

FELÜLETI HŐMÉRSÉKLETMÉRŐ ÉRZÉKELŐK KALIBRÁLÁSA A FELÜLET DŐLÉSSZÖGÉNEK FÜGGVÉNYÉBEN

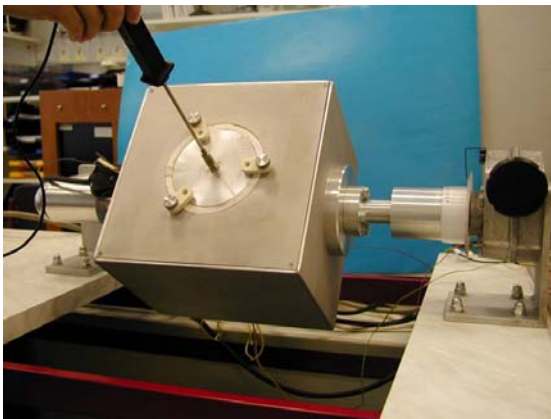
András Emese*

Kivonat – Az OMH kifejlesztett egy berendezést a kontakt, felületi hőmérséklet érzékelők kalibrálására és a mérési hibát meghatározó tényezők tanulmányozására. Egy új kutatás eredménye az a kalibrálási eljárás, amely, tekintettel az ipari igényekre, meghatározza a hőmérsékleti hiba függését a fűtött felület dőlésszögétől. A cikk szeretné felhívni a figyelmet a kalibrációs görbék azonos jellegére, függetlenül a felület hőmérsékletétől és anyagösszetételétől, valamint az érzékelő kialakításától.

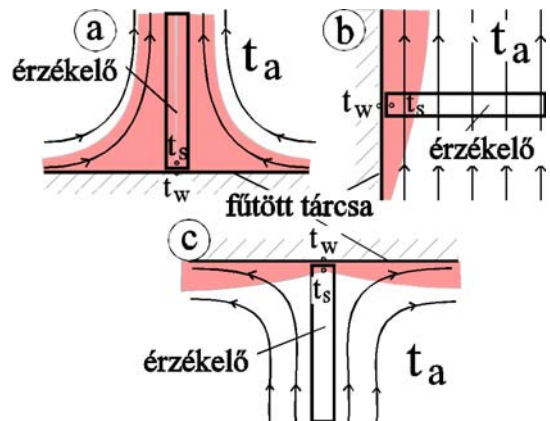
1. BEVEZETÉS

Számos ipari és tudományos alkalmazás igényli a felületi hőmérséklet mérését. Laboratóriumunk az elsők között fejlesztett ki egy elektromos fűtésű, felületi hőmérsékletmérésre használatos etalon berendezést (1.ábra), amely a környezeti hőmérséklet és 600 °C közötti széles hőmérséklettartományban működik. A fűtött tárcsa cserélhető, felölelve a különböző hővezetésű anyagok széles skáláját az ideális hővezetésű alumíniumtól egészen a hőszigetelő bakelitig vagy kerámiagyapotig. A felületi érzékelő kalibrálásának alapja a felületi etalon hőmérséklet és a fűtött felületre ráhelyezett érzékelő által mutatott hőmérséklet összehasonlítása. Az alkalmazott kalibrálási eljárás magába foglalja a felületi hőmérsékletnek extrapolációval való meghatározását az érzékelő ráhelyezése előtt [1].

Tavaly az OMH hangolta össze azt a felületi hőmérsékletméréssel kapcsolatos EUROMET (Európai Metrológiai Szövetség) nemzetközi összehasonlító mérést, amely a legelső volt a világon és tizenegy ország vett részt. A körmérés sikeres volt: igazolta a résztvevő metrológiai intézetek képességét felületi érzékelők kalibrálására és azt, hogy a mérési hibáik összhangban vannak a mérési bizonytalanságokkal. Az etalon berendezések felépítésének különbözősége ellenére a mérési eredmények meglepően közel vannak egymáshoz. Ezen együttműködés eredménye jövőre a Tempmeco 2004 konferencián lesz bemutatva.



1.ábra: Az OMH etalon felületi berendezése



2.ábra: A felület extrém helyzetei

Szilárd testek felületén végzett hőmérsékletmérés esetén, a hőáram függ egyrészt a test és a környezete közti hőmérséklet különbségtől, másrészt a hőátviteli tényezőtől (amely magába foglalja a hővezetést, a hőátadást és a sugárzást). Egy adott felület tényleges hőmérsékletének meghatározása érdekében a felületi érzékelő által mutatott értéket korrigálni kell. Ez a korrekció főleg az alábbi három tényezőtől függ:

- *a fűtött felület jellemzői*: a tárcsa geometriai és hőfizikai jellemzői, hőmérséklete, felületének minősége (érdesség, oxidáció)
- *a felület érzékelő hatása*: típusa, kialakítása, geometriai és hőfizikai jellemzői [2]
- *hőátviteli sajátosságok*: A felület és az érzékelő, valamint az érzékelő és a környezete közötti hőátadás minősége befolyásolja a fűtött felület és az érzékelő érintkezési felülete közti hőmérséklet különbséget, vagyis a mérési hibát.

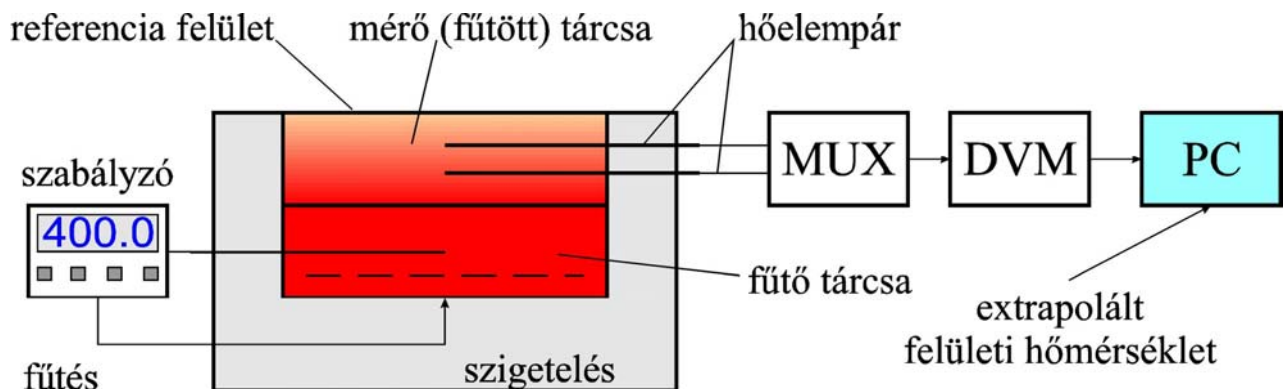
A fűtött felület közvetlen közelében egy vékony légréteg található, amelynek jellemzői befolyásolják a hőátadást.

