

EFECTUL MPEMBA

Profesor Cătălina Stanca

Colegiul Național „Alexandru Ioan Cuza”, Galați

Capitolul 1: În ce constă „efectul Mpemba”

Fenomenul prin care apa caldă poate îngheța mai repede decât apa rece a fost numit, „efectul Mpemba”. Pentru a înțelege mai bine semnificația acestui efect putem realiza următorul experiment având la dispoziție două vase identice ca formă, conținând cantități egale de apă. În unul din vase apa se află la o temperatură mai mare decât în celălalt. Răcim ambele vase folosind același proces de răcire. ***Surprinzător în anumite condiții experimentale vom observa că apa inițial mai caldă va îngheța mai repede decât apa inițial mai rece!***

Este ușor de observat că acest efect nu se poate produce în orice condiții. Astfel dacă apa caldă s-ar afla la temperatura de $99,9^{\circ}\text{C}$ și apa rece la temperatura de $0,01^{\circ}\text{C}$ acest fenomen nu se poate produce. Apare evident faptul că producerea acestui fenomen este dependentă de temperaturile inițiale. Studiile care s-au făcut după apariția acestuia au demonstrat că pe lângă temperaturile inițiale, forma recipientului și condițiile de răcire sunt elemente care influențează și ele producerea lui.

O demonstrație intuitivă poate fi făcută astfel: apei reci aflate inițial la 30°C îi va lua 10 minute să înghețe, în timp ce apei calde, aflată inițial la 70°C îi va trebui ceva timp să ajungă la 30°C și apoi încă ceva timp până să înghețe. Conform acestui raționament simplu efectul Mpemba pare imposibil! Și totuși acest lucru se întâmplă!

Oamenii de știință au încercat mai multe explicații:

- Este posibil ca apa „să se fi schimbat” când se răcește de la 70°C ?
- Ar putea să aibă o masă mai mică, mai puțin gaz dizolvat?
- Poate curenții de convecție ar putea produce o distribuție neuniformă a temperaturii?

Câteva posibile explicații pentru acest efect au fost propuse, dar deocamdată experimentele nu arată clar care element este definitoriu. De ce știința modernă nu a dat nici un răspuns la întrebarea aparent simplă despre apa care se răcește? Problema este că timpul necesar apei să înghețe este sensibil la condițiile experimentului (forma și mărimea recipientului, forma și mărimea unității de refrigerare, gazul și impuritățile conținute în apă). Există un număr relativ mare de experimente realizate, dar nici unul dintre ele nu a putut să proclame MECANISMUL care stă la baza producerii acestui efect.

1.1. Scurt istoric

Comportamentul apei calde care îngheață mai repede decât apa rece în anumite condiții experimentale a fost observat de oamenii de știință cu mult înainte de 1969. Prima referire la acest aspect datează din antichitate, fiind făcută de Aristotel, în 300 î.e.n. Fenomenul a fost analizat și în perioada medievală când exista preocuparea găsirii unei definiții pentru noțiunea de căldură. În anul 1600, Francis Bacon și puțin mai târziu Rene Descartes aminteau despre acest fenomen contradictoriu. Apariția teoriei moderne despre căldură a lăsat într-un con de umbră acest fenomen care nu se plia pe conceptul modern al noțiunii de căldură.

Numele acestui comportament „straniu” al apei îi aparține lui Mpemba, un student tanzanian care dorea să prepare înghețată în laboratorul școlii, dintr-un amestec de lapte și zahăr. Folosind lapte fierbinte a observat că acesta a înghețat înainte în amestecul format, lucru care nu s-a întâmplat și colegilor lui. Întrebându-și profesorul de fizică acesta a negat vehement acest posibil comportament al amestecului, spunându-i că nu verifică principiile de bază ale fizicii. Mai târziu a reluat studiul împreună cu Dr. Osborne, un profesor de fizică, intrigat la rândul-i de afirmațiile studentului Mpemba. În anul 1969 au publicat observațiile lor experimentale, explicând acest fenomen pe baza conducerii termice și nicidecum a evaporării. Tot în același an, Dr. Kell a publicat studiile sale derulate independent de cei doi, vrând să verifice în acest fel o legendă care circula în Canada, bazată pe acest fenomen. El explică însă producerea acestuia pe baza procesului de evaporare, ca fenomen preponderent în „comportamentul nefiresc al apei” (Dr. Kell). Reluarea acestui experiment s-a realizat de nenumărate ori în laboratoare din diferite părți ale lumii, dar nu s-a găsit explicația fenomenologică în totalitatea ei.

Un critic de la Physics World scrie: „Chiar dacă efectul Mpemba este real - dacă apa caldă poate câte o dată să înghețe mai repede decât cea rece – nu este clar, explicația va fi luminatoare.” subliniind faptul că investigațiile fenomenului trebuie să controleze un număr mare de parametri inițiali (incluzând tipul și temperatura inițială a apei, dimensiunea, forma și materialul containerului și temperatura frigiderului) și trebuie să stabilească o metodă particulară a timpului de îngheț, toate acestea ar putea să afecteze prezența sau absența efectului Mpemba. O vastă varietate multidimensională de experimente ar putea explica de ce efectul nu este înțeles încă.

