

INSTALATIE PENTRU REALIZAREA PUNCTULUI TRIPLU AL ARGONULUI

SONIA GAIȚĂ - Institutul Național de Metrologie
FĂNEL IACOBESCU - Biroul Român de Metrologie Legală
CONSTANTIN ILIESCU – Universitatea “Politehnica” București
ADRIAN DUMITRIU- Institutul Național de Metrologie

Abstract: The paper presents the installation for the realization of the triple point of Argon, which was recently designed and built in the Thermometry Laboratory of INM. The authors offer details on the criteria that guided the design of the installation, from providing an adequate immersion of the platinum resistance thermometer, as well as the longest possible duration for the melting plateau, up to setting the dimensions of the cell so that enough mechanical strength is provided and the pressure of the gaseous Ar is limited to 50×10^5 Pa. The paper includes the results of a study carried out on the factors influencing the temperature of the phase transition, as realised with the installation. By presenting the solutions employed to minimise those factors, and by providing a detailed description of the installation and of the materials chosen to make it, the paper offers information relevant for the realisation of other similar equipments to be used in the domain of negative temperatures. The realisation at INM of the installation for the materialisation of the triple point of Ar allows the enhancement of the Romanian national temperature standard down to 84 K.

Cuvinte cheie: Scara Internațională de Temperatură din 1990, puncte fixe de definiție ale SIT-90, punctul triplu al argonului, termometru cu rezistență din platină

1 INTRODUCERE

Punctul triplu al argonului (83,805 8 K) este unul dintre punctele fixe de definiție ale Scării Internaționale de Temperatură din 1990 (SIT-90) [1]. Punctul triplu al unei substanțe este unicul punct din diagrama temperatură-presiune a acelei substanțe în care fazele solidă, lichidă și gazoasă coexistă, adică este punctul de joncțiune al curbelor vapori-solid, vapori-lichid și lichid-solid, curbe ale diagramei de echilibru p,T ; coordonatele p și T la punctul triplu sunt caracteristice substanței respective.

Starea de echilibru a punctului triplu al unei substanțe se poate realiza fie prin topirea treptată a substanței solidificate, fie prin solidificarea treptată a substanței lichefiate, în prezența vaporilor acelei substanțe. Pentru materializarea punctelor triple criogenice, deci și celui al argonului, se folosește aproape întotdeauna primul procedeu.

O primă instalație pentru realizarea punctului triplu al argonului (PTAr) a fost realizată la INM în 1980. Utilizarea unei proporții eronate între volumul incintei superioare și, respectiv, inferioare a condus la stabilirea unei cantități de argon ce asigură o imersie insuficientă (< 30 mm) a termometrului cu rezistență din platină (TRP) în argonul lichid, cu consecințe serioase asupra temperaturii realizate. O instalație complet revizuită a fost proiectată și construită în anul 2001.

Există numai 3 modele de instalații pentru etalonarea TRP tip tijă la PTAr publicate în literatura de specialitate [2, 3, 4]. Instalația realizată recent la INM se bazează pe modelul propus de G. Bonnier (BNM-INM/CNAM) în 1975 [2], model care a stat și la baza instalației realizate în 1980 la INM. Unele particularități constructive ale instalației au fost confirmate personal cu G. Bonnier, care a făcut de asemenea sugestii utile (reducerea grosimii peretelui tubului suport al TRP și a grosimii izolației poliuretanică a celulei), ce au contribuit la obținerea într-un timp scurt a unei instalații funcționale, cu parametri competitivi.

2 PRINCIPIUL CONSTRUCTIV ȘI FUNCȚIONAL

Materializarea PTAr cu această instalație se realizează într-o celulă etanșă, folosind o metodă cu flux constant. În această metodă, temperatura mediului înconjurător substanței de lucru închise în celulă este fixată la o valoare ușor mai ridicată decât cea a tranziției de fază, iar palieretele se înregistrează în “dinamică termică”.