* Országos Mérésügyi Hivatal

A 2. ábrán látható szürkített részek ezt a termikus határrejteget ábrázolják, ahol a hőmérséklet lényegesen nagyobb mint a környezeti hőmérséklet (t_a). Az (a) esetben ($\alpha=0^\circ$) az érzékelő teljesen benne található a feláramló meleg levegőben, míg a (b) esetben ($\alpha=90^\circ$) csak az érzékelőnek egy része. A (c) esetben ($\alpha=180^\circ$) az érzékelőt körbevevő levegő hőmérséklete gyakorlatilag azonos a környezeti hőmérséklettel.

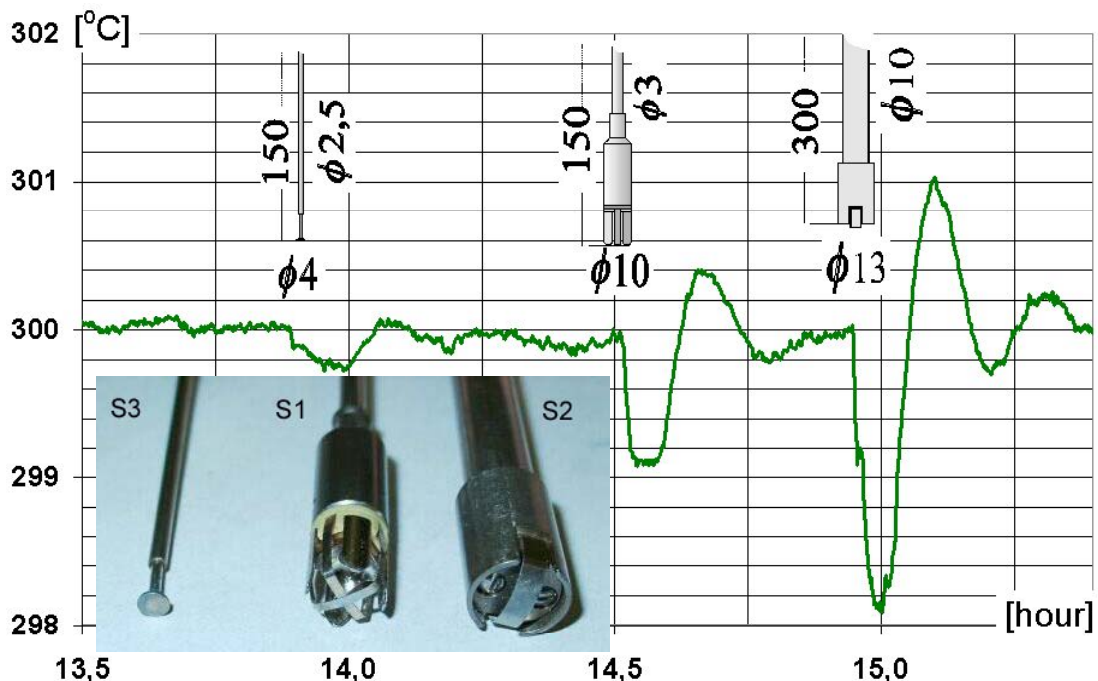
2. A FELÜLET KÜLÖNBÖZŐ DŐLÉSSZÖGÉN ALAPULÓ KALIBRÁLÁSI MÓDSZER

A mérési eredményt nagymértékben befolyásolja a mérési módszer [2] [3]. Az etalon felületi hőmérsékletmérő berendezés vázlatos rajza a 3. ábrán látható. A hőmérséklet szabályozása a fűtőtárcsába beépített hőelem segítségével történik. K típusú hőelem pár méri a mérőtárcsa belső hőmérsékletét, amelyet a távolságok ismeretében extrapolálhatunk a felületre. A mérési adatokat a számítógép ábrázolja, tárolja és feldolgozza.



3. ábra: Az etalon felületi hőmérsékletmérő berendezés sematikus rajza

A méréseket 100°C és 400°C között végeztük Testo műszerrel és három különböző típusú érzékelővel (4. ábra), amelyek különböző mértékben torzítják a hőmérsékleti mezőt a tárcsa belsejében:

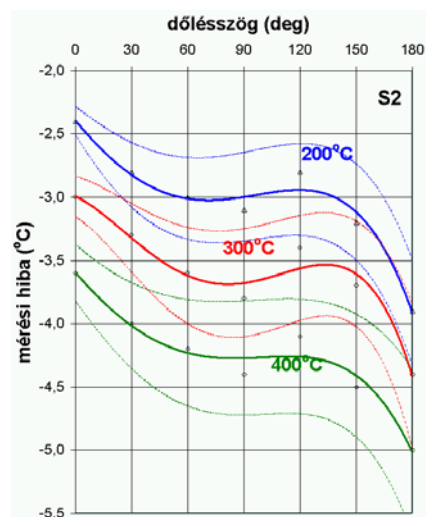
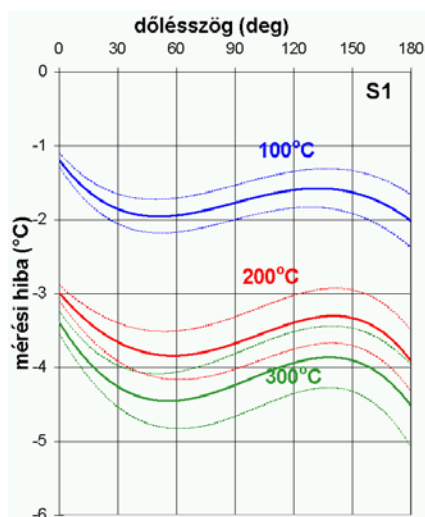