1.2. Factorii care influențează înghețarea apei

Convecția: Presupune un transfer de energie prin mișcarea curenților într-un gaz sau într-un lichid. Acest proces în explicarea fenomenului se bazează pe două aspecte existente:

➤ Curenții de convecție cauzati de densitățile diferite ale apei

Se știe că, pentru majoritatea temperaturilor, densitatea apei scade pe măsură ce temperatura crește. Așadar, apa rece este mai densă decât apa caldă, ceea ce face ca ea, într-o primă fază să se „scufunde” în container. Odată ce temperatura devine mai mică de 4°C , această apă va căpăta densitate mai mică și se va ridica spre suprafață, rămânând acolo până când procesul înghețare al apei se va încheia complet. Mișcarea apei reci spre suprafață duce la apariția curenților de convecție și la *existența unei neuniformități în valorile temperaturii de la fundul containerului spre suprafață*. Pe de altă parte apa rece de la fundul vasului, ajunsă la suprafață va crea o „peliculă de gheață” care va împiedica aerului rece din dispozitivul de răcire să răcească apa din interior.

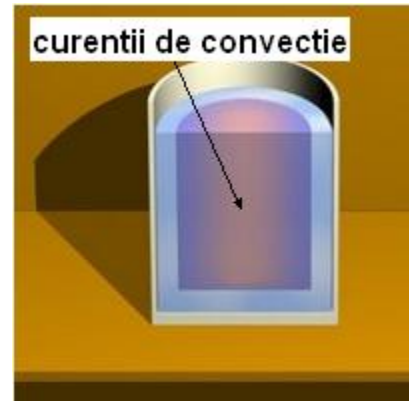
➤ **Curenții de convecție datorati mișcării aerului rece.**

Aerul rece din dispozitivul de răcire poate cauza răcirea apei de la suprafață.

Cum pot influența acești curenți de convecție efectul Mpemba?

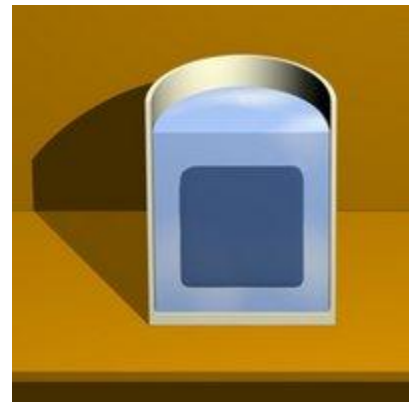
Vasul cu apă inițial mai caldă: curenții de convecție care apar au temperatură mai ridicată. Prin mișcarea lor duc la topirea stratului de gheață permițând aerului rece din dispozitivul de răcire să pătrundă în interior și apa să se răcească.

Figura 1 Curenții de convecție



Vasul cu apă inițial mai rece: Temperatura lor fiind mai mică nu vor putea să producă topirea stratului de gheață, procesul de răcire al apei din interiorul containerului fiind mai îndelungat.

Figura 2 Stratul de gheață de la suprafața vasului



Deci convecția în sine ar trebui să explice efectul Mpemba, dar dacă într-adevăr o face nu se știe. **Concluzionând putem afirma că, graficul ce reprezintă curba de răcire a apei fierbinți nu va reproduce curba de răcire a apei reci, ci va scădea mai repede când va ajunge la aceeași temperatură.**

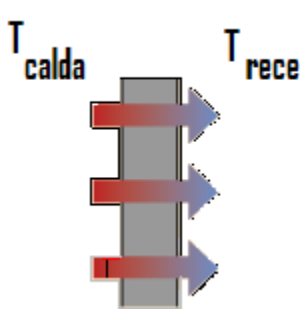
Experimentele pentru efectul Mpemba au raportat o suprafață fierbinte așa cum ne putem aștepta. Verificarea ipotezei în toată complexitatea sa ar presupune realizarea unui model teoretic al curenților de convecție, lucru care până în acest moment nu a fost făcut.

Conducția: Presupune un transfer de căldură ca urmare a mișcării de agitație termică a moleculelor, fără modificarea dimensiunilor macroscopice ale corpului. Rata de transfer a căldurii prin conducție se definește ca fiind egală cu transferul de căldură în unitate de timp, pe unitate de suprafață și depinde de gradientul temperaturii și de caracteristicile termice ale materialului.

$$\frac{\Delta Q}{A\Delta t} = -k \frac{\Delta T}{\Delta x} \text{ unde } k = \text{conductivitatea termică a substanței}$$

$$\frac{\Delta T}{\Delta x} = \text{gradient de temperatură}$$

Un aspect extrem de interesant este transferul de căldură prin conducție între două suprafețe plane, calculat pe baza formulei (figura 3).



$$\frac{Q}{t} = \frac{kA(T_{cald} - T_{rece})}{d}$$

unde k = conductivitatea termică a barierei

A = aria suprafeței prin care se realizează transferul de căldură

d = grosimea barierei

T = temperaturile celor două surse între care are loc transferul de căldură

Figura 3

Motivul pentru care vom utiliza această formulă în calculele noastre este legat de factorii dependenți de transferul de căldură prin conducție.

➤ Containerul

Se află în contact direct cu sistemul de răcire, ceea ce face ca el să se răcească și la rândul său să răcească și apa din interior. Pentru ca procesul de conducție să fie predominant în efectul Mpemba este necesar să folosim un container din metal, deoarece acesta este un bun conductor termic, spre deosebire de lemn.

- **Aerul** rece este în contact direct atât cu containerul cât și cu apa, ceea ce permite scăderea temperaturii apei prin mecanismul de conducție.

Cum poate influența acest proces efectul Mpemba?

