

„Mert semmi sem tetszik, ha nem szokatlan.” – *William Shakespeare*

A kreativitás és a humor elidegeníthetetlenek egymástól. Paradoxonok, problémák megoldásához, összefüggések felfedezéséhez gyakran tréfás ötletek útján érünk csak el. Ezért az első pillantásra teljesen nevetségesnek, feleslegesnek vagy örültnek tűnő kísérletekben, kutatásokban – kicsit átgondolva azokat – néha komoly összefüggések rejlenek.

A szokatlanra hamarabb felkapják a fejüket az emberek. Így vannak ezzel a tanulók is, akiknél nagyobb érdeklődést kelthetünk a „szárazabbnak” gondolt tudományterületek tanítása során, ha ismertetjük velük az igNobel-díj történetét és az anyaghoz kapcsolódó igNobel-díjra jelölt kutatásokat. A díjat az észak-amerikai cambridge-i Harvard Egyetem tudományos humorlapjának szerkesztői alapították 1991-ben. A Nobel-díjak (nobel = nemes, kiváló, ignobel = alantas, fölösleges, semmire sem való) ellenpólusát kívánták létrehozni. Azok a kutatások részesülhetnek díjazásban, amelyek először megmosolyogtatónak tűnnek, majd később gondolkozásra késztetnek bennünket [1].

Írásunk egy látszólag haszontalan eszköz, a vízhőmérő elkészítéséről szól. A hőmérőkészítés során viszont a víz szokatlan és érdekes tulajdonságaival találkozunk, a termodinamika fogalmain keresztül elkalandozunk a fizikátörténet egyes fejezeteibe, számolunk és mérünk (és sokszor vétünk) – de legfőképpen problémákat oldunk meg.

Ajánlom e projektet azon középiskolában tanító fizikatanár-kollégáknak, akik szeretik rendhagyó módon is megközelíteni az aktuális tananyagot.

Tudománytörténeti előzmények

Feltehetőleg *Galileo Galilei* készítette az első hőmérőket a 17. században (barotermoszóp), amelyek gázos hőmérők voltak (a levegő tágulása mozgatót egy vízoszlopot), de a külső légnyomás változásai miatt pontatlannak bizonyultak. *Olaf Römer* 1701-ben alkoholos hőmérőjével elkészítette az első hőmérsékleti skálát. *Daniel Gabriel Fabrenheit* 1714-ben Römer ötlete alapján új skálát készített, de hőmérőjében al-

kohol helyett higanyt alkalmazott [2]. Később, 1742-ben *Anders Celsius* is higanyt használt, de alapponatoknak a víz normál nyomáson jól reprodukálható forrás- és fagyáspontját választotta. A kor tudósai a hőmérsékletet lényegében *érzékletnek* fogták fel és annak szubjektív voltát „objektivizálták” egy megfelelő mérőműszer elkészítésével [3]. Ez mindenképpen hasznosnak bizonyult, hiszen a hőmérő segítségével a hővel kapcsolatos természeti jelenségek további tudományos leírására nyílt lehetőség.

A hőmérsékletmérés elve, hogy hőmérőnket termikus kapcsolatba hozzuk a mérendő testtel vagy rendszerrel, és a kialakult közös hőmérsékletet a hőmérőről leolvassuk. Annak érdekében, hogy a mérést minél kevésbé befolyásolja a hőmérő, a mérendő rendszerhez képest elhanyagolhatóan kevés anyagot kell tartalmaznia, ráadásul olyan anyagból kell készülnie, aminek melegítéséhez vagy hűtéséhez kevés hő szükséges (azaz fajhője kicsi). A hőmérőkészítés kezdetén ezen szempontokhoz hasonlóan választották ki a megfelelő folyadékokat, így eshetett a választás a kis fajhőjű higanyra, amely ráadásul nagy hőmérsékleti intervallumot képes mérni (olvadáspontja $-38,83\text{ }^{\circ}\text{C}$, forráspontja $356,73\text{ }^{\circ}\text{C}$). A víz hőmérőfolyadékként szóba sem jöhetett nagy fajhője (amely körülbelül harmincszorosa a higanyénak) és csekély hőtágulása miatt (nagy folyadéktartályt igényel).