4. ábra: A felületi hőmérsékletmérő torzulása különböző érzékelők ráhelyezése esetén

- S1 érzékelő, típusa Testo 0602.0392, keresztaszál rugalmas hőelem szalaggal
- S2 érzékelő, típusa Omega 88010K, rugalmas hőelem szalaggal
- S3 érzékelő, típusa Testo 0602.0692, nem rugalmas kicsi fejjel

A környezeti hőmérséklet $\approx 23^\circ\text{C}$ volt. A fűtött sík tárcsa anyagául alumíniumot és rozsdamentes acélt használtunk, amelyek hővezetési tényezője $\lambda=230\text{ W/m}\cdot\text{K}$, illetve $30\text{ W/m}\cdot\text{K}$. A tárcsák átmérője 100 mm, vastagságuk 20 mm.

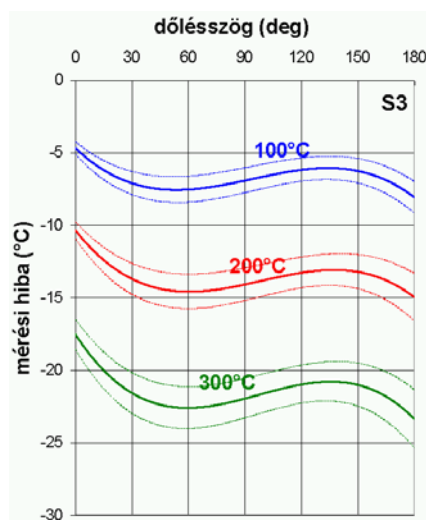
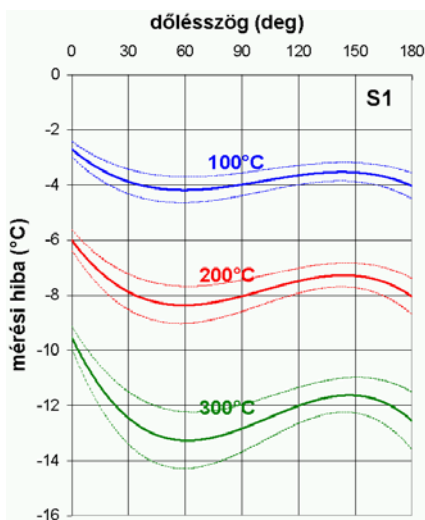
A kalibrálás kezdetén extrapolációval meghatározásra került a felületi hőmérséklet, mielőtt az érzékelőt ráhelyeztük a felületre. A méréseket hét különböző dőlésszögű felület esetén végeztük el 0° és 180° között.



5.ábra: Az S1 és S2 érzékelők kalibrálási görbéje alumínium tárcsa esetén

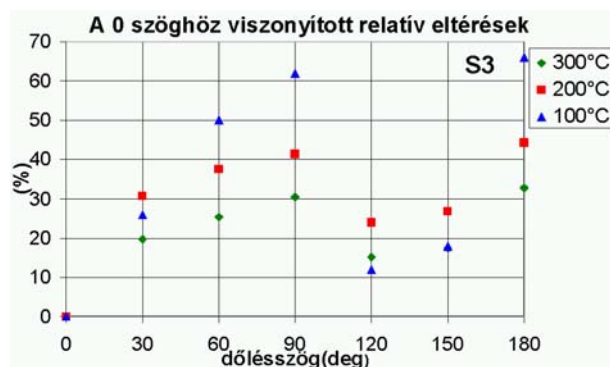
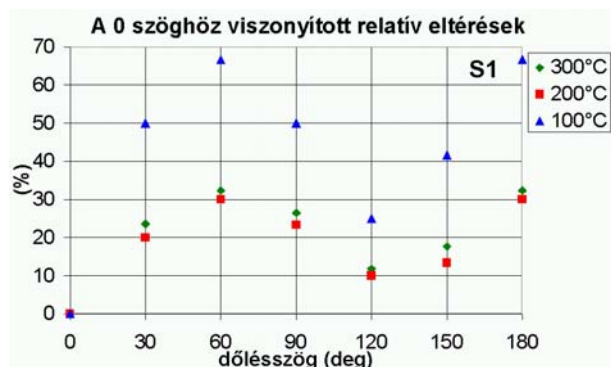
A mérési eredmények azt mutatják, hogy a hőmérsékleti hiba jelentősen változik a felület dőlésszöge függvényében (5., 6.ábra). A diagramra helyezett pontok húsz mérés átlagértékei, adott hőmérséklet, érzékelő, tárcsa-anyag és dőlésszög esetén. A folytonos görbék harmadfokú függvényből kapott trend-vonalak. A szaggatott vonalak határolják a bizonytalansági sávot.

A diagramokon látható, hogy a görbéknek ugyanaz a jellege, függetlenül a felületi hőmérséklettől, anyagtípustól és érzékelő konstrukciótól.



6.ábra: Az S1 és S3 érzékelők kalibrálási görbéje acél tárcsa esetén

A 7.ábra bemutatja a 0° dőlésszöghöz viszonyított százalékos eltéréseket: alumínium tárcsa esetén az S1 érzékelőt, acél tárcsa esetén az S3 érzékelőt. Észrevehető, hogy milyen jelentős a mérési hiba függése a dőlésszögtől (több mint 60 %).



