

TERMOAKUSZTIKAI ÉRDEKESSÉGEK

Beke Tamás
Nagyasszonyunk Katolikus Általános Iskola
és Gimnázium, Kalocsa

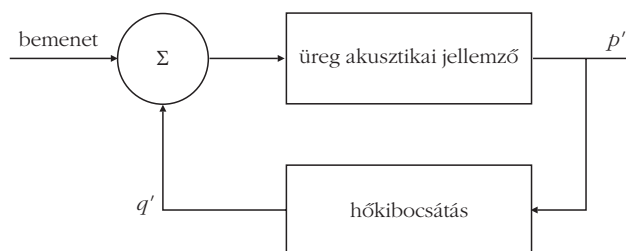
A termoakusztika a hő hatására létrejövő hanghatás vizsgálatával foglalkozik. Termoakusztikai instabilitásnak nevezzük, ha egy termodinamikai rendszerben a nyomás oszcillációja párosul az egyenetlen hőátadással. Ha a rendszer által kibocsátott hő függ a nyomás és a rendszerben áramló gáz sebességének fluktuációjától, akkor egy visszacsatolási hurok jön létre, ami destabilizálhatja a rendszert; ezt szemlélteti a 1. ábra Matveev alapján [1]. A termoakusztika alapvető szerepet játszik számos technikai alkalmazásban, például folyékony tüzelésű rakétahajtóművek vagy gázturbinák és égőkamrák instabilitásai, illetve termoakusztikus motorok esetében. A kialakuló vibráció és a fokozott hőátadás rontják a berendezés működésének hatásfokát, illetve csökkentik az élettartamot.

Termoakusztikai vizsgálatok történeti áttekintése

A termoakusztikai vizsgálatoknak érdekes történeti előzményei vannak. Már két évszázad eltelt azóta, hogy az első termoakusztikával kapcsolatos megfigyelést publikálták és azóta számos eredmény született. *Higgins* 1802-ben felfedezte az „énekítő lángot”, amely akkor keletkezett, amikor egy gázégőt meggyújtott és a lángot egy mindkét végén nyitott csőbe vezette. A kísérletet elvégezte az egyik végén zárt csővel is, bizonyos esetekben ekkor is keletkezett hang. A hang frekvenciája megegyezett a cső saját „természetes” frekvenciájával. *Sondbauss* 1850-ben felfedezte, hogy az egyik végén zárt csőben nagy amplitúdójú oszcilláció alakulhat ki, ha a cső zárt végét melegíti. A jelenséget elméletileg is vizsgálta.

Rijke 1859-ben felfedezte, hogyan lehet egy mindkét végén nyitott csőben hanghatást fenntartani. A kísérletekhez egy körülbelül 5 cm átmérőjű függőleges helyzetű üvegcsövet használt; elhelyezett egy fémhálót a cső alsó felében, majd a hálót izzásig hevítette gázláng segítségével. Miután eltávolította a lángot, erős hangot hallott, amely nagyjából pár másodpercig tartott, addig, amíg a fémháló ki nem hűlt. *Rijke* a lánggal való melegítés helyett kipróbálta az

A cikk a Szegedi Tudományegyetem Természettudományi és Informatikai Karán Fizika kutatási program (*A közép- és a felsőfokú fizika oktatásának fejlesztésére irányuló kutatások*) keretében készült. Külön köszönetem szeretném kifejezni a témavezetőnek, *Papp Katalinnak* (SZTE), *Radnóti Katalinnak* (ELTE) és *Hopp Bélának* (SZTE), akik hasznos tanácsokkal és javaslatokkal segítettek az írásban.

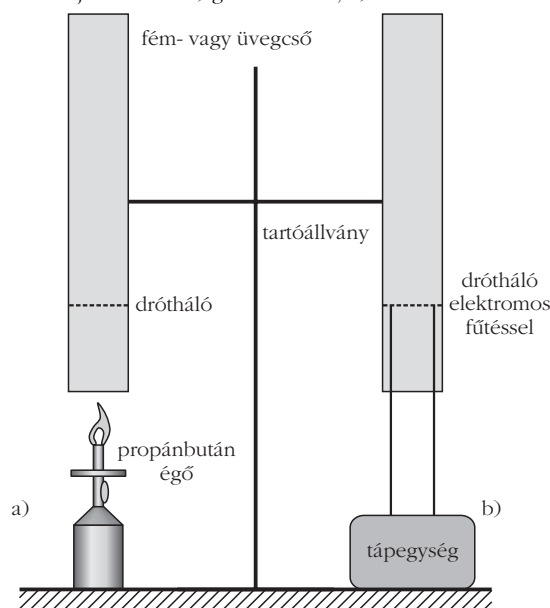


1. ábra. A termoakusztikai rendszer vázlata.

elektromos fűtést is, ehhez viszonylag nagy erősségű áramot kellett átvezetni a hálón, hogy az izzásba jöjjön (2. ábra).

