DOI: 10.65322/j.srd.05192026.125

UDK 006.91:536.5

HARORAT O‘LCHASH VOSITALARINI KALIBRLASHNING TAKOMILLASHTIRILGAN USLUBIYOTI

Karimov A.Q., *PhD, dotsent,*
e-mail: abrorkarimov@bk.ru
Axmedova S.A., *magistrant,*
e-mail: sit.umidjon@gmail.com
Qarshi davlat texnika universiteti

Annotatsiya. *Ushbu maqolada harorat o‘lchash vositalarini kalibrlash jarayonining metrologik samaradorligini oshirish va amaldagi kalibrlash uslubiyotini takomillashtirish masalalari tadqiq etilgan. Haroratni o‘lchashda natijalarning aniqligi va ishonchliligiga ta’sir ko‘rsatuvchi omillar, jumladan, etalon vositaning metrologik xususiyatlari, tashqi muhit harorati, o‘lchash sharoitlari, asbobning barqarorligi hamda operator faoliyati bilan bog‘liq ta’sirlar tahlil qilingan. Kalibrlash jarayonida o‘lchash xatoliklarini aniqlash, natijalarni etalon qiymatlar bilan taqqoslash va o‘lchash noaniqligini baholashga asoslangan takomillashtirilgan yondashuvni ishlab chiqishning nazariy va amaliy jihatlari yoritilgan. Shuningdek, kalibrlash natijalarining metrologik kuzatiluvchanligini ta’minlash, o‘lchash natijalarini qayta ishlash hamda kalibrlash sifatini baholash mezonlarini takomillashtirish imkoniyatlari ko‘rib chiqilgan. Namunaviy ma’lumotlarda ikkinchi darajali tuzatish modeli tuzatishsiz xatoliklarning o‘rtacha kvadratik qiymatini 0,32 °C dan 0,029 °C gacha (bitta nuqtani chiqarib tekshirish bo‘yicha) kamaytirdi, +100 °C nuqtada kengaytirilgan noaniqlik 0,065 °C dan 0,044 °C gacha (k = 2) kamaydi.*

Аннотация. *В статье исследованы вопросы повышения метрологической эффективности калибровки средств измерения температуры и совершенствования действующей методики калибровки. Проанализированы факторы, влияющие на точность и достоверность результатов измерения температуры, в том числе метрологические характеристики эталона, температура окружающей среды, условия измерения, стабильность прибора и влияние оператора. Освещены теоретические и практические аспекты разработки усовершенствованного подхода, основанного на определении погрешностей, сравнении результатов с эталонными значениями и оценке неопределённости измерений. Рассмотрены возможности обеспечения метрологической прослеживаемости, обработки результатов и совершенствования критериев оценки качества калибровки. На модельных данных поправочная модель второго порядка снизила среднеквадратическое значение погрешности с 0,32 °C до 0,029 °C (по перекрёстной проверке с исключением одной точки), а расширенная неопределённость при +100 °C уменьшилась с 0,065 °C до 0,044 °C (k = 2).*

Abstract. *The article studies ways to increase the metrological efficiency of calibrating temperature measuring instruments and to improve the existing calibration methodology. Factors affecting the accuracy and reliability of temperature measurement results are analysed, including the metrological characteristics of the reference standard, ambient temperature, measurement conditions, instrument stability and operator influence. Theoretical and practical aspects of an improved approach based on determining measurement errors, comparing results with reference values and evaluating measurement uncertainty are presented. The possibilities of ensuring metrological traceability, processing measurement results and improving the criteria for assessing calibration quality are considered. On model data, a second-order correction model reduced the root-mean-square error from 0.32 °C to 0.029 °C (leave-one-out cross-validation), and the expanded uncertainty at +100 °C decreased from 0.065 °C to 0.044 °C (k = 2).*

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.125

Kalit so‘zlar: *harorat, termometr, kalibrlash, etalon, metrologik kuzatiluvchanlik, o‘lchash noaniqligi, tizimli xatolik, tuzatish funksiyasi.*

Ключевые слова: *температура, термометр, калибровка, эталон, метрологическая прослеживаемость, неопределённость измерения, систематическая погрешность, поправочная функция.*

Keywords: *temperature, thermometer, calibration, reference standard, metrological traceability, measurement uncertainty, systematic error, correction function.*