Apa inițial aflată la temperatură mai mare, cedează o parte din căldură containerului care folosește o parte din aceasta la încălzirea stratului de gheață de la suprafață. Ținând cont de faptul că topirea stratului de gheață și începerea procesului de răcire este mai puternică în acest vas și transferul de căldură de la container la apă este mai rapid. Putem spune că, căldura „iese” din containerul mai cald mult mai rapid decât din cel mai rece.

Aplicăm formula pe care am prezentat-o la caracteristicile vasului cu care am efectuat noi experiențele și la temperaturile la care efectul Mpemba a fost cel mai elocvent pentru noi, obținem următoarele valori pentru rata de transfer termic prin conducție:

$$r = 5 \text{ cm}, h = 8 \text{ cm}, d = 1 \text{ cm}$$

$$k_{\text{aluminiu}} = 0,75 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{caldă}} = 40^{\circ}\text{C}, T_{\text{rece}} = 19,8^{\circ}\text{C}, T_{\text{sistem răcire}} = -1^{\circ}\text{C}$$

Făcând un simplu calcul matematic găsim rata de transfer termic pentru sursa caldă

$$\frac{Q}{t} = 101,38 \text{ J/s} \text{ și } \frac{Q}{t} = 51,43 \text{ J/s} \text{ pentru sursa rece, lucru care dovedește din nou posibila valabilitate a teoriei.}$$

Evaporarea: Procesul de evaporare are ca efect scăderea temperaturii. Pe măsură ce apa inițial fierbinte se răcește își pierde din volum pentru a se evapora. Având volum mai mic lichidul pierde mai puțină căldură pentru a se răci și deci se răcește mai repede. Calculele făcute de Kell în 1969 au arătat că dacă apa s-ar răci prin evaporare și ar menține o temperatură uniformă apa mai caldă ar îngheța înaintea apei reci. Calculul vitezei de evaporare pentru cele două situații evidențiază din nou posibilitatea producerii acestui fenomen.

$$v = k \frac{S}{H} (p_m - p)$$

unde S = aria suprafeței libere a lichidului

$p_m - p$ = diferența dintre presiunea vaporilor saturați ai apei la o anumită temperatură și presiunea p a vaporilor din atmosferă

k = constantă care depinde și de viteza aerului în contact cu lichidul

Am dorit să analizăm diferențele posibile între aceste valori de evaporare (am ținut cont de faptul că avem aceeași suprafață liberă) și pentru aceasta am anexat și valori ale presiunii vaporilor saturați ai apei în funcție de temperatură.

t($^{\circ}\text{C}$)	0	10	30	40	50	80
P _m (mmHg)	4,6	9,16	31,5	61,6	92	354,6

Analizând tabelul putem vedea o diferență importantă între valori ale p_m la temperaturile la care s-au realizat experiențele, ceea ce arată că procesul de evaporare este mai puternic în cazul apei calde. Dacă containerul ar fi realizat din lemn (la fel ca cel al lui Mpemba) atunci procesul de evaporare ar fi dominant, deoarece procesul de conducție ar fi extrem de slab, lemnul nefiind un bun conducător de căldură.

Rezultate pozitive Această explicație este solidă și fără îndoială contribuie la efectul Mpemba în multe situații fizice. În timp ce experimentele arată că evaporarea este importantă totuși, nu demonstrează și faptul că este singurul mecanism din spatele efectului.

Rezultate negative Osborne a măsurat volumul pierdut la evaporare și au găsit volumul mult mai mic decât cel calculat de Kell. Un alt experiment făcut de Wojciechowski a constatat din realizarea efectului Mpemba într-un container închis unde nici un volum nu s-a pierdut la evaporare.

Solvatii prezenți de obicei în apă – oxigen sau dioxid de carbon, pot schimba punctul de îngheț al apei. Ei sunt evacuați din apa inițial fierbinte, schimbând proprietățile apei. Când apa este mai caldă ea conține mai puțin solvat deoarece solubilitatea acestora în apă este mai mică la temperatură

ridicată. Așadar, când apa inițial mai caldă îngheață, ea trebuie să elimine mai puțin gaz decât cea rece, având în acest fel un punct de îngheț mai ridicat decât apa rece.

Alte substanțe

Jonathan Katz de la Universitatea Washington St. Louis. Katz crede că, În pofida faptului că apa are o mulțime de proprietăți deosebite, efectul Mpemba nu este o proprietate a apei ci este cauzat de alte substanțe precum calciul sau bicarbonatul de magneziu care sunt dizolvate în apă. Atunci când apa este încălzită, aceste substanțe precipită și apa rămâne mai pură. Apa pură (distilată) îngheață la zero grade Celsius, însă apa impură îngheață la temperaturi mai scăzute.

Un alt lucru care contribuie la același fenomen este faptul că impuritățile modifică "capacitatea calorică" a apei care definită

$$c = \frac{Q}{\Delta t}, \text{ unde}$$

Q = cantitatea de căldură

Deci, apa impură are o capacitate calorică mai mare ceea ce face să își schimbe temperatura mai greu.

Acest lucru ar putea explica și din ce cauză efectul Mpemba este mai pronunțat în cazul apei mai "grele" (conținând mai multe minerale precum calciul și bicarbonatul de magneziu).