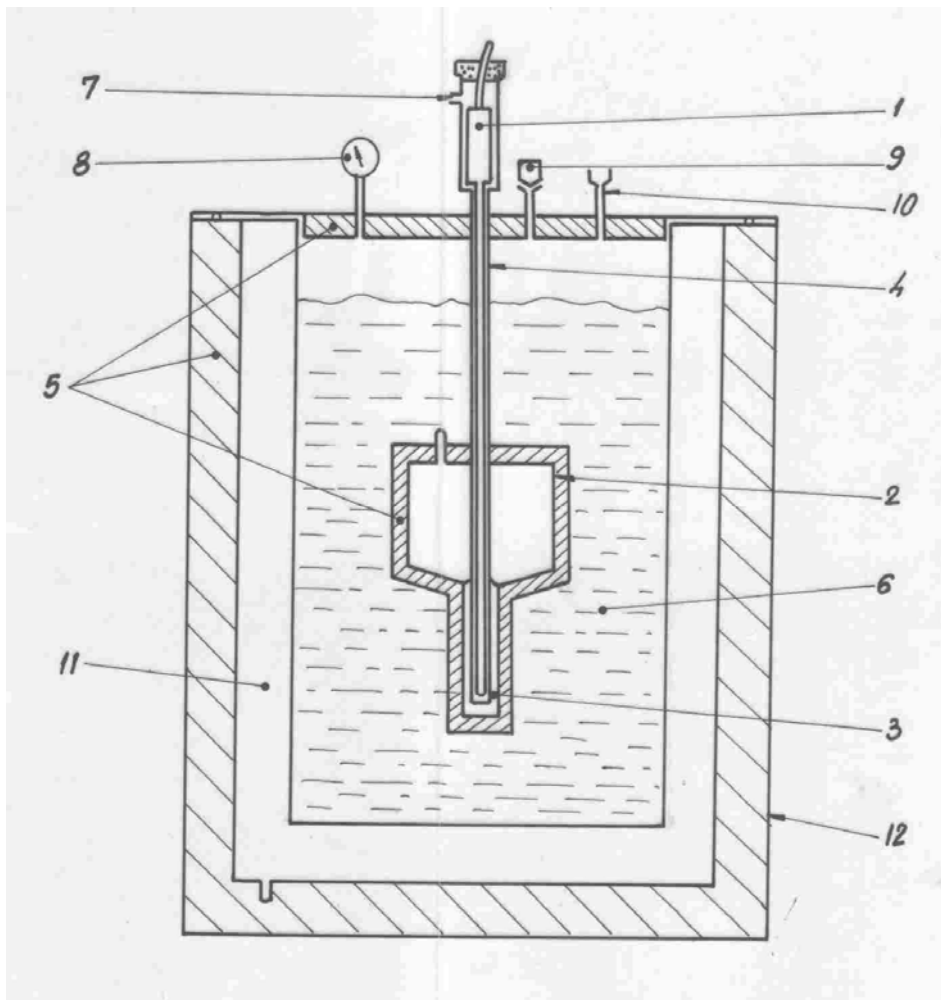


Figura 1 - Instalația pentru materializarea PTAr

1. - TRP tip tijă; 2. - Celulă din oțel inoxidabil;
3. - Argon; 4. - Tub suport al TRP; 5. - Spumă poliuretanică; 6. - Azot lichid; 7. - Heliu gazos; 8. - Manometru; 9. - Robinet;
10. - Tub de umplere; 11. - Vas Dewar; 12. - Carcasă metalică

În linii mari, instalația (figura 1) constă dintr-o celulă etanșă realizată din oțel inoxidabil (2) umplută cu argon pur și plasată într-un vas Dewar (11), în care mediul de răcire este azotul lichid.

Celula este prevăzută cu o coadă în care, la punctul triplu, se adună argonul (3) în fazele solidă și lichidă. În interiorul celulei, tubul suport (4) al TRP (1) leagă mecanic celula de capacul criostatului. Se

introduce azot lichid (6) în criostat; temperatura de fierbere a azotului (≈ 77 K) fiind mai coborâtă decât temperatura PTAr (≈ 84 K), are loc lichefierea și solidificarea argonului din celulă. Se închide tubul de umplere (10) și se ajustează presiunea în criostat cu ajutorul unui robinet (9) și a unui manometru (8), astfel încât temperatura băii cu azot lichid să fie adusă la o valoare ușor superioară temperaturii tranziției de fază a argonului. Căldura primită de la baia de azot determină topirea argonului solidificat. Tranziția este studiată prin înregistrarea continuă a indicațiilor TRP.