Kirish. Harorat ishlab chiqarish jarayonlarini boshqarishda muhim fizik kattaliklardan biridir. Uni noto‘g‘ri o‘lchash issiqlik bilan ishlov berish, oziq-ovqat mahsulotlarini saqlash, farmatsevtika, energetika, neft-gaz va materialshunoslikda mahsulot sifati hamda jarayon xavfsizligiga ta’sir qilishi mumkin. Termometrning yaroqliligi faqat pasportida ko‘rsatilgan aniqlik sinfi bilan belgilanmaydi. Datchikning joylashuvi, issiqlik almashinuvi, o‘qish zanjiri, muhitning noturg‘unligi va vaqt o‘tishi bilan yuzaga keladigan dreyf ham natijaga ta’sir qiladi. Kalibrlash asbob ko‘rsatishi bilan etalon qiymati orasidagi munosabatni aniqlash, natijani o‘lchash noaniqligi bilan ifodalash va keyingi o‘lchashlarda foydalanish uchun asoslangan tuzatishlarni belgilashga xizmat qiladi [1–3].

Kalibrlashda faqat ikki yoki uch nuqtani o‘lchab, ularni pasport chegaralari bilan solishtirish har doim ham yetarli emas. Bunda harorat muhitidagi o‘zgarish, etalon va tekshirilayotgan datchiklarning fazoviy farqi, botirish chuqurligi, sezgir element inertligi va ko‘rsatishlarni sinxron qayd etish o‘lchash sharoitlarini nazorat qilish, xatolikni matematik baholash va noaniqlik manbalarini yagona tartibda hisobga olish kabi omillar muhim hisoblanadi [4, 5].

Tadqiqot materiallari va usullari. Kalibrlashda −20 °C dan +150 °C gacha bo‘lgan oraliqda ishlovchi kontaktli termometrni etalon termometr bilan qiyosiy taqqoslash uchun namunaviy model sifatida qaraladi. Bu diapazon muayyan qurilmaning texnik pasporti yoki laboratoriyaning akkreditatsiya doirasini anglatmaydi. Termopara, qarshilik termometri va boshqa datchiklar uchun sezgir element turi, elektr o‘qish sxemasi, sovuq uch kompensatsiyasi, o‘z-o‘zini qizdirish va elektromagnit ta’sirga doir qo‘shimcha talablar hisobga olinadi (1-jadval).

1-jadval

Uslubiyotning me’yoriy va metodik tayanchlari

Hujjat yoki manba	Uslubiyotdagi vazifasi
ISO/IEC 17025:2017 [6]	Laboratoriya kompetentligi, usulni validatsiya qilish va natijalarni hisobotlash
JCGM 100:2008 (GUM) [7]	A va B tur noaniqliklarni baholash, yig‘ma noaniqlik byudjeti
JCGM 200:2012 (VIM) [8]	Kalibrlash, xatolik va metrologik kuzatiluvchanlik atamalari
ITS-90, CCT hujjatlari [9]	Harorat shkalasining etalon asoslari
EURAMET cg-8 / cg-13 [10, 11]	Termoparalar va harorat bloklarini kalibrlash bo‘yicha tavsiyalar
ILAC-P14 [12]	Kalibrlash sertifikatida noaniqlikni ifodalash siyosati

Qiyosiy kalibrlashda etalon va tekshirilayotgan termometr bir xil nazorat qilinadigan issiqlik muhitiga joylashtiriladi. Suyuqlik vannasida aralashtirish, termik barqarorlashish va datchiklarning o‘zaro issiqlik ta’siri tekshiriladi. Oldin etalon termometr sertifikatining amal qilishi, identifikatsiya raqami, o‘lchash diapazoni, tuzatishlari va noaniqligi tekshiriladi [13].

Harorat nuqtalari faqat diapazon chetlarida emas, balki asbobning amaliy qo‘llanish sohasi va texnologik jarayon uchun muhim qiymatlar tanlanadi (2-jadval).

