



# Дослідження метрологічних характеристик державного первинного еталона одиниці об'ємної та масової витрати рідини при підготовці до участі у міжнародних звіреннях

В.О. Ащепков<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Харківський національний університет радіоелектроніки, просп. Науки, 14, 61166, Харків, Україна

<sup>2</sup> Національний науковий центр "Інститут метрології", вул. Мирносолицька, 42, 61002, Харків, Україна  
ashhepkovvalera@gmail.com

## Анотація

У статті розглянуто результати дослідження метрологічних характеристик державного первинного еталона одиниці об'ємної та масової витрати рідини, об'єму та маси рідини, що протікає по трубопроводу (ДЕТУ 03-04-04). Дослідження проводилися в Національному науковому центрі "Інститут метрології" в рамках підготовки до міжнародних звірень. Були досліджені метрологічні характеристики складових частин державного еталона, зокрема, стабільність потоку шляхом експериментального визначення стандартної невизначеності вимірювання за типом А масової витрати рідини на вимірювальній ділянці еталона. На основі отриманих результатів було проведено модернізацію еталона. Крім того, розглянуто можливі напрямки подальших досліджень, спрямованих на вдосконалення методів вимірювань та аналіз невизначеності вимірювань за типом А. Подальша робота у цьому напрямку може сприяти підвищенню конкурентоспроможності в національній та міжнародній метрологічній спільноті. Також у статті розглянуто методику обробки результатів вимірювання під час проведення міжнародних звірень, визначено основні вимоги до дотримання міжнародних стандартів для подальшого дослідження на еталоні з метою відповідності цим вимогам.

Звірення є важливою складовою метрології, оскільки вони забезпечують еквівалентність одиниць вимірювання, що позитивно впливає на забезпечення єдності вимірювань у різних промислових та наукових секторах. Такі заходи сприяють не лише науковому прогресу, але й забезпечують високі стандарти якості та безпеки в сучасному суспільстві. Результати цих досліджень допоможуть підготуватися до міжнародних звірень, що є важливим для порівняння одиниць вимірювання. Це в свою чергу сприятиме ефективнішому передаванню одиниць вимірювання вторинним еталонам та засобам вимірювальної техніки.

**Ключові слова:** метрологічні характеристики; міжнародні звірення; стандартна невизначеність; витрата рідини; державний еталон.

Отримано: 28.02.2024

Відредаговано: 15.03.2024

Схвалено до друку: 20.03.2024

## 1. Вступ

Міжнародні звірення в метрології відіграють вирішальну роль у забезпеченні надійності та точності вимірювань по всьому світу. Вони спрямовані на розробку та прийняття міжнародних стандартів і національних еталонів. Міжнародні дослідницькі проекти сприяють узгодженості вимірювань у наукових, промислових та технічних галузях. Регіональні метрологічні організації (РМО) через порівняння національних еталонів прагнуть встановити спільні основи для проведення вимірювань, забезпечуючи їх точність та узгодженість. Процес дослідження є основою для

забезпечення довіри до результатів вимірювань та подолання технічних бар'єрів у торгівлі. Порівнюючи та аналізуючи результати вимірювань на міжнародному рівні, виявляються та усуваються джерела похибок, що сприяє підвищенню достовірності вимірювань. Крім того, міжнародні звірення в метрології сприяють активному обміну знаннями та досвідом між науковою спільнотою та промисловістю.

Можливість надання інформації про калібрувальні та вимірювальні можливості країни на вебсайті JCRV (Об'єднаний комітет регіональних метрологічних організацій та МБМВ –

Міжнародного бюро з мір та ваг) є одним із результатів позитивних міжнародних звірень. Це дозволяє підтвердити виконання Угоди про взаємне визнання національних еталонів, сертифікатів калібрування та вимірювань, що видаються національними метрологічними інститутами (CIPM MRA). Такі міжнародні звірення також дозволяють учасникам підтвердити міжнародне визнання державного первинного еталона фізичних величин і його метрологічні характеристики. Інформація, яка міститься в рядку СМС, визначає якість метрологічних послуг країни та є важливою для торговельних і економічних відносин між країнами [1].

У період із 2002 по 2024 рік у світі було проведено 27 міжнародних звірень за напрямком вимірювання витрати рідини та об'єму рідини в рамках EUROMET, APMP (Asian Pasific Metrology Program), SIM (System of Inter-American Metrology) та CCM (Consultative Committee for Mass and Related Quantities). За вже завершеними міжнародними звіреннями написано звіти та публікації, що вказані в списку літератури за такими номерами: EUROMET [2–7]; APMP [8–10]; SIM [11–14]; CCM [15–19].