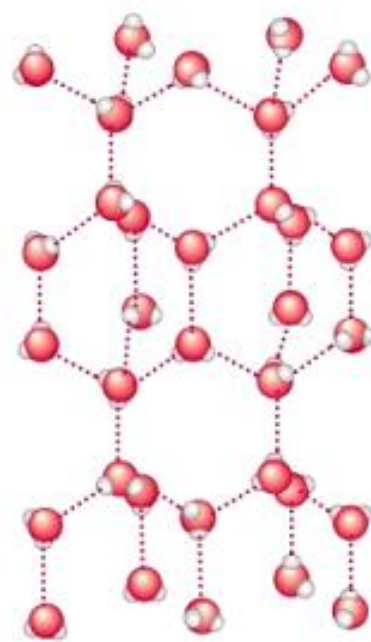


Figura 4 Structura "ordonată" a apei la 0°C

Mediul ambiant Apa inițial fierbinte poate modifica mediul înconjurător într-un anumit fel astfel încât să-l facă să se răcească mai repede.

Un experiment efectuat cu containere diferite ca mărime a avut ca rezultat schimbări semnificative ale datelor. Așadar este important să analizăm și mediul înconjurător.

De exemplu, o explicație recentă pentru efectul Mpemba ar fi legată de stratul de gheață din sistemul de răcire. Astfel, containerul ce conține apă rece va sta pur și simplu pe suprafața gheții, în timp ce containerul cu apă fierbinte va topi gheața și apoi va sta pe fundul congelatorului. Apa fierbinte va avea în acest fel un contact termic mai bun cu sistemele de răcire. Dacă gheața topită îngheață din nou formând un pod de gheață între congelator și container, atunci contactul termic va fi chiar mai bun.

Evident, chiar dacă această afirmație este adevărată, ea are o utilitate limitată din moment ce experimentele științifice sunt destul de bine pregătite, astfel încât să nu lase recipientul așezat pe un strat de gheață ci să-l plaseze direct pe sistemul de răcire. Așadar, în timp ce acest mecanism propus

poate sau nu poate avea o relevanță în ceea ce privește experimentele făcute, este irelevant pentru majoritatea rezultatelor publicate.

C. Verificarea experimentală

1. Prima verificare experimentală a avut ca suport științific următoarea afirmație:

- **stratul de gheață care se formează are ca efect încetinirea procesului de răcire în vasul cu temperatură inițial mai mică.**

Probele cu care am lucrat sunt 2 pahare identice, pe care le-am supus procesului de înghețare.

timp (min)	temperatura apei calde ($^{\circ}\text{C}$)	temperatura apei reci ($^{\circ}\text{C}$)
0	39°	15°
10	32°	9°
20	27°	7° începe formarea de cristale la suprafața paharului
25	17°	6° cristalele se extind pe toată aria laterală, "prinzând" la mijloc apa din interior într-o cămașă.
30	12°	5° continuă procesul de extindere.
35	7° apar primele cristale pe suprafața apei.	3° continuă procesul de extindere.
40	3° procesul de înghețare se extinde în toată masa apei.	2° continuă procesul de extindere în întregul pahar.
50	2° cristalele de gheață s-au extins în interiorul vasului cuprinzând mai mare parte din acesta.	2° cristalele de gheață s-au extins în interiorul vasului cuprinzând cea mai mare parte din acesta.

Figura 5 Stratul de gheață de la suprafață după 35 de minute din vasul cu apă caldă



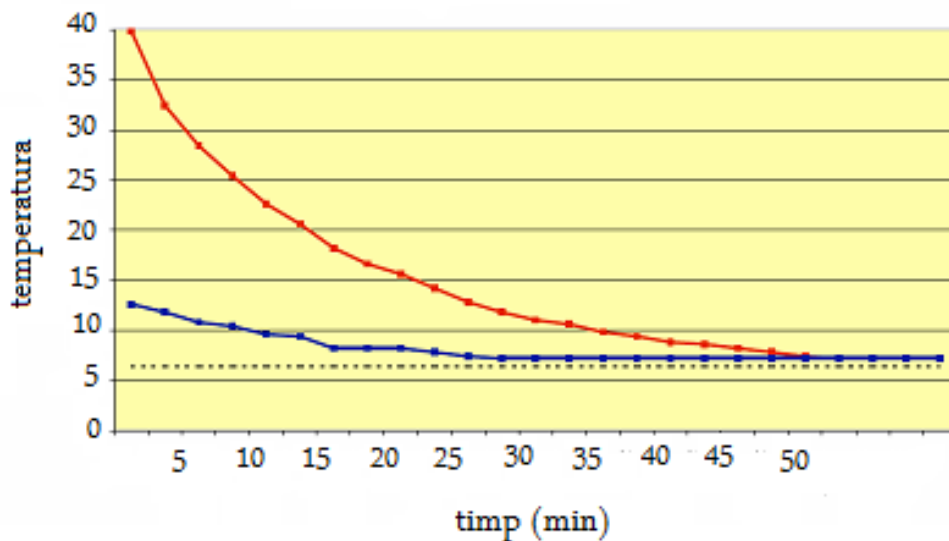


Figura 6. Modul în care se realizează procesul de înghețare pentru cele surse

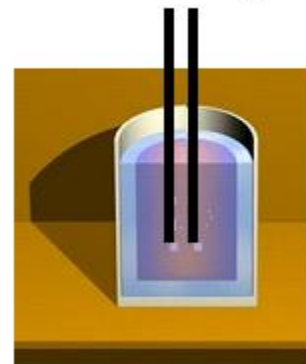
2. A doua verificare experimentală are ca suport științific

- **neuniformitatea temperaturii de la fundul containerului spre suprafață**, evidențiind curenții de convecție.