A folytonos fűtés esetén folytonos hanghatást észlelt; a hang meglehetősen erős volt, még a három terelemmel arrébb lévő kollégái is panaszkodtak miatta. (*Rijke*t eredetileg a jelenség a zenei hangok szempontjából érdekelte, de a kísérletek elvégzése után nem találta a csövet megfelelő „hangszernek”). A jelenségre az első magyarázatot maga *Rijke* adta, amely szerint a forró háló átadja a hőt a szomszédos légtömegnek, amely kitágul, sűrűsége csökken, emelkedni kezd a csőben, így egy felfelé irányuló áramlás alakul ki. A felemelkedő levegő kapcsolatba kerül a cső felső részének hidegebb falával, majd összehúzódik, sűrűbbé válik, ezáltal a cső hosszában sűrűségkülönbség alakul ki. *Rijke* szerint a nyomás megváltozása eredményezi, hogy a gáz a cső alsó felében kitágul, míg a felső részében összenyomódik.

2. ábra. *Rijke*-csövek: a) gázfűtésű cső, b) elektromos fűtésű cső.



Rijke tanársegédje, *Johannes Bosscha* fedezte fel a Rijke-cső „negatív párját”. A Bosscha-cső felső felében egy hűtött rács található, a cső bizonyos esetekben hangot bocsát ki.

Lord Rayleigh (John William Strutt) 1896-ban „hatásosan bemutatható jelenségként” említi a Rijke-cső hanghatását. Lord Rayleigh kísérleteihez egy 1,5 m hosszú, 12 cm átmérőjű acélcövet használt. A fémháló szintén acélból készült és a cső alsó részében, a negyedrésznél helyezte el. Az acélhálót annyira felfűtötte, hogy a kialakuló hang hatására megremegett a kísérleti labor. Bevezette a Rayleigh-integrál fogalmát, ami a rendszer stabilitását jellemzi [2].

1969-ben *Nicholas Rott* elkezdett egy publikációsorozatot, amely termoakusztikával foglalkozott. Az első jelentős témakör a Taconis-oszcilláció volt, amely akkor következik be, ha egy gázzal töltött csövet folyékony nitrogénbe merítenek és lehűtenek nagyon alacsony, kriogenikus hőmérsékletre. (A ceppfolyós nitrogén forráspontja -196 °C , a fagyasztó berendezések üzemi hőmérséklete körülbelül -160 °C .) Amikor a csövet kihúzták a hűtőközezből, az berezonált és hangosan „énekelni” kezdett.

Annaswamy és munkatársai 2000-ben modellezték a gázfűtésű égőkamrákban zajló égést [3]. Égés közben a gáz áramlását laminárisnak feltételezték. A rendszerben fellépő termoakusztikai rezgéseket úgy szabályozták, hogy egy érzékeny mikrofont helyeztek el a „rezonátor”-üreg belsejében, amely szenzorként működött. A mikrofon jeleit digitális formában számítógépbe vezették, ahol egy program döntött arról, hogy be kell-e avatkozni a rendszer működésébe; ami úgy történt, hogy a rendszer belsejében egy hangszórót is elhelyeztek, ez töltötte be az aktuátor szerepét; a hangszóró vezérlését a számítógépes program végezte. A numerikus modellből kapott eredményeket kísérleti adatokkal is alátámasztották.

