу чутливість, працюють при низьких швидкостях потоку, мають широкий динамічний діапазон по витраті та забезпечують мале значення втрати тиску при протіканні кисню на відмінну від об'ємних витратомірів. Теплові перетворювачі мають декілька температурних сенсорів, які фіксують зміну температури середовища в залежності від швидкості потоку газу та його густини. Густина газу залежить від тиску газу та його температури. Тому при відповідному налаштуванні такі перетворювачі дають змогу визначати витрату газу за стандартних умов без окремих перетворювачів абсолютного тиску газу та температури, оскільки є масовими витратомірами за принципом роботи. Теплові перетворювачі витрати реалізуються на дискретних температурних сенсорах або входять до складу спеціалізованих чіпів теплових перетворювачів витрати.

Перетворювачі первинно налаштовані на облік потоку повітря та мають середню похибку визначення витрати маси до 5%.

Для підвищення точності витратоміра кисню до 2% пропонується виконувати його калібрування на спеціалізованому стенді саме в кисневому середовищі.

На рис. 1 наведено блок-схему запропонованого стенду калібрування витратоміра кисню з використанням теплового перетворювача з спеціалізованим сенсором.

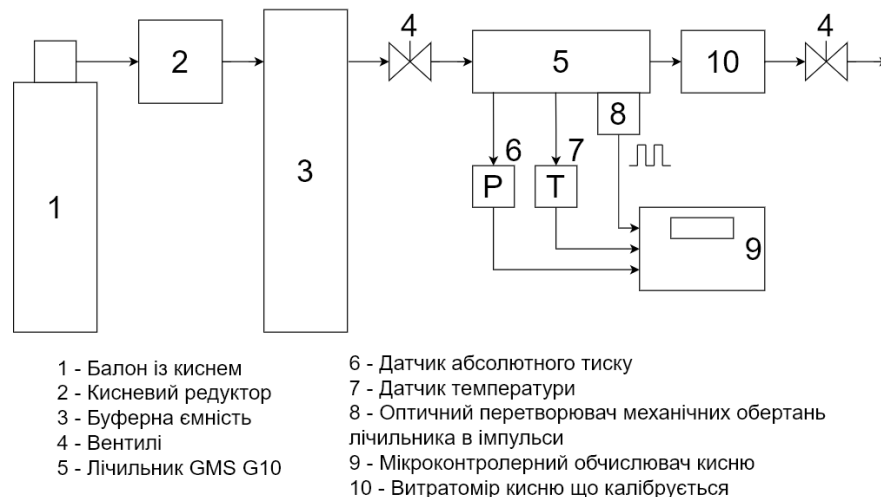


Рис. 1. Блок-схема стенду калібрування витратоміра кисню

Блок обчислювача 9 визначає реальну витрату кисню Q_{pi} в літрах за хвилину в робочих умовах за співвідношенням:

$$Q_{pi} = \frac{0.06 \cdot f_i}{c}, \quad (1)$$

де f_i – частота імпульсного сигналу від лічильника GMS G10, Гц;

c – кількість імпульсів від лічильника GMS G10 на одиницю об'єму кисню за робочих умов.

Оскільки стандартний імпульсний вихід такого лічильника формує сигнали із значенням 10 імпульсів на один кубічний метр газу за робочих умов, то для більш точного визначення значення витрати кисню обчислювачем розроблено оптичний перетворювач 8 (рис. 1) швидкості механічного обертання зубчастого колеса лічильника GMS G10 у вихідні імпульси і згідно паспорта лічильника ціна такого імпульсу c складає 9472.1 імпульсів на кубічний метр.

Для приведення витрати Q_{pi} кисню до стандартних умов Q_{ci} обчислювач 9 виконує корекцію витрати [1] при надходженні кожного i -го імпульсу від лічильника з врахуванням поточних значень абсолютного тиску P_i , абсолютної температури T_i та коефіцієнта стисливості z_i за наступним співвідношенням:

$$Q_{ci} = Q_{pi} \cdot \frac{P_i T_c}{P_c T_i z_i} \quad (2)$$

У співвідношенні (2) коефіцієнт стисливості z_i визначає відношення фактора стисливості кисню за робочих умов до його фактора стисливості за стандартних умов і може бути визначений по табличним даним чи по рівнянню стану з [2]. Але використання такого підходу в мікропроцесорних пристроях визначення витрати та кількості кисню потребує постійного перерахунку табличних значень коефіцієнта стисливості при широких діапазонах зміни тиску та температури та вноситься помилка інтерполяції при його обрахунку. Обчислення ж коефіцієнта стисливості через його густину з використанням рівняння стану з [2] потребує значних ресурсів мікропроцесора та витрати часу та точності при вирішенні складного рівняння стану.

