



15–16 жовтня 2014 р. у м. Харкові на базі Національного наукового центру “Інститут метрології” відбулася IX Міжнародна науково-технічна конференція “Метрологія та вимірювальна техніка”, присвячена питанням сучасного стану методології, нормативної бази, вимірювальної техніки і метрологічного забезпечення у різних видах вимірювань.

У цьому випуску журналу публікуються розширені доповіді, прочитані на конференції та рекомендовані оргкомітетом до публікації в “Українському метрологічному журналі”. У наступному випуску їх публікацію буде продовжено.

УДК 006.91:531.7

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АВТОМАТИЧНОГО ДОЗАТОРА ГРАФІТОВОЇ ПЕЧІ АТОМНО-АБСОРБЦІЙНОГО СПЕКТРОМЕТРА SOLAAR M6 DUAL ZEEMAN

А. Г. Івков, провідний науковий співробітник, начальник лабораторії ННЦ “Інститут метрології”, м. Харків
Є. Ю. Щур, молодший науковий співробітник ННЦ “Інститут метрології”, м. Харків



А. Г. Івков



Є. Ю. Щур

Подано результати проведених досліджень метрологічних характеристик автоматичного дозатора графітової печі атомно-абсорбційного спектрометра SOLAAR M6 DUAL ZEEMAN.

The metrological investigations of automatic dosing device (autosampler) which is part of the graphite furnace atomic absorption spectrometer SOLAAR M6 DUAL ZEEMAN were shown.

Одним із ключових завдань Головного центру Державної служби стандартних зразків (ГЦ ДССЗ) Національного наукового центру “Інститут метрології” є забезпечення простежуваності атестованих значень стандартних зразків, що випускають в Україні, пов’язаної з обґрунтовано оціненими невизначеностями значень цих метрологічних характеристик. Для атестації стандартних зразків розчинів іонів металів ГЦ ДССЗ має можливість застосування атомно-абсорбційного спектрометра SOLAAR M6 Dual Zeeman виробництва компанії “ThermoElectron Corp.”

(Англія). У роботі [1] показано можливість експериментального дослідження фактичних вимірювальних можливостей спектрометра SOLAAR M6 у режимі електротермічної атомізації (встановлення обґрунтованих границь оптимального діапазону вимірюваних концентрацій для кожного елемента та похибок результатів цих вимірювань), а в [2] розглянуто спосіб установа похибки дозування автоматичного пробовідбірника системи електротермічної атомізації у графітовій печі спектрометра, яка є відправною точкою при складанні бюджету невизначеності вимірювання вмісту елементів спектрометром SOLAAR M6. Цей спосіб, що полягає у визначенні ваговим методом об’єму, який дозує автоматичний пробовідбірник, у [2] було детально досліджено та показано його придатність і очікувану задовільну точність.

У цій публікації подано експериментальні результати, отримані під час реалізації цього способу, та статистичні підходи до опису похибки дозування автоматичного пробовідбірника системи електротермічної атомізації у графітовій печі спектрометра SOLAAR M6 (рис. 1).

Досліджуваний дозатор під час проведення аналізу забезпечує автоматичний відбір та подавання до графітової печі об’ємів у діапазоні від 0,5 мкл ($5 \cdot 10^{-7}$ дм³ або 0,5 мм³) до 70,0 мкл ($7 \cdot 10^{-5}$ дм³ або 70,0 мм³). Проте під час проведення хімічного аналізу найпоширеніший об’єм проби для графітової печі спектрометра SOLAAR M6 становить 20,0 мкл, і через великий вплив похибки дозування, нечасто виникає необхідність відбирати об’єми, що є меншими за 20 мкл (а об’єми менше ніж 2 мкл виробник спектрометра рекомендує взагалі не вико-



Рис. 1. Спектрометр SOLAAR M6 Dual Zeeman

ристовувати). З урахуванням цього було вирішено дослідити метрологічні характеристики дозатора в діапазоні від 2 до 70 мкл, приділивши найбільшу увагу точці 20 мкл.

Ваговий метод визначення об'єму полягає у зважуванні на прецизійних вагах дозованих пристроєм об'ємів рідини відомої густини (дистильованої води) і подальшому порівнюванні значень фактично дозованих об'ємів (розрахованих діленням точно вимірної маси дозованої рідини на її густину, знайдену за довідковими таблицями [3] густини дистильованої води за визначеної температури) з номінальними значеннями дозованих об'ємів.

Результат кожного вимірювання маси води (за схемою АВВА, де А – еталонна гиря, а В – об'єкт, що зважують [4]) розраховували за формулою

$$m_{H_2O} = \left[\left(\frac{m_{6,H_2O}^6 + m_{6,H_2O}^7}{2} \right) + \left(m_{гиря}^{атест.} - \frac{m_{гиря}^5 + m_{гиря}^8}{2} \right) \right] - \left[\left(\frac{m_{сух.б.}^2 + m_{сух.б.}^3}{2} \right) + \left(m_{гиря}^{атест.} - \frac{m_{гиря}^1 + m_{гиря}^4}{2} \right) \right],$$

де m_{6,H_2O}^i – маса скляного бюксу з дозованим об'ємом води, г; $m_{сух.б.}^i$ – маса сухого скляного

Таблиця 1
Результати дозування автоматичним пробовідбірником системи електротермічної атомізації у графітовій печі спектрометра SOLAAR M6