Міжнародні звірення за напрямком масової витрати рідини проводяться в діапазоні від 50 до 36000 кг/г. Цей діапазон відповідає найбільш використаному діапазону масової витрати рідини, який досліджується у звіреннях EUROMET.M.FF-C17 [7] або APMP.M.FF.K1 [8].

## 2. Методика обробки результатів звірень

У міжнародних звіреннях за напрямком масової витрати рідини як еталон-переносник використовують масовий коріолісовий витратомір. Лабораторія-учасник проводить вимірювання витратоміра за своєю методикою, після чого розраховується похибка вимірювань із дотриманням вимог технічного протоколу звірень, який було узгоджено всіма учасниками ще до проведення звірень.

У міжнародній практиці проведення міжнародних звірень виявляється певна тенденція у проведенні обробки результатів звірень. Згідно з фінальними звітами міжнародних організацій [2–19], методика обробки результатів звірень полягає в розрахунку еталонного значення ключового порівняння, проходженні тесту “ $x_i$  – квадрат”, обчисленні ступеня еквівалентності для оцінки успішності лабораторії-учасника та призначенні СМС-рядків. Еталонне значення ключового порівняння (CRV) визначається окремо для кожної витрати згідно з процедурою А з [20]. Визначення еталонного значення ключового порівняння включає перевірку на відповідність згідно з [21].

Еталонне значення ключового порівняння у розраховується відповідно до наступного рівняння [7]:

$$y = \frac{\frac{\varepsilon_{lab1}}{u_{\varepsilon lab1}^2} + \frac{\varepsilon_{lab2}}{u_{\varepsilon lab2}^2} + \dots + \frac{\varepsilon_{labi}}{u_{\varepsilon labi}^2}}{\frac{1}{u_{\varepsilon lab1}^2} + \frac{1}{u_{\varepsilon lab2}^2} + \dots + \frac{1}{u_{\varepsilon labi}^2}}, \quad (1)$$

де  $\varepsilon_{lab1}, \varepsilon_{lab2}, \dots, \varepsilon_{labi}$  – значення, виміряне в різних незалежних лабораторіях 1, 2, ...,  $i$ , це можуть бути середні коефіцієнти перетворення, значення похибки вимірювань витратоміра або похибка витратоміра з урахуванням різних факторів впливу на вимірювання. У кожних окремих звіреннях це значення узгоджується технічним протоколом звірень.

$u_{\varepsilon lab1}, u_{\varepsilon lab2}, \dots, u_{\varepsilon labi}$  – це стандартна невизначеність вимірювань значень  $\varepsilon_{lab1}, \varepsilon_{lab2}, \dots, \varepsilon_{labi}$ , які були виміряні в різних незалежних лабораторіях 1, 2, ...,  $i$ . Вона розраховується на основі наступного рівняння [7]:

$$\frac{1}{u_y^2} = \frac{1}{u_{\varepsilon lab1}^2} + \frac{1}{u_{\varepsilon lab2}^2} + \dots + \frac{1}{u_{\varepsilon labi}^2}. \quad (2)$$

Розширена невизначеність еталонного значення  $U_y$  становить [22]:

$$U_y = 2 \cdot u_y. \quad (3)$$

Далі проводиться тест “ $x_i$  – квадрат”, щоб перевірити, чи можна очікувати, що певні похибки та супутні їм невизначеності матимуть гаусівський розподіл. Якщо це так, то “ $y$ ” буде прийнято. Тест “ $x_i$  – квадрат” виконується таким чином [7]:

$$X_{obs}^2 = \sum_n \left( \frac{\varepsilon_{lab i} - \varepsilon_{RV}}{u(\varepsilon_{lab i})} \right)^2, \quad (4)$$

де  $X_{obs}^2$  – спостереження значень  $x_i$  – квадрат;  $\varepsilon_{RV}$  – значення похибки еталона-переносника.