3 FACTORII DE INFLUENȚĂ ȘI SOLUȚIILE ADOPTATE PENTRU MINIMIZAREA LOR

Temperatura PTAr indicată de un TRP plasat în interiorul celulei depinde de:

- fenomenul de supraîncălzire a argonului lichid în timpul palierului de topire;
- pierderile de căldură datorate fazei gazoase a argonului la punctul triplu;
- transferul de căldură dintre substanța de lucru și mediul exterior celulei;
- încălzirea prin efect Joule a TRP. Erorile datorate acestui fenomen sunt eliminate, întotdeauna, prin extrapolarea la curent zero a valorii rezistenței electrice măsurate;
- presiunea hidrostatică a coloanei de argon lichid. Pe baza valorii coeficientului de variație a temperaturii cu adâncimea l , $dT/dl = 3,3 \times 10^{-3} \text{ K m}^{-1}$, se poate calcula efectul presiunii hidrostatice asupra temperaturii PTAr și rezultatele măsurărilor se pot corecta corespunzător;
- impuritățile argonului din celulă.

3.1 Fenomenul de supraîncălzire a argonului lichid

În cursul procesului de topire, după formarea a 50 % lichid, faza lichidă a eșantionului de argon se supraîncălzește considerabil [2, 9]. Acest fenomen este datorat conductivității termice foarte scăzute a fazei lichide ($\lambda = 1,25 \times 10^{-3} \text{ W cm}^{-1} \text{ K}^{-1}$) la temperatura punctului triplu față de cea a oțelului austenitic la aceeași temperatură ($\lambda = 85,8 \times 10^{-3} \text{ W cm}^{-1} \text{ K}^{-1}$). Consecința acestei diferențe de conductivitate este aceea că, din căldura primită de la baia de azot lichid, numai o parte servește la avansarea topirii, restul încălzind pur și simplu lichidul format, cu mult peste temperatura punctului triplu. De aceea, indicațiile TRP reprezintă o temperatură medie între lichidul supraîncălzit și solidul care se topește.

Teoretic, topirea ar trebui să înceapă în jurul acelor centre de impurități care slăbesc rețeaua cristalină. În fapt, procesul se poate petrece astfel numai dacă topirea se desfășoară lent și dacă conductivitatea termică a substanței este mare. Însă acest lucru nu este valabil, deoarece topirea este efectuată rapid (în câteva ore) iar conductivitatea termică a argonului este mică. Din aceste motive, topirea începe întotdeauna în vecinătatea sursei de căldură și nu în zonele unde se află impuritățile.

Conductivitatea termică a substanței nu poate fi modificată; în schimb, se poate modifica viteza fluxului termic prin substanță. Deoarece fluxul termic este proporțional cu gradientul de temperatură, riscul de supraîncălzire a lichidului poate fi redus prin împărțirea probei în secțiuni mici. Soluția este deja clasică [2, 6, 7, 9] și constă în instalarea unor schimbătoare de căldură în celulă, într-un contact termic bun unele cu celelalte.

În cazul celulei realizate la INM, s-au folosit 2 cilindri concentrici din cupru (#1 mm). Cei doi cilindri, fixați între ei cu distanțiere din cupru, au fost instalați în coada celulei, în jurul tubului suport, divizând astfel volumul de argon lichid și solid în 3 compartimente aproximativ egale.

3.2 Pierderile de căldură datorate fazei gazoase a argonului la punctul triplu

Vaporii de argon nu pot fi menținuți exact la temperatura eșantionului care se topește. Dacă vaporii sunt mai calzi decât punctul de topire, ei vor produce supraîncălzirea fazei lichide și temperatura indicată de termometru va fi mai ridicată. Dacă vaporii sunt mai reci, ei încep imediat să se condenseze la partea cea mai rece a sistemului, producând, simultan, “criopomparea” [9] eșantionului.