	Номінальні значення дозованих об'ємів											
	2 мкл	5 мкл	10 мкл	20 мкл		24 мкл	28 мкл	35 мкл	42 мкл	50 мкл	60 мкл	70 мкл
Фактичні значення дозованих об'ємів, мкл	2,359	5,479	10,559	20,414	20,359	24,428	28,588	35,688	42,518	50,676	60,743	70,754
	2,489	5,520	10,587	20,503	20,336	24,533	28,589	35,596	42,723	50,517	60,819	70,686
	2,479	5,476	10,479	20,490	20,377	24,572	28,547	35,694	42,593	50,687	60,697	70,675
	2,386	5,522	10,454	20,578	20,453	24,548	28,487	35,662	42,649	50,626	60,673	70,472
	2,361	5,357	10,410	20,576	20,606	24,561	28,563	35,575		50,712	60,737	70,828
	2,404	5,411	10,489	20,611	20,566			35,576		50,798	60,707	70,681
	2,449	5,491	10,420	20,478	20,592			35,546		50,625		70,651
	2,337	5,433	10,469	20,473	20,455			35,585		50,665		70,742
	2,355	5,456		20,430	20,507			35,592		50,759		70,586
	2,496	5,444		20,609	20,533					50,781		70,664
		5,395		20,526	20,536					50,730		70,611
		5,426		20,493	20,558					50,726		70,486
		5,457		20,342						50,714		70,536
										50,696		70,545
									50,650		70,737	
n_j	10	13	8	25		5	5	9	4	15	5	15

бюксу перед дозуванням у нього води, г; $m_{\text{гірі}}^{\text{атест.}}$ – атестована маса п'ятиграмової гірі, г; $m_{\text{гірі}}^i$ – маса п'ятиграмової гірі, показана вагами, г; $i = 1...8$ – порядок зважування об'єктів.

Одержавши результати визначення мас для 115 заданих оператором номінальних значень об'ємів води у діапазоні від 2 до 70 мкл, розраховували виправлені з урахуванням змін густини повітря значення фактично дозованих пристроєм об'ємів води $V_{\text{H}_2\text{O}}$ згідно з Настановами щодо калібрування піпеток-дозаторів [5]:

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{\rho_{\text{гірі}}} \cdot \frac{\rho_{\text{гірі}} - \rho_{\text{пов.}}}{\rho_{\text{H}_2\text{O}} - \rho_{\text{пов.}}},$$

де $\rho_{\text{H}_2\text{O}}$ – густина води за температури вимірювання маси відповідно до таблиць стандартних довідкових даних, г/дм³ [3]; $\rho_{\text{гірі}}$ – густина матеріалу еталонної гірі, г/дм³; $\rho_{\text{пов.}}$ – густина повітря під час проведення вимірювань, розрахована відповідно до додатка Е.3 OIML R 111-1: 2004 [4] за даними атмосферного тиску, відносної вологості повітря та температури повітря під час проведення вимірювань, г/дм³.

Отримані виправлені значення фактично дозованих автоматичним пробовідбірником спектрометра SOLAAR M6 об'ємів води наведено у табл. 1.

Окрім цих 115 результатів, отриманих протягом липня–серпня 2014 року, були наявні також ще 24 результати, одержані у 2012 році під час попередніх досліджень, описаних у [2], але вони, на жаль, не були супроводжені відомостями щодо умов проведення вимірювань (немає даних щодо атмосферного тиску та відносної вологості повітря), тому немає можливості врахувати поправки на густину повітря [4, 5] та включити ці 24 результати до розгляду.

При подальшому обробленні даних, віднімаючи від отриманих при вимірюванні значень фактично дозованого об'єму відповідні їм задані оператором номінальні значення об'єму, отримали вибірки значень абсолютних відхилень дозування для кожного із 115 заданих номінальних об'ємів, відображені на

рис. 2, на якому також позначено їх апроксимуючу пряму, отриману за методом найменших квадратів.

Настановами [5] при обробленні результатів калібрування дозаторів передбачено також перерахунок значень фактично дозованих об'ємів (що були отримані за певної температури проведення вимірювань) до так званої “базової” температури 20 °С. Це зумовлено тим, що матеріал робочої камери, вузлів та поршня дозатора може зазнавати ефекту теплового розширення, що спричиняє систематичне викривлення дозованого об'єму при зміні температури. Для виконання такого перерахунку необхідно знати коефіцієнт об'ємного розширення дозатора, який для ручних піпеток-дозаторів зазвичай повідомляє виробник, у даному ж випадку для автоматичного пробовідбірника системи електротермічної атомізації спектрометра SOLAAR M6 такої інформації немає.

У зв'язку з цим було здійснено спробу виявити таку залежність за отриманими даними дослідження залежності зміни значення об'єму, віднесеного до його номінального значення $V/V_{\text{ном}}$, від зміни температури за графіком, наведеним на рис. 3. Але отриманий у такий спосіб методом найменших квадратів експериментальний кутовий коефіцієнт прямої 0,00015, при перевірці його за t -критерієм Стьюдента, виявився статистично незначуще відмінним від нуля, тобто з'ясувалося, що за наявними експериментальними даними (а саме через велике переважання змінної складової похибки над цим порівняно малим систематичним ефектом) неможливо виявити статистично значиму залежність між зміною дозованого об'єму та температурою.

Відповідно до зазначеного на рис. 2 рівняння функції залежності абсолютної похибки дозування від номінального об'єму, визначено систематичну похибку дозування при заданому номінальному значенні дозованого об'єму проби розчину аналізованого компонента $D_V = 0,0047 \cdot V_{\text{ном}} + 0,4197$, яку треба буде враховувати при обчисленні результатів визначення вмісту цього компонента в пробі у процесі хімічного аналізу.