Значно зручніше визначати коефіцієнт стисливості z_i за допомогою математичної моделі $z_i = f(P_i, T_i)$.

Для отримання математичної моделі обчислення коефіцієнту стисливості кисню в діапазоні абсолютного тиску від 0.15 до 7 МПа та діапазоні зміни його температури від 243 до 383 °К на основі даних з [1] був складений ортогональний план експерименту, факторами якого є тиск кисню та його температура, який складається з 64 точок.

Для побудови моделі в зазначеному діапазоні P та T застосовувався програмний математичний пакет TableCurve 3D для побудови варіантів поліномів та підготовлений заздалегідь план експерименту з 64 точок. Характер залежності $z_i = f(P_i, T_i)$ має вигляд площини наведеної на рис.2.

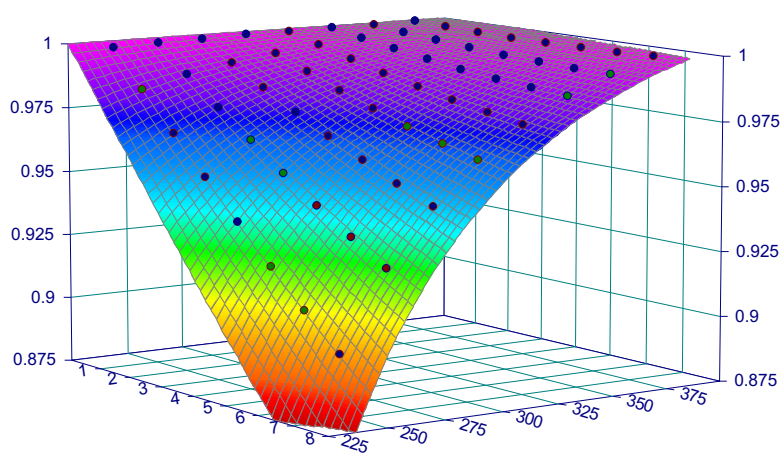


Рис. 2. Характер залежності коефіцієнта стисливості кисню від тиску та температури $z_i = f(P_i, T_i)$

Критерієм вибору моделі є відсутність коливань моделі та максимальне значення коефіцієнта кореляції. В результаті отримана модель обчислення значення коефіцієнта стисливості кисню має такий вигляд:

$$z = \frac{a + cP + e \ln T + gP^2 + i(\ln T)^2 + kP \ln P}{1 + bP + d \ln T + fP^2 + h(\ln T)^2 + jP \ln T} \quad (3)$$

де $a = 1.000041367$, $b = -0.0054107$, $c = -0.00965199$, $d = -0.39590557$,
 $e = -0.39592056$, $f = 1.55918e-05$, $g = 2.04318e-05$, $h = 0.039719427$,
 $i = 0.039720776$, $j = 0.000951129$, $k = 0.001657155$.

Для моделі (3) температура T має розмірність $^{\circ}\text{K}$, а абсолютний тиск P має розмірність мПа . Коефіцієнт кореляції моделі має значення $r^2 = 0.9999994932$, а максимальне відхилення моделі складає 0.0056 відсотка. Розподіл похибки обчислення коефіцієнта стисливості по моделі (3) наведено на рис. 3.