Materiale necesare:

- 2 vase de aluminiu având aceleași dimensiuni;
- 300 ml apă la temperatura de 40⁰C;
- 300 ml apă la temperatura de 24⁰C
- 2 senzori de temperatură conectați la placa de achiziție;
- dispozitiv de răcire (frigider)

senzori de temperatura



Graficele obținute arată existența gradientilor de temperatură specifici fenomenului de convecție. După cum se observă agitația termică datorată acestui proces este mai pronunțată în situația vasului în care se află apă la temperatura inițială de 40⁰C. Un alt aspect care trebuie evidențiat este legat de neuniformitatea temperaturii nu numai pe adâncime, dar și între 2 puncte care se află la aceeași

adâncime, demonstrând din nou caracterul accentuat al deplasării gradientilor de temperatură în totalitatea lichidului.

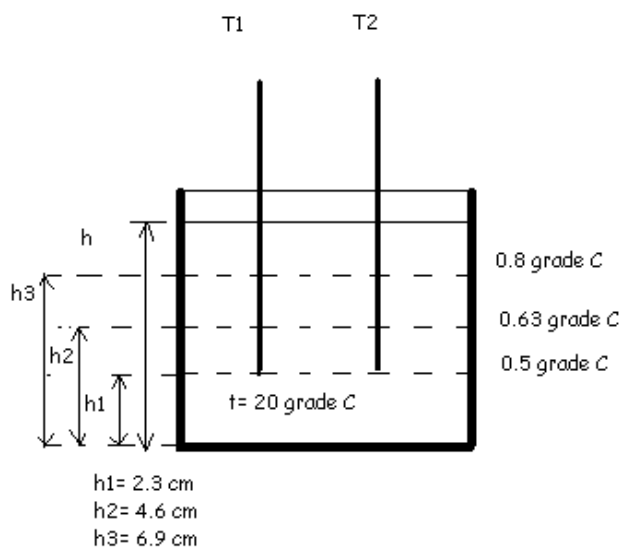


Figura 7 Modul în care sunt distribuiți gradientii de temperatură pe adâncime pentru sursa rece

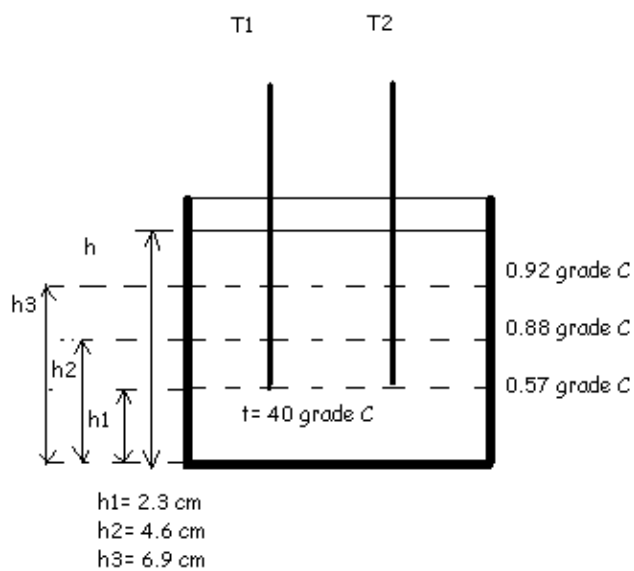


Figura 8 Modul în care sunt distribuiți gradientii de temperatură pe adâncime pentru sursa caldă

Timp (s)	Diferență de temperatură (°C)
0	0
4	0,2
8	0,4
15	0,65
25	0,85
30	0,90
40	0,93
50	1,02

Timp(s)	Diferență de temperatură (°C)
0	0
4	0,35
8	0,50
15	0,75
25	0,90
30	0,98
40	1,05
50	1,25

Tabele ce reprezintă valorile obținute cu ajutorul senzorilor de temperatură la aceeași adâncime

Figura 9 Diferența de temperatură. între 2 puncte situate la aceeași adâncime - sursa rece