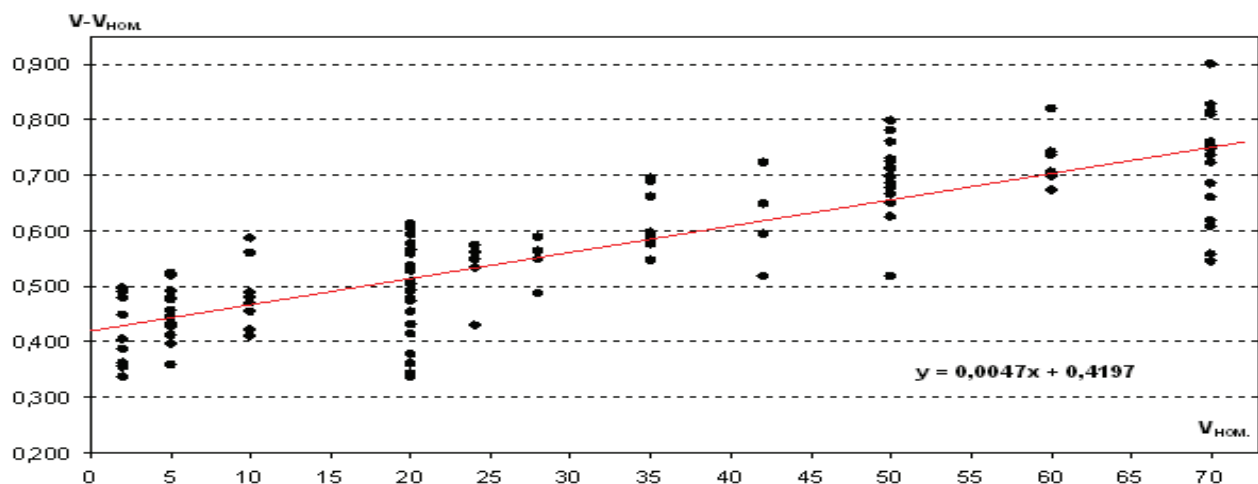


Рис. 2. Залежність відхилення результату дозування від номінального об'єму

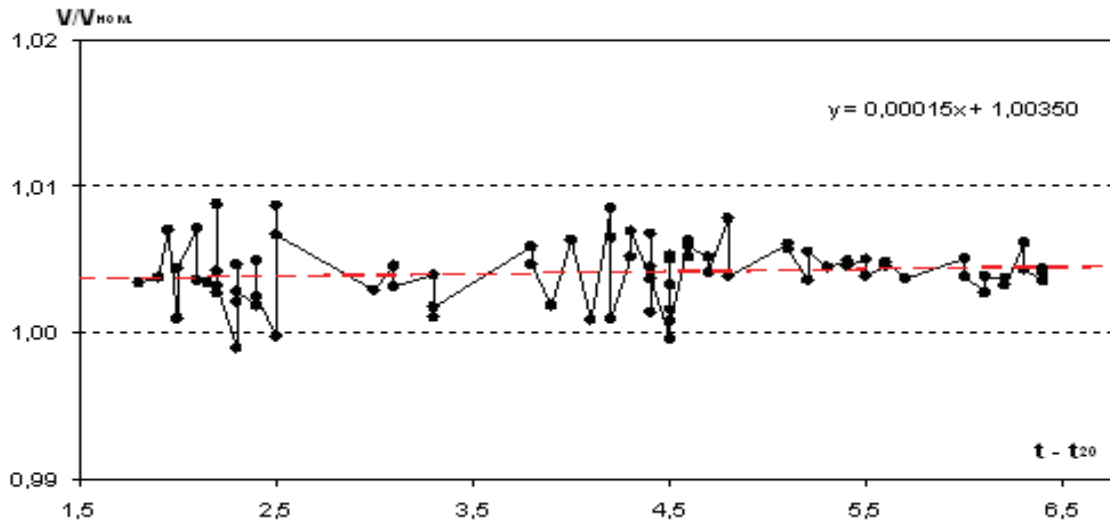


Рис. 3. Залежність відхилення результату дозування від зміни температури

Очевидно, що отримане апроксимуюче рівняння не точно відображає реальну залежність, тому методами математичної статистики [6] оцінено довірчий інтервал похибки цієї поправки (тобто лінії регресії), який наведено на рис. 4. Для складової невизначеності, пов'язаної з неточністю введення поправки, в залежності від номінального об'єму, можна виділити чотири діапазони значень:

V , мкл	2...15	16...46	47...60	61...70
$u_{\text{попр.}}$, мкл	0,023	0,015	0,023	0,029

Для статистичного аналізу випадкової складової похибки з експериментальних даних було виключено їх систематичну складову відніманням від експериментальних значень відхилень об'ємів відповідних їм значень систематичних відхилень об'ємів, розрахованих за вищезазначеним апроксимуючим

рівнянням, у результаті чого було отримано масив даних, що характеризує змінну (випадкову) складову похибки дозування.

При спільному обробленні даних усіх 11 груп для номінальних об'ємів у діапазоні від 2 до 70 мкл виявилось, що 11 дисперсій, отримані для кожної з груп досліджуваних значень об'ємів, є статистично сумісними за критерієм Барглета [7]: розраховане значення критерію становило $B = 13,4$, тоді як для $\alpha = 0,05$ табличне значення розподілу $\chi^2_{0,05}(10) = 18,3$. Гістограму розподілу випадкової похибки наведено на рис. 5.

Перевірено вид розподілу випадкової похибки за критерієм омега-квадрат [8] (критерій Крамера–Мізеса–Смирнова) та встановлено, що гіпотеза про відповідність розподілу нормальному не відхиляється від рівня значущості $\alpha = 0,05$ ($\omega^2_{\text{експ.}} = 0,113$; $\omega^2_{0,05} = 0,126$, тобто $\omega^2_{\text{експ.}} < \omega^2_{0,05}$).

Було досліджено вид випадкової функції, що описує випадкову похибку як процес, тобто розглянуто, як змінюється значення похибки в ряду

