

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-82-53>

УДК

РЕДЬКО Олександр

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0000-0002-9054-5746>

МОКІЙЧУК Валентин

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0000-0001-7400-4467>

НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ХАРАКТЕРНІ ПІПЕТКОВИМ ДОЗАТОРАМ

В даній статті проведено аналізування нормативних та технічних документів з питань експлуатування та калібрування дозаторів піпеткових з фіксованим та регульованим об'ємом дози. Виділені та описані джерела невизначеності результату вимірювання під час експлуатації та калібрування дозаторів, які доцільно застосовувати в практиці акредитованих випробувальних та калібрувальних лабораторій. Особливу увагу приділено невизначеності пов'язаної з випаровуванням рідини в процесі дозування. Запропоновано формулу та порядок експерименту з визначення втрати маси за рахунок випаровування рідини. Наведено елементи обчислення складових невизначеності результату вимірювання.

Ключові слова: невизначеність, дозатор, вимірювання, калібрування, об'єм, лабораторія, ISO 8655-6, ISO/IEC 17025.

REDKO Oleksandr, MOKIICHUK Valentyn

National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

UNCERTAINTIES ASSOCIATED WITH PIPETTE DISPENSERS

This article presents a detailed analysis of the regulatory and technical documents that govern the operation and calibration of fixed and adjustable dose volume pipette dispensers. The study addresses the critical need for a unified approach to dose volume measurement, particularly in accredited testing and calibration laboratories, to ensure that results are comparable and consistent with international standards like ISO/IEC 17025. The research identifies and describes key sources of measurement uncertainty that are relevant for these laboratories, highlighting both systematic and random influencing factors.

A significant part of the paper is dedicated to the uncertainty linked to the evaporation of liquid during the dosing and measurement processes. Evaporation can cause a noticeable loss of mass, especially when working with small volumes, which can significantly affect the accuracy of the final measurement. To address this, the study analyzes new international standards, including ISO 8655-6:2022 and ISO/TR 20461:2023, which have not yet been harmonized in Ukraine.

To solve the problem of evaporation, the authors propose a specific formula and an experimental procedure for determining the mass loss due to liquid evaporation. This procedure, illustrated by a time diagram, involves a series of repeated cycles to calculate the average mass loss, with a recommended minimum of two and a preference for ten cycles to reduce uncertainty. The resulting value, $\delta_{\text{вип.}}$, can be used as a correction factor for calibration results, as a component of the calibration uncertainty, or as a measure of the calibration system's performance.

Furthermore, the article provides a comprehensive table of typical uncertainty components associated with dosing and calibration. It highlights that many factors influencing the final dose volume are often not accounted for during testing. Therefore, accredited testing laboratories must consider the characteristics of the specific liquid being dispensed during verification. The paper also reviews guidelines from various sources, such as DKD-R 8-1 and ASTM E542-22, on minimizing evaporation, emphasizing the importance of using modern balances with evaporation traps. An evaporation trap works by creating a controlled microenvironment with saturated water vapor to minimize mass loss, thereby ensuring greater accuracy.

The authors present a formula for the uncertainty associated with the evaporation correction, $u(\delta_{\text{вип.}})$. This formula includes components for balance sensitivity and repeatability. The article also suggests a criterion for when this uncertainty component can be neglected: if the value of $\delta_{\text{вип.}}$ is not more than 1/5 of the permissible error for the pipette's dose volume. The study concludes with practical recommendations for calibration and testing laboratories, including maintaining specific temperature and humidity ranges, and using appropriate equipment like evaporation traps for small volumes. These recommendations are crucial for improving the reliability and comparability of measurement results in laboratory settings.

Keywords: uncertainty, pipette, measurement, calibration, volume, laboratory, ISO 8655-6, ISO/IEC 17025.