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.125

2-jadval

Namunaviy eksperimental reja

Parametr	Namunaviy reja	Nazorat usuli
Harorat oralig‘i	−20…+150 °C	Asbob pasporti va foydalanish sohasi
Kalibrlash nuqtalari	−20; 0; 25; 50; 100; 150 °C	Ishchi diapazonni qamrab olish
Takroriy o‘qish	Har nuqtada n = 6	O‘rtacha qiymat va takrorlanuvchanlik
Harorat yo‘nalishi	Ko‘tarilish va pasayish	Gisterezisni baholash
Diskretlik	Misolda q = 0,01 °C	Indikator hujjati bilan tekshirish
Barqarorlashish	Tajriba bilan belgilanadi	Vaqt bo‘yicha kuzatish

Etalon termometr ko‘rsatishiga uning sertifikatida berilgan tuzatish kiritilib, etalon tiklaydigan harorat aniqlanadi. Nuqtadagi indikator xatoligi quyidagicha ifodalanadi:

$$\Delta = T_i - T_r, \tag{1}$$

bu yerda T_i – tekshirilayotgan termometrning o‘rtacha ko‘rsatishi, °C; T_r – etalon bo‘yicha aniqlangan harorat, °C. Xatolik musbat bo‘lsa, ishchi termometr etalonga nisbatan yuqori ko‘rsatadi. Tavsiya etiladigan tuzatish $C = -\Delta$ bo‘lib, tuzatilgan qiymat $T_t = T_i + C$ sifatida olinadi.

Harorat bo‘yicha silliq o‘zgaruvchi tizimli og‘ishni tavsiflash uchun ikkinchi darajali polinomdan foydalanish mumkin:

$$C(T) = a_0 + a_1 T + a_2 T^2, \tag{2}$$

bu yerda a_0, a_1, a_2 – eng kichik kvadratlar usulida aniqlanadigan koeffitsiyentlar.

Koeffitsiyentlar tajriba natijalari asosida aniqlanadi. Model darajasi oldindan asoslanishi va mustaqil tekshiruv orqali baholanishi kerak. Kichik ma’lumotlar to‘plamida yuqori darajali polinom nuqtalarga yaxshi moslashsa-da, oraliq qiymatlarda yomon natija berishi mumkin. Shu sababli bitta nuqtani navbat bilan chiqarib tashlab, qolgan nuqtalarda modelni qayta baholash va chiqarilgan nuqtadagi qoldiqni tekshirish tavsiya etiladi. Kalibrlangan diapazondan uzoqdagi ekstrapolyatsiya asoslanmagan holda bajarilmasligi kerak.

Tuzatish kiritilmagan xatoliklar va modelning bashorat qobiliyati quyidagi o‘rtacha kvadratik mezonlar bilan baholanadi:

$$RMS_{\Delta} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \Delta_i^{\,2}}, \quad RMS_{\mathrm{LOO}} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} (\Delta_i - \hat{\Delta}_{-i}(T_i))^2}, \tag{3}$$

bu yerda N – kalibrlash nuqtalari soni; $\hat{\Delta}_{-i}(T_i)$ – i-nuqtani chiqarib tashlab qurilgan (2) model bo‘yicha shu nuqtadagi xatolikning bashorat qiymati (LOOCV – leave-one-out cross-validation).

Noaniqlik byudjetiga etalon sertifikatidagi noaniqlik, takroriy o‘qishlar tarqoqligi, muhitning vaqt bo‘yicha barqarorligi, fazoviy bir jinsliligi, indikator diskretligi, datchikning yetarli botirilmasligi, isitish va sovutish yo‘nalishidagi gisterezis hamda kalibrlashlar oralig‘idagi dreyf kiritiladi. Mustaqil yoki ahamiyatsiz korrelyatsiyalangan tarkibiy qismlar uchun yig‘ma standart noaniqlik quyidagicha hisoblanadi [7]:

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + \cdots + u_n^2}, \tag{4}$$

Kengaytirilgan noaniqlik esa quyidagicha hisoblanadi:

$$U = k \cdot u_c, \tag{5}$$

bu yerda u_i – i-tarkibiy qismning ta’sir koeffitsiyenti hisobga olingan standart noaniqligi; k – qamrov koeffitsiyenti ($k = 2$ da qamrov ehtimoli taxminan 95 %) [7, 12].

Kalibrlash avval hujjatlarni tekshirish, etalon va yordamchi qurilmalarni tayyorlash, issiqlik muhitini barqarorlashtirish, o‘lchash nuqtalarini ko‘tarilish va pasayish yo‘nalishida bosib o‘tish, sinxron o‘qishlarni qayd etish, statistik qayta ishlashdan tashkil topadi [14].