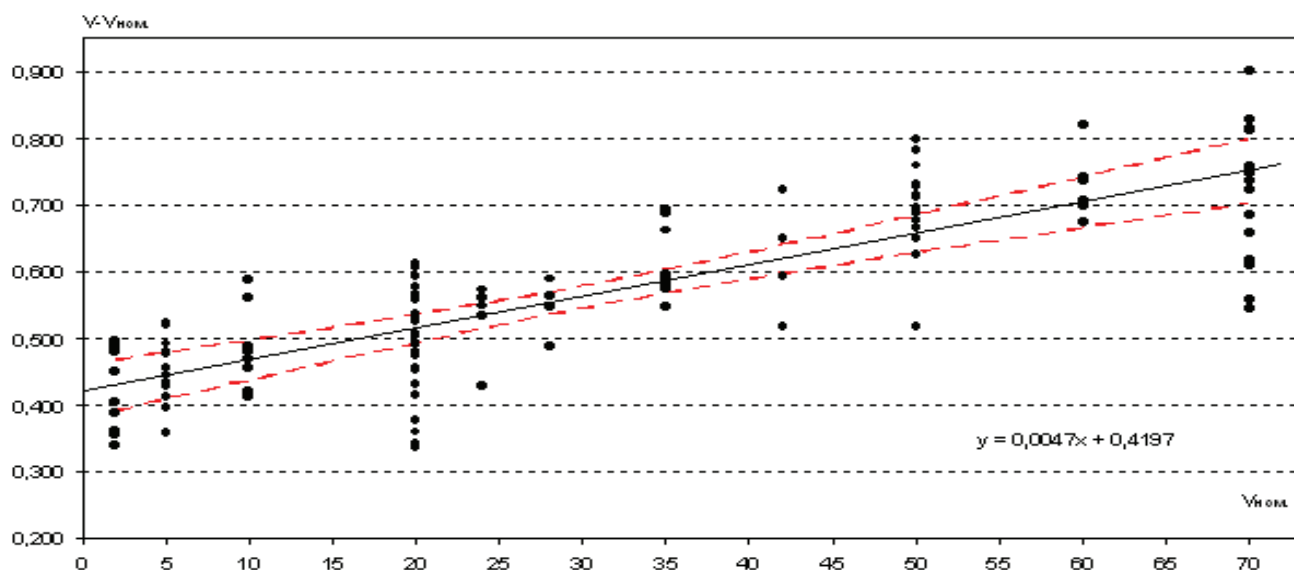


Рис. 4. Довірчий інтервал для систематичної похибки дозування (поправки)

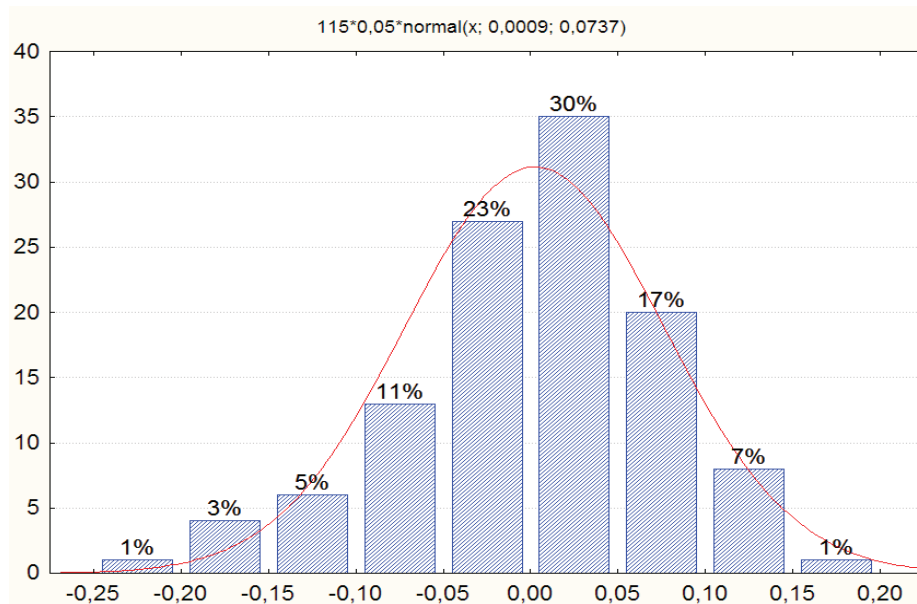


Рис. 5. Розподіл загальної вибірки отриманих значень випадкової похибки дозування об'єму

отримуваних упродовж одного дня значень та який наявний ступінь взаємного зв'язку (автокореляції) між результатами сусідніх вимірювань у такому ряду (див. рис. 6 та 7).

На рис. 6, де кожна лінія відповідає окремому дню вимірювань, можна побачити, що динаміка зміни випадкової похибки протягом дня відповідає поняттю ергодичного процесу [9], а на рис. 7 відображено побудовану автокореляційну функцію цього процесу, з якої випливає, що під час проведення вимірювань уже друге вимірювання є повністю незалежним від першого (тобто всі виконані протягом дня вимірювання можна вважати незалежними одне від одного), а зміни значень похибок протягом дня обумовлено випадковим розсіюванням.

Графік залежності оцінок середніх квадратичних відхилень випадкової похибки від об'єму (рис. 8) виявляє їх можливу залежність від зростання дозованого об'єму (що може бути обумовлено особливостями конструкції дозуючого пристрою).

У зв'язку із цим виділено дві групи об'ємів з однорідними оцінками, для яких отримано такі об'єднані (середньозважені) оцінки середніх квадратичних відхилень:

1 група: 2 мкл, 5 мкл та 10 мкл, $\bar{s} = 0,056$, $f = 28$;

2 група: 20 мкл, 24 мкл, 28 мкл, 35 мкл, 42 мкл, 50 мкл, 60 мкл та 70 мкл, $\bar{s} = 0,078$, $f = 76$.

Зроблено спроби виявити вплив інших можливих факторів на похибку дозування автоматичного пробовідбірника системи електротермічної атомізації у графітовій печі спектрометра SOLAAR M6, щоб упевнитися в тому, що виправлені результати визначення об'єму, отримані ваговим методом, являють собою дійсні властивості дозуючого пристрою, не пов'язані з недосконалою реалізацією вагового методу або неврахованим систематичним впливом зовнішніх умов, таких, як атмосферний тиск, вологість чи температура.