Deoarece atomii extrași transportă cu ei căldura latentă de vaporizare, o condensare cât de mică într-un punct rece determină o răcire foarte mare a eșantionului.

Trebuie evidențiat faptul că, în timp ce vaporii reci determină răcirea întregului eșantion de sus în jos, prin convecție, vaporii calzi produc o încălzire localizată numai la suprafață. Suprafața lichidă caldă produsă va fi mai ușoară (deoarece creșterea temperaturii scade densitatea) și, de aceea, va rămâne localizată la partea superioară a eșantionului. Căldura astfel acumulată la suprafață nu va difuza, în general, prin argonul lichid, datorită conductivității slabe a acestuia.

Este preferabil, deci, să se mențină temperatura vaporilor de argon peste punctul de topire. Pentru a obține această ușoară supraîncălzire a fazei de vaporii în celula realizată, pereții incintei superioare (în care, la temperatura punctului triplu, sunt localizați vaporii de argon) au fost proiectați cu o grosime mai mare decât cei ai incintei inferioare.

3.3 Fluxurile termice

Deoarece transferul termic dintre eșantion și mediul său înconjurător nu poate fi niciodată eliminat, acest fenomen va împiedica să se atingă, vreodată, în mod real, o distribuție de temperatură omogenă în substanță și, în consecință, poate contribui în mod semnificativ la erori experimentale. Din această cauză, fluxurile de căldură trebuie să fie minimizate individual.

Pentru minimizarea fluxurilor termice prin conducție și radiație prin tubul suport al TRP, acesta a fost realizat din țevă de oțel inoxidabil, cu dimensiunile cele mai mici posibile. La stabilirea dimensiunilor s-au avut în vedere constrângerile legate de:

- diametrul TRP;
- presiunea de 50 bari la care este solicitat tubul în interiorul celulei;
- necesitatea sudării tubului suport de capacul criostatului.

Grosimea mică a tubului suport reduce, de asemenea, rezistența termică dintre substanța de lucru și TRP, minimizând, astfel, abaterea temperaturii indicate de la temperatura tranziției de fază.

Pentru a optimiza fluxul de căldură de la baia cu azot spre eșantionul de argon, celula a fost acoperită cu un strat izolator de spumă poliuretanică, având grosimea de 5 mm.

Pe de altă parte, baia cu azot lichid prezintă neomogenități de temperatură pe verticală datorită faptului că temperatura de fierbere este funcție de presiunea hidrostatică. Pentru a uniformiza temperatura la exteriorul celulei, aceasta a fost acoperită, peste stratul izolator, cu o carcasă din cupru.

3.4 Influența impurităților

Influența impurităților asupra curbei de topire a fost studiată de Ancsin [9] prin introducerea în argon "pur" a unor impurități, în diferite concentrații. El a găsit că:

- He, H₂ și Ne în concentrații de până la 200 vppm nu au influență asupra curbei de topire în limitele de sensibilitate ale experimentului (aproximativ $\pm 0,1$ mK). S-ar părea că aceste impurități sunt mult prea volatile ca să rămână localizate în argonul care se topește.
- N₂, CO, O₂ și CH₄ coboară curba de topire și măresc diferența de temperatură dintre începutul și sfârșitul palierului de topire (denumită, interval de topire). Figura 2 [9] arată rezultatele obținute pentru 100 vppm din fiecare dintre aceste impurități. Se observă că punctele lichidus au fost coborâte cu 2; 2,4; 2,4 și, respectiv, 2,9 mK pentru 100 vppm de O₂, N₂, CO și, respectiv, CH₄. Pe de altă parte, intervalele parțiale de topire (de la o compoziție de 5 % lichid-95 % solid până la punctul lichidus) au, așa cum se vede în figura 2, o lărgime de 2; 5,2; 5,2 și 8 mK pentru cele 4 impurități de mai sus.
- Kr lasă temperatura punctului triplu al argonului mai mult sau mai puțin nemodificată dar crește dispersia rezultatelor în mod considerabil. Rezultatele din figura 2 conduc la concluzia că N₂, CO, O₂ și C₄ sunt ușor solubile în Ar lichid, în timp ce He, H₂, Ne și Kr nu sunt.