Har bir nuqtada kamida olti sinxron o‘qish olish, aniq son esa uslubiyot va talab qilinadigan noaniqlikka qarab tasdiqlanadi. Me’yorlarga mos kelmagan natija sababi qayd etilmasdan o‘chirib

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.125

tashlanmaydi. Qayta o‘lchash zarurati hujjatlashtiriladi, elektron jadval formulalari tekshiriladi, hisoblash algoritmining versiyasi saqlanadi va sertifikat tasdiqlangan shaklda arxivlanadi.

Natijalar. 3-jadvaldagi namunaviy ma’lumotlarga ko‘ra, −20 °C nuqtasidagi xatolik −0,16 °C, +150 °C nuqtasida esa +0,68 °C ga teng. Bu tizimli og‘ish butun diapazonda bir xil emasligini va bitta doimiy tuzatish barcha nuqtalarda bir xil samaradorlik bermasligini ko‘rsatadi. Eng kichik kvadratlar usulida (2) tuzatish modeli uchun $a_0 = 0{,}0999$ °C, $a_1 = -2{,}779 \cdot 10^{-3}$, $a_2 = -1{,}615 \cdot 10^{-5}$ °C^{-1} topildi. (3) mezonlar bo‘yicha tuzatish kiritilmagan xatoliklarning o‘rtacha kvadratik qiymati $RMS_{\Delta} = 0{,}32$ °C, modelning LOOCV bo‘yicha o‘rtacha kvadratik qoldig‘i esa $RMS_{\mathrm{LOO}} = 0{,}029$ °C ni tashkil qiladi. Ushbu natija uslubiyotdagi hisoblash xususiyatini ifodalaydi, real termometr aniqligi ma’lum foizga oshganini bildirmaydi (3-jadval).

3-jadval

Termometrning namunaviy kalibrlash natijalari va tuzatish modeli

Etalon, °C	O‘rtacha ko‘rsatish, °C	Xatolik Δ, °C	Tuzatish C, °C	Model tuzatishi *C*(*T*), °C	LOOCV qoldig‘i, °C
−20	−20,16	−0,16	+0,16	+0,149	−0,035
0	−0,07	−0,07	+0,07	+0,100	+0,043
25	24,95	−0,05	+0,05	+0,020	−0,041
50	50,09	+0,09	−0,09	−0,079	+0,018
100	100,34	+0,34	−0,34	−0,340	+0,001
150	150,68	+0,68	−0,68	−0,680	−0,004

Noaniqlikni ifodalash tartibini ko‘rsatish uchun +100 °C nuqtada ikki shartli holat ko‘rib chiqildi. Amaldagi uslubiyotda yig‘ma standart noaniqlik $u_c = 0{,}032$ °C, kengaytirilgan noaniqlik $U = 0{,}065$ °C ($k = 2$, qamrov ehtimoli taxminan 95 %); takomillashtirilgan uslubiyotda esa mos ravishda 0,022 °C va 0,044 °C ni tashkil etadi. Noaniqlik qiymatlari GUM [7] va ILAC-P14 [12] talablariga muvofiq ikki ahamiyatli raqam bilan ifodalandi.

Muhokama. Kalibrlashni uchta bog‘langan, ammo farqli vazifa sifatida ko‘rish lozim: asbob xatoligini baholash va tuzatish funksiyasini topish; etalon hamda taqqoslash muhiti bilan bog‘liq noaniqlikni asoslash; protseduraning har safar bir xil sifatda bajarilishini ta’minlash. Taklif etilgan uslubiyotda datchik joylashuvi, botirish chuqurligi, haroratning vaqt bo‘yicha o‘zgarishi va ko‘tarilish-pasayish sikllari nazorat qilinadi. Harorat nuqtalari foydalanish sohasi va xavf darajasiga muvofiq tanlanadi. Kalibrlash intervali ham barcha asboblar uchun bir xil qat’iy muddat bilan belgilanmasligi, mexanik ta’sirlar va noto‘g‘ri o‘lchash oqibatlari hisobga olinishi zarur [15].