Ступені свободи  $\nu$ , в цьому випадку, було встановлено згідно з рівнянням [7]:

$$\nu = n_i - 1. \quad (5)$$

Щоб реалізувати вихідне значення, лабораторії-учасники повинні відповідати таким умовам [7]:

$$Pr\{X_{\nu}^2 > X_{obs}^2\} < 0,05. \quad (6)$$

Якщо ця умова не виконується, еталонне значення ключового порівняння розраховується без даних лабораторії, яка має найвище значення “ $X$ ”. Ця процедура повторюється доти, поки умову не буде виконано. Після цього отримане таким чином значення  $y$  приймається як еталонне значення  $\varepsilon_{CRV}$ , а значення  $U(y)$  визнається як розширена невизначеність  $U(\varepsilon_{CRV})$ .

При підготовці до міжнародних звірень важливо враховувати значення проходження тесту “ $x_i$  – квадрат”, який обчислюється на основі похибки вимірювань еталона-переносника та стандартної невизначеності. Тому важливо, щоб стандартна невизначеність вимірювань за типом А еталона була якомога меншою. Крім того, при складанні технічних протоколів звірень необхідно визначати умови проведення вимірювань, такі як температура навколишнього середовища, вологість повітря, температура рідини, атмосферний тиск тощо. Серед таких умов часто враховуються й умови, що стосуються самої лабораторії, такі як герметичність гідротакту, відсутність повітря в системі, встановлення нуля витратоміра, допустимі зміни витрати при проведенні вимірювань на одній точці витрати. Саме тому ще одним із важливих аспектів при підготовці до звірень є стабільність витрати рідини при проведенні вимірювань на еталоні.

### 3. Дослідження стабільності витрати рідини

На державному первинному еталоні одиниці об’ємної та масової витрати рідини, об’єму та маси рідини, що протікає по трубопроводу (далі – ДЕТУ 03-04-04) проводилося дослідження стабільності витрати рідини шляхом розрахунку стандартної невизначеності вимірювання за типом А масової витрати рідини на вимірювальній ділянці (далі – ВД) еталона.

Вимірювання відбувалися таким чином: спочатку за допомогою вентиля встановлювалось обране значення витрати рідини  $Q_{em}$  (т/ч); вимірювався час  $t$  (с) наповнення рідиною вимірювального баку та вага  $m$  (т) рідини у вимірювальному баку. Цю процедуру було повторено по 5 разів на 3 значеннях витрати рідини на ВД діаметром 50 мм, 15 мм, 6 мм. Після проведення вимірювань виявлено недостатню стабільність по-

току, що призвело до рішення замінити насосні агрегати еталона на нові та провести повторні дослідження.

Додатково, для підвищення стабільності потоку витрати під час вимірювань та зменшення флуктуацій, було встановлено частотний перетворювач для всіх насосних агрегатів. Частотний перетворювач, завдяки регулюванню частоти обертання двигуна насосного агрегату, може доволі точно встановлювати необхідний рівень витрати рідини та має плавний запуск, що зменшує флуктуації рідини при виході на робочий режим вимірювання на еталоні. Отримані результати до та після модернізації наведені в табл. 1.

У табл. 1 використовуються такі позначення:  $DN$  – діаметр трубопроводу на ВД, мм;  $m$  – вага рідини, т;  $t$  – час вимірювання, с;  $Q_{em}$  – масова витрата рідини, т/г;  $U_a$  – стандартна невизначеність вимірювань за типом А, %.

Результат вимірювання масової витрати рідини ( $Q_{em}$  1; 2;...;5) визначався за таким рівнянням:

$$Q_{em_i} = \frac{m * 3600}{t} \tag{7}$$

Стандартну невизначеність вимірювання за типом А витрати рідини  $U_a$  у відсотках було визначено за формулою:

$$u_A(Q_{em}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{em_i} - \bar{Q})^2}{n(n-1)}}, \tag{8}$$

де  $\bar{Q}$  – середнє арифметичне значення витрати рідини на точці витрати, було визначено за формулою [23]:

$$\bar{Q} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_{em_i} \tag{9}$$

Значення стандартної невизначеності вимірювань за типом А масової витрати рідини до та після модернізації зображено на рис. 1.