Din Certificatul de calitate al argonului procurat de la SIAD TP Italia, rezultă următoarele

impurități: N₂, 0,5 ppm; hidrocarburi, 0,05 ppm; apă, 0,5 ppm (apa nu are nici o influență asupra palierului de topire), O₂, 0,5 ppm; H₂, 0,05 ppm și CO + CO₂, 0,1 ppm. Calculând contribuția fiecărui tip de impuritate a rezultat că scăderea temperaturii PTAr datorită impurităților specificate de producător va fi de 0,025 mK iar creșterea intervalului de topire va fi de 0,045 mK.

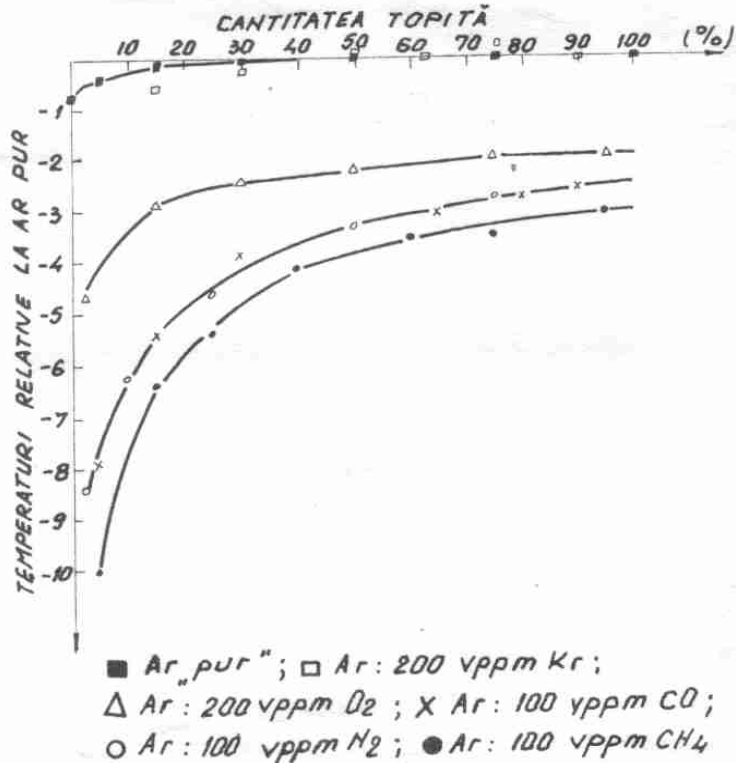


Figura 2 - Curbele de topire ale Ar dopat cu impurități

4 CONSTRUCȚIA INSTALAȚIEI

Instalația realizată pentru materializarea PTAr este un ansamblu autonom format din:

- celulă cu argon;
- criostat.

4.1 Celula

O celulă pentru un punct triplu criogenic poate să fie umplută la fiecare utilizare, printr-un sistem de purificare și umplere, sau poate fi închisă etanș. Ultimul model este

acum aproape unanim folosit pentru realizările de punct triplu, deoarece reduce posibilitatea de contaminare a substanței.

Proiectarea celulei a avut în vedere ca:

- volumul fazei lichide să asigure o imersie corespunzătoare a TRP și o durată cât mai mare a palierului de temperatură;
- volumul tampon al incintei superioare să limiteze presiunea argonului la 50 bari când celula se află la temperatura ambiantă;
- grosimea pereților și a capacului, precum și sudura acestora să asigure o rezistență mecanică suficientă la presiunea interioară de 50 bari, permițând, totodată, un transfer termic adecvat de la baia cu azot lichid.