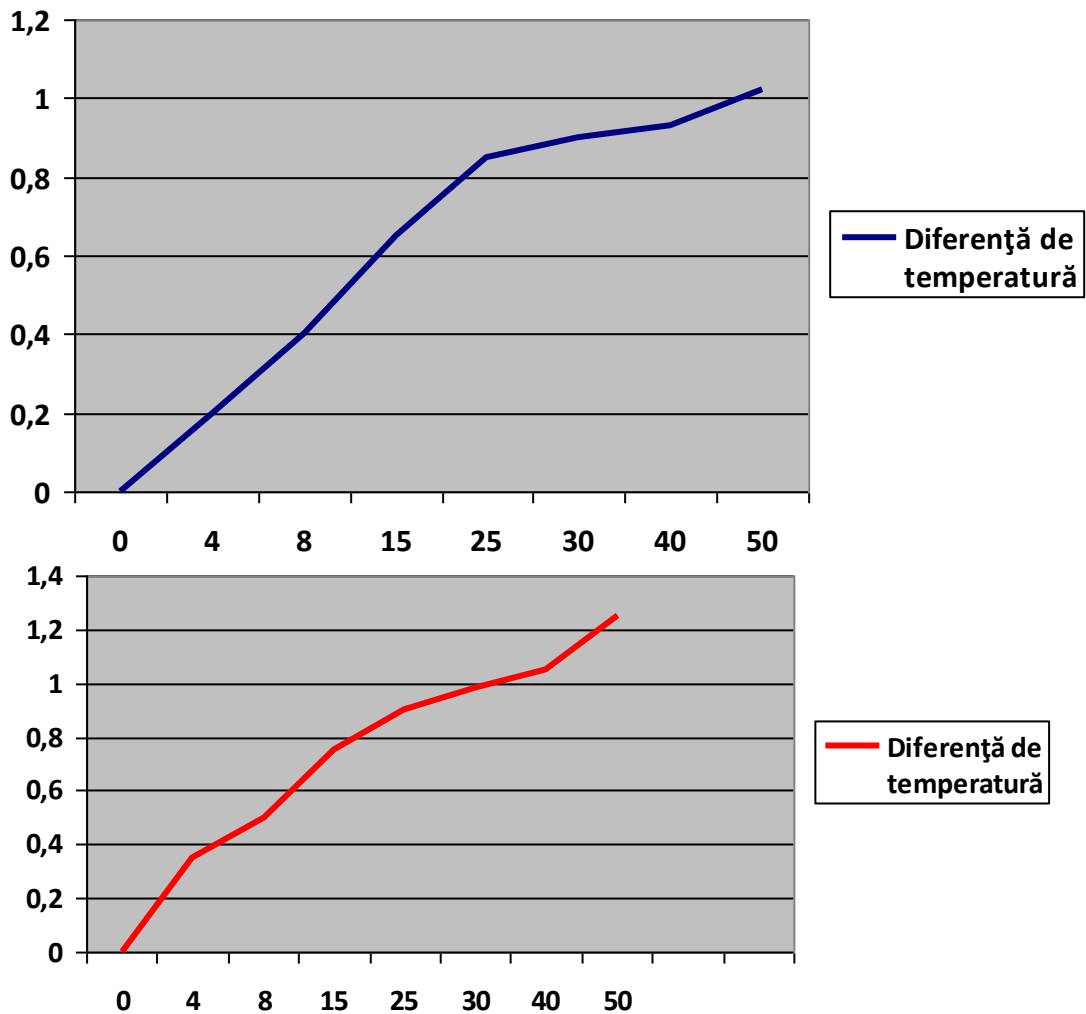


Figura 10 Diferența de temperatură. între 2 puncte situate la aceeași adâncime - sursa caldă

3. A treia verificare experimentală urmărește

- **comportarea aceleiași mase de apă în procesul de răcire, având temperaturi diferite de plecare.**

Materiale necesare:

- 3 vase de aluminiu având aceleași dimensiuni;
- 300 ml apă la temperatura de $11,5^{\circ}\text{C}$;
- 300 ml apă la temperatura de 10°C ;
- 300 ml de apă la temperatura de $10,5^{\circ}\text{C}$;
- 300 ml apă la temperatura de 40°C ;
- 300 ml de apă la temperatura de $18,6^{\circ}\text{C}$;
- 3 senzori de temperatură conectați la placa de achiziție;
- dispozitiv de răcire (frigider)

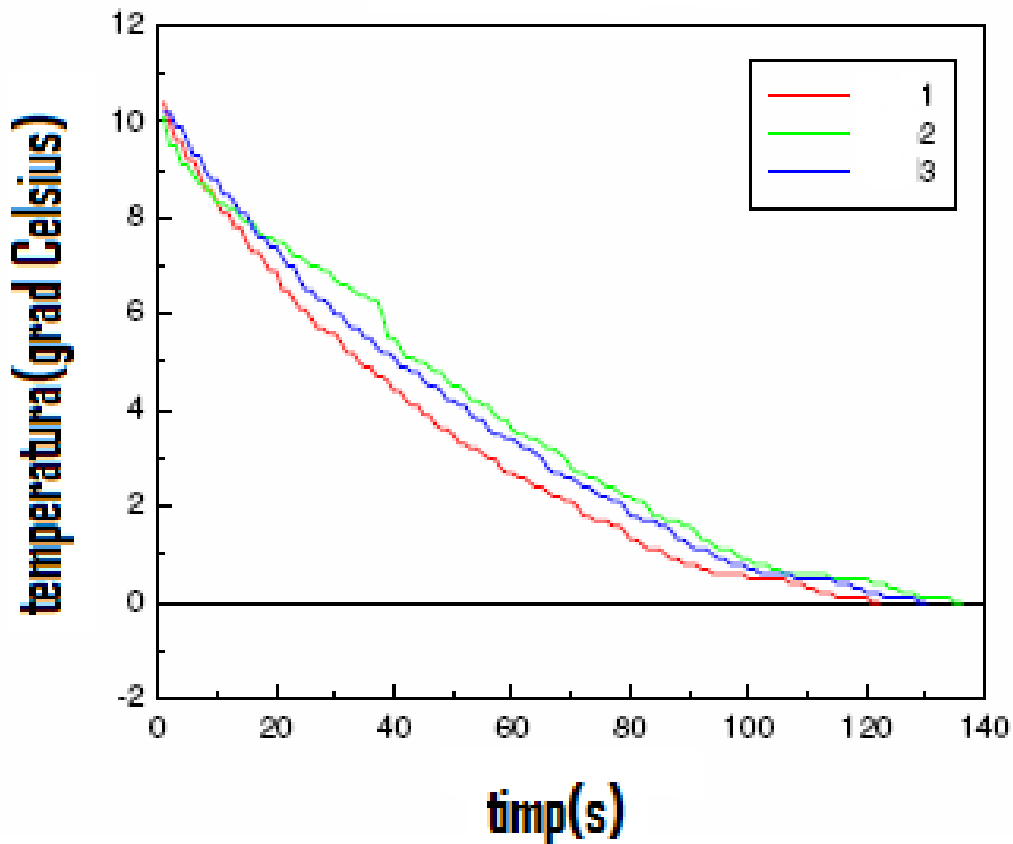


Figura 11 Variația temperaturii în procesul de răcire pentru primele 3 surse de apă

Facem precizarea că am folosit temperaturi atât de apropiate pentru a vedea comportamentul apei în jurul unei valori date a temperaturii. Ceea ce am observat este faptul că modul de răcire al apei, atunci când temperaturile sunt relativ apropiate este asemănător.

