

**Anna SZMYRKA-GRZEBYK, Leszek LIPIŃSKI, Aleksandra KOWAL,
Henryk MANUSZKIEWICZ**

INSTYTUT NISKICH TEMPERATUR I BADAŃ STRUKTURALNYCH PAN

Międzynarodowe porównania wzorców temperatury dla zakresu niskich temperatur

Doc. dr hab. Anna SZMYRKA-GRZEBYK

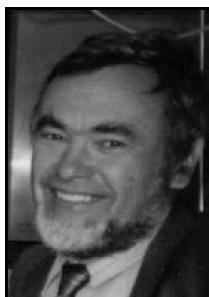
Kierownik Laboratorium Wzorca Temperatury w Instytucie Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych PAN we Wrocławiu. Studia na Wydziale Mat-Fiz-Chem Uniwersytetu Wrocławskiego ukończyła w 1969 r. Stopień doktora nauk fizycznych uzyskała w 1976 r. w INT i BS PAN. Stopień doktora habilitowanego nauk technicznych w zakresie elektrotechniki - metrologii elektrycznej uzyskała w 2005 roku.



e-mail: A.Szyrka@int.pan.wroc.pl

Dr Leszek LIPIŃSKI

Do 2006 r. kierownik Zakładu Kriotermometrii w Instytucie Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych PAN we Wrocławiu. Obecnie fizyk w Laboratorium Wzorca Temperatury. Studia na Wydziale Mat-Fiz-Chem Uniwersytetu Wrocławskiego ukończył w 1966 r. Stopień doktora nauk fizycznych uzyskał w 1976 r. w INT i BS PAN.



e-mail: L.Lipinski@int.pan.wroc.pl

Mgr inż. Aleksandra KOWAL

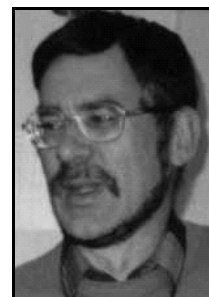
Fizyk w Laboratorium Wzorca Temperatury Instytutu Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych PAN we Wrocławiu. Studia na Wydziale Podstawowych Problemów Techniki Politechniki Wrocławskiej ukończyła w 2000 r.



e-mail: A.Kowal@int.pan.wroc.pl

Dr Henryk MANUSZKIEWICZ

Fizyk w Laboratorium Wzorca Temperatury Instytutu Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych PAN we Wrocławiu. Studia na Wydziale Mat-Fiz-Chem Uniwersytetu Wrocławskiego ukończył w 1976 r. Stopień doktora nauk fizycznych uzyskał w 1995 r. w INT i BS PAN.



e-mail: H.Manuszkiewicz@int.pan.wroc.pl

Streszczenie

Międzynarodowa Skala Temperatury z 1990 r. zdefiniowana jest w zakresie temperatur od 0,6 K aż do kilku tysięcy stopni Celsjusza. W zakresie temperatur od 13,8033 K do 273,16 K termometrem interpolacyjnym jest czujnik platynowy termometru rezystancyjnego typu kapsułkowego wzorcowany w sześciu punktach stałych. Termometr platynowy oraz komórki do realizacji punktów stałych skali MST-90 stanowią wzorce temperatury w omawianym zakresie temperatur. W celu określenia dokładności realizacji skali i zapewnienia spójności pomiarowej między wzorcami państwowymi prowadzone są międzynarodowe porównania parametrów metrologicznych komórek termometrycznych i czujników temperatury.

Słowa kluczowe: skala temperatury, termometry rezystancyjne, niskie temperatury.

International comparisons of temperature standards for a low temperature range

Abstract

The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90) defined between 0,65 K up to a few thousands Celsius degrees is divided for several subranges where different types of interpolating thermometers are used. In the low temperature range from 13,8033 K up to 273,16 K a capsule type standards platinum resistance thermometer calibrated at six or eight fixed points is the interpolating instrument. The thermometer and cells for realization the fixed points are temperature standards in the temperature range. In order to determine of an accuracy of the ITS-90 realization and to establish a degree of equivalence of the national standards international comparisons are organized. In the comparison, described in the paper, the temperature standards from INTiBS participate too.

Keywords: temperature scale, resistance thermometers, low temperatures.