Pentru a putea proiecta celula, trebuia să stabilim mai întâi cantitatea de argon ce urmează să fie închisă în celulă. În acest scop, am pornit de la condiția ca faza lichidă a argonului la temperatura PTAr trebuie să asigure o adâncime de imersie adecvată pentru termometrele cu rezistență din platină Tinsley, din dotarea laboratorului nostru. Din nefericire, însă, nu am putut găsi informația referitoare la adâncimea de imersie necesară, nici în documentele CCT [7], nici la firma Tinsley. Am optat pentru o adâncime de imersie de 110 mm, acoperitoare în opinia noastră, având în vedere faptul că, prin construcție, tubul suport al TRP este, pe o lungime mare, la o valoare egală sau foarte apropiată de cea a PTAr, deoarece acest tub traversează baia cu azot lichid. Opțiunea noastră a fost confirmată de informația obținută ulterior de la G. Bonnier care, tot pentru un TRP Tinsley, a asigurat o adâncime de imersie de circa 90 mm.

Celula a fost realizată dintr-o incintă cilindrică prelungită cu o altă incintă, de diametru mai mic, în care se adună argonul lichid în momentul condensării sale (figura 1). În interiorul celulei, tubul suport (4) al TRP leagă mecanic celula de capacul criostatului. Punând condiția ca stratul de argon lichid din jurul TRP să aibă o grosime de 10 mm, am calculat volumul de argon lichid necesar pentru materializarea punctului triplu ($\approx 66 \text{ cm}^3$). Adăugând și masa de argon aflat în stare gazoasă la temperatura punctului triplu, a rezultat că masa totală de argon ce trebuie să fie închisă în celulă este de 120 g.

Deoarece densitatea argonului în faza lichidă este de aproximativ 1000 de ori mai mare decât densitatea argonului în faza gazoasă, dimensiunile incintei superioare au fost astfel proiectate încât, la temperatura camerei, presiunea gazului din celulă să fie de 50 bari.

Celula a fost realizată în întregime dintr-o bară laminată de oțel inoxidabil de tip austenitic, marca W 4301, a cărui caracteristică cea mai importantă este aceea că la temperaturi joase își păstrează etanșeitățile și nu devine poros.

Pe baza teoriilor de rezistență, am calculat grosimea pereților celor 2 incinte, ce sunt solicițate de o presiune interioară egală cu 50 bari, știind că materialul admite o tensiune $R_m=597 \text{ N/mm}^2$. Pentru ca argonul care se topește să nu se găsească în zona de variație a grosimii pereților, lungimea cozii celulei a fost mărită cu 7 mm.

Celula a fost prevăzută la partea sa superioară cu un capac, realizat din aceeași bară de inox. Grosimea capacului (de 5 mm) a fost calculată, de asemenea, pe baza teoriilor de rezistență.

Capacul a fost prevăzut cu două orificii, unul pentru tubul suport al TRP și celălalt pentru capilarul de umplere a celulei. Sudurile au fost realizate în atmosferă controlată de argon.

4.2 Criostatul

Criostatul are un dublu rol: în primul rând, asigură răcirea celulei cu argon sub temperatura punctului triplu a și, în al doilea rând, asigură un mediu de temperatură constantă în jurul celulei.

Proiectarea vasului Dewar a avut în vedere ca:

- grosimea pereților și a capacelor, precum și sudurile, să asigure o rezistență mecanică suficientă la aplicarea presiunii interioare de ≈ 2 bari și a greutateii masei de azot lichid de $\approx 462 \text{ N}$.
- cantitatea de azot lichid furnizeze căldura necesară pentru producerea tranziției de fază a argonului din celulă.

Așa cum se poate vedea din figura 1, criostatul se compune dintr-un vas cu pereți dubli (10) realizat din tablă de oțel inoxidabil de tip austenitic, marca W4301, și o carcasă (12) din tablă de oțel. Dimensiunile vasului (11) au fost stabilite astfel încât cantitatea de căldură care trebuie cedată de masa de azot pentru a realiza topirea argonului să nu afecteze sensibil temperatura azotului. Aceste dimensiuni asigură în jurul celulei un strat de azot lichid cu grosimea de circa 100 mm.