Стаття надійшла до редакції / Received 11.04.2025

Прийнята до друку / Accepted 11.05.2025

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Створення уніфікованого підходу до вимірювання об'єму дози під час вимірювання, як складової випробування та під час калібрування. Особливо важливим є аспект калібрування та оцінювання невизначеності, щоб результати отримані в різних акредитованих калібрувальних лабораторій за стандартом ISO/IEC 17025:2019 [1] (далі – КЛ) були порівнювані між собою та співставні між собою. На результат дозування під час випробування у акредитованих випробувальних лабораторіях (далі – ВЛ) впливають ряд факторів, які необхідно ідентифікувати за значущістю та характером впливу: систематичний чи випадковий. Акредитовані ВЛ мають проводити проміжні перевіряння дозаторів згідно п.6.4.10 [1] та верифікації їх після калібрування п.6.4.4 [1] і враховувати додаткові невизначеності притаманні процедурі калібрування.

ВИДІЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ, КОТРИМ ПРИСВЯЧУЄТЬСЯ СТАТТЯ

Прийняті в червні 2022 року нова версія міжнародного стандарту з калібрування дозаторів піпеткових з регульованим або фіксованим об'ємом дози (далі – дозатор) ISO 8655-6 [2] і в лютому 2023 року нова версія міжнародного технічного звіту з оцінювання невизначеності при калібруванні дозаторів гравіметричним методом ISO/TR 20461 [3] досі не гармонізовані в Україні.

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Авторами у даній статті, з метою підвищення достовірності вимірювань, описуються рекомендації для внесення змін в методики калібрування КЛ, інструкції з проміжних перевірянь дозаторів ВЛ та верифікації після калібрування дозаторів ВЛ.

Розглядається питання визначення поправки втрати маси води від випаровування рідини з поверхні посуду під час калібрування та під час проміжних перевірянь дозаторів ($\delta_{\text{вип.}}$) та оцінювання невизначеності від її внесення в результат вимірювання ($u(\delta_{\text{вип.}})$).

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Огляд основних складових невизначеностей притаманних дозаторам піпетковим

На сьогодні різними організаціями в сфері стандартизації розроблено ряд документів, які стосуються різних аспектів експлуатації дозаторів, а саме безпосереднє використання у лабораторії під час випробувань, визначення придатності дозатора під час проміжних перевірянь у ВЛ, калібрування у КЛ та верифікації у ВЛ після калібрування.

Загальне модельне рівняння визначення об'єму дози гравіметричним методом при калібруванні дозатора за ISO 8655-6:2022 [2] має вигляд:

$$V_{\text{ref}} = (m_L - m_e + \delta_{\text{вип.}}) \cdot \frac{1}{\rho_W - \rho_A} \cdot \left(1 - \frac{\rho_A}{\rho_B}\right) \cdot [1 - \gamma \cdot (t_W - t_{\text{ref}})], \quad (1)$$

де V_{ref} – розраховане значення об'єму дози за референтної температури, мл;

m_L – результат зважування об'єму дози, г;

m_e – покази ваг перед зважуванням об'єму дози, г (якщо використовується функція тарування, значення цього параметру дорівнює нулю);

$\delta_{\text{вип.}}$ – оцінена маса випаровування об'єму дози за тестовий цикл (див. формулу 2), г (в стандарті ISO 8655-6:2022 має позначення m_{evap});

ρ_A – оцінена густина повітря за визначених під час вимірювання температури, відносної вологості та тиску, г/мл;

ρ_B – густина референтної гирі, г/мл,

ρ_W – оцінена за формулою Танака густина дози дистильованої води з врахуванням її температури, г/мл;

γ – комбінований коефіцієнт теплового розширення дозатора, який калібрується, $^{\circ}\text{C}^{-1}$;

t_W – температура дозатора, яка вважається рівною температурі дистильованої води, що дозується, $^{\circ}\text{C}$;

t_{ref} – референтна температура дозатора (20°C або 27°C).