A 18. században még nem ismerték a kapcsolatot a hőmérséklet és a részecskék átlagos mozgási energiája között, és azt is csak önkényesen feltételezték, hogy a folyadékok a hőmérséklet-emelkedéssel egyenes arányban tágulnak (feltehetően az egyenes hőkölés alatt a folyadékszintek emelkedésének ütemét vizsgálhatták). A linearitás általános matematikai alakját fejezi ki az (1) egyenlet, ahol a és b tetszőleges paraméterek:

$$t(V) = aV + b. \quad (1)$$

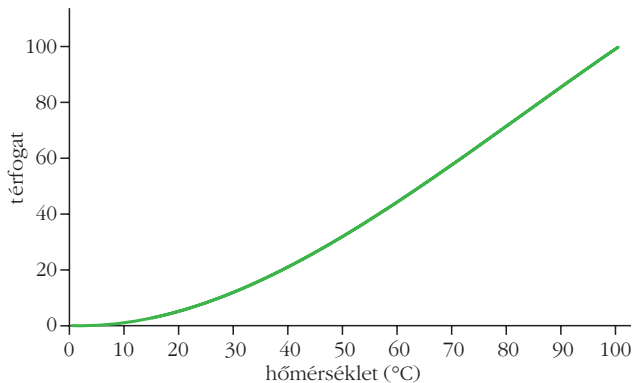
Az (1) egyenletben szereplő a és b paraméterek meghatározásához 2 fixpontot kell keresni – például V_0 és V_{100} , amelyek önkényesek lehetnek. Így, ha 2 tetszőleges (érdeemes jól reprodukálható hőmérsékleteket



Stonawski Tamás a Nyíregyházi Egyetemen főiskolai adjunktus. Doktori címét 2016-ban az ELTE Fizika Tanítása doktori program keretében szerezte. Kutatási területe a digitális média alkalmazása a tanulói kreativitás, problémamegoldás és önálló kísérletezés fejlesztésére általános és középiskolában.



Gálík Tamás a Nyíregyházi Főiskolán fizikusként végzett, jelenleg a Nyíregyházi Egyetem fizika-kémia mesterszakos hallgatója. Kísérleti és demonstrációs eszközök tervezésével és készítésével foglalkozik. Rendszeresen tart tudománynépszerűsítő előadásokat korosztálytól függetlenül az ország számos pontján.



1. ábra. A víz térfogatának változása a hőmérséklet függvényében. A grafikon erősen eltér a lineáristól a 0–40 °C hőmérséklet-tartományban.

választani) hőmérsékleten ismerjük a folyadék térfogatát, azokat az egyenletbe helyettesítve a és b paraméterek kiküszöbölhetők.

A folyadékos hőmérők (amelyek még ma is közkedveltek) azon az elven működnek, hogy bizonyos mérési intervallumban (amit a gyártónak meg kell adnia) a hőmérő üvegszálaban levő folyadék V térfogatváltozása egyenesen arányos a közben bekövetkezett T hőmérsékletváltozással:

$$\Delta V \sim \Delta T. \quad (2)$$

Persze ez a térfogatváltozás a kezdeti térfogattal is egyenes arányosságot mutat, ezért minél nagyobb a hőmérő tartálya és minél vékonyabb a hőmérő üvegszála, annál nagyobb szintkülönbséget mutat a folyadékszál ugyanazon hőmérséklet-különbség mellett:

$$\Delta V \sim V_0 \Delta T, \quad (3)$$

ahol V_0 a valamely T_0 hőmérsékleten mért kezdeti folyadéktérfogatot jelenti.

Az összetartozó mennyiségek egy olyan β állandót határoznak meg, ami kifejezi a folyadék hőtágulási tulajdonságát (anyag minőségre jellemző, de egyéb körülmények is befolyásolhatják), annak mértékét:

$$\Delta V = \beta V_0 \Delta T \quad (4)$$

Ám a fenti állandóság többszáz fokok hőmérséklet-különbségek esetén (és bizonyos folyadékokra kis hőmérséklet-különbségek esetén is) nem feltétlenül teljesülnek (megjegyzés: az üvegcső és a tartály hőtágulása is befolyásolással van a mérésre). Az első hőmérők készítésékor kiindulásként két, jól reprodukálható hőmérsékleti alappontot határoztak meg, majd a kalibrálható hőmérőt ezen alappont-hőmérsékletű közegbe helyezve, az üvegcsőre karcolták annak helyét. A két alappont közti részt egyenlő közönként (például 100) felosztották. Tehát alából feltételezték a hőtágulási együttható állandóságát. Bizonyos folyadékok, mint például az alkohol vagy a higany, hiszen viszonylag egyenletesen és intenzíven (nagy a hőtágulási együtthatójuk) tágulnak, beváltak hőmérőkészítéshez, míg mások teljesen alkalmatlanok voltak. Az egyik „legalkalmatlanabb” folyadék az éltető víz,