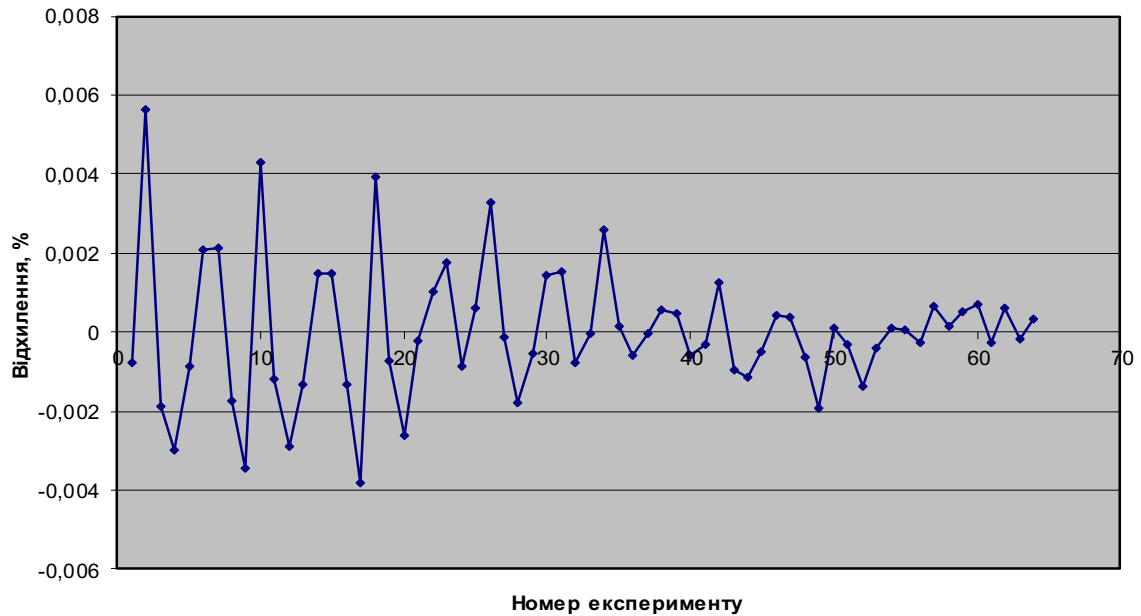


Рис. 3. Розподіл відносної похибки у відсотках визначення коефіцієнта стисливості кисню по моделі (3).

При калібруванні або перевірці витратоміра кисню за допомогою стенду на рис. 1 фіксуються покази витрати Q_{ci} за стандартних умов обчислювача стенду 9 та витратоміра кисню, який калібрується q_{ci} . Значення витрати по обчислювачу встановлюється в межах від 3 л/хвилину до 200 л/хвилину (тиск кисню відповідає номінальному тиску кисневої магістралі лікувального закладу де встановлений витратомір).

На основі отриманих даних складається ортогональний план експерименту, першим фактором якого є покази витрати витратоміра, що калібрується q_{ci} , а другим фактором різниця $\Delta q_{ci} = Q_{ci} - q_{ci}$ між витратою по обчислювачу стенду та витратою по витратоміру.

Для побудови математичної моделі значення корекції витрати Δq_{ci} витратоміра необхідно отримати аналітичне значення функції корекції витрати виду:

$$\Delta q_{ci} = f(q_{ci}) . \quad (4)$$

Тоді мікропроцесор витратоміра обчислює скоректовану витрату q_{ci_k} витратоміра кисню за стандартних умов за співвідношенням:

$$q_{ci_k} = q_{ci} + \Delta q_{ci} \quad (5)$$

Експериментальне дослідження цілого ряду витратомірів кисню на запропонованому калібрувальному стенді (рис. 1) показало, що коректуюча функція (5) для кожного конкретного витратоміра є різною але її можна з максимальним прийнятним коефіцієнтом кореляції та похибкою, яка не перевищує долі відсотка апроксимувати залежністю виду:

$$\Delta q_{ci} = a + b \cdot x^{Sb} + c \cdot x^{Sc} + d \cdot x^{Sd} \quad (6)$$

де x – витрата кисню обчислена витратоміром без корекції,

S_b, s_c, s_d – степені коефіцієнтів a, b, c, d коректуючої функції (6).

Наприклад, для одного з витратомірів кисню коректуюча функція відображається графіком на рис. 4.