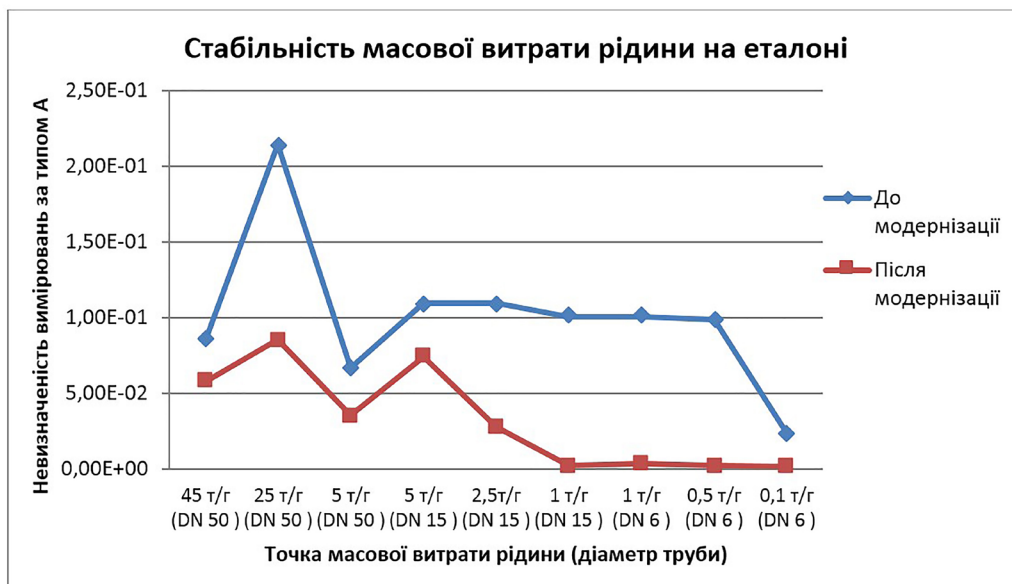


Рис. 1. Дослідження стабільності витрати на еталоні

Результати дослідження

До модернізації						Після модернізації			
№	DN	m (т)	t (с)	$Q_{em}$ (Т/ч)	$U_a$ (%)	$U_a$ (%)	$Q_{em}$ (Т/ч)	t (с)	m (т)
1	50	0,35642	28,495	45,030	8,570E-02	5,773E-02	45,483	28,452	0,35946
	50	0,35392	27,981	45,535			45,466	28,023	0,35392
	50	0,35583	28,399	45,107			45,207	28,338	0,35585
	50	0,35965	28,601	45,270			45,246	28,615	0,35964
	50	0,35566	28,216	45,377			45,340	28,241	0,35568
2	50	0,27454	40,082	24,658	2,140E-01	8,530E-02	25,575	40,060	0,28460
	50	0,26196	37,865	24,906			25,282	35,900	0,25212
	50	0,25764	36,854	25,167			25,844	37,242	0,26735
	50	0,26061	37,143	25,259			25,676	35,129	0,25055
	50	0,25971	36,245	25,795			25,984	36,225	0,26147
3	50	0,21194	151,321	5,042	6,672E-02	3,525E-02	5,141	140,481	0,20061
	50	0,21959	150,328	5,259			5,159	142,700	0,20451
	50	0,22615	151,120	5,387			5,206	139,464	0,20167
	50	0,21466	150,073	5,149			5,051	143,200	0,20094
	50	0,21578	151,194	5,138			5,261	141,225	0,20638
4	15	0,15097	106,674	5,095	1,094E-01	7,403E-02	5,271	103,909	0,15213
	15	0,15955	107,933	5,322			5,159	105,513	0,15120
	15	0,15632	103,426	5,441			5,317	103,441	0,15278
	15	0,15916	104,486	5,484			5,015	108,142	0,15064
	15	0,15197	110,806	4,937			4,967	109,648	0,15129
5	15	0,11308	143,866	2,830	1,010E-01	2,767E-02	2,532	144,201	0,10141
	15	0,10980	159,831	2,473			2,598	141,198	0,10191
	15	0,10050	149,024	2,428			2,651	141,307	0,10407
	15	0,10425	156,790	2,394			2,601	145,167	0,10489
	15	0,11402	160,063	2,565			2,506	144,460	0,10057
6	15	0,14156	387,850	1,314	1,097E-01	2,556E-03	1,037	351,209	0,10120
	15	0,12957	401,182	1,163			1,049	353,593	0,10301
	15	0,11717	408,055	1,034			1,033	349,364	0,10020
	15	0,10055	439,651	0,823			1,046	357,472	0,10391
	15	0,10709	461,712	0,835			1,040	352,217	0,10178
7	6	0,12428	384,850	1,163	6,630E-02	3,287E-03	0,988	368,427	0,10106
	6	0,11696	411,129	1,024			0,972	367,072	0,09906
	6	0,11398	467,754	0,877			0,986	369,541	0,10126
	6	0,10043	415,156	0,871			0,992	370,405	0,10202
	6	0,11782	403,856	1,050			1,002	374,095	0,10412
8	6	0,08399	408,546	0,740	9,865E-02	2,406E-03	0,448	653,032	0,08125
	6	0,08085	700,448	0,416			0,459	644,401	0,08225
	6	0,08810	995,200	0,319			0,455	651,228	0,08227
	6	0,08369	405,522	0,743			0,458	653,917	0,08328
	6	0,08576	748,500	0,412			0,449	656,923	0,08202
9	6	0,04814	850,882	0,204	2,372E-02	1,997E-03	0,114	1324,250	0,04180
	6	0,04593	1091,995	0,151			0,119	1326,231	0,04376
	6	0,04096	1550,765	0,095			0,116	1329,038	0,04282
	6	0,04613	852,479	0,195			0,112	1322,286	0,04112
	6	0,04536	1350,937	0,121			0,123	1328,472	0,04535