Pentru a obține o cât mai bună izolare termică a azotului lichid din criostat, inițial ne-am propus ca spațiul dintre pereții vasului (10) să fie vidat. Pe baza teoriilor de rezistență la întindere și compresiune, am calculat grosimea pereților și capacelor vasului Dewar, în funcție de presiunea la care sunt solicițate. O grosime a capacelor de 2 mm și, respectiv, 3 mm, și a pereților de 1 mm s-a dovedit a fi suficientă (conform tensiunilor admisibile specificate în Certificatul de calitate). La vidare, deși a rezistat solicitărilor la întindere și compresiune, vasul a flambat. O explicație ar putea fi forma ușor ovalizată a capacelor, rezultată la tăierea tablei, ceea ce a determinat și ușoara ovalizare a celor doi cilindri concențrici. Pentru că timpul nu ne-a permis construcția unui nou vas, am renunțat la izolarea prin vid și am decis să recurgem la o altă formă de izolare criogenică și anume, prin pulberi izolatoare.

Pulberile izolatoare sunt materiale divizate foarte fin, cum ar fi perlita, SiO_2 expandat, silicat de calciu etc. La presiunea de 1 atmosferă a gazului care umple spațiul dintre particule, pulberea reduce transportul total de căldură, deoarece diminuează convecția și radiația și, dacă mărimea particulei este destul de mică, se poate micșora drumul liber mijlociu al moleculelor de gaz.

Laboratorul nostru dispunea în acel moment de o cantitate suficientă de perlită pentru a izola vasul Dewar. Am măsurat densitatea perlitei ($\rho = 0,095 \text{ g/cm}^3$) și, pe baza graficului lui Kinzer [8], am determinat conductivitatea sa termică: $340 \mu\text{W/cm}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Am decis să folosim această pulbere ca izolator în spațiul dintre pereții vasului Dewar, păstrând izolația suplimentară (un strat de 50 mm din spumă poliuretanică, ce are conductivitatea termică de $330 \mu\text{W/cm}^{-1} \text{ K}^{-1}$) în spațiul dintre vasul Dewar și carcasa metalică exterioară, așa cum fusese proiectat.

Pentru a ameliora calitățile izolatoare ale perlitei, după umplere, vasul Dewar a fost plasat pentru câteva ore deasupra unei surse de căldură, în scopul de a elimina pe cât posibil umezeala dintre particulele care compun pulberea. Apoi, cele două orificii practicate în capac pentru a permite umplerea, au fost închise etanș.

5 UMLEREA ȘI ÎNCHIDEREA ETANȘĂ A CELULEI

Impuritățile din gazul închis în celulă influențează esențial valoarea temperaturii PTAr și lărgimea intervalului său de topire. Pentru ca un punct triplu să fie în limitele a 0,1 mK față de cel al substanței pure, trebuie ca suma totală a impurităților din substanță să fie menținută sub 10 vppm. Conform Certificatului de calitate furnizat de producător, puritatea nominală a gazului procurat de la SIAD TP a fost de 99,99983 %. S-a arătat că, pentru cele 1,7 ppm impurități prezente în gaz, erorile sistematice introduse sunt neglijabile.

Stabilizarea impurităților nominale din eșantion, atât în procesul de umplere și închidere etanșă a celulei, cât și ulterior, pe durata mai multor ani de utilizare, reprezintă condiția principală pentru a face o celulă de punct triplu cu adevărat performantă și durabilă și, este, în fond, cel mai dificil de realizat în cazul gazelor, în special al cantităților mici de gaz închise în celule etanșe. Pavese [10] arată că desorbția unui singur strat de impurități gazoase din fiecare porțiune de $0,2 \text{ m}^2$ de suprafață geometrică provoacă o contaminare de aproximativ 40 vppm în 5 l de gaz și că o pierdere de 10^{-7} torr l/s datorată unei neetanșeități introduce o impurificare de aproximativ 2 vppm/zi în aceeași cantitate de gaz.

Curățirea corespunzătoare a celulei și a sistemului de umplere este o cerință cheie pentru a se evita contaminarea gazului. Pavese [10] mărturisește că 3 ani au fost dedicați la IMGIC punerii la punct a procedurilor de curățire pentru fabricarea și umplerea celulelor etanșe.