Нова версія стандарту ISO 8655-6 [2] 2022 року містить більш суворі вимоги до ваг, що використовуються для калібрування, зокрема щодо їхньої роздільної здатності та повторюваності. Вимагається замінювати наконечник принаймні один раз на кожную точку діапазону під час калібрування або проміжних вимірювань. Це допомагає виявити пошкоджені або неправильно виготовлені наконечники та забезпечити послідовність. Вводиться розуміння системи "піпетка + наконечник": хоча це загальна зміна для всього стандарту, вона має пряме відношення до гравіметричного методу, оскільки результати калібрування дійсні лише для типу наконечника, зазначеного в сертифікаті.

За результатами аналізування актуальних нормативних документів та публікацій [2-10] авторами складено таблицю, яка містить типові впливні фактори, які є джерелами невизначеності дозування та/або вимірювань під час калібрування або верифікації дозаторів (табл. 1).

Як видно з таблиці значна частина факторів, яка впливає на об'єм дози, яку ми отримаємо не враховується під час випробувань. Можна припустити, що ці складові враховані в невизначеності калібрування та застосовуються як окрема складова під час оцінювання невизначеності результату випробувань. Але оскільки під час калібрування застосовується дистильована вода, то вплив таких факторів як випаровування та об'ємне розширення рідини, яку дозують у ВЛ, не враховують. Отже, для ВЛ важливо під час верифікації враховувати характеристики саме тієї рідини, яка дозується.

Таблиця 1

Типові складові невизначеності, пов'язані з результатом дозування та калібрування дозатора

Джерело невизначеності	Використовується для обчислення розширеної невизначеності		Характер впливу
	результату дозування рідини	результату калібрування дозатора	
Температура навколишнього середовища	+	+	систематичний
Вологість навколишнього середовища	+	+	систематичний
Атмосферний тиск	–	+	систематичний
Густина рідини, що дозується	–	+	систематичний
Об'ємний коефіцієнт теплового розширення матеріалу наконечника	–	+	систематичний
Випадкова складова при вимірюванні фактичного об'єму дози	+	+	випадковий
Випаровування дози у наконечнику	–	+	систематичний
Випаровування дози на вагах	–	+	систематичний
Вимірювання маси дози	–	+	систематичний
Температури дистильованої води	–	+	систематичний
Густина дистильованої води	–	+	систематичний
Випаровування дози в ємності для зважування	–	+	систематичний
Густина повітря, в якому зважується маса дози	–	+	систематичний
Густина гіри, якою калібрувались ваги	–	+	систематичний
Поводження з дозатором (теплота руки оператора, вплив людського фактора)	–	+	випадковий
Одиниця молодшого розряду	–	+	випадковий
		(для ваг)	

ISO 8655-6:2022 [2], який встановлює методику калібрування, містить більш жорсткіші вимоги до статистичної достовірності, стабільності умов навколишнього середовища та уточнює метод оцінювання поправки випаровування дистильованої води на відміну від попередньої версії. ISO 8655-10 [4] прийнятий у лютому 2024 року вказує в розділі 7 на необхідність виконання персоналом ВЛ проміжних перевірок рідинами, що застосовуються при випробуваннях та у додатку А надає рекомендації вибору дозаторів та наконечників з перевагами та недоліками. ASTM E1154 – 23 [5] прийнятий у лютому 2023 року охоплює вимоги, умови експлуатації та процедури верифікації дозаторів та містить вимоги до навчання та кваліфікації операторів цих засобів вимірювальної техніки (ЗВТ).

Слід звернути увагу, що при дозуванні під час випробування та визначення об'єму дозування під час калібрування не враховується ціна поділки дозатора з регульованим об'ємом дози як складова невизначеності, оскільки дозатор розглядається як міра з номінальним значенням.

Настанови нормативних документів стосовно мінімізації $\delta_{\text{вип.}}$

Для зменшення значення поправки обумовленої втрати маси води від випаровування рідини з поверхні посуду під час калібрування та під час проміжних перевірок дозаторів ($\delta_{\text{вип.}}$) необхідно звертати увагу на термостабілізацію дозатора, вагів та дистильованої води, вологості середовища і робити забір води тільки у змочений наконечник, з метою збільшення рівня вологості повітря в наконечнику.