Після проведення розрахунків та модернізації насосної складової частини еталона спостерігається зниження стандартної невизначеності типу А масової витрати рідини, що свідчить про підвищення стабільності витрати. Суттєве зниження невизначеності вимірювань витрати у нижньому діапазоні може свідчити про неефективну роботу старих насосних агрегатів малої потужності. Проте значення витрати у верхньому діапазоні на порядок вищі, що вказує на необхідність проведення подальших досліджень у цьому напрямку. Це може вимагати нових стратегій або модифікацій системи, щоб досягти бажаних показників стабільності та точності вимірювань у всьому діапазоні витрати рідини.

Значення стандартної невизначеності за типом Б залишилися незмінними. Це пояснюється тим, що насосні агрегати, так само як і частотний перетворювач, впливають на процес проведення вимірювань, а не на саме обладнання, яким вимірювання здійснюється.

#### 4. Висновки

Під час проведення досліджень спостерігалися великі значення стандартної невизначеності вимірювань типу А, що свідчило про нестабільність масової витрати рідини. Це вимагало проведення модернізації та додаткових досліджень. Після впровадження модернізаційних заходів було зафіксовано покращення стабільності потоку рідини. Стабільність витрати рідини є важливим критерієм для проведення міжнародних звірень, тому ці дослідження були важливим етапом відповідно до міжнародних стандартів.

У подальших дослідженнях планується вдосконалення методики вимірювань на еталоні з особливою увагою до аналізу невизначеності типу А. Ці заходи будуть спрямовані на підвищення точності вимірювань та досягнення повної відповідності до міжнародних вимог під час міжнародних звірень.

## Study of metrological characteristics of the state primary measurement standard of volume flow and mass consumption of liquid in preparation for participation in international comparisons

V. Aschepkov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Kharkiv National University of Radio Electronics, Nauky Ave., 14, 61166, Kharkiv, Ukraine

<sup>2</sup> National Scientific Centre "Institute of Metrology", Myronosytska Str., 42, 61002, Kharkiv, Ukraine  
ashhepkovvalera@gmail.com

### Abstract

The paper discusses the results of a study of metrological characteristics of the state primary measurement standard of volume flow and mass consumption of liquid, as well as the volume and mass of liquid flowing through pipelines (DETU 03-04-04). The study was conducted at the National Scientific Centre "Institute of Metrology" in preparation for international comparisons. Metrological characteristics of the components of the state measurement standard were studied, including the stability of the flow by experimentally determining the standard measurement uncertainty of the mass consumption of liquid at the measurement section of the standard. Based on the obtained results, the measurement standard was modernized. In addition, the paper discusses possible directions for further research aimed at improving measurement methods and analysing the measurement uncertainty of Type A. Further work in this direction can contribute to increasing the competitiveness across the national and international metrological community. The paper also examines the procedure for processing measurement results during international comparisons and identifies basic requirements for complying with international standards for further research of the measurement standard to meet these requirements.

Metrological comparisons are an important part of metrology, as they ensure the equivalence of measurement units, which is essential for ensuring uniformity of measurements in various industrial and scientific areas. Such measures do not only promote scientific progress, but also ensure high standards of quality and safety in modern society. The results of this research will help to prepare for international comparisons, which are important for comparing measurement units.

This, in turn, will contribute to more efficient transfer of measurement units to secondary measurement standards and measuring instruments.

**Keywords:** metrological characteristics; international comparisons; standard uncertainty; liquid flow; national standard.