Repetând experiența cu temperaturi mult mai mari, respectiv $18,6^{\circ}\text{C}$ și 40°C am obținut graficele, observându-se clar un comportament diferit în procesul de răcire.

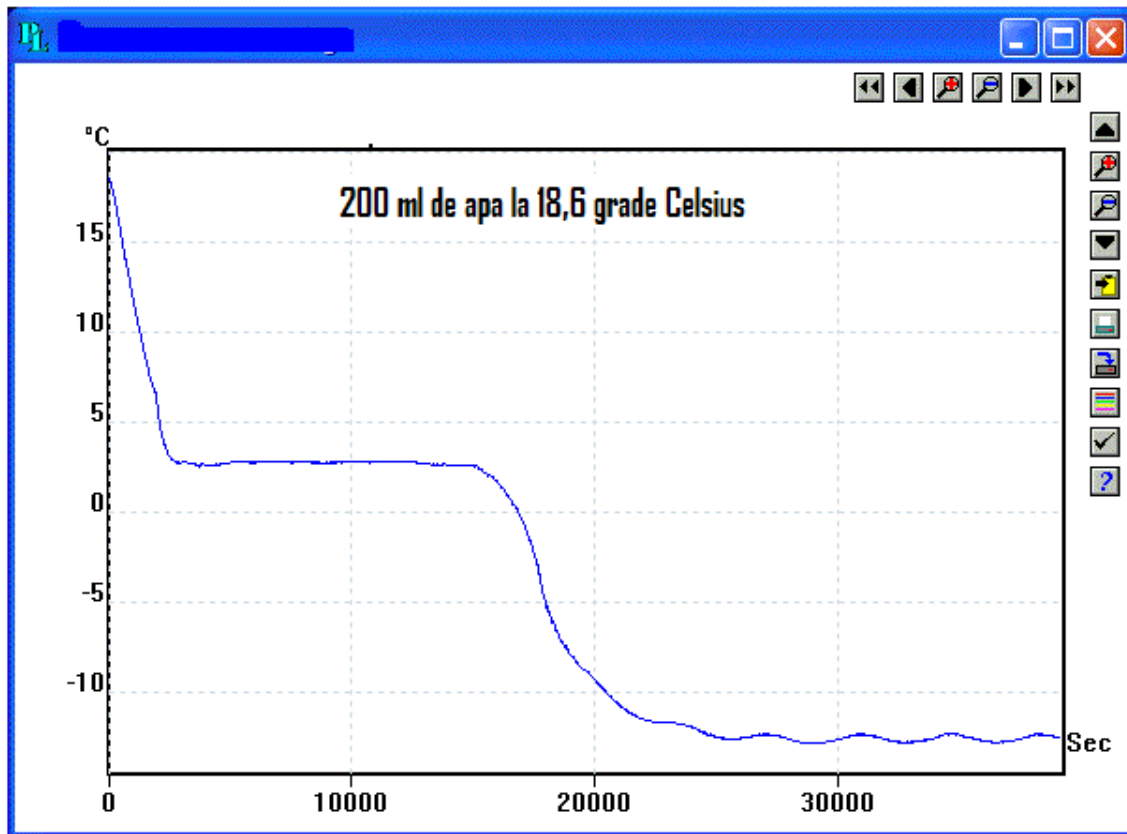


Figura 12 Variația temperaturii apei în procesul de răcire pentru sursa de apă aflată la $18,6^{\circ}\text{C}$