3. A MÉRÉSI EREDMÉNYEK ELEMZÉSE

3.1. A felületi érzékelő elméleti modellje

A tapintó érzékelőt elméletileg úgy tekinthetjük mint egy véges hosszúságú, egyik végén állandó hőmérsékletű (t_w) fűtött rudat, amely a végtelen, állandó hőmérsékletű t_a térbe konvekcióval és sugárzással adja le a hőt. A tapintó érzékelő d_s külső átmérőjű, s falvastagságú, h_s hosszúságú üreges rúd modelljének felel meg. A következő geometriai paraméterek határozhatók meg az üreges rúdra vonatkozóan: a rúd hővezetési keresztmetszete $A_s = \pi \cdot d_s \cdot s$ és a rúd kerülete $K_s = \pi \cdot d_s$.

A rúd által konvekcióval leadott hőáram a következő képlettel számolható [3], [4]:

$$Q_k = \lambda_s \cdot A_s \cdot a \frac{e^{a \cdot h_s} - e^{-a \cdot h_s}}{e^{a \cdot h_s} + e^{-a \cdot h_s}} (t_w - t_a) \quad a = \sqrt{\frac{\alpha_s \cdot K_s}{\lambda_s \cdot A_s}}$$

, ahol α_s a rúd-környezet hőátadási tényező, λ_s a rúd hővezetési tényezője.

Az α_s hőátadási tényező értéke a Nusselt számban szerepel [5]:

$$Nu = \frac{\alpha_s \cdot X}{\lambda_a} \quad Nu = c \cdot (Gr \cdot Pr)^n \cdot K \quad \alpha_s = \frac{\lambda_a}{X} \cdot c \cdot (Gr \cdot Pr)^n \cdot K$$

, ahol X a felület jellemző geometriai mérete, λ_a a rúd által leadott hőteljesítményt felvevő közeg hővezetési tényezője, c , n és K a felület geometriájától és a gravitációs térhez viszonyított helyzetétől függő tényezők, Gr a Grashof szám és Pr a Prandtl szám. A szakirodalom [3] két szélsőséges esetben adja meg a c , n , és K együtthatók és az X geometriai paraméter értékeit. Függőleges rúd esetén: $X = h_s$, $c = 0,686$, $n = 0,25$ és $K = \left(\frac{Pr}{1 + 1,05 \cdot Pr} \right)^{0,25}$.

Vízszintes rúd esetén: $X = d_s$, $c = 0,47$, $n = 0,25$ és $K = 1$.

A rúd által sugárzással leadott hőteljesítmény a következő képlettel számítható [3], [4]:

$$Q_R = \sigma \cdot A_R \cdot \varepsilon_R \cdot (T_{ms}^4 - T_a^4)$$

, ahol σ a Boltzmann állandó, A_R a sugárzó felület területe, ε_R a felület sugárzási tényezője, T_{ms} a sugárzó felület abszolút átlaghőmérséklete és T_a a környezet abszolút hőmérséklete.

A rúd által leadott össz hőteljesítmény egyenlő lesz:

$$Q_t = Q_k + Q_R$$

Számításokat végeztünk az S1 érzékelő esetén a következő paraméterekkel:

$d_s = 4mm$, $s = 0,5mm$, $h_s = 150mm$, $t_a = 23^\circ C$ és $\varepsilon_R = 0,25$.

A számítások eredményeit I. TÁBLÁZAT tartalmazza, amelyben a v index a függőleges, a h index pedig a vízszintes érzékelőre vonatkozó értékek.

I. TÁBLÁZAT

t [°C]	Q _{kv} [W]	Q _{kh} [W]	Q _R [W]	Q _{tv} [W]	Q _{th} [W]
100	0,306	0,448	0,130	0,436	0,579
200	0,758	1,110	0,379	1,137	1,489
300	1,231	1,802	0,746	1,977	2,548
400	1,714	2,510	1,265	2,980	3,775

3.2. A felületi hőmérséklet érzékelők méréssel és számítással meghatározott hibáinak összehasonlítása

A mérési hiba az érzékelő által mutatott t_s hőmérséklet és a fűtött tárcsa t_w hőmérséklete közti különbség és függ a φ szögtől:

$$dt_m = t_s - t_w$$

A felület mentén kialakuló áramlás hőtani szempontból deformálja a környezet hőmérsékletterét. Három szélsőséges esetben a termikus határreteg a 2.ábrán követhető. Megfigyelhető, hogy a tapintó érzékelő feje környezetében a $\varphi = 180^\circ$ esetén legvékonyabb a határreteg, így jó megközelítéssel az elméleti hibagörbét ezen a ponton lehet csatlakoztatni a mért hőmérséklet hibagörbéhez (8.ábra):

$$dt_{th}(180^\circ) = dt_m(180^\circ)$$

A (v) függőleges helyzetben a Q_{tv} hőáram felírható:

$$Q_{tv} = f_s \cdot dt_{th}(180^\circ)$$

Tekintetbe véve a fenti összefüggést, meghatározható az f_s arányossági tényező értéke:

$$f_s = \frac{Q_{tv}}{dt_m(180^\circ)}$$

Felhasználva a táblázatból a t_w hőmérsékletnek megfelelő Q_{th} össz hőteljesítmény értéket, kiszámíthatjuk az elméleti hiba értékét $\varphi=90^\circ$ esetén:

$$dt_{th}(90^\circ) = \frac{Q_{th}}{f_s}$$

Az elméleti hibafüggvény egy szimmetrikus görbe lesz a $\varphi = 90^\circ$ függőlegeshez viszonyítva ($dt_{th}(0^\circ) = dt_{th}(180^\circ)$).

A szakirodalomban nem találhatók közbenső szögekre érvényes számítási képletek. Feltételezve egy másodfokú függvénnyel történő leírását az elméleti hibának:

$$dt_{th} = a \cdot \varphi^2 + b \cdot \varphi + c$$

, a $[\varphi = 0^\circ, dt_{th}(0^\circ)]$, $[\varphi = 90^\circ, dt_{th}(90^\circ)]$ és $[\varphi = 180^\circ, dt_{th}(180^\circ)]$ értékpárok ismerete lehetővé teszi az a , b és c együtthatók értékeinek meghatározását.