#### Список літератури

1. Довженко Я.С., Склярів В.В., Пилипенко К.В. Підготовка державного первинного стандарту України для одиниць твердості за шкалами Роквелла та Супер Роквелла (ДЕТУ 02-04-99) для міжнародних порівнянь. *Метрологія та прилади*. 2012. № 5. С. 6–12.
2. Batista E., Lau P. EURAMET regional key comparison EURAMET.M.FF-K4.b: Volume intercomparison at 20 L. *Metrologia*, 2009, vol. 46(1A):07013. doi: 10.1088/0026-1394/46/1A/07013
3. Malengo A., Batista E., Arias R., Mičić L., Bošnjaković A., Mirjana M., Piluri E., Svendsen G., et al. Final report on EURAMET project 1395/EURAMET.M.FF-K4.1.2016: volume comparison at 20 L. *Metrologia*, 2020, vol. 57(1A):07021. doi: 10.1088/0026-1394/57/1A/07021
4. Huovinen M., Frahm E. EURAMET.M.FF-S13 final report. *Metrologia*, 2022, vol. 59(1A):07010. doi: 10.1088/0026-1394/59/1A/07010
5. Geršl J., Lojek L. Final report on EURAMET project No. 1046: Intercomparison of water flow standards using electromagnetic flowmeters. *Metrologia*, 2013, vol. 50(1A):07002. doi: 10.1088/0026-1394/50/1A/07002
6. Batista E. Final report on EUROMET key comparison EUROMET.M.FF-K4 for volume intercomparison of 100 ml Gay-Lussac pycnometer. *Metrologia*, 2006, vol. 43(1A):07009. doi: 10.1088/0026-1394/43/1A/07009
7. Benkova M., Frahm E., Romieu K., Warnecke H., Bükler O., Haack S., Akselli B., Mazur V., Berkmann C., Zygmantas G. Comparisons of standards for liquid flow rates under static load changes. *Metrologia*, 2024, vol. 61(1A):07003. doi: 10.1088/0026-1394/61/1A/07003
8. Lee K., Chun S., Terao Y., Thai N., Yang C., Tao M., Gutkin M. Final report of the APMP water flow key comparison: APMP.M.FF-K1. *Metrologia*, 2011, vol. 48(1A):07003. doi: 10.1088/0026-1394/48/1A/07003
9. Man J., Arias R., Terao Y., Lee Y., Ligong G., Tulasombut V., Chan T., Thai N., Steyn R., Sampath H. Final report on APMP key comparison of volume of liquids at 20 L and 100 mL: APMP.M.FF-K4. *Metrologia*, 2011, vol. 48(1A):07001. doi: 10.1088/0026-1394/48/1A/07001
10. Chun S., Furuichi N. Final report of the APMP water flow supplementary comparison (APMP.M.FF-S1). *Metrologia*, 2022, vol. 59(1A):07004. doi: 10.1088/0026-1394/59/1A/07004
11. Morales A., Malta D., Kornblit F., Ramírez R., Arias R., Trujillo S. Final report on regional supplementary comparison SIM.M.FF-S5: Volume of liquids at 50 mL. *Metrologia*, 2012, vol. 49(1A):07012. doi: 10.1088/0026-1394/49/1A/07012
12. Jacques C., Juarez S., Maldonado J., Bean V. NORAMET intercomparison of volume standards at 50 mL and 100 mL (SIM.M.FF-S1). *Metrologia*, 2003, vol. 40(1A):07001. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/40/1A/07001>