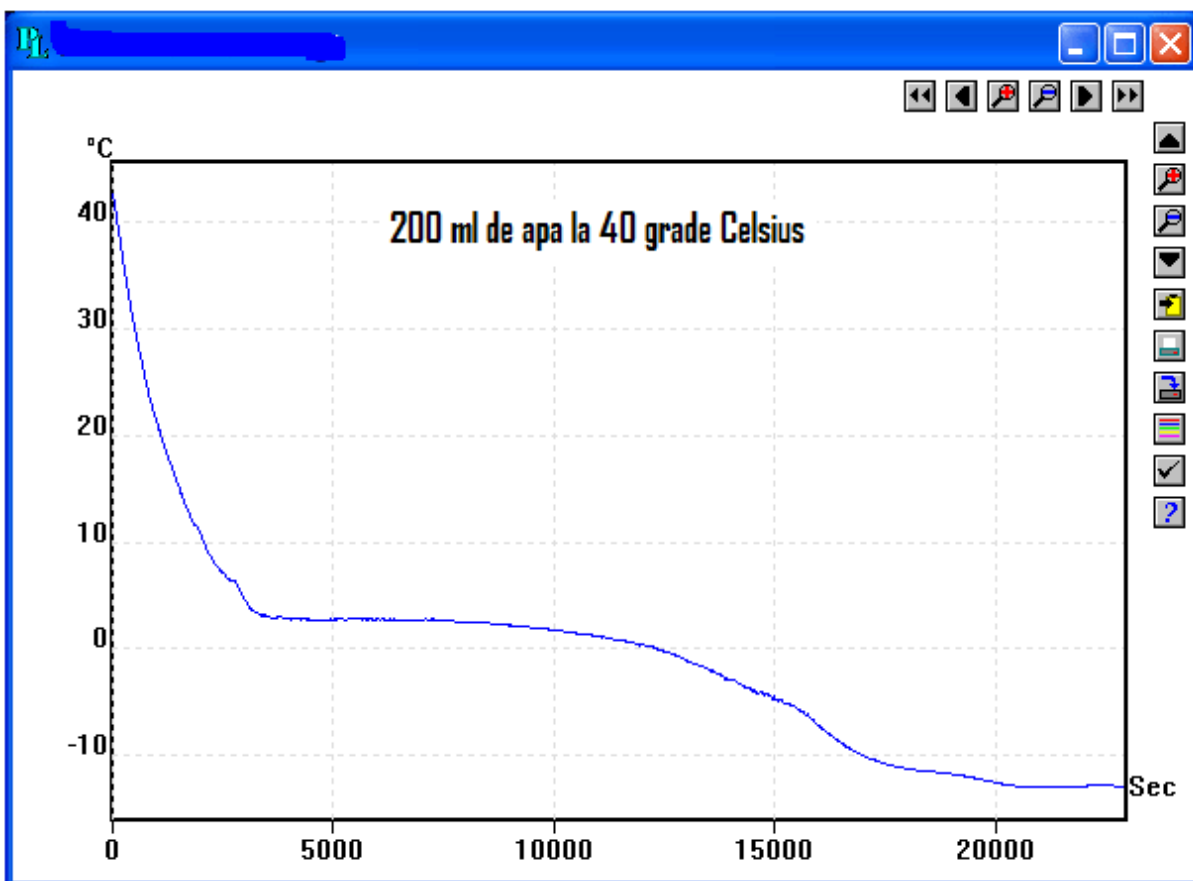


Figura 13 Variația temperaturii apei în procesul de răcire pentru sursa aflată la 40°C

4. Verificarea experimentală a efectului Mpemba.

Materiale necesare:

- 2 probe de apă (200ml) una aflată la 40°C și alta la 18,6°C;
- 2 vase de aluminiu identice;
- 2 senzori de temperatură conectați la placa de achiziții;
- un dispozitiv de răcire.

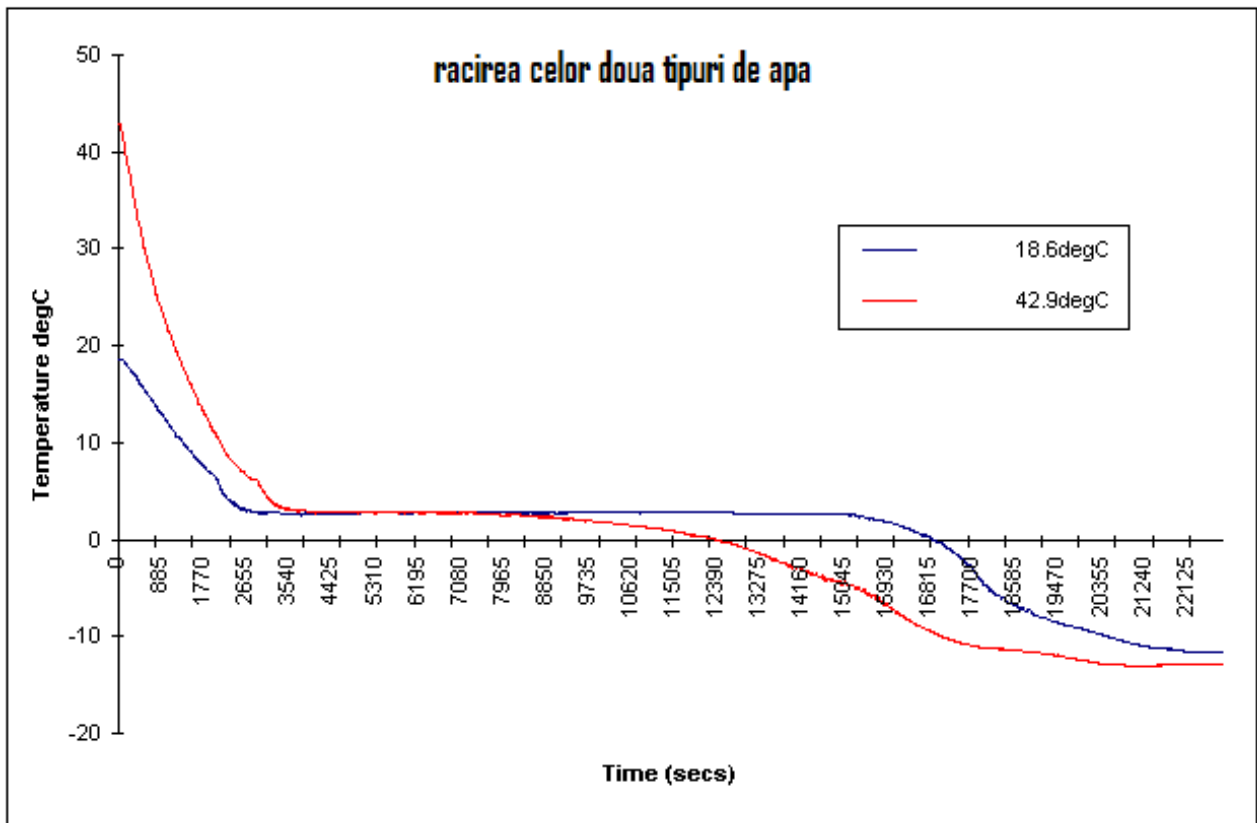


Figura 14 Verificarea experimentală a efectului Mpemba