A hőátadás és az akusztika közötti dinamikai kapcsolat következtében alakul ki az egyenetlen égés az égőkamrákban, repülőgép hajtóművekben, gázturbinákban. Ezeket az instabilitásokat összefoglaló néven hajtómű-instabilitásoknak, belső égésű instabilitásoknak, vagy termoakusztikus instabilitásoknak nevezük; következményük akár szerkezeti károsodás is lehet. A rakéták hajtóművei, a gázturbinák igen érzékenyek az égéstérben lezajló termoakusztikai instabilitásokra. A nyomás, illetve az áramlás oszcillációja következtében a motorban felerősödnek a vibrációk, növekszik a hőátadás, csökken a motor hatásfoka; a hajtómű ennek következtében akár meg is sérülhet (például repedések keletkezhetnek, vagy a rázkódás hatására alkatrészek szakadhatnak le), ezért a gyakorlatban legtöbbször célszerű megakadályozni a nagy amplitúdójú oszcilláció kialakulását. A szilárd és a folyékony hajtóanyagú hajtóműrendszerek is hajlamosak az instabilitásokra.

A környezetvédelmi normák manapság a repülőgépipar számára is komoly követelményeket állítanak. A nitrogén-oxidok kibocsátása az egyik legkényesebb témakör. A nitrogén-oxidok emissziója ará-

nyos a hajtómű hőmérsékletével. Ha az üzemanyag és a levegő aránya alacsony értékű, az előkevert és előporlasztott üzemanyag felhasználásával a motor hőmérséklete elfogadható értéken tartható, így csökken a hajtómű károsanyag-kibocsátása. Ezek az úgynevezett LPP (Lean Premixed and Prevaporized = szegényes előkevert és előporlasztott) hajtóművek sajnos hajlamosak arra, hogy bennük a lezajló termoakusztikus instabilitások következtében alacsony frekvenciájú (50–150 Hz) longitudinális hullám alakuljon ki. Ez az akusztikus hullám nagyon erőteljes („szkreccs”-nek vagy „buzz”-nak nevezik a mérnökök, ami zümmögést, mormogást, döngést, sercegést jelent magyarul), és akár a hajtómű fizikai károsodásához vezethet; sőt esetleg teljesen tönkre is mehet a berendezés.

A 20. században megjelentek, majd elterjedtek a sugárhajtású repülőgépek (jet) és a rakéták; az égés ezek hajtóművében nagyon nagy teljesítménysűrűségű (GW/m^3 nagyságrendjébe esik). Ezen energia nagyon kis hányada is elegendő ahhoz, hogy a hajtómű belsejében hanghatást keltsen és tartson fenn. A Rijke-cső azért került a kutatók figyelmének középpontjába, mert termoakusztikus szempontból jól használható modellje a sugárhajtású motoroknak és a rakéta-hajtóműveknek. Mivel a Rijke-csőben szintén fellépnek ehhez hasonló instabilitások, ezért alkalmas arra, hogy laboratóriumi körülmények között vizsgálják vele a „buzz-jelenséget” [4].

A Rijke-cső érdekes felhasználásáról számolt be *Pun* 2001-ben: egy Los Angeles mellett működő szemétegető hangos zajt bocsátott ki magából, ha az égetőmű a maximális teljesítmény felénél nagyobb teljesítménnyel üzemelt. Ez a zaj annyira hangos volt, hogy a környéken élők feljelentést tettek miatta. A szemétegető által keltett hang vizsgálatára Rijke-csövet használtak, ami a szemétegető egyszerűbb laboratóriumi modelljéül szolgált.

Sztochasztikus termoakusztikus folyamatok

A termoakusztikus folyamat szabályozása többnyire valamilyen speciális cél érdekében történik, ilyen például az égőkamrában az égés tökéletesítése, a hatásfok növelése, az égetőmű teljesítményének növelése, az égés során képződő nitrogén-oxidok mennyiségének csökkentése. A kísérleti adatokból az derült ki, hogy az égőkamrákat általában jól lehetett kontrollálni, de bizonyos esetekben mégis instabillá váltak.