1. Wprowadzenie

14. października 1999 r. przedstawiciele 38 krajów świata podpisali, opracowane przez Międzynarodowe Biuro Miar (BIPM¹),

Porozumienie o wzajemnym uznawaniu, które znane jest jako porozumienie MRA, od nazwy w języku angielskim *Mutual Recognition Arrangement*. Porozumienie dotyczy wzajemnego uznawania państwowych wzorców jednostek miar oraz świadectw wzorcowania i świadectw pomiarów wydawanych przez państwowe instytuty metrologiczne. Do chwili obecnej liczba sygnatariuszy wzrosła do 65 instytutów metrologicznych z 45 krajów. Polska także jest sygnatariuszem MRA. Obok Głównego Urzędu Miar (GUM) porozumieniem objęty jest Ośrodek Radioizotopów POLATOM w Świerku i Laboratorium Wzorca Temperatury Instytutu Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych PAN we Wrocławiu, gdzie znajdują się odpowiednio państwowe wzorce jednostki miary promieniowania i temperatury dla zakresu niskich temperatur. Celem porozumienia MRA jest przede wszystkim ustanowienie stopnia równoważności państwowych wzorców jednostek miar utrzymywanych przez państwowe instytuty metrologiczne (NMI²) oraz nienie wzajemnego uznawania świadectw wzorcowania wydawanych przez NMI. Ustanowienie stopnia równoważności państwowych wzorców jednostek miar wymagało, i wymaga nadal, przeprowadzenia międzynarodowych pomiarów porównawczych. Porównania te noszą nazwę porównań kluczowych. Dla celów porozumienia przyjęto, że stopień równoważności wzorców jednostek miar oznacza do jakiego stopnia wzorce te są zgodne z wartościami odniesienia określonymi na podstawie porównań kluczowych a więc zgodne nawzajem ze sobą. Pełną koordynację porównań międzynarodowych zapewnia BIPM, natomiast Komitety Doradcze są odpowiedzialne za przeprowadzenie porównań kluczowych. W bazie BIPM, na stronie: www.bipm.org/kcdb znajdują się dane dotyczące ponad 500 porównań kluczowych, a także wykaz możliwości wzorcowania i pomiarów – CMC³ wszystkich NMI. W wykazie tym podane są wielkości (wraz z niepewnościami), dla których świadectwa wzorcowania i pomiarów są uznawane przez sygnatariuszy porozumienia.

¹ BIPM - Bureau International des Poids et Mesures, Francja

² NMI – National Metrological Institute

³ CMC – Calibration and Measurement Capabilities

2. Międzynarodowe porównania wzorców temperatury

Lista porównań w termometrii podana przez BIPM zawiera 29 pozycji, wśród nich podstawową rolę odgrywają następujące porównania kluczowe przeprowadzone pod kierunkiem Komitetu Doradczego dla Termometrii - CCT⁴:

- CCT-K1: Realizacja MST-90 od 0,65 K do 24,6 K,
- CCT-K2: Realizacja MST-90 od 13,8 K do 273,16 K,
- CCT-K3: Realizacja MST-90 od 83,8058 K do 933,473 K,
- CCT-K5: Realizacja MST-90 między 962 °C i 1700 °C,
- CCT-K7: Porównania komórek punktu potrójnego wody.

Podział taki związany jest z definicją Międzynarodowej Skali Temperatury z 1990 r. (MST-90) [1] i jej praktyczną realizacją.

Jeszcze przed podpisaniem MRA – we wrześniu 1996 r. – CCT podjął decyzję o przeprowadzeniu międzynarodowych porównań mających na celu określenie stopnia równoważności realizacji MST-90 w poszczególnych NMI w zakresie temperatur od 0,65 K do 24,6 K wartość temperatury definiowana jest za pomocą gazowych termometrów kondensacyjnych i interpolacyjnych termometrów gazowych przez zastosowanie odpowiednich równań interpolacyjnych podanych w MST-90. W praktyce do porównań dokładności realizacji skali w tym zakresie stosowane są termometry rezystancyjne z czujnikami wykonanymi ze stopu rod-żelazo [2]. W porównaniach kluczowych CCT-K1 przeprowadzonych w latach 1997 – 2001 pod kierunkiem NPL⁵ uczestniczyło 7 instytutów metrologicznych. W 2007 r. zainicjowano kolejną serię porównań kluczowych EUROMET.T-K1.1 poświęconych realizacji MST-90 przy użyciu termometrów rod-żelazo, pilotowanych przez PTB⁶. W porównaniach tych bierze udział INTiBS.