У пп.8.2, 8.3 та 8.7.2 методики калібрування Фізико-технічного інституту Німеччини (PTB) DKD-R 8-1 [6] містяться наступні настанови:

- застосовувати сучасні ваги оснащені спеціальними уловлювачами випаровувань приклад яких зображено на рис. 1;
- підтримувати температуру в лабораторії в діапазоні від 20 °C до 25 °C, під час калібрування дозаторів коливання температури має бут не більшим 0,5 К. Але для зменшення невизначеності рекомендується калібрувати за дрейфу температури повітря в лабораторії не більше 0,2 К;
- дистильована вода має бути не гіршою за характеристиками ніж клас 3 ISO 3696;
- втрати випаровування можливо розрахувати або оцінити на основі власного досвіду відповідно до об'єму дози;
- оптимальний діапазон відносної вологості від 45% до 60% і під час калібрування дозаторів коливання має бути не більше 5 % відносної вологості. Але для зменшення невизначеності рекомендується калібрувати за відносної вологості від 45% до 55%.



Рис. 1. Зображення уловлювачів випаровувань, які застосовуються при зважуванні малих доз об'єму речовин та при калібруванні дозаторів виробництва Mettler Toledo та Sigma-Aldrich

Принцип роботи уловлювачів випаровувань (evaporation trap) полягає у створенні контрольованого мікросередовища над поверхнею води, що зважується, з метою мінімізації або повного запобігання втратам маси через випаровування [7]. Це критично важливо, оскільки навіть мізерні втрати рідини можуть значно вплинути на точність зважування малих об'ємів. Конструкція складається з основної камери, в яку потрапляє об'єм дози, кришка для унеможливлення дифузії вологих газів, зовнішня камера, яка, як правило, має резервуар з водою та може мати подвійні стінки. Ці елементи уловлювача дозволяють досягнути:

- зменшення площі поверхні випаровування. Уловлювачі випаровувань зазвичай мають дуже вузький отвір або довгу, тонку шийку, через яку вводиться дистильована вода з піпетки. Це значно зменшує площу поверхні води, яка контактує з навколишнім повітрям, уповільнюючи процес випаровування;
- створення насиченої водяної пари. Закрита або майже закрыта конструкція уловлювача дозволяє водяній парі, що утворюється над поверхнею рідини, накопичуватися в обмеженому просторі. Це швидко призводить до насичення повітря водяною паром у всередині посудини. Коли повітря насичене водяною паром, швидкість випаровування води з рідкої фази значно сповільнюється, оскільки основна рушійна сила для випаровування зменшується.
- підтримання стабільної вологості: завдяки створенню насиченої водяної пари, уловлювач підтримує високу та стабільну відносну вологість безпосередньо над зважуваною рідиною (часто в діапазоні 60-90% або вище). Це створює умови, близькі до рівноважних, що мінімізує чисті втрати води.
- термічна стабільність. Багато уловлювачів випаровувань також мають конструкцію, яка допомагає підтримувати температурну стабільність всередині посудини. Стабільна температура зменшує коливання швидкості випаровування та запобігає утворенню повітряних потоків, які могли б видаляти водяну пару.
- захист від повітряних потоків. Закрита конструкція також фізично захищає поверхню рідини від зовнішніх повітряних потоків, які можуть посилювати випаровування, здуваючи насичене повітря.
- зменшення впливу перепадів тиску. Деякі більш складні системи можуть також враховувати або мінімізувати вплив невеликих перепадів тиску, які можуть виникати під час роботи з дозатором.

Отже, уловлювач випаровувань не вимірює випаровування в прямому сенсі, а активно запобігає йому або зводить його до мінімуму, створюючи контрольоване мікросередовище. При цьому майже увесь об'єм дози знаходиться в уловлювачі частково в первісному рідкому стані, частково в газоподібному і частково в конденсованому станах, зберігаючи всю масу дози, що є важливим для калібрування дозаторів.