Розгляд залежності випадкової похибки від атмосферного тиску, вологості та температури

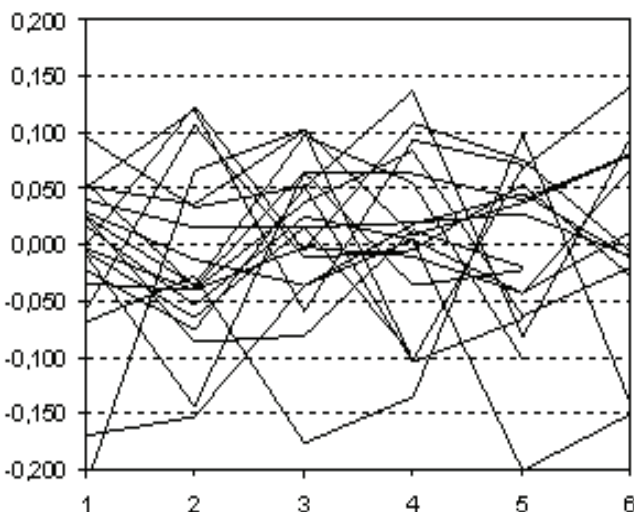


Рис. 6. Ергодичність похибки

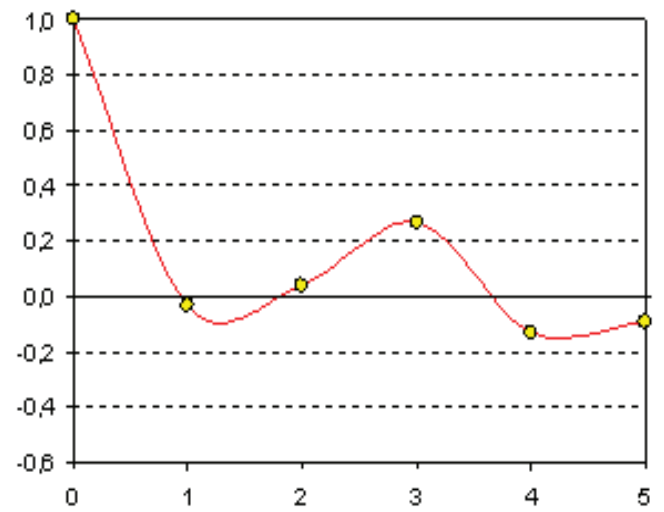


Рис. 7. Автокореляція результатів

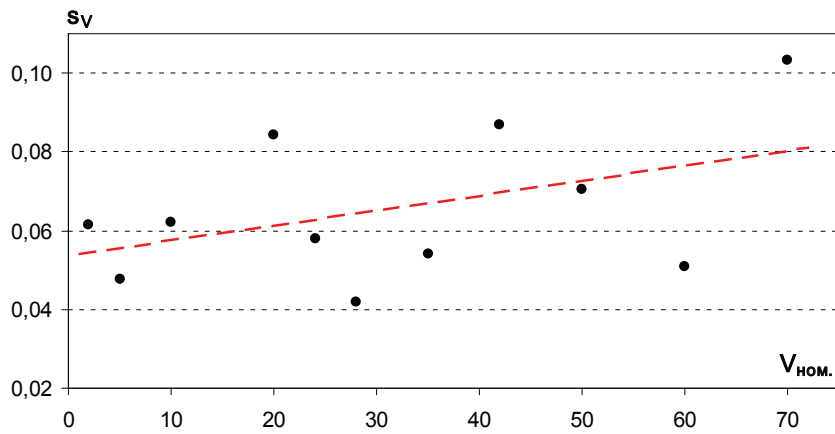


Рис. 8. Залежність оцінок середніх квадратичних відхилень випадкової похибки від дозованого об'єму