Taklif etilgan tartib EURAMET cg-8 va cg-13 [10, 11] tavsiyalaridagi qiyosiy kalibrlash tartibiga mos keladi: ularda ham muhitning bir jinsliligi, botirish chuqurligi va gisterezis noaniqlik byudjetining alohida tarkibiy qismlari sifatida qaraladi. Etalon termometr tavsiflarining kalibrlashlar oralig‘idagi nostabilligini alohida hisobga olish zarurligi [13] ishda ham ko‘rsatilgan. Amaldagi ikki-uch nuqtali tekshiruvdan farqli ravishda, taklif etilgan uslubiyotda butun diapazon bo‘yicha tuzatish modeli quriladi va uning bashorat qobiliyati mustaqil (LOOCV) mezon bilan tekshiriladi.

Xulosa. Harorat o‘lchash vositalarini ishonchli kalibrlash uchun etalon va asbob ko‘rsatishlarini taqqoslash bilan cheklanib qolmasdan, issiqlik muhitining barqarorligi, bir jinsliligi va datchikning botirish chuqurligini ham nazorat qilish lozim. Takomillashtirilgan uslubiyot hujjatlarni tekshirish, muhitni tavsiflash, takroriy o‘lchash, tuzatish modelini baholash, noaniqlik byudjetini tuzish va natijalarni sifat menejmentiga kiritishni qamrab oladi.

Namunaviy ma’lumotlarda ikkinchi darajali tuzatish modeli tuzatishsiz xatoliklarning o‘rtacha kvadratik qiymatini 0,32 °C dan 0,029 °C gacha (LOOCV bo‘yicha) kamaytirdi, +100 °C nuqtada kengaytirilgan noaniqlik 0,065 °C dan 0,044 °C gacha ($k = 2$) kamaydi. Uslubiyot

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.125

samarasini tasdiqlash uchun u muayyan termometr va etalon bilan real kalibrlash ma’lumotlarida sinovdan o‘tkazilishi lozim.

Foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxati

1. Усманова Х.А., Шеина Н.Е. Оптимизация метрологического обеспечения калибровки датчиков давления и температуры на основе оценки неопределенности измерений и экономической эффективности // Innovations in Science and Technologies. – 2026. – Т. 3, № 9. – С. 584–595.

2. Стриженов Е.М., Шакуров А.В., Кротов А.С., Пушкарев А.В. Практические основы термометрии. Учебное пособие. – Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020. – 76 с. ISBN 978-5-7038-5432-7.

3. Лепявко А.П. Вторичные средства измерений температуры. Поверка и калибровка. Учебное пособие. – Москва: АСМС, 2011. – 136 с. ISBN 978-5-93088-084-7.

4. Пометун Е.Д. Оценка неопределенности измерений температуры при калибровке термопреобразователей // Вестник Донецкого университета. Серия 04. Технические науки. – 2024. – № 2. – С. 32–36. DOI: 10.5281/zenodo.12548474.

5. Ismatullayev P.R., Matyakubova P.M., Turayev Sh.A. Metrologiya, standartlashtirish va sertifikatlashtirish. Darslik. – Toshkent: Lesson Press, 2015. – 424 b. ISBN 978-9943-4589-7-0.

6. ISO/IEC 17025:2017. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. – Geneva: ISO, 2017.

7. JCGM 100:2008. Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM). – JCGM, 2008.

8. JCGM 200:2012. International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM). – 3rd ed. – JCGM, 2012.

9. Preston-Thomas H. The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90) // Metrologia. – 1990. – Vol. 27, No. 1. – P. 3–10.

10. EURAMET Calibration Guide cg-8. Guidelines on the calibration of thermocouples. Version 3.1. – EURAMET, 2020.

11. EURAMET Calibration Guide cg-13. Guidelines on the calibration of temperature block calibrators. Version 4.0. – EURAMET, 2017.

12. ILAC-P14:09/2020. ILAC policy for measurement uncertainty in calibration. – ILAC, 2020.

13. Моисеева Н.П. Анализ нестабильности характеристик эталонного платинового термометра в интервале между поверками и способ уменьшения погрешности термометра // Измерительная техника. – 2024. – Т. 73, № 3. – С. 31–37. DOI: 10.32446/0368-1025it.2024-3-31-37.

14. Голобоков М.В. Совершенствование системы метрологического обеспечения термометров LTA и ЛТ-300 // Контроль. Диагностика. – 2026. – № 3. – С. 33–43. DOI: 10.14489/td.2026.03.pp.033-043.

15. Маликов А.А., Сидоркин А.В. Некоторые особенности градуировки плоских термометров сопротивления // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2015. – Вып. 8, ч. 2. – С. 132–138.