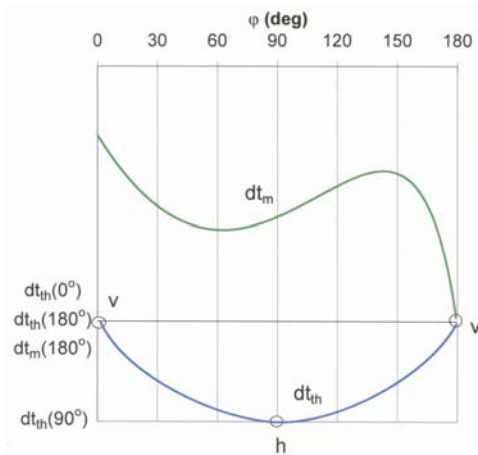
A ddt_{th} eltérés az elméleti és a mért hőmérséklet-hibák között a következő kifejezéssel határozható meg:

$$ddt_{th} = dt_m - dt_{th}$$

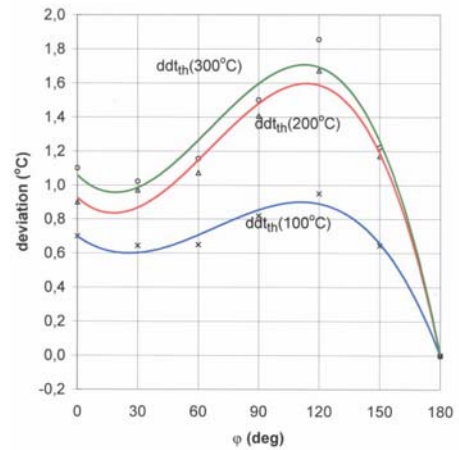
Az S1 érzékelőre kiszámoltuk a dt_{th} és ddt_{th} értékeit, amelyek a 9.ábrán láthatók. A ddt_{th} a következő formában fejezhető ki:

$$dt_h = (180^\circ - \varphi) \cdot (a_k + b_k \cdot \varphi + c_k \cdot \varphi^2)$$

,ahol a legkisebb négyzetes hiba módszerével meghatározhatók az a_k , b_k and c_k együtthatók.



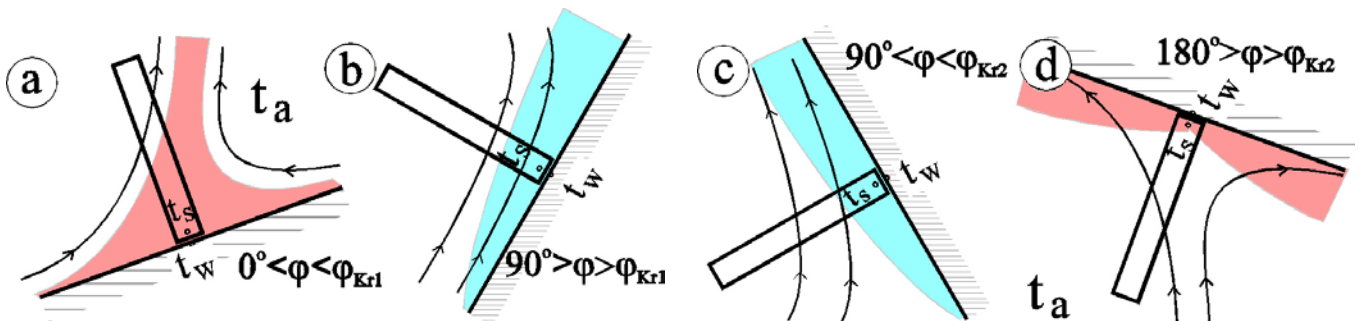
8.ábra: A mért és az elméleti hőmérséklet-hiba változása a dőlésszög függvényében



9.ábra: Az elméleti hőmérséklet-hiba eltérése a mért hőmérséklet hibától

3.3. Az elméleti és a méréssel meghatározott hibák közti különbség fizikai magyarázata

A h hosszúságú érzékelő-fej és, bizonyos szög értéktartományokban, az érzékelő rúd egy része is a felület mentén kialakult termikus határrétegben található (11.ábra.). A fűtött felület és az érzékelő környezetében kialakuló áramlás és termikus határréteg a 10.ábrán bemutatott különböző szög értéktartományokban értelmezhető.



10.ábra: Hőáram és határréteg

Egy sík lap mentén kialakult klasszikus termikus határrétegben a hőmérséklet eloszlást a következő függvénnyel lehet leírni, amely csak a $\varphi \in [\varphi_{kr1}, \varphi_{kr2}]$ szög értéktartományban igaz [6]:

$$t_{bl} - t_a = (t_w - t_a) \cdot \left(1 - \frac{y}{\delta}\right)^2, \quad \text{ahol } \delta \text{ a termikus határréteg vastagsága.}$$

Az érzékelő által leadott össz hőteljesítmény egyenlő kell legyen az érzékelőbe belépő hőteljesítménnyel. A fűtött felület által az érzékelő fejnek közvetlenül leadott hőáram a következő formában írható:

$$Q_w = f \cdot dt_m$$

Az érzékelő fej nem csak a csatlakozási felületén keresztül kap hőáramot, hanem a termikus határrétegtől is, ezért felírható a következő egyenlet:

$$Q_{ts} = Q_w + Q_{bl}$$

, ahol Q_{ts} az érzékelő rúdja által leadott hőáram, Q_w és Q_{bl} az érzékelőbe belépő hőáramok a fej-felület, valamint a határréteg kontakt felületen keresztül. Tekintetbe véve, hogy