CCT-K2 to porównania dokładności realizacji skali w zakresie, w którym wartość temperatury wyznaczana jest za pomocą interpolacyjnych termometrów rezystancyjnych z czujnikiem platynowym typu kapsułkowego, wzorcowanych w niskotemperaturowych punktach stałych, poczynając od punktu potrójnego wodoru 13,8033 K do punktu potrójnego wody 273,16 K. Pierwsze porównania kluczowe CCT-K2, w których uczestniczyło 7 instytutów, przeprowadzone zostały w latach 1997 – 1999. Porównaniami kierował NRC⁷ w Kanadzie. Do chwili obecnej pięć serii porównań CCT-K2 zostało zarejestrowanych w bazie BIPM; w porównaniach o numerze CCT-K2.4 uczestniczy INTiBS.

Porównania kluczowe CCT-K3 przeprowadzane są w zakresie temperatur od 83,8058 K do 933,473 K, w którym temperatura wyznaczana jest za pomocą interpolacyjnego termometru rezystancyjnego z czujnikiem platynowym z długą nóżką. Polski państwowy wzorzec temperatury dla tego zakresu znajduje się w GUM.

Fundamentalnymi dla termometrii porównaniami kluczowymi są porównania CCT-K7 a obecnie EUROMET.T-K7: Porównania komórek punktu potrójnego wody. Punkt potrójny wody jest podstawowym definicyjnym punktem MST-90, z realizacją którego ściśle związana jest dokładność realizacji jednostki miary temperatury – kelwina (stopnia Celsjusza) [1]. W porównaniach EUROMET.T-K7 Polskę reprezentuje GUM, natomiast INTiBS przeprowadził bilateralne porównania komórek do realizacji punktu potrójnego wody z instytutem metrologii w Turynie (INRiM⁸) a także z GUM.

Dokładność i równoważność realizacji niskotemperaturowych punktów stałych: punktu potrójnego wodoru 13,8033 K, neonu 24,5561 K, tlenu 54,3584 K i argonu 83,8058 K, oszacowana została w porównaniach gwiazdzistych przeprowadzonych w ramach realizacji projektu EUROMET Nr 377⁹ kierowanych

przez PTB oraz w trakcie realizacji projektu Unii Europejskiej w 5. Programie Ramowym nr G6RD-CT-1999-00114 o akronimie MULTICELLS¹⁰. W realizacji obu tych projektów uczestniczył INTiBS.

3. Porównania kluczowe EUROMET.T-K1.1

Porównania kluczowe EUROMET.T-K1.1: Realizacja MST-90 w zakresie temperatur od 2,4 K do 24,5561 K przy użyciu termometrów rezystancyjnych ze stopu rod-żelazo prowadzone są z inicjatywy PTB. Biorą w nich udział instytuty metrologiczne z Włoch (INRiM), Polski (INTiBS), Holandii (NMI-VSL¹¹), Anglii (NPL) oraz Francji (LNE-INM/CNAM¹²). Porównania prowadzone są zgodnie z protokołem opracowanym wcześniej dla CCT-K1 i dają możliwość powiązania z wynikami tych pierwszych poprzez udział PTB i NPL w obu seriach porównań kluczowych. Każdy z partnerów uczestniczących w porównaniach dostarcza do laboratorium pilotującego po dwa termometry ze stopu rod-żelazo wraz z ich podstawową charakterystyką metrologiczną – wartością rezystancji wyznaczoną w określonych punktach skali. INTiBS przekazał termometr firmy Tinsley, typ 5187 W nr B 178 oraz firmy VNIIFTRI¹³ nr 93. Wyniki wzorcowań przekazane do PTB przedstawione są w tabeli 1 i 2. Termometr Tinsley B 178 był wielokrotnie wzorcowany w INTiBS w punktach stałych MST-90, natomiast termometr VNIIFTRI nr 93 został wywzorcowany w lipcu 2007 r.