Geometria celulei realizate la INM permite o curățire internă eficientă a sa. În acest scop, interiorul celulei, și toate piesele componente (ecrane, tub suport etc.), au fost spălate succesiv cu un solvent organic și cu acid clorhidric diluat; apoi au fost limpezite de câteva ori cu apă distilată.

Pentru a putea fi etanșat cât mai bine, tubul de umplere din cupru trebuie să fie cât mai curat posibil. De aceea, înaintea sudării pe celulă, tubul a fost curățat foarte bine prin vidarea sa timp de câteva ore la (800...900) °C.

După spălare, celula a fost ținută sub vid timp de aproape 30 ore. Înainte de umplerea definitivă, celula a fost alternativ umplută cu argon pur, la o presiune de (1..3) bar, și vidată de 10 ori.

Etanșarea celulei s-a dovedit a fi un punct foarte delicat. După umplerea finală a celulei cu argon la presiunea de 50 bari, tubul de umplere din cupru a fost strâns cu un clește și extremitatea sa a fost sudată cu Wood's metal. Operația nu a reușit, însă. Chiar și după înlocuirea tubului din cupru cu un capilar din cupru (diametrul interior: 1 mm), etanșarea nu a putut fi realizată.

Explicația este legată de caracteristicile materialului folosit pentru sudură. Wood's metal [11] este un aliaj de bismut (50% Bi, 25 % Pb, 12,5 % Sn și 12,5 % Sn) care se topește la (65...70) °C. Dar, asemenea bismutului pur, acest aliaj se dilată la solidificare. De asemenea, este fragil și se deformează atunci când este supus unor tensiuni mecanice.

După câteva încercări de etanșare pe un capilar umplut cu gaz la presiune ridicată și stabilirea unei anumite proceduri de strângere a acestuia, și, mai ales, după sudarea extremității capilarului de umplere cu argon, celula a putut fi închisă etanș.

6 CONCLUZII

Prin instalația prezentată în această lucrare, laboratorul de termometrie al INM se înscrie între foarte puținele laboratoare din lume care dețin celule de construcție proprie pentru materializarea punctului triplu al argonului. Soluțiile adoptate în laboratorul INM la unele din problemele dificile de proiectare și realizare fizică ale instalației au fost argumentate și prezentate în lucrare. Realizarea instalației pentru materializarea punctului triplu al argonului– punct fix de definiție al SIT-90 - va permite extinderea etalonului național de temperatură al României de la 234 K la 84 K.

Bibliografie

- [1] H. Preston-Thomas, *The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90)*, Metrologia, Vol.10, BIPM, 1990, pp.3-10
- [2] G. Bonnier, *Point triple de l'argon (83,798 K) référence de transfert*, Bulletin d'information du BNM, nr. 22, pag. 12, 1975
- [3] G. Furukawa G. T., Bigge W. R., Riddle J.L., *Triple Point of Argon*, Temperature. Its Measurement and Control in Science and Industry, vol.4, part 1, pag. 231, 1972
- [4] Ancsin J., Philips M. J., *Triple Point of Argon*, Metrologia, vol. 1976
- [5] B. Fellmuth, E. Tegeler, *Realization of the ITS-90 in the range from 0,65 K to 933 K (660EC)*, Temperature. Its Measurement and Control in Science and Industry, vol.5, part 1, pag. 293, 1982
- [6] Bloembergen C., Bonnier G., H. Ronsin, *An International Intercomparison of Argon Triple Point Calibration Facilities, Accommodating Long Stem Thermometers*, Metrologia, 27, pag.101-106, 1990
- [7] *Supplementary Information for the International Temperature Scale of 1990*, BIPM, Pavillon deBreteuil, F-92310 Sèvres, 1990
- [8] Vance R. W., Duke W.M., *Applied Cryogenic Engineering*, 1962
- [9] Ancsin J., *Studies of Phase Changes in Argon*, Metrologia, vol.9, pag. 147-154, 1973
- [10] Pavese F., Ferri D, *Ten years of research on sealed cells for phase transition studies of gases at IMGC*, Temperature. Its Measurement and Control in Science and Industry, vol.5, part 1, pag. 217, 1982
- [11] Guy Kendal White, *Experimental Techniques in Low-Temperature Physics*, 1959