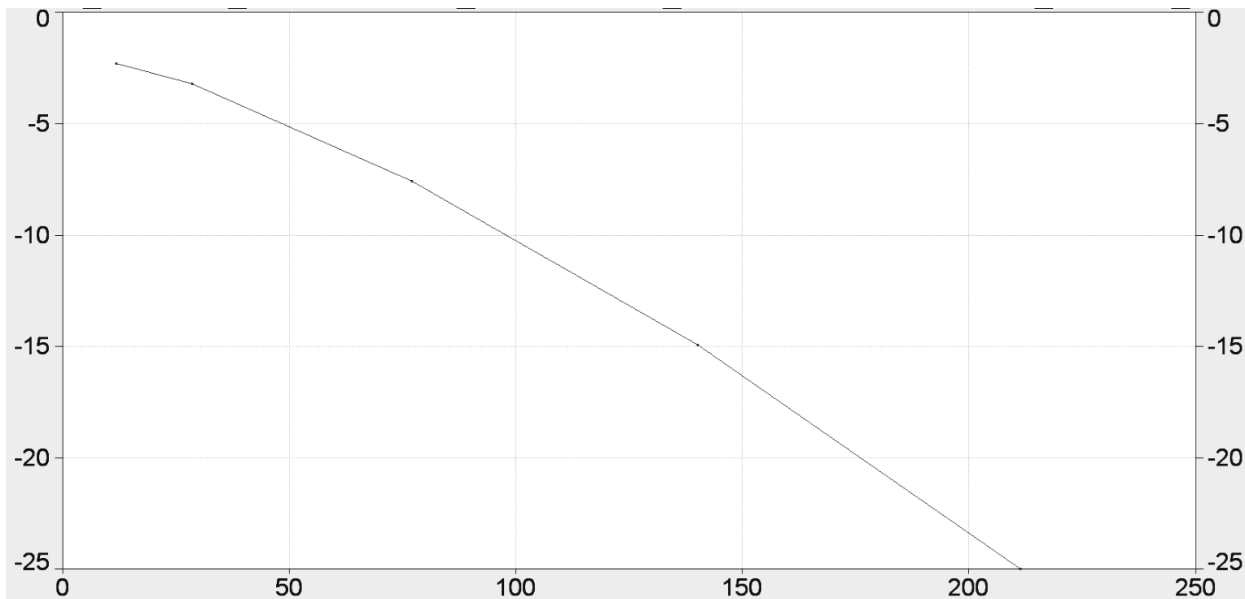


Рис. 4. Графік коректуючої функції витратоміра кисню
(горизонтальна вісь – витрата кисню витратоміром без корекції, л/хв.,
вертикальна – коректуюче значення, л/хв.)

Для побудови моделі коректуючої функції використовувався програмний математичний пакет TableCurve2D.

Моделі коректуючої функції (6) з коефіцієнт кореляції $r^2 = 0.9999999993672056$, та максимальним відхилення моделі складає 0.000475976701674615 відсотка та має наступний вигляд:

$$y = a + b \cdot x + c \cdot x^3 + d \cdot x^{0.5}, \quad (7)$$

$$a = -3.283632767253523,$$

$$b = -0.1434997833949054,$$

$$c = -2.919629442037117E-07,$$

$$d = 0.7854181600878881.$$

В моделі (7) значення y – це коректуюче значення витрати, x – значення витрати витратоміра кисню без корекції.

Оскільки витратомір кисню (рис. 1) має зовнішній інтерфейс RS-232, то за допомогою цього інтерфейсу отримані коефіцієнти коректуючої функції (6) та значення степенів коефіцієнтів завантажуються в енергонезалежну пам'ять витратоміра.

Запропонована методика калібрування витратоміра на запропонованому стенді (рис. 1) дозволяє забезпечити точність витратоміра кисню 2%.

Для функціонування витратоміра кисню його програмне забезпечення складається з таких програмних модулів:

- діагностика та ініціалізація компонентів витратоміра;
- обчислення витрати кисню по даним теплового перетворювача та корекція витрати згідно математичної моделі;
- аналіз розрахункових даних на їх коректність;
- інтегрування миттєвої витрати кисню у часі та перевірка інтегральних параметрів обчислювача на коректність;
- забезпечення протоколу обміну даними по зовнішньому інтерфейсу.