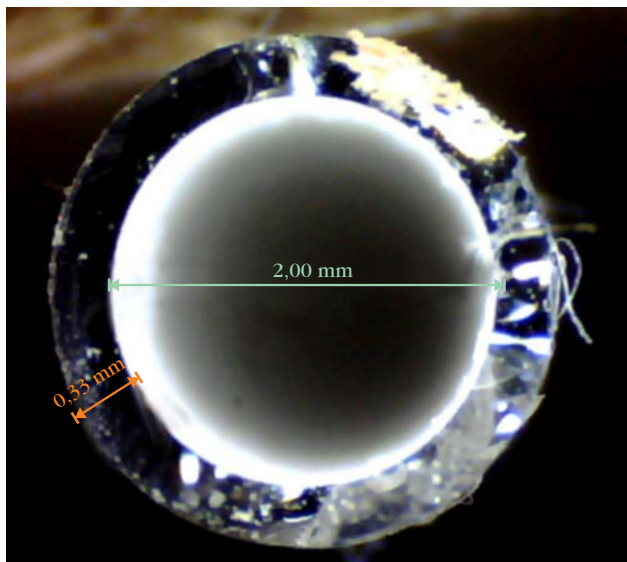
2. ábra. A vízhőmérő a kémcsőből készített tartállyal, amibe az LCD-monitorból kukázott üvegcső kapcsolódik.

amelynek térfogatváltozása (1. ábra) erősen eltér a lineáristól, de viszonylag magas fagyáspontja miatt sem volt célszerű alkalmazni. Írásunkban mégis vízhőmérő készítésére buzdítunk minden kedves olvasót, mert bár értelmetlennek tűnik (mint ahogy a hőemberkészítés vagy a homokvár építése is), mégis közelebb visz a hőmérséklet értelmezéséhez, és a víz szokatlan tulajdonságaihoz.

Vízhőmérő készítése

A folyadékos hőmérők egy tartályból és a hozzá kapcsolt, a tartálynál lényegesen kisebb térfogatú üvegcsőből állnak. Így – ugyanazon hőmérsékletváltozás esetén – a tartály lényegesen tudja növelni a tágulás mértékét (4) a vékony, hosszú folyadékszálban. Másrészt a folyadék nagy része viszonylag kis térrészre, a tartályba koncentrálódik, ezért elegendő csak a tartályt kapcsolatba hozni a mérendő rendszerrel.

Vízhőmérőnk (2. ábra) tartályának egy kémcsődarabot választottunk, üvegcsőnek pedig hidegkatódos fénycsövet (CCFL-t bontott LCD-monitorból) használtunk. A két egység egyesítéséhez keményebb gumidugót használtunk fel. A jobb láthatóság érdekében tojásfestékkel színeztük a vizet (1 ezrelék alatti koncentrációban). Az összeállított hőmérőbe a jól kiforralt vizet (ne tartalmazzon a későbbiekben oldott levegőt, buborékokat) úgy juttattuk bele, hogy a tartályt gázlánggal melegítettük, majd az üvegcső végét a vízbe nyomva felszívattuk a folyadékot. A művelet befejezése után az üvegcső végét (az üvegcső melegítése után) ragasztóval zártuk le.

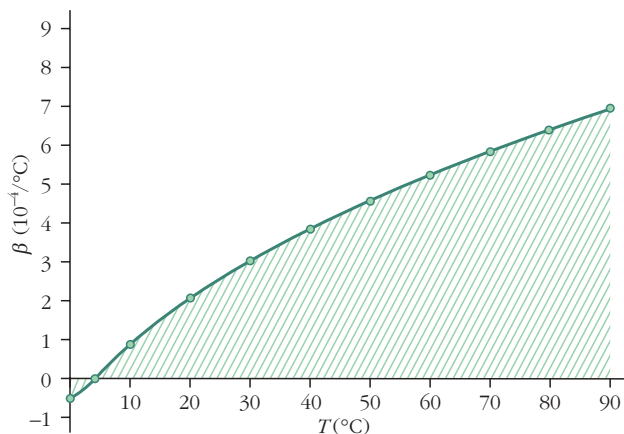
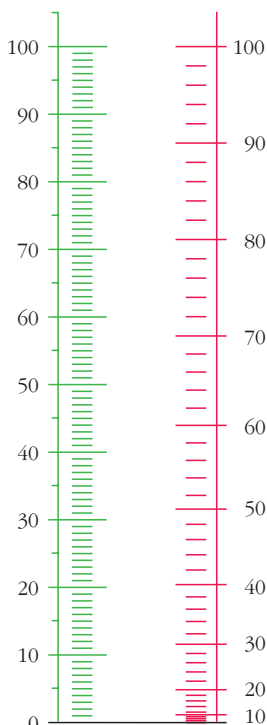