У п.7.3 та 7.4 ISO 8655-6:2022 [2] визначено, що тривалість випробувального циклу – це час, необхідний для завершення зважування однієї внесеної дози об'єму в ємність для зважування, і він повинен бути зведеним до мінімуму. Важливо, щоб час циклу калібрування, як визначено вище, був регулярним від циклу до циклу, та може бути застосована математична компенсація похибки через випаровування під час серії вимірювань. У пп. 5.3, 5.4, 6, 7.2, 7.3, 7.4, 8.1.4, 8.3.2, 9.1 ISO 8655-6:2022 [2] наводяться настанови, щодо мінімізації $\delta_{\text{вип.}}$, які частково повторюють настанови DKD-R 8-1 [6]:

- чіткі вимоги до метрологічних характеристик допоміжних ЗВТ;

- застосовувати ємність для зважування, яка б забезпечувала найменшу втрату маси від випаровування дистильованої води, наприклад при виборі ємності звертати увагу на її геометрію (обирати з меншою площею випаровування) та з наявністю кришки, розглянути можливість використання уловлювача випаровувань;
- враховувати поправку від випаровування рідини за калібрування малих об'ємів доз – менше 50 мкл;;
- затримка наконечника в рідині після забору об'єму дози;
- оцінити експериментально $\delta_{\text{вип.}}$ за 10 циклів тестування;
- різницю температур повітря та води має бути не більше $\pm 0,5$ °C, яку можна мінімізувати використовуючи відповідну ємність;
- приміщення КЛ має бути без протягів із стабільним середовищем. Допустимі межі температури повітря діапазоні від 20 °C до 23 °C з максимальним коливанням $\pm 0,5$ °C на годину. Допустимі межі відносної вологості повітря від 45% до 80%.
- перед калібруванням приміщення та обладнання мають знаходитись в допустимих умовах навколишнього середовища не менше 2 годин.
- дистильована вода має бути не гіршою за характеристиками ніж клас 3 ISO 3696;
- на початку та в кінці калібрування необхідно вносити записи не тільки умови навколишнього середовища, а й температури води.

Обчислення втрати маси води за рахунок випаровування з поверхні посуду для калібрування за час між внесенням води і зчитуванням значення з вагів пропонується обчислювати за формулою, яка є модифікованим варіантом формули наведеної в п.9.1 [2, ф.1]:

$$\delta_{\text{вип.}} = \frac{(m_{10} - m_{11}) + \dots + (m_{n0} - m_{n1})}{n} \quad (2)$$

де m_{10} – покази ваг після внесення першої дози рідини у ємність для зважування та стабілізації значення, г;

m_{11} – покази ваг перед внесенням наступної дози води у ємність через інтервал τ_1 , г;

m_{n0} – покази ваг після n -го внесення води у ємність та стабілізації значення, г;

m_{n1} – покази ваг через час після n -го внесення води у ємність через інтервал τ_n , г;

n – загальна кількість повторних циклів.

Процес відповідного експерименту наведено нижче (Рис. 2). Такий експеримент доцільно проводити під час проведення валідації для типових дозаторів та об'ємів доз. Також для зменшення невизначеності такий експеримент можна проводити безпосередньо під час калібрування.