Tab. 1. Wartość rezystancji termometru ze stopu rod-żelazo VNIIFTRI nr 93
Tab. 1. Resistances of the RhFe thermometer VNIIFTRI no 93

Punkt stały	Komórka wzorcowa nr	Rezystancja, Ω	Niepewność, μΩ dla $k = 1$
Punkt potrójny wody	Isotech 465	99,164778	58
Punkt potrójny neonu	7 Ne 1-IV-86	12,469906	26
Punkt potrójny wodoru	14 H2	10,561831	18

Tab. 2. Wartość rezystancji termometru ze stopu rod-żelazo Tinsley nr B 178
Tab. 2. Resistances of the RhFe thermometer Tinsley no B 178

Punkt stały	Komórka wzorcowa nr	Rok	Rezystancja, Ω	Niepewność, μΩ dla $k = 1$
Punkt potrójny wody	NPL 972	1999	94,879552	14
	NPL 972	2002	94,879565	
	Isotech 465	2007	94,879581	
Punkt potrójny neonu	7 Ne 1-IV-86	2000	10,963950	20
	Eb1Ne	2001	10,963941	
	Ec2Ne	2002	10,963937	
Punkt potrójny wodoru	E3H2	2000	9,209984	16
	Ec1H2	2002	9,210028	13
	E2H2	2001	9,210125	15
	14 H2	2001	9,210015	20
Punkt λ ⁴ He	PTB	2003	5,295059	10

Obecnie wykonywane są w PTB pomiary rezystancji termometrów przekazanych przez partnerów, na podstawie których zostanie dokonana ocena stopnia równoważności realizacji MST-90 w zakresie najniższych temperatur.

⁴ CCT – Consultative Committee for Thermometry

⁵ NPL – National Physical Laboratory, Anglia

⁶ PTB – Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Niemcy

⁷ NRC – National Research Council, Kanada

⁸ INRiM – Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica, Włochy

⁹ Star Intercomparison of Low-Temperature Fixed Points using Sealed Triple-Point Cells

¹⁰ Improvement of European traceability in temperature measurements below 0 °C

using permanently-sealed transportable multicell standards – MULTICELLS

¹¹ NMI-VSL – Nederlands Meetinstituut – Van Swinden Laboratorium, Holandia

¹² LNE-INM/CNAM – Laboratoire National de Métrologie et d'Essais, Francja

¹³ VNIIFTRI – Instytut Metrologii w Moskwie, Rosja

4. Porównania kluczowe CCT–K2.4

Dwa termometry rezystancyjne z czujnikami platynowymi typu kapsułkowego, Leeds&Northrup nr 1866334 i Tinsley nr 234721, stanowiące własność INTiBS, biorą udział w porównaniach kluczowych CCT–K2.4, którymi kieruje NRC. W 2005 r. rezystancja obu termometrów wyznaczona została w punktach stałych MST-90 w NRC. Pomiary te poprzedzone były pomiarami przeprowadzonymi we Francji w ramach realizacji projektu EUROMET nr 730¹⁴. W 2007 r. oba termometry platynowe zostały wywzorcowane w INTiBS. Wyniki wzorcowań termometru L&N 1866334 przedstawiono w tabeli 3, gdzie:

$$W = \frac{R_T}{R_{273,16}}, \quad (1)$$

W_{ref} jest funkcją odniesienia opisaną w MST-90 zależnością:

$$\ln(W_{ref}) = A_0 + \sum_{i=1}^{12} A_i \left[\frac{\ln(T/273,16) + 1,5}{1,5} \right]^i, \quad (2)$$

a $\Delta W = W - W_{ref}$ jest funkcją odchylenia wiążącą funkcję W z W_{ref} równaniem:

$$W - W_{ref} = a(W - 1) + b(W - 1)^2 + \sum_{i=1}^3 c_i [\ln(W)]^i, \quad (3)$$

Tab. 3. Parametry metrologiczne termometru rezystancyjnego z czujnikiem platynowym typu kapsułkowego L&N nr 1866334 w punktach stałych MST-90

Tab. 3. Metrological parameters of the CSPRT L&N no 1866334 at the fixed points of ITS-90

Punkt stały	H ₂ O	Hg	Ar	O ₂	Ne	H ₂
T, K	273,16	234,3156	83,8058	54,3584	24,5561	13,8033
R_T, Ω	25,537311	21,557672	5,515232	25196,34	0,217411	0,031027
W	1,00000000	0,84416373	0,21596761	0,09183410	0,00851346	0,00121497
W_{ref}	1,00000000	0,84414211	0,21585975	0,09171804	0,00844974	0,00119007
ΔW	0,00000000	0,00002162	0,00010786	0,00011606	0,00006373	0,00002490
T_{obl}, K	273,16000	234,31567	83,80580	54,35834	24,55610	13,80325
$U(T), mK$	0,212	0,330	0,310	0,406	0,338	0,354

Równanie (3) pozwala na wyznaczenie współczynników a , b i c_i , a w konsekwencji na wyznaczenie wartości temperatury dla dowolnej wartości W . Wielkość $U(T)$ jest niepewnością rozszerzoną pomiaru temperatury dla współczynnika rozszerzenia $k = 2$ przy poziomie ufności $p \approx 95\%$. Wyniki porównań i ocena stopnia równoważności realizacji MST-90 w INTiBS w zakresie temperatur od 13 K do 273,16 K są w trakcie opracowywania przez NRC.