13. Trujillo S., Maldonado J., Vega M., Santalla E., Sica A., Cantero D., Salazar M., Morales A., Solano P., Rodríguez L. SIM.M.FF-S7: Final report on SIM/ANDIMET supplementary comparison for volume of liquids at 100 mL and 100  $\mu$ L. *Metrologia*, 2016, vol. 53(1A):07014. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/53/1A/07014>
14. Frahm E., Arias R., Maldonado M., Vargas J., Mendoza J., Arredondo A., Silvosa M. Supplementary comparison SIM.M.FF-S9.2016 for water flow measurement. *Metrologia*, 2024, vol. 61(1A):07001. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/61/1A/07001>
15. Benkova M., Frahm E., Romieu K., Warnecke H., Bükler O., Haack S., Akselli B., Mazur V. et al. Comparisons of standards for liquid flow rates under static load changes. *Metrologia*, 2024, vol. 61(1A):07003. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/61/1A/07003>
16. Arias R., Maldonado M., Wright J., Jacques C., Lachance C., Lau P., Többen H., Cignolo G., et al. Results of the key comparison CCM.FF-K4 for volume of liquids at 20 L and 100 mL. *Metrologia*, 2006, vol. 43(1A):07005. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/43/1A/07005>
17. Zelenka Z., Arias R., Maldonado M., Batista E., Jintao W., Malengo A., Malta D. et al. BIPM/CIPM key comparison CCM.FF-K4.1.2011. Final report for volume of liquids at 20 L and 100 mL. *Metrologia*, 2015, vol. 52(1A):07011. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/52/1A/07011>
18. Paik J., Lee K., Lau P., Engel R., Loza A., Terao Y., Reader-Harris M. Final report on CCM.FF-K1 for water. *Metrologia*, 2007, vol. 44(1A):07005. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/44/1A/07005>
19. Furuichi N., Arias R., Yang C-T., Chun S., Meng T., Shinder I., Frahm E., Bükler O., Mills Chr. et al. Final report “Key comparison CCM.FF-K1.2015 – water flow: 30 m<sup>3</sup>/h ... 200 m<sup>3</sup>/h”. *Metrologia*, 2022, vol. 59(1A):07013. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/59/1A/07013>
20. Cox M.G. The evaluation of key comparison data. *Metrologia*, 2002, vol. 39(6), pp. 589–595. doi: 10.1088/0026-1394/39/6/10
21. Cox M.G. The evaluation of key comparison data: determining the largest consistent subset. *Metrologia*, 2007, vol. 44(3), pp. 187–200. doi: 10.1088/0026-1394/44/3/005
22. WGFF Guidelines for CMC Uncertainty and Calibration Report Uncertainty, technical report. 2013. 6 p. URL: <http://www.bipm.org/utis/en/pdf/ccm-wgff-guidelines.pdf>
23. Zakharov I., Serhienko M., Chunikhina T. Measurement uncertainty evaluation by kurtosis method at calibration of a household water meter. *XXX International Scientific Symposium “Metrology and Metrology Assurance” (MMA)*, 2020, pp. 83–86. doi: 10.1109/MMA49863.2020.9254260