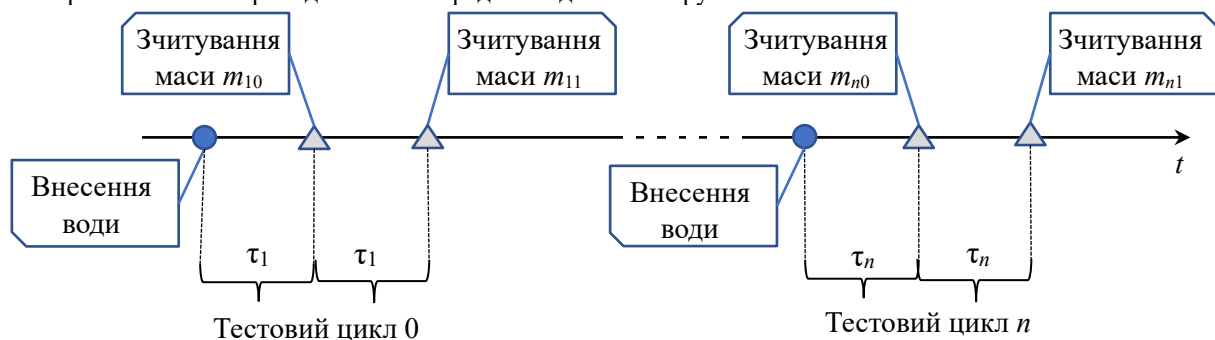


Рис. 2 Часова діаграма процесу визначення середньої випаровуваної маси води в умовах лабораторії

Процедура визначення втрати маси полягає у наступному:

1. Згідно описаної процедури (п. 8.3.2 ISO 8655-6:2022 [2]) наберіть воду у дозатор та внесіть у посуд, зафіксуйте покази вагів m_{10} після їх стабілізації. Час між внесенням води і зчитуванням маси є часом циклу дозування τ_1 .
 2. Через інтервал часу τ_1 зафіксуйте покази вагів m_{11} . Обнулiть ваги, якщо це передбачено методом калібрування.
 3. Внесіть воду і повторіть п.1 та п.2 визначену кількість разів. Потрібно зазначити, що мінімальна кількість циклів під час наведеної процедури – 2. Бажано для зменшення невизначеності від поправки $\delta_{\text{вип.}}$ виконати 10 повторних циклів.
 4. Останній цикл: після внесення води, після стабілізації (час τ_n), зафіксуйте покази вагів m_{n0} та через час τ_n зафіксуйте покази m_{n1} .
 5. Обчисліть середнє значення втрати маси із-за випаровування за формулою 2.
- Отримане значення $\delta_{\text{вип.}}$ можна використовувати як:

- поправку до результатів калібрування або проміжних перевірянь, якщо значення $\delta_{\text{вип.}}$ отримане безпосередньо під час калібрування та перевищує значення допустимої похибки або невизначеності, регламентованої виробником;
- складову невизначеності калібрування для відповідного діапазону дозування, поклавши рівномірний закон розподілу;
- характеристику функціонування калібрувальної системи, для вирішення питання нехтовності цієї складової невизначеності.

Якщо значення $\delta_{\text{вип.}}$ застосовується як поправка, то в результат оцінювання невизначеності під час калібрування потрібно внести відповідну складову невизначеності $u(\delta_{\text{вип.}})$. Ця складова містить як мінімум два компоненти, а саме складову чутливості вагів (одиницю молодшого розряду) та повторюваність, оцінену як стандартне відхилення отриманих значень різниць мас m_n та m_{n+1} для кожного тестового циклу. Для представлення $u(\delta_{\text{вип.}})$ в аналітичній формі введемо параметр втрати маси (mass loss) від випаровування:

$$ml_i = m_{i0} - m_{i1},$$

де i – порядковий номер циклу від 1 до n .

$$u(\delta_{\text{вип.}}) = \sqrt{\left(\frac{d}{2\sqrt{3}}\right)^2 + s(ml)^2},$$

де d – одиниця молодшого розряду ваг, якими калібрують дозатор;

$s(ml)$ – оцінка середньоквадратичного відхилення різниць ml ;

Якщо значення $\delta_{\text{вип.}}$ використовується як характеристика функціонування калібрувальної системи, тобто обладнання, яке застосовується під час калібрування зменшує втрату маси з-за випаровування, то як критерій нехтовності може бути запропонований наступний: якщо значення $\delta_{\text{вип.}}$ складає не більше 1/5 від допустимої похибки дозатора для відповідного значення дози рідини, то цією складовою можна знехтувати.