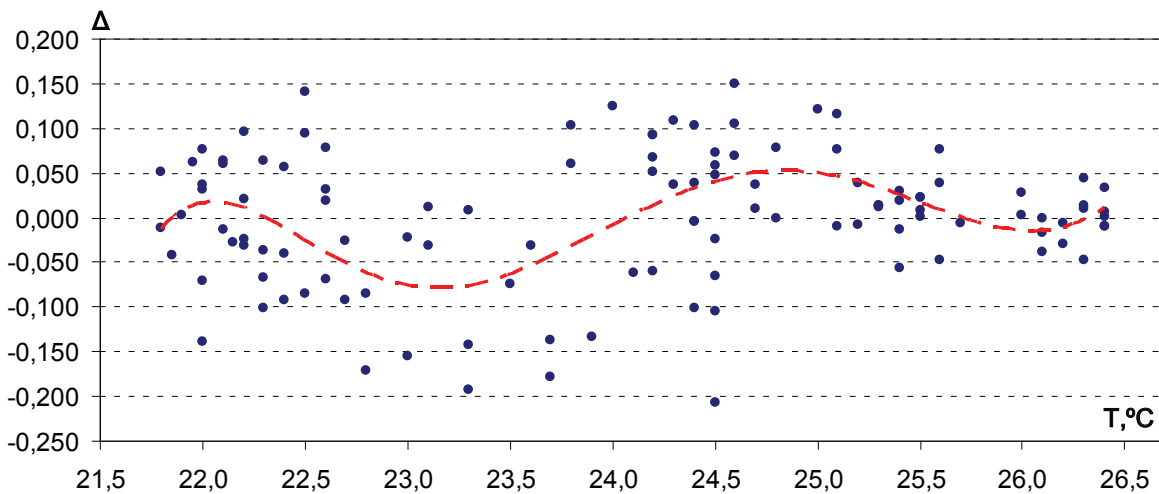


Рис. 9. Залежність випадкової похибки від температури

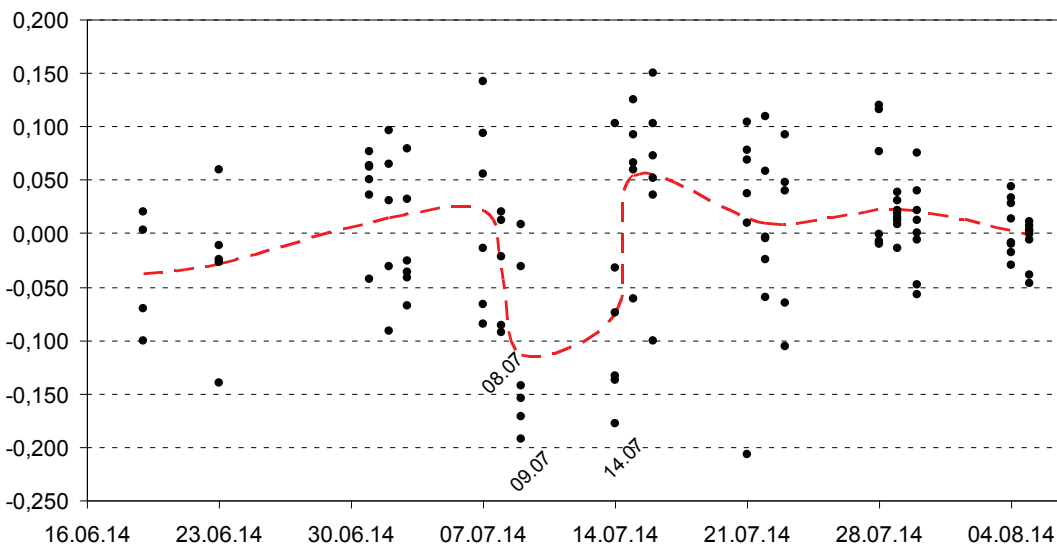


Рис. 10. Зміна випадкової похибки протягом часу проведення вимірювань

показав, що зміна вологості з дня на день фактично не впливає на середнє значення відносної похибки в окремий день, хоча вплив атмосферного тиску вже може бути суттєвим (зі збільшенням тиску

трохи зростає середнє значення випадкової похибки), при цьому можна спостерігати нез'ясований "провал" значень випадкової похибки в інтервалі температур від 22,6 до 24,0 °С (рис. 9).

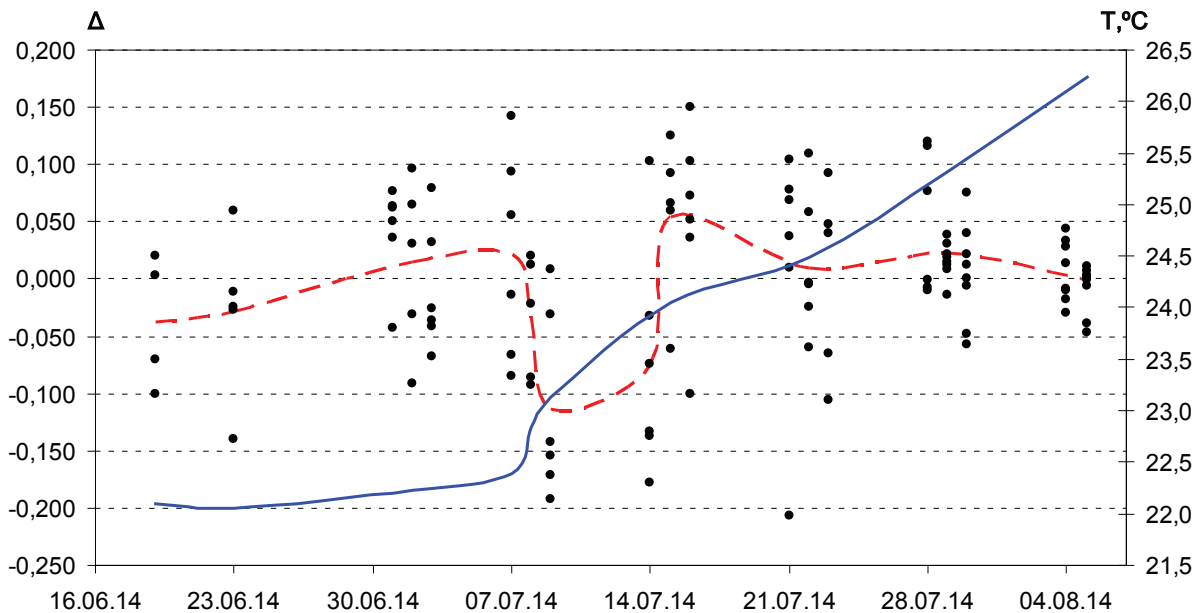


Рис. 11. Вплив температури на значення випадкової похибки

На рис. 10 показано, як “поводить себе” відносна похибка протягом всього періоду часу, впродовж якого виконувалися вимірювання (липень–серпень 2014 р.). Із графіка видно, що протягом трьох днів вимірювань (8, 9 та 14 липня) спостерігається суттєвий аномальний “провал” значень похибок.

Найбільш показово те, що якраз на ці самі дні припадають і значення температури, що відповідають “провалу” значень похибки на рис. 9. Якщо накласти один на одний графік зміни випадкової похибки протягом часу проведення вимірювань та графік зміни температури протягом часу проведення вимірювань (рис. 11), то можна помітити, що “провал” значень відносної похибки відповідає діапазону стрімкого підвищення температури, таким чином, імовірно, це може бути спричинено різкою та невірноваженою зміною зовнішніх умов під час проведення вимірювань.

Результати проведених досліджень використано для формування бюджету невизначеності вимірювань об’єму ваговим методом, складові якого наведено

на схемі (рис. 12). Бюджет невизначеності складався відповідно до рекомендацій настанови Guideline DKD-R 8-1 [5] щодо калібрування піпеток-дозаторів.