## References

1. Dovzhenko Ya.S., Skliarov V.V., Pylypenko K.V. Preparation of the State primary standard of Ukraine for hardness units according to the Rockwell and Super Rockwell scales (DETU 02-04-99) for international comparisons. *Metrology and Instruments*, 2012, no. 5, pp. 6–12.
2. Batista E., Lau P. EURAMET regional key comparison EURAMET.M.FF-K4.b: Volume intercomparison at 20 L. *Metrologia*, 2009, vol. 46 (1A), 07013. doi: 10.1088/0026-1394/46/1A/07013
3. Malengo A., Batista E., Arias R., Mičić L., Bošnjaković A., Mirjana M., Piluri E., Svendsen G. et al. Final report on EURAMET project 1395/EURAMET.M.FF-K4.1.2016: volume comparison at 20 L. *Metrologia*, 2020, vol. 57(1A):07021. doi: 10.1088/0026-1394/57/1A/07021
4. Huovinen M., Frahm E. EURAMET.M.FF-S13 final report. *Metrologia*, 2022, vol. 59(1A):07010. doi: 10.1088/0026-1394/59/1A/07010
5. Geršl J., Lojek L. Final report on EURAMET project No. 1046: Intercomparison of water flow standards using electromagnetic flowmeters. *Metrologia*, 2013, vol. 50(1A):07002. doi: 10.1088/0026-1394/50/1A/07002
6. Batista E. Final report on EUROMET key comparison EUROMET.M.FF-K4 for volume intercomparison of 100 ml Gay-Lussac pycnometer. *Metrologia*, 2006, vol. 43(1A):07009. doi: 10.1088/0026-1394/43/1A/07009
7. Benkova M., Frahm E., Romieu K., Warnecke H., Bükler O., Haack S., Akselli B., Mazur V., Berkman C., Zygmantas G. Comparisons of standards for liquid flow rates under static load changes. *Metrologia*, 2024, vol. 61(1A):07003. doi: 10.1088/0026-1394/61/1A/07003
8. Lee K., Chun S., Terao Y., Thai N., Yang C., Tao M., Gutkin M. Final report of the APMP water flow key comparison: APMP.M.FF-K1. *Metrologia*, 2011, vol. 48(1A):07003. doi: 10.1088/0026-1394/48/1A/07003
9. Man J., Arias R., Terao Y., Lee Y., Ligong G., Tulasombut V., Chan T., Thai N., Steyn R., Sampath H. Final report on APMP key comparison of volume of liquids at 20 L and 100 mL: APMP.M.FF-K4. *Metrologia*, 2011, vol. 48(1A):07001. doi: 10.1088/0026-1394/48/1A/07001
10. Chun S., Furuichi N. Final report of the APMP water flow supplementary comparison (APMP.M.FF-S1). *Metrologia*, 2022, vol. 59(1A):07004. doi: 10.1088/0026-1394/59/1A/07004
11. Morales A., Malta D., Kornblit F., Ramírez R., Arias R., Trujillo S. Final report on regional supplementary comparison SIM.M.FF-S5: Volume of liquids at 50 mL. *Metrologia*, 2012, vol. 49(1A):07012. doi: 10.1088/0026-1394/49/1A/07012
12. Jacques C., Juarez S., Maldonado J., Bean V. NORAMET intercomparison of volume standards at 50 mL and 100 mL (SIM.M.FF-S1). *Metrologia*, 2003, vol. 40(1A):07001. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/40/1A/07001>
13. Trujillo S., Maldonado J., Vega M., Santalla E., Sica A., Cantero D., Salazar M., Morales A., Solano P., Rodríguez L. SIM.M.FF-S7: Final report on SIM/ANDIMET supplementary comparison for volume of liquids at 100 mL and 100  $\mu$ L. *Metrologia*, 2016, vol. 53(1A):07014. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/53/1A/07014>
14. Frahm E., Arias R., Maldonado M., Vargas J., Mendoza J., Arredondo A., Silvosa M. Supplementary comparison SIM.M.FF-S9.2016 for water flow measurement. *Metrologia*, 2024, vol. 61(1A):07001. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/61/1A/07001>
15. Benkova M., Frahm E., Romieu K., Warnecke H., Bükler O., Haack S., Akselli B., Mazur V. et al. Comparisons of standards for liquid flow rates under static load changes. *Metrologia*, 2024, vol. 61(1A):07003. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/61/1A/07003>
16. Arias R., Maldonado M., Wright J., Jacques C., Lachance C., Lau P., Többen H., Cignolo G., et al. Results of the key comparison CCM.FF-K4 for volume of liquids at 20 L and 100 mL. *Metrologia*, 2006, vol. 43(1A):07005. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/43/1A/07005>
17. Zelenka Z., Arias R., Maldonado M., Batista E., Jintao W., Malengo A., Malta D. et al. BIPM/CIPM key comparison CCM.FF-K4.1.2011. Final report for volume of liquids at 20 L and 100 mL. *Metrologia*, 2015, vol. 52(1A):07011. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/52/1A/07011>
18. Paik J., Lee K., Lau P., Engel R., Loza A., Terao Y., Reader-Harris M. Final report on CCM.FF-K1 for water. *Metrologia*, 2007, vol. 44(1A):07005. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/44/1A/07005>
19. Furuichi N., Arias R., Yang C-T., Chun S., Meng T., Shinder I., Frahm E., Bükler O., Mills Chr. et al. Final report “Key comparison CCM.FF-K1.2015 – water flow: 30 m<sup>3</sup>/h ... 200 m<sup>3</sup>/h”. *Metrologia*, 2022, vol. 59(1A):07013. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/59/1A/07013>
20. Cox M.G. The evaluation of key comparison data. *Metrologia*, 2002, vol. 39(6), pp. 589–595. doi: 10.1088/0026-1394/39/6/10
21. Cox M.G. The evaluation of key comparison data: determining the largest consistent subset. *Metrologia*, 2007, vol. 44(3), pp. 187–200. doi: 10.1088/0026-1394/44/3/005
22. WGFF Guidelines for CMC Uncertainty and Calibration Report Uncertainty, technical report. 2013. 6 p. Available at: <http://www.bipm.org/utis/en/pdf/ccm-wgff-guidelines.pdf>
23. Zakharov I., Serhienko M., Chunikhina T. Measurement uncertainty evaluation by kurtosis method at calibration of a household water meter. *XXX International Scientific Symposium “Metrology and Metrology Assurance” (MMA)*, 2020, pp. 83–86. doi: 10.1109/MMA49863.2020.9254260