$$Q_{ts} = f \cdot dt_{th}$$

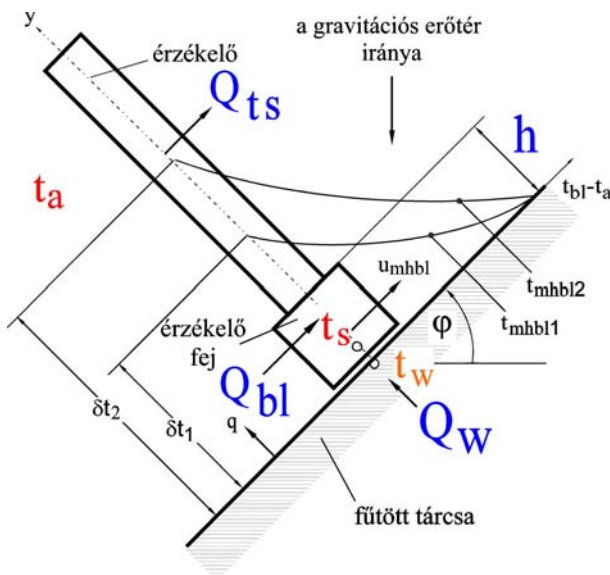
, megfigyelhető, hogy az elméleti és a mért hőmérséklet-hibák különbsége a termikus határrétegnek tudható be:

$$\frac{Q_{bl}}{f} = dt_{th} - dt_m = -ddt_{th}$$

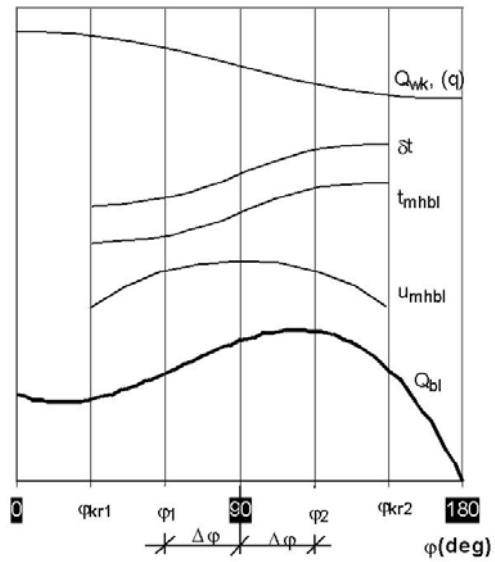
Kvalitatív leírását a ddt_{th} változásának a φ szög függvényében el lehet végezni Q_{bl} hőáram változásának elemzésével. A fűtött tárcsa által konvekcióval leadott Q_{wk} hőáram esetén kísérletileg igazolt tény [3] [5], hogy:

$$Q_{wk}(\varphi = 0^\circ) > Q_{wk}(\varphi = 90^\circ) > Q_{wk}(\varphi = 180^\circ)$$

Tehát a Q_{wk} hőáram és a q fajlagos hőáram monotonon csökkenő függvény (12.ábra).



11.ábra: A felületi hőmérsékletmérés modellje



12.ábra: A határréteg és az érzékelő közti hőátadás elemzése

A termikus határréteg hőmérséklet eloszlásából következik, hogy a q fajlagos hőáram fordítottan arányos a határréteg δt vastagságával, így a δt monotonon növekvő függvény a $\varphi \in [\varphi_{kr1}, \varphi_{kr2}]$ szög értéktartományban. A $\varphi = 90^\circ$ szöghöz viszonyítottan, szimmetrikus φ értékekre ($\varphi_1 = 90^\circ - \Delta\varphi$, $\varphi_2 = 90^\circ + \Delta\varphi$), igaz lesz hogy $\delta t_1 < \delta t_2$. A 8.ábrán látható, hogy az érzékelő fej h magasságára vonatkozó rétegben a határréteg középhőmérsékletei között a következő összefüggés létezik:

$$t_{mhbl2} > t_{mhbl1}, \quad \text{vagyis a } t_{mhbl} \text{ monotonon növekvő függvény (12.ábra).}$$

Az érzékelő fej h magasságára vonatkozó határrétegben az áramlási sebesség a $\varphi = 90^\circ$ szög esetén a legnagyobb (12.ábra). A határréteg által a h magasságú fejnek átadott hőáram arányos az u_{mhbl} sebességgel és a t_{mhbl} hőmérséklettel, vagyis:

$$Q_{bl} \approx u_{mhbl} \cdot t_{mhbl}$$

Tekintetbe véve az u_{mhbl} és a t_{mhbl} változását a φ szög függvényében, egyértelmű, hogy a Q_{bl} már nem lesz szimmetrikus a $\varphi = 90^\circ$ függőlegeshez viszonyítva, ami magyarázatot ad ddt_{th} asszimetriájára.

A Q_{bl} változás leírható a $\varphi \in [0, \varphi_{kr1}]$ szög intervallumban a 10.ábra alapján. A $\varphi = 0^\circ$ szög esetén a termikus határréteg nem csak a fejet, hanem az egész érzékelő rudat is körülveszi (2.ábra). A φ szög növelésével mind több része az érzékelő rúdnak kikerül a termikus határrétegből. Így a Q_{bl} ebben a szög értéktartományban monotonon csökkenő függvény lesz. A Q_{bl} változása a $\varphi \in [\varphi_{kr2}, 180^\circ]$ értékintervallumban a 10.ábra alapján elemezhető. A $\varphi = 180^\circ$ esetén (2.ábra), a feláramló hideg közeg szinte elfújja a termikus határréteget az érzékelő feje közeléből, így jó megközelítéssel felírható hogy $Q_{bl}(\varphi = 180^\circ) \cong 0$. A 10.ábra termikus és áramlási határréteg sémái alapján

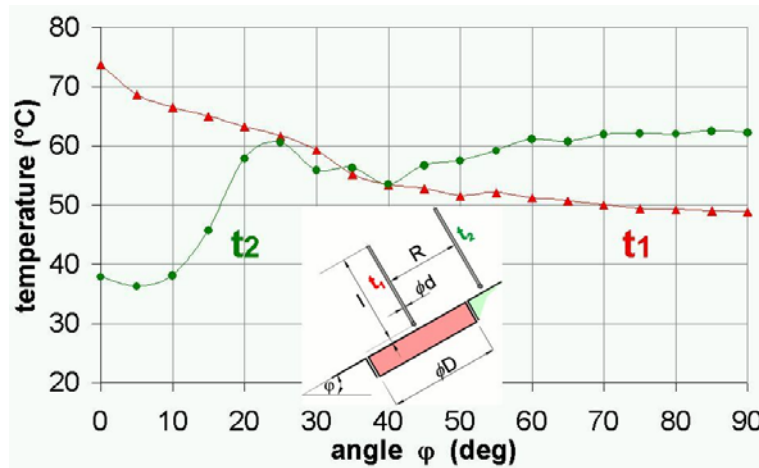
kijelenthető, hogy ebben a szög értéktartományban a q_{bl} monotonon csökkenő függvény. A 12. ábrán szemléltetett $Q_{bl} = f(\varphi)$ függvény formailag jól egyezik a 9. ábrán látható ddt_{th} függvénnyel.