Схема передбачає врахування в бюджеті невизначеності таких складових: невизначеність, пов’язана з вимірюванням маси води (невизначеність ваг, роздільна здатність ваг, випаровування води під час вимірювань і т. ін.); невизначеність, пов’язана з вимірюванням та дрейфом температури, вологості повітря й атмосферного тиску (невизначеність, пов’язана з розрахунком густини води та густини повітря); невизначеність, пов’язана з відтворюваністю; невизначеність, пов’язана із впливом оператора на процес вимірювання і т. ін., що можна узагальнити виразом

$$u^2(V) = \left(\frac{\partial V}{\partial m}\right)^2 \cdot u^2(m) + \left(\frac{\partial V}{\partial t}\right)^2 \cdot u^2(t) + \left(\frac{\partial V}{\partial \rho}\right)^2 \cdot u^2(\rho) + \left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)^2 \cdot u^2(P) + \left(\frac{\partial V}{\partial W}\right)^2 \cdot u^2(W) + u_{\text{бок}}^2 + u_{\text{нопр}}^2 + \dots$$

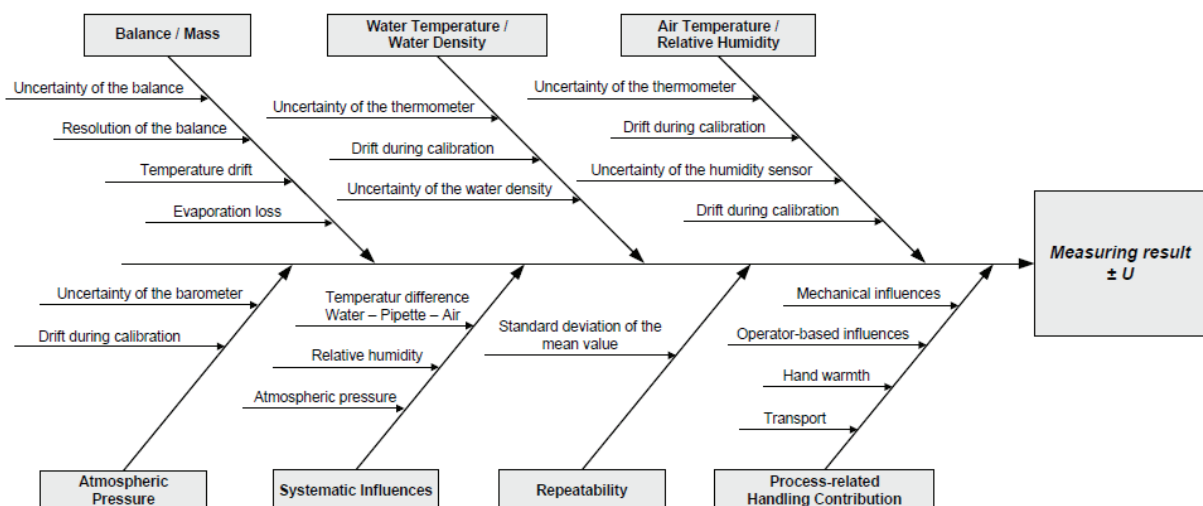


Рис. 12. Бюджет невизначеності для вимірювань об’єму ваговим методом

Таким чином, розширена невизначеність вимірювань під час калібрування становить

$$U_v = k \cdot \sqrt{u^2(V)} \quad (k = 2, P = 0,95),$$

а результат можна записати у вигляді

$$V = (V_{\text{ном.}} + V_{\text{попр.}}) \pm U_v \quad (k = 2, P = 0,95).$$

У результаті проведених досліджень спочатку було оцінено складові невизначеності, пов'язані з визначенням маси води (зважуванням на аналітичних вагах скляного бюксу з дозованим об'ємом води), такі, як дрейф нуля відліку ваг та дрейф під навантаженням, роздільна здатність ваг, дрейф температури під час зважування, втрати води внаслідок випаровування, а також враховано невизначеність маси гирі.

Після цього спостерігалися зміни значень мас порожніх скляних бюксів при маніпуляціях із ними: винос бюкса із камери ваг, відкриття/закриття накривки, витримування бюкса 2 хв іззовні камери

ваг (тобто ті впливи, що не пов'язані з безпосереднім поміщенням води до бюксів). Складова невизначеності, обумовлена так званим "поводженням з бюксом" (операторська похибка) та нестабільністю його маси, становила, за нашими оцінками, 0,064 мкл.

Вплив зовнішніх умов (атмосферного тиску, відносної вологості повітря, температури) також було враховано та відповідні складові невизначеності оцінено відповідно до рекомендацій [5].

Бюджет невизначеності результатів вимірювань при калібруванні дозатора спектрометра SOLAAR M6 наведено в табл. 2.

Результат калібрування разом із розширеною невизначеністю для номінального об'єму 20 мкл можна записати як

$$V = 20,52 \text{ мкл} \pm 0,15 \text{ мкл} \quad (k = 2, P = 0,95).$$

Відповідно для крайніх точок діапазону вимірювань 2 та 70 мкл:

Таблиця 2

Бюджет невизначеності результатів вимірювань

x_i	a	$P(x_i)$	k	$u(x_i)$	c_i	$u_i(V)$
Ваги/маса						
Маса гирі	9 мкг	Нормальне	2	4,5 мкг	0,001 мкл/мкг	0,0045 мкл
Дрейф нуля	1,2 мкг	Прямокутне	$\sqrt{3}$	0,69 мкг	0,001 мкл/мкг	0,00069 мкл
Дрейф під навантаженням	2,3 мкг	Прямокутне	$\sqrt{3}$	1,4 мкг	0,001 мкл/мкг	0,0014 мкл
Роздільна здатність ваг	0,6 мкг	Прямокутне	$\sqrt{3}$	0,347 мкг	0,001 мкл/мкг	0,00035 мкл
Дрейф температури	0,17 К	Прямокутне	$\sqrt{3}$	0,098 К	0,0001 мкл/К	0,00001 мкл
Втрати внаслідок випаровування	10 мкг	Прямокутне	$\sqrt{3}$	5,8 мкг	0,001 мкл/мкг	0,0058 мкл
Густина води						
Невизначеність термометра	0,05 К	Нормальне	2	0,025 К	0,021 мкл/К	0,00053 мкл
Дрейф при вимірюваннях	0,2 К	Прямокутне	$\sqrt{3}$	0,115 К	0,021 мкл/К	0,0024 мкл
Невизначеність густини води	10 ppm	Прямокутне	$\sqrt{3}$	0,00001 мг/мкл	100 мкл ² /мг	0,00058 мкл
Температура						
Невизначеність термометра	0,1 К	Нормальне	2	0,05 К	0,00045 мкл/К	0,00003 мкл
Дрейф при вимірюваннях	0,2 К	Прямокутне	$\sqrt{3}$	0,115 К	0,00045 мкл/К	0,00005 мкл
Атмосферний тиск						
Невизначеність барометра	0,7 гПа	Нормальне	2	0,35 гПа	0,0012 мкл/гПа	0,00042 мкл
Дрейф при вимірюваннях	20 гПа	Трикутне	$\sqrt{6}$	8,165 гПа	0,0012 мкл/гПа	0,0098 мкл
Вологість повітря						
Невизначеність вологоміра	1 %	Нормальне	2	0,50%	0,007 мкл/%	0,0035 мкл
Дрейф при вимірюваннях	5 %	Прямокутне	$\sqrt{3}$	2,89%	0,007 мкл/%	0,0202 мкл
Різниця температур вода-повітря	0,2 К	Прямокутне	$\sqrt{3}$	0,115 К	0,22 мкл/К	0,0254 мкл
Відтворюваність: 5 мкл (2...15)	0,040 мкл	Прямокутне	$\sqrt{3}$	0,023 мкл	1	0,023 мкл
20 мкл (16...46)	0,025 мкл	Прямокутне	$\sqrt{3}$	0,015 мкл	1	0,015 мкл
50 мкл (47...60)	0,040 мкл	Прямокутне	$\sqrt{3}$	0,023 мкл	1	0,023 мкл
70 мкл (61...70)	0,050 мкл	Прямокутне	$\sqrt{3}$	0,029 мкл	1	0,029 мкл
Поводження із бюксом та нестабільність його маси	110 мкг	Прямокутне	$\sqrt{3}$	64 мкг	0,001 мкл/мкг	0,064 мкл

Метрологічні характеристики дозатора спектрометра SOLAAR M6

Діапазон дозування	від 2 до 70 мкл
Абсолютна поправка до номінального об'єму	$(0,0047 \cdot V + 0,4197)$ мкл
Мінімальний крок дозування	0,1 мкл
Невизначеність вимірювань при калібруванні в діапазоні від 2 до 70 мкл	$\pm 0,16$ мкл ($k = 2$, $P = 0,95$)
СКВ при дозуванні (нормальний розподіл) в діапазоні: від 2 до 19,9 мкл від 20 до 70 мкл	0,056 мкл ($f = 28$) 0,078 мкл ($f = 76$)

$$V = 2,43 \text{ мкл} \pm 0,16 \text{ мкл} (k = 2, P = 0,95);$$

$$V = 70,75 \text{ мкл} \pm 0,16 \text{ мкл} (k = 2, P = 0,95).$$

Як можна помітити, відносна розширена невизначеність вимірювань, залежно від номінального об'єму, в діапазоні від 2 до 70 мкл становила від 7 до 0,2 %, а для найбільш використовуваного об'єму 20 мкл – 0,7 %.

Таким чином, у результаті проведених досліджень отримано метрологічні характеристики дозатора спектрометра SOLAAR M6, які наведено в табл. 3.

Встановлені метрологічні характеристики дозатора дозволять враховувати вклад операції дозування до невизначеності результатів хімічного аналізу і обґрунтовано обирати при створенні методик хімічного аналізу оптимальні значення дозованого об'єму, а також достовірно оцінити реальні вимірювальні можливості спектрометра SOLAAR M6, у тому числі, надають можливість у майбутньому дослідити вплив на точність вимірювань операцій випаровування та атомізації проби розчину і вимірювання абсорбції оптичним блоком спектрометра.

Список літератури

1. Івков А. Г. Щодо можливості застосування атомно-абсорбційного спектрометра SOLAAR M6 для атестаційних вимірювань державних стандартних зразків Головним центром Державної служби стандартних зразків України / А.Г. Івков, М.В. Тюхтіна, Є.Ю. Щур // Метрологія та вимірювальна техніка: VII Міжнар. наук.-техн. конф. "Метрологія – 2010", 12–14 жовтня 2010 р., Харків: наук. праці: в 2 т. Т. 1. – Харків: ННЦ "Інститут метрології", 2010. – С. 105–108.
2. Щур Є.Ю. Дослідження метрологічних характеристик автоматичного дозуючого пристрою (auto-sampler) графітової печі атомно-абсорбційного спектрометра Solaar M6 Dual Zeeman / Є.Ю. Щур, А.Г. Івков // Метрологія та вимірювальна техніка: VIII Міжнар. наук.-техн. конф. "Метрологія – 2012" [Електронний ресурс], 9–11 жовтня 2012 р., Харків: наук. праці: в 2 т. Т. 1. – Харків: ННЦ "Інститут метрології", 2012. – С. 69–72. – 1CD-ROM.
3. Recommended table for the density of water between 0 °C and 40 °C based on recent experimental reports / M. Tanaka, G. Girard, R. Davis [et al.] // Metrologia. – 2001. – 38. – P. 301–309.
4. OIML R 111-1: 2004 (E) International Recommendation. Weights of classes E₁, E₂, F₁, F₂, M₁, M₁₋₂, M₂, M₂₋₃ and M₃ // Part 1: Metrological and technical requirements.
5. Guideline DKD-R 8-1 Calibration of piston-operated pipettes with air cushion // Published by the German Calibration Service (DKD) under the patronage of PTB (National Metrology Institute of Germany). – Braunschweig, Germany. – Issue 12/2011. – 24 p.
6. Джонсон Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы обработки данных / Н. Джонсон, Ф. Лион; пер. с англ. под ред. Э.К. Лецкого. – М.: Мир, 1980. – 612 с.
7. Большев Л.Н. Таблицы математической статистики / Л.Н. Большев, Н.В. Смирнов. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1983. – 416 с.
8. Мартынов Г.В. Критерии омега-квадрат / Г.В. Мартынов. – М.: Наука, 1978. – 80 с.
9. Миф Н.П. Модели и оценка погрешности технических измерений / Н.П. Миф. – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 144 с.