3. ábra. Hidegkatódos fénycső mikroszkopikus képe a megadott paraméterekkel. A cső belsejét huzalra erősített dörzsanyag segítségével tisztítottuk ki.

A tartály térfogatának kiszámítása

A kémcső belső átmérője 17 mm, az üvegcsőnek használt fénycső belső átmérője 2 mm volt (3. ábra). Az üvegcsőbeli – 0–90 °C hőmérséklet-változás hatására bekövetkező – vízszintemelkedést az optimálisnak vélt 15 cm-nek választottuk. A tartály magasságának kiszámításával meghatározhatjuk, hol kell elvág-

5. ábra. Bal oldalon a higanyos, jobb oldalon a vízhőmérő elméleti skálája látható. A skálák azonos alappontok (0 és 100 °C) alapján készültek. A vízhőmérő skáláján az osztásközök különböző hosszúságúak lettek.



4. ábra. A desztillált víz normál hőtágulási együtthatójának a hőmérséklettől való függése (normál légnyomáson). Az ábrán vonalkázással van jelölve a görbe és a T tengely közé eső terület. A program által kiszámított integrál értéke: 0,0351.

ni a kémcsövet (1 mm-es flexkoronggal). Mivel a víz hőtágulása nem lineáris – erősen hőmérsékletfüggő – a (4) egyenletet általánosítani kell:

$$\int dV = \int_{T_0}^{T_1} \beta(T) V_0 dT = V_0 \int_{T_0}^{T_1} \beta(T) dT. \quad (5)$$

A térfogatváltozást:

$$\Delta V = Ah = r^2 \pi h = 4,71 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \quad (6)$$

az üvegcső adatai alapján számoltuk ki.

Az (5) egyenletben szereplő integrál értékét a Graph programmal határoztuk meg. Első lépésben a különböző hőmérsékleten mért hőtágulási együttható értékeihez (táblázat alapján [4]) görbét illesztettünk, majd a programmal kiszámítottuk a görbe alatti területet (4. ábra). A görbe alatti terület alapján meghatároztuk a tartály térfogatát:

$$\Delta V = 4,71 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 = V_0 \cdot 0,0351 \rightarrow \rightarrow V_0 = 13,4 \text{ cm}^3, \quad (7)$$

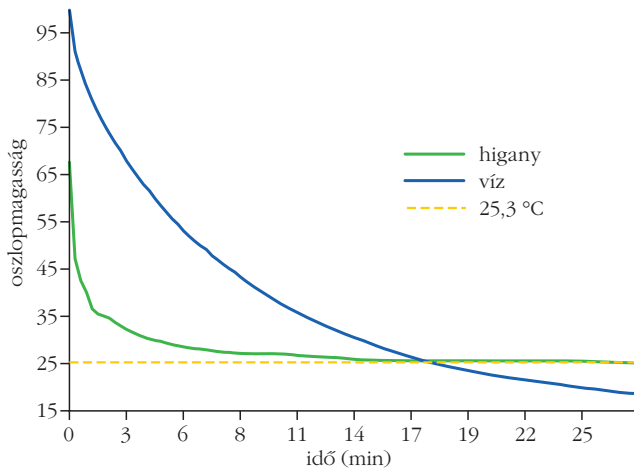
majd a magasságát:

$$h_{\text{tartály}} = \frac{V_0}{A_{\text{tartály}}} = 5,9 \text{ cm}. \quad (8)$$

A tartály meglehetősen korpulensnek adódott.