Для визначення сумарної кількості кисню V_{Σ} таким витратоміром після його калібрування мікропроцесор витратоміра виконує цифрове інтегрування скоректованої миттєвої витрати виду:

$$V_{\Sigma} = \sum_1^k q_{ci_k} \cdot \tau_i, \quad (8)$$

де q_{ci_k} – скоректоване миттєве значення витрати витратоміра за стандартних умов i -го циклу, τ_i – проміжок часу виконання розрахунків в i -му циклі інтегрування. Точність визначення кількості кисню витратоміром буде, в основному, визначатись точністю визначення витрати q_{ci_k} .

На рис. 5 наведено зовнішній вигляд витратоміра кисню, точність і стабільність показів якого досліджувалась на калібрувальному стенді.



Рис. 5. Витратомір кисню з тепловим перетворювачем витрати

Висновки та перспективи подальших досліджень. Таким чином, в роботі наведено склад, структура та логіка роботи перевірного та калібрувального стенду для витратомірів кисню медичних закладів з тепловим перетворювачем витрати. Запропонований стенд, методика калібрування та математична модель корекції витрати дає змогу покращити точність витратоміра. Запропонована математична модель визначення коефіцієнта стисливості для роботи обчислювача стенду. Запропонована методика калібрування витратоміра на запропонованому стенді забезпечує точність витратоміра в 2%.

Список бібліографічного опису:

1. Шиманський П. М., ін. Вимірювання витрати та кількості газу: довідник. Івано-Франківськ : Сімик, 2004. 160 с.
2. Дементьев С. Ю. Контроль кількості медичного кисню. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2011. № 2. С. 149–152.
3. Ільченко А. В. Вплив деяких параметрів конструкції теплового витратоміра палива на передачу тепла в ньому. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2021. Т. 13, № 1. С. 54–59. URL: <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2021-13-1-54-59>.
4. Середюк О. Є., Криницький О. С., Ткачук В. В. Сучасні тенденції розвитку термоанемометрії у сфері обліку природного газу. *Український метрологічний журнал*. 2020. № 3А. URL: <https://doi.org/10.24027/2306-7039.3A.2020.217773>.
5. Baker R. Thermal Flowmeters. *Flow Measurement Handbook: Industrial Designs, Operating Principles, Performance, and Applications* / ed. by R. C. Baker. Cambridge, 2016. P. 530–552. URL: <https://doi.org/10.1017/CBO9781107054141.019>.
6. Bess M. Calibrating Thermal Mass Flowmeters. *inTech*. 2021. Vol. 68, no. 4. P. 28–33. URL: <https://www.isa.org/intech-home/2021/april-2021/departments/calibrating-thermal-mass-flowmetersisa.org>.
7. Lipták B. G. Flow Measurement. Boca Raton : CRC Press, 2020. URL: <https://doi.org/10.1201/9781003063926>.

References:

1. Shymanskyi P. M., in. Vymiriuvannia vytraty ta kilkosti hazu: dovidnyk. Ivano-Frankivsk : Simyk, 2004. 160 s.
2. Dementiev S. Kontrol kilkosti medychnoho kysniu. *Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh*. 2011. № 2. S. 149–152.
3. Ilchenko A. V. Vplyv deiakykh parametriv konstruksii teplovoho vytratomira palyva naperedachu tepla v nomu. *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu*. 2021. T. 13, № 1. S. 54–59. URL: <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2021-13-1-54-59>.
4. Serediuk O. Ye., Krynytskyi O. S., Tkachuk V. V. Suchasni tendentsii rozvytku termoanemometrii u sferi obliku pryrodnoho hazu. *Ukrainskyi metrolohichnyi zhurnal*. 2020. № 3A. URL: <https://doi.org/10.24027/2306-7039.3A.2020.217773>.
5. Baker R. Thermal Flowmeters. *Flow Measurement Handbook: Industrial Designs, Operating Principles, Performance, and Applications* / ed. by R. C. Baker. Cambridge, 2016. P. 530–552. URL: <https://doi.org/10.1017/CBO9781107054141.019>.
6. Bess M. Calibrating Thermal Mass Flowmeters. *inTech*. 2021. Vol. 68, no. 4. P. 28–33. URL: <https://www.isa.org/intech-home/2021/april-2021/departments/calibrating-thermal-mass-flowmetersisa.org>.
7. Lipták B. G. Flow Measurement. Boca Raton : CRC Press, 2020. URL: <https://doi.org/10.1201/9781003063926>.