5. Porównania komórek do realizacji punktów stałych

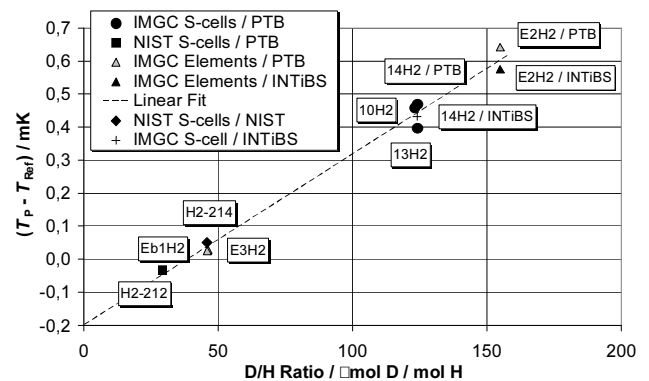
Międzynarodowe porównania parametrów metrologicznych komórek do realizacji punktów stałych prowadzone są w trzech grupach, z uwagi na zróżnicowaną konstrukcję komórek i konieczność stosowania odmiennych technik pomiarowych:

1. porównania komórek kriogenicznych,
2. porównania komórek do realizacji punktu potrójnego rtęci,
3. porównania komórek do realizacji punktu potrójnego wody.

5.1. Porównania komórek kriogenicznych

Porównania komórek kriogenicznych do realizacji punktu potrójnego wodoru, neonu, tlenu i argonu prowadzone były w ostatnim dziesięcioleciu dwukrotnie. W latach 1997 – 2002 realizowany był projekt EUROMET nr 377: *Gwiazdźiste porównania niskotemperaturowych punktów stałych przy zastosowaniu zamkniętych komórek punktów potrójnych*. Różniły się one od typowych porównań kluczowych przyjętą procedurą pomiarową. Wszystkie pomiary przeprowadzone dla 51 komórek z 13 instytutów metrologicznych wykonane zostały w PTB [3]. W porównaniach uczestniczyły cztery komórki z INTiBS wchodzące wówczas w skład państwowego wzorca jednostki miary temperatury dla zakresu niskich temperatur: komórka do realizacji punktu potrójnego wodoru, neonu, tlenu i argonu. Komórki te wykonane były w IMGC¹⁵ w Turynie.

Jeszcze w trakcie realizacji projektu EUROMET Nr 377 sześć europejskich instytutów metrologicznych, wśród nich INTiBS, podjęło współpracę nad opracowaniem nowej generacji kriogenicznych wzorców temperatury w ramach projektu Unii Europejskiej w 5. Programie Ramowym nr G6RD-CT-1999-00114 o akronimie *MULTICELLS*. Wyniki badań przedstawiono w pracach [4-6]. Na szczególne podkreślenie zasługuje wykazanie związku temperatury punktu potrójnego wodoru od składu izotopowego, co przedstawiono na rys. 1. Na wykresie zostały umieszczone także wyniki uzyskane w NIST¹⁶ [7]. Eksperymentalne wyznaczenie tej zależności skłoniło autorów do wystąpienia do CCT z propozycją zmiany definicji temperatury punktu potrójnego wodoru w równowadze [8]. Obecnie komórki do realizacji punktu potrójnego wodoru, neonu i argonu badane w ramach realizacji projektu *MULTICELLS* stanowią elementy wzorca państwowego w INTiBS.