В ISO/TR 20461 [3] містяться настанови стосовно обчислення компонентів невизначеності результату непрямого вимірювання об'єму дозу гравіметричним методом. У п.6.2 цього документу стосовно невизначеності обумовленої ефектом випаровування вказують, що цей параметр оцінюється в кожній лабораторії.

У п.5.3.8 та п.6.2.8 рекомендації з оцінювання невизначеності результату калібрування гравіметричним методом засобів вимірювання об'єму EURAMET-cg-19 Version 3.0 (09/2018) [8] вказується, що зважування наповненої бюретки слід проводити якнайшвидше, щоб зменшити помилки, спричинені будь-яким випаровуванням. Чітких настанов з оцінювання невизначеності внесення поправки $\delta_{\text{вип.}}$ не зазначено.

У п. 7.2.3 стандарту ASTM E542–22 [9], який поширюється на калібрування лабораторних засобів вимірювання об'єму від 0,1 мл до 10 л зазначається, що відносна вологість лабораторії повинна бути в межах від 40% до 60%, стабільною до 6,5% за 4 години, температура від 21°C до 23°C з коливаннями не більше ± 1 °C та відхилення температури води від повітря не більше $\pm 0,5$ °C, щоб відповідати більшості збалансованих робочих умов виробника. Хоча відносна вологість використовується та коригується при розрахунку густини повітря, вона не коригує потенційні похибки, спричинені випаровуванням або конденсацією. Стабільна відносна вологість також може мінімізувати вплив випаровування або конденсації на об'ємні прилади та може мінімізувати вплив статичної електрики на об'ємні прилади, еталони маси та терези під час вимірювань. У п.17.9 цього документу визначено, що якщо чітко дотримуватись настанов та умов проведення вимірювань, то невизначеність на випаровування можна не враховувати.

У звіті EURAMET PROJECT 1295 (01/2019) [10] для піпеток 1000 мкл і 100 мкл встановлено, що чутливість випаровування до відносної вологості змінюється приблизно на 0,07% при 10% rH зміни вмісту вологи. Цей коефіцієнт чутливості виявився трохи вищим (0,10%/10%rH) для піпеток об'ємом 10 мкл.

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

1. У цій статті за результатом аналізування складено таблицю типових джерел невизначеності, пов'язаної з результатом дозування та калібрування дозатора.

2. Авторами висвітлено проблему та запропоновані рішення оцінювання поправки обумовленої втрати маси води від випаровування рідини з поверхні посуду під час калібрування та під час проміжних перевірянь дозаторів ($\delta_{\text{вип.}}$) та пов'язаною з внесенням поправки невизначеності $u(\delta_{\text{вип.}})$.

3. Умови проведення, які можна рекомендувати для проведення калібрування в КЛ або проміжних перевірянь та внутрішньолaboratorних калібрувань ВЛ наступні:

- температура повітря від 20 °C до 23 °C з дрейфом не більше $\pm 0,5$ °C;
- відносна вологість повітря від 45% до 60 % з дрейфом не більше $\pm 0,5$ %;
- відхилення температури дистильованої води від повітря не більше $\pm 0,5$ °C;
- наявність уловлювача випаровувань для об'єму доз менше 50 мкл та ємності для зважування доз більше 50 мкл, що оснащені кришкою.