4. A FÜTÖTT TÁRCSA FELETTI ÁRAMLÁSI KÉP ELEMZÉSE

4.1. Különböző dőlésszögek esetén a hőmérséklet mért értékei a fűtött tárcsa feletti légréteg két pontjában

Az áramlási és hőmérsékleti viszonyok elemzésére mérésekre került sor egy $d=1,6$ mm átmérőjű, $l=150$ mm hosszúságú, K típusú köpenyhőelemmel, amelynek érzékelő végét $h=3$ mm távolságra helyezkedett el a $D=100$ mm átmérőjű fűtött tárcsa középpontja, illetve $R=100$ mm távolságra a berendezés külső felülete felett (13. ábra).

A tárcsa középpontjában elhelyezett köpenyhőelem által mért t_1 hőmérséklet gyakorlatilag megegyezik az érzékelő rudat körülvevő levegő hőmérsékletével. Az R távolságra elhelyezett hőelem által mért t_2 hőmérséklet az áramlási kép változásáról ad értékes információkat. A t_1 és t_2 hőmérsékletek változása a φ szög függvényében a $\varphi \in [0^\circ \div 90^\circ]$ szögintervallumban a 13. ábrán követhető.



13. ábra: Hőmérsékletváltozás a dőlésszög függvényében a fűtött tárcsa feletti térben

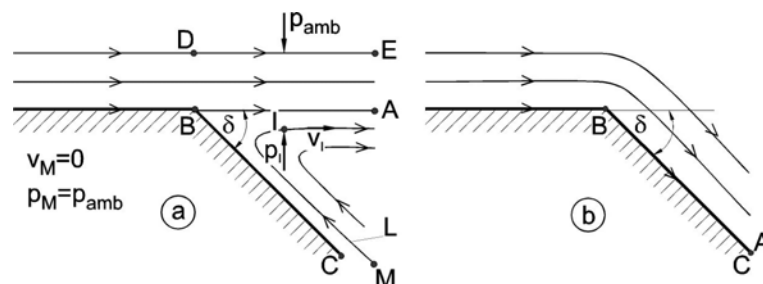
A t_1 hőmérséklet a φ szög függvényében egy monotonon csökkenő függvény. Ezért, állandó felületi hőmérséklet esetén, a felületi hőmérsékletérzékelő hibájának növekedése a környezeti hőmérsékletcsökkenésnek tulajdonítható. A t_1 hőmérséklet változása a φ szög függvényében egyértelműen megmagyarázza a felületi érzékelő hibájának növekedését a $\varphi \in [0^\circ \div 90^\circ]$ szögintervallumban.

A t_1 és t_2 hőmérsékletek változásának együttes elemzése lehetőséget nyújt a fűtött tárcsa feletti légtér áramlási képének módosulásáról a dőlésszög függvényében.

4.2. Az áramlási kép minőségi elemzése

A t_2 hőmérséklet változásának megértéséhez a „Coanda” effektus használható.

Feltételezve egy szabad légsugár áramlását egy δ törésszögű fal mentén, a súrlódási erő az A-B-C törtvonallal határolt térben egy szekunder mozgást hoz létre (14.a. ábra).



14. ábra: „Coanda” effektus

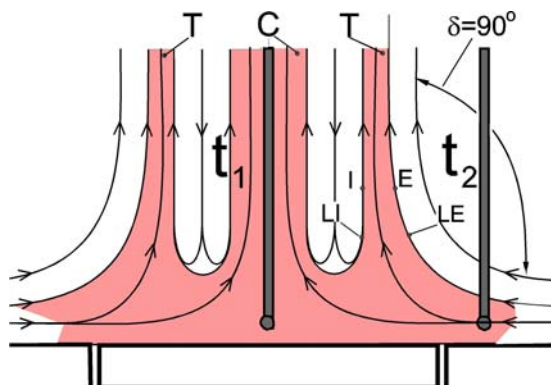
Az L áramvonal M távoli pontjában az áramlási sebesség gyakorlatilag nulla ($v_M \approx 0$) és a nyomás megegyezik a környezet nyomásával ($p_M = p_{atm}$). Ugyanazon áramvonal I pontjában, amely a B töréspont közelében van, a sebesség már nem nulla értékű ($v_I \neq 0$). Alkalmazva az M és I pontok között a Bernoulli egyenletet, következik hogy az I pontban a nyomás kisebb lesz mint a környezeti nyomás, tehát a B-A áramvonal mentén a nyomás értéke a p_{amb} alá esik.

$$p_I + \frac{\rho \cdot v_I^2}{2} = p_{amb} \qquad p_I = p_{amb} - \frac{\rho \cdot v_I^2}{2} < p_{amb}$$

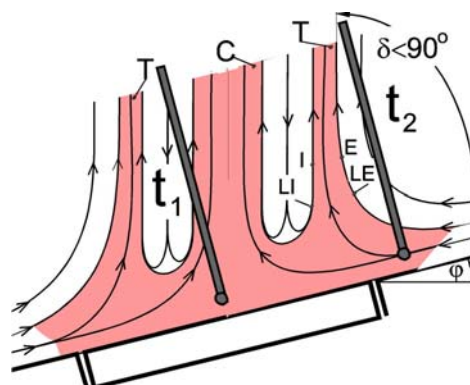
Tekintetbe véve a nyomáskülönbséget a szabad légsugár belső B-A áramvonala és külső D-E áramvonala között, a légsugár ráhajlik a B-C felületre(14.b.ábra).