Rys. 1. Zależność temperatury T_p punktu potrójnego wodoru od stosunku D/H
Fig. 1. Dependence of the hydrogen triple point temperature T_p on the D/H ratio

5.2. Porównania komórek rtęci

Porównania komórek do realizacji punktu potrójnego rtęci na skalę międzynarodową przeprowadzone zostały w połowie lat 90. w BNM-INM/CNAM w Paryżu [9]. Badane były komórki, w których możliwe jest wzorcowanie termometrów platynowych typu kapsułkowego o niewielkich wymiarach i termometrów z długą nóżką. INTiBS w 1999 r. opracował własną konstrukcję miniaturowej komórki rtęci do wzorcowania termometrów typu kapsułkowego [10] i przeprowadził bilateralne porównania jej parametrów z komórką klasyczną w IMGC i PTB. Różnica temperatury punktu potrójnego rtęci w miniaturowej komórce INTiBS i komórkach IMGC i PTB nie przekraczała 0,4 mK [11]. W 2006 r. INTiBS kupił stanowisko do realizacji punktu potrójnego rtęci wyposażone w dużą komórkę, której parametry metrologiczne

¹⁴ A comparison of temperature scale near fixed points in the low temperature range

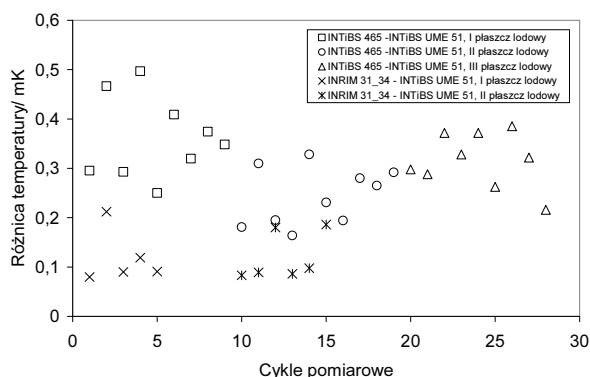
¹⁵ IMGC - Istituto di Metrologia "G.Colonnetti" CNR, obecnie INRiM, Włochy

¹⁶ NIST - National Institute of Standards and Technology, USA

wyznaczane są w porównaniach bilateralnych z PTB – projekt EUROMET nr 916¹⁷.

5.3. Porównania komórek wody

W przypadku komórek do realizacji punktu potrójnego wody dwukrotnie przeprowadzono porównania kluczowe: CCT-K7 w latach 2002 – 2004 i EUROMET.T-K7 w 2006 – 2007 r. W porównaniach tych uczestniczyły komórki wody z GUM, bowiem zgodnie z przyjętą procedurą porównań kluczowych w określonej serii porównań może uczestniczyć tylko jeden przedstawiciel danego kraju. Dla komórek wody wchodzących w skład wzorca państwowego w INTiBS przeprowadzono w 2002 r. bilaterale porównania z GUM, które dawały powiązanie z CCT-K7 [12]. Obecnie opracowywane są wyniki bilateralnych porównań przeprowadzonych we współpracy z INRiM w Turynie – projekt EUROMET nr 895¹⁸. Porównania te prowadzone były zgodnie z ustaleniami dla porównań kluczowych EUROMET.T-K7 i dają powiązanie z wynikami tego projektu. W porównaniach między INTiBS i INRiM komórką transferową była komórka UME 51 stanowiąca własność INTiBS. Porównania odniesione zostały do wyników pomiarów rezystancji termometrów platynowych w dwóch komórkach wody nr 31 i 34, które są elementami wzorca państwowego w INRiM i w komórce nr 465 należącej do INTiBS. Wyniki pomiarów przeprowadzonych dla kilku płaszczy lodowych wytwarzanych w komórkach wody przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Wyniki bilateralnych porównań komórek do realizacji punktu potrójnego wody

Fig. 2. Results of the bilateral comparison of the water triple point cells

Średnia wartość różnicy temperatury punktu potrójnego wody realizowanego w komórce INTiBS 465 i komórce transferowej UME 51 wynosi 0,307 mK, natomiast średnia wartość różnicy temperatury punktu potrójnego wody realizowanego w zestawie komórek INRiM 31 i 34 i w komórce transferowej UME 51 jest równa 0,120 mK. Po podstawieniu tych wartości oszacowana różnica temperatury punktu potrójnego wody realizowanego w komórce INTiBS 465 i w komórkach INRiM 31 i 34 wynosi więc 0,195 mK. Wyższa wartość temperatury komórki INTiBS w porównaniu z wzorcem INRiM może świadczyć o większej czystości wody komórki INTiBS 465, ponieważ zanieczyszczenia powodują obniżenie temperatury punktu potrójnego wody.

Na rok 2008 zaplanowane są także bilaterale porównania komórek wody między INTiBS i GUM.