Elméleti skála készítése a kalibrálás előtt

Matematikai meggondolásból is készíthetünk hőmérsékleti skálát. Ehhez az 1. ábra grafikonját használtuk. A grafikont fokenként mért sűrűségérték-táblázat alapján rajzoltuk, majd görbét illesztettünk rá, és e görbe egyenletét felhasználva a számítógépes Scilab program [5] segítségével készítettük el a skálát (5. ábra).



6. ábra. A higanyos és vizes hőmérők hűlési görbéi. Az oszlopmagasság egységeit úgy választottuk meg, hogy az számértékileg a higanyos hőmérő hőmérsékletével egyezzen meg, így a grafikonokon – rejtve – a hőmérséklet alakulása is nyomon követhető.



7. ábra. A kaloriméterben kalibrált vízhőmérő skálája 30–90 °C hőmérséklet-tartományban.

Hűlési görbék

Még a kalibrálás előtt érdemes hűlési görbéket is készíteni. Ezért forró vizes (körülbelül 70–80 °C-os) kaloriméterbe egy higanyos hőmérőt és vízhőmérőt helyeztünk. Több, mint 20 perc elteltével kiemeltük őket a kaloriméterből és filmfelvételt készítettünk a csökkenő meniszkuszok pozíciójáról [5]. A filmfelvételt (Tracker programmal) kielemezve kaptuk meg a hűlési görbéket (6. ábra). A görbék alapján elmondható, hogy a vízhőmérő a higanyos hőmérőhöz képest jóval hosszabb idő után kerül a környezetével hőmérsékleti egyensúlyba. (Nyilván kisebb időértékeket kapunk, ha nem levegőben, hanem vízben végezzük el a kísérletet.)

A hőmérő kalibrálása RC112E hőmérséklet-szabályozóval

Elektromosan fűthető, és állandó hőmérsékleten tartható kaloriméterbe helyeztük a vízhőmérőt, majd 30–90 °C-ig 10 fokenként – megfelelő időt hagyva a hőkiegyenlítődésnek (minimum 10 perc) – filctollal bejelöltük a kaloriméter hőmérsékletének megfelelő oszlopmagasságot (7. ábra). Ez alatti tartomány mérése hidegebb helyiségben lehetséges: Például 5 °C-os teremben már a 10 és 20 °C-nak megfelelő oszlopmagasságokat is jelölhetünk.

Konklúziók

Kísérleteink alapján elmondhatjuk, hogy noha a víz szolgáltatja a Celsius-skála két alappontját, mégsem szerencsés vizet tölteni a hőmérőbe, majd azzal mérni, a víz technikailag alkalmatlan erre a feladatra. A vízhőmérő egyik legnagyobb hibája, hogy nagy hőt von el a mérendő anyagrészről, és ez a hőáramlási folyamat lustává is teszi a mérést, több időre van szükség a közös hőmérséklet kialakulására. Ha hőmérőkészítésre kö-

zönséges csapvizet alkalmazunk, akkor az abban oldott levegő pontatlanabbá teszi a mérést, hiszen hőmérséklet-változás hatására a légbuborékok (a vízzel nem megegyezően) növekedni kezdenek, ez a folyadék térfogatváltozását befolyásolja. Kísérletünkben a gumidugó is pontatlanságot okozott, hiszen az is tágult, ráadásul a nyomásváltozásokra is agresszíven reagált, változtatva a kémcsőtartály térfogatát, azon keresztül pedig az üvegcsőben kialakult folyadékszint magasságát.

A projekt során kiderült, hogy a víz egyik különleges tulajdonsága a hőtágulási együtthatójának változása. Ezért nem számolható ki egyszerűen például, hogy a víz 20 °C-ról 70 °C-ra történő felmelegítése során mekkora lesz annak pontos térfogatváltozása. A feladat megoldásához integrálni, függvénygörbe alatti területeket kell számolni, mint azt az (5) összefüggésnél láttuk. A feladat megoldása előtt érdemes megbecsülni, hogy a térfogatváltozás mennyivel tér el a lineáris hőtágulás alapján számolt értéktől. Megdöbbenő, hogy éppen kétszer akkora kapunk, mintha a 20 °C-on vett, állandó hőtágulási együtthatóval számolnánk (8. ábra). (A feladat megoldása a 4. ábrával analóg módon történik.)

8. ábra. A desztillált víz β hőtágulási együtthatójának növekedése éppen kétszer akkora hőtágulást eredményez 20 és 70 °C között, mint amennyit az alsó hőmérsékleten érvényes β okozna.