A felfelé néző, kis D átmérőjű tárcsák esetén az áramlási kép a 2.ábrán követhető. A berendezés nem fűtött felülete mentén (SI) áramló levegőt a tárcsa felmelegíti és kialakul egy feláramló, meleg légsugár (C).

A fűtött felület növekedésével több kürtő is kialakulhat. A kör alakú tárcsák esetén (15.ábra) kialakul egy központi meleg légsugár(C) mint a 2.ábrán, de kialakulhat egy vagy több cső formájú légsugár is (T) [4]. Az áramlás úgy rendeződik, hogy a cső formájú légsugár (LE) külső E- és (LI) belső I pontjában a sebességek- és így a nyomások egyenlők.



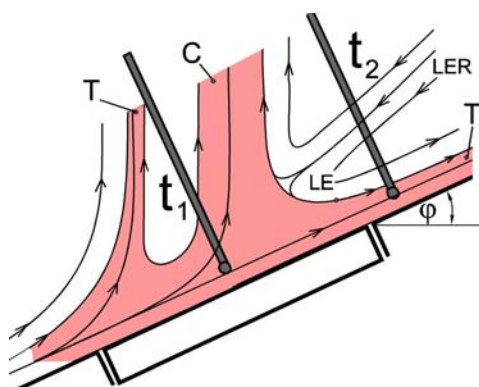
15.ábra: Áramlási kép $\delta=90^\circ$ esetén



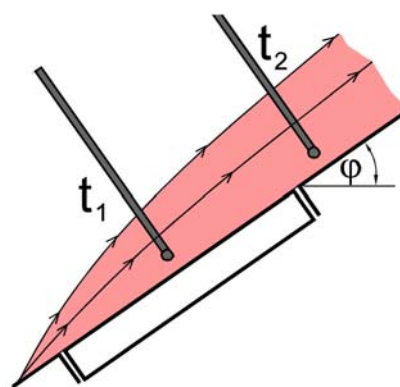
16.ábra: Áramlási kép $\varphi \in [0^\circ \div 10^\circ]$ esetén

A felület döntésével az LE áramvonal eredeti $\delta=90^\circ$ szöge csökken. Ez a folyamat a 13.ábrán a $\varphi \in [0 \div 10]$ intervallumban látható: a t_2 hőmérséklet gyakorlatilag állandó, a t_1 hőmérséklet pedig fokozatosan csökken. Összehasonlítva a 15. 16.ábrák áramlási képeit ez a viselkedés egyértelmű, mivel a t_2 hőmérsékletet mérő hőelem gyakorlatilag ugyanazon hőmérsékleti térben marad, míg a t_1 hőmérsékletet mérő hőelem egy része fokozatosan kikerül a C központi meleg légsugár hatása alól. A δ szög csökkenésével az LE áramvonal E pontjában a sebesség nő, tehát a nyomás csökken, ami a „Coanda” effektus megjelenése miatt a T légsugár jobb oldali ágának a felületre való leszívását eredményezi (17.ábra).

A $\varphi \in [10 \div 25]$ intervallumot az jellemzi, hogy a t_2 hőelem bekerül a meleg légsugárba (13.ábra). A $\varphi \in [25 \div 35]$ intervallumban jellemző az LE áramvonallal határolt (LER) területben az áramlási sebesség növekedése, ami a t_2 csökkenését eredményezi (13.ábra). A $\varphi \in [35 \div 55]$ szögintervallumban, a „Coanda” effektus miatt, először a C központi légsugár, majd a T légsugár baloldali ága is leszívódik a fűtött felületre. A 18.ábra bemutatja a klasszikus határréteget [5][6], amely $\varphi \in [55 \div 90]$ -re érvényes.



17.ábra: Áramlási kép $\varphi \in [10^\circ \div 25^\circ]$ esetén



18.ábra: Áramlási kép $\varphi \in [55^\circ \div 90^\circ]$ esetén

5. KÖVETKEZTETÉSEK

A felületi érzékelővel történő mérést számos olyan tényező befolyásolja, amely még nincs számszerűsítve és amely kalibrálás során határozható meg. A cikk egy ilyen lényeges hibatényező jelentőségét tanulmányozza.

A mérési eredmények egyértelműen bizonyítják, hogy a felület dőlésszöge lényegesen befolyásolja a hőmérséklet-hibát, ami a tárcsa feletti légtér konvekciós áramlási képének változásával magyarázható. Az új mérési módszer, a mérési eredmények és ezek elméleti elemzése egyedülálló a szakirodalomban.

SZAKIRODALOM

- [1] R. Morice, E. András, E. Devin, T. Kovács, "Contribution for the calibration and the use of surface temperature sensors", Tempmeko Proceedings, vol. 2, pp.1111-1116, 2001.
- [2] F. Bernhard, S. Augustin, H. Mammen, K.D. Sommer, E. Tegeler, M. Wagner, U. Demisch, "Calibration of contacting sensors for temperature measurements on surfaces", Tempmeko Proceedings, vol. 1, pp. 257-262, 1999.
- [3] M.A. Mihejev, "Bases of practical calculations concerning the heat-transfer", "A hőátadás gyakorlati számításának alapjai" Tankönyvkiadó, Budapest, 1990.
- [4] T. Környey, "Transmission of heat", "Hőátvitel", Műegyetemi kiadó, Budapest, 1999.
- [5] H. Y. Wong, "Heat transfer for engineers", Longman Group Limited, London, 1983.
- [6] E. R. G. Eckert, R. M. Drake Jr., "Heat and Mass Transfer", Mc Graw - Hill Book Company, Inc., New York, Toronto, London, 1959.

SZERZŐ: András Emese, Hőmérséklet- és Optikai Mérések Osztály, Országos Mérésügyi Hivatal (OMH), 1124 Budapest, Németvölgyi út 37-39, telefon: 36 1 4585963, fax: 36 1 4585927, E-mail: e.andras@omh.hu