Література

1. ISO/IEC 17025:2017 General requirements and for the competence of testing and calibration laboratories. URL: <https://www.iso.org/ru/standard/66912.html>.
2. ISO 8655-6:2022 Piston-operated volumetric apparatus — Part 6: Gravimetric reference measurement procedure for the determination of volume. URL: <https://www.iso.org/ru/standard/75211.html>
3. ISO/TR 20461:2023 Determination of uncertainty for volume measurements of a piston-operated volumetric apparatus using a gravimetric method. URL: <https://www.iso.org/ru/standard/68803.html>
4. ISO 8655-10 Piston-operated volumetric apparatus — Part 10: User guidance, and requirements for competence, training, and POVA suitability. URL: <https://www.iso.org/ru/standard/79614.html>
5. ASTM E1154 – 23 Standard Specification for Piston or Plunger Operated Volumetric Apparatus and Operator Qualification. URL: <https://store.astm.org/e1154-23.html>
6. DKD-R 8-1. Guideline. Calibration of piston-operated pipettes with air cushion. Issue 12/2011 URL: https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/dienstleistungen/dkd/archiv/Publications/Guidelines/DKD-R_8-1_englisch_neu_.pdf
7. Installation Instructions Evaporation Trap MS-ET-54. Mettler-Toledo AG. Laboratory & Weighing Technologies. Greifensee, Switzerland. – 2 p. URL: https://www.mt.com/dam/product_organizations/laboratory_weighing/Accessories/evaporation_trap/manuals/en/MS-ET-54_INI_en_30036177A.pdf
8. Guidelines on the Determination of Uncertainty in Gravimetric Volume Calibration EURAMET Calibration Guide No. 19 Version 3.0 (09/2018). – 26 p. URL: https://www.euramet.org/Media/docs/Publications/calguides/I-CAL-GUI-019_Calibration_Guide_No._19_web.pdf
9. ASTM E542 – 22 Standard Practice for Gravimetric Calibration of Laboratory Volumetric Instruments. URL: <https://store.astm.org/e0542-22.html>
10. EURAMET PROJECT 1295 (01/2019) Guide on the Calibration, Operation and Handling of Micropipettes. Final REPORT. NQIS/EIM, Greece – 40 p.

References

1. ISO/IEC 17025:2017 General requirements and for the competence of testing and calibration laboratories. URL: <https://www.iso.org/ru/standard/66912.html>.
2. ISO 8655-6:2022 Piston-operated volumetric apparatus — Part 6: Gravimetric reference measurement procedure for the determination of volume. URL: <https://www.iso.org/ru/standard/75211.html>
3. ISO/TR 20461:2023 Determination of uncertainty for volume measurements of a piston-operated volumetric apparatus using a gravimetric method. URL: <https://www.iso.org/ru/standard/68803.html>
4. ISO 8655-10 Piston-operated volumetric apparatus — Part 10: User guidance, and requirements for competence, training, and POVA suitability. URL: <https://www.iso.org/ru/standard/79614.html>
5. ASTM E1154 – 23 Standard Specification for Piston or Plunger Operated Volumetric Apparatus and Operator Qualification. URL: <https://store.astm.org/e1154-23.html>
6. DKD-R 8-1. Guideline. Calibration of piston-operated pipettes with air cushion. Issue 12/2011 URL: https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/dienstleistungen/dkd/archiv/Publications/Guidelines/DKD-R_8-1_englisch_neu_.pdf
7. Installation Instructions Evaporation Trap MS-ET-54. Mettler-Toledo AG. Laboratory & Weighing Technologies. Greifensee, Switzerland. – 2 p. URL: https://www.mt.com/dam/product_organizations/laboratory_weighing/Accessories/evaporation_trap/manuals/en/MS-ET-54_INI_en_30036177A.pdf
8. Guidelines on the Determination of Uncertainty in Gravimetric Volume Calibration EURAMET Calibration Guide No. 19 Version 3.0 (09/2018). – 26 p. URL: https://www.euramet.org/Media/docs/Publications/calguides/I-CAL-GUI-019_Calibration_Guide_No._19_web.pdf
9. ASTM E542 – 22 Standard Practice for Gravimetric Calibration of Laboratory Volumetric Instruments. URL: <https://store.astm.org/e0542-22.html>
10. EURAMET PROJECT 1295 (01/2019) Guide on the Calibration, Operation and Handling of Micropipettes. Final REPORT. NQIS/EIM, Greece – 40 p.