6. Podsumowanie

Laboratorium Wzorca Temperatury INTiBS PAN, depozytariusz wzorca państwowego temperatury w zakresie od 13,8033 K do 273,16 K, uczestniczy we wszystkich aktualnie prowadzonych

międzynarodowych porównaniach wzorców temperatury, których celem jest określenie dokładności realizacji Międzynarodowej Skali Temperatury z 1990 r. w zakresie niskich temperatur oraz stopnia równoważności polskiego wzorca z wzorcami międzynarodowymi, tym samym wypełnia zalecenia Międzynarodowego Biura Miar zawarte w porozumieniu MRA.

Praca naukowa finansowana ze środków finansowych na naukę w latach 2007 - 2008 jako projekt badawczy Nr MRA/293/2006.

7. Literatura

- [1] H. Preston-Thomas, The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90), *Metrologia* 27, 1990, 3 – 10.
- [2] L. Crovini, P.P.M. Steur, ITS-90 Realization in Fourteen National Standards Laboratories, *Metrologia* 31, 1994, 109-115.
- [3] B. Fellmuth, D. Berger, L. Wolber, M. de Groot, Head D., Y. Hermier, Y.Z. Mao, T. Nakano, F. Pavese, V. Shkraba, A.G. Steele, P.P.M. Steur, A. Szymrka-Grzebyk, W.L.Tew, L. Wang, D.R. White, An International Star Intercomparison of Low-Temperature Fixed Points using Sealed Triple-Point Cells, *Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry, 7*, American Institute of Physics, Melville, 2003, 885 – 890.
- [4] F. Pavese, M. de Groot, B. Fellmuth, D. Head, Y. Hermier, A. Szymrka-Grzebyk, L. Zanin, The Project „MULTICELLS” for the Development of New Temperature Standards in the Cryogenic range Down to 2.18 K by Means of Sealed cells, 8-th International Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science, TEMPMEKO’2001, Berlin 2001, 759 – 765.
- [5] A. Szymrka-Grzebyk, L. Lipiński, H. Manuskiewicz, A. Kowal, Nowa generacja kriogenicznych wzorców temperatury, *Metrology and Measurement Systems*, vol.IX, no.I, 2002, 67 – 78.
- [6] F. Pavese, B. Fellmuth, D.Head, Y. Hermier, A Peruzzi, A. Szymrka-Grzebyk, L. Zanin, “MULTICELLS” the European Project on Cryogenic Temperature Fixed Points in Sealed Cells, *Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry, 7*, American Institute of Physics, Melville, 2003, 161-167.
- [7] B. Fellmuth, Y. Hermier, F. Pavese, A. Szymrka-Grzebyk, W. Tew, Special Problems when Realising the Triple Point of Hydrogen as a Defining Fixed Point of the ITS-90, 8-th International Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science, TEMPMEKO’2001, Berlin 2001, 403-407.
- [8] F. Pavese, B. Fellmuth, D. Head, Y. Hermier, H. Sakurai, A.G. Steele, A. Szymrka-Grzebyk, W.L. Tew, Proposal of amendment of the ITS-90 definition concerning the triple point of equilibrium hydrogen, 21 Meeting of the Consultative Committee for Thermometry, Bureau International des Poids et Mesures, Paris 2001, Dokument BIPM CCT/01-07.
- [9] Y. Hermier, Le point triple du Mercury comme reference de temperature: etude, realisation et bilan des incertitudes, BNM-INM, Paris 1996.
- [10] L. Lipiński, A. Szymrka-Grzebyk, H. Manuskiewicz, A new type of a small cell for the realization of the mercury triple point, *Meas. Sci. Technol.* vol. 11, 2000, 738 – 741.
- [11] A. Szymrka-Grzebyk, L. Lipiński, H. Manuskiewicz, Miniaturowa komórka do realizacji punktu potrójnego rtęci, *Metrologia i Systemy Pomiarowe*, tom VII, zeszyt 3, 2000, 193-202.
- [12] H. Manuskiewicz, L.Lipiński, A. Szymrka-Grzebyk, A. Kowal, W. Roszkowski, R. Kuna, M. Tichy, Bilateral comparison of the water triple point at GUM and INTiBS in Poland, 2nd International Seminar on Low Temperature Thermometry, Wrocław 2003, 56 – 61.

Artykuł recenzowany

¹⁷ Bilateral comparison of mercury triple point cells

¹⁸ Bilateral comparison water triple point cells