A gyakorlatban alkalmazott égető- és hajtóművek esetében az égés zajos közegben történik, gyakran turbulens áramlási környezetben, sőt az égéstér különböző részein eltérőek az áramlás jellemzői. A teljesen determinisztikus modellek nem adnak számot több fontos jellemzőről. A gyakorlati életben használt égetőművekben sztochasztikus folyamatok is jelen vannak, ezeket nem lehet a teljesen determinisztikus modellekkel leírni. *Lieuwen* 2003-ban bemutatta, hogy a nyomásingadozások ciklusról ciklusra is változnak; statisztikai elemzést adott az égés instabilitá-

sának meghatározására. A sztochasztikus folyamatoknak komoly gyakorlati következményei lehetnek, módosíthatják a hajtómű lineáris és nemlineáris viselkedését is. Elképzelhető, hogy egy hajtómű stabil módon viselkedik a tesztelesek során, majd látszólag „minden indok nélkül” instabillá válik. Más esetben a „korábban jól működő” aktív vezérlés nem képes tovább szabályozni a rendszert. Érdekes módon a rendszer „újraindításával” ezek a jelenségek általában megszűnnek. A gyakorlati technikai alkalmazások során ezt a kiszámíthatatlan működési tartományt kezelni kell.

Termoakusztikus oszcilláció

A termoakusztikus elven működő eszközöket két nagyobb csoportra oszthatjuk: az egyikben állóhullámok alakulnak ki, a másik típusban haladó hullámok keletkeznek. Vizsgáljuk meg részletesebben a folyamatot!

A különböző csővekben (például Rijke-cső, Sondhauss-cső) kialakuló termoakusztikai hanghatás okainak elemzéséhez tekintsük át egy levegőoszlopban kialakuló hullámokkal kapcsolatos fontosabb tudnivalókat! A termoakusztika szerint a hanghullám a hőterjedés során alakul ki a „szonikusan indukált hőgradiens” következtében. Ha a cső mindkét vége nyitott, akkor Rijke-oszcillációnak nevezzük, ha a cső egyik vége nyitott, a másik zárt, akkor Sondhauss-oszcillációnak hívjuk a kialakult jelenséget.

A termoakusztikus berendezésekben valamilyen külső energiabetáplálás (például gázláng, vagy elektromos fűtés) következtében felforrósított „rács” körül a levegő hőmérséklete emelkedik, így növekszik a nyomás és a sebesség is; a felmelegedett gáz tágul, sűrűsége csökken. A gázmolekulák a cső hidegebb vége felé gyorsulnak, ezáltal a cső fűtött végénél a relatív gáznyomás csökken. Ahogy a molekulák lehűltek, más gázrészecskék gyorsulnak a fűtött csővég felé, ahol feltöltik az alacsonyabb nyomású térfogatrészt. Itt a molekulák újra „felmelegednek”, majd az egész folyamat kezdődik előlről. A gázmolekulák felgyorsulása és lelassulása az időben szinuszosan történik, végeredményként egy önfenntartó szinuszos, longitudinális gáznyomás-oszcilláció keletkezik. A hőforrás felülete körüli hőfluktuáció a legfőbb tényező a hangkeltésben. A Rijke-cső egyfajta „termoakusztikus pumpa”, amelyben a hőmérséklet oszcillációja „pumpálja” az akusztikus energiát a hallható hang szintjére [5]. Ha a hőforrás hőmérséklete emelkedni kezd, kialakul valamikor hőmérséklet-különbség a hőforrás felszínének mindkét oldala és az azt körülvevő levegő között. A környező levegőben a sűrűségcsökkenés réteges, így természetes konvekciós áramlás indul meg. (A hőkonvekció során a hő a részecskék mozgásával terjed, ez az energia szállításának anyagáramlással összekötött formája.) Az átszállított hőteljesítmény (\dot{Q}) függ a rács hőmérsékletétől (T_r), a környező levegő hőmérsékletétől (T_l), a hőfor-

rás (rács) felszínének nagyságától (S_r), és az átlagos hőszállítási koefficiensstől (b_{atl}) [5]:

$$\dot{Q} = b_{atl} S_r (T_r - T_l). \quad (1)$$

Ha egy gázban mechanikus zavar (zaj) keletkezik, akkor ez a zavar a „rugalmas” közegben tovább terjed, közben a gázban p' akusztikai nyomás és v' sűrűségfluktuáció alakul ki. Ezt a jelenséget nevezzük hangnak. A hang (terjedési) sebessége (v_b) kifejezhető a gáz akusztikai nyomásának és a sűrűség fluktuációjának segítségével:

$$v_b = \sqrt{\frac{dp'}{d\rho'}}. \quad (2)$$

A termoakusztikus folyamatok során a csőben a nyomáshullám közelítőleg síkhullám, a cső szájának környékén kisebb mértékű toroidális viselkedést mutat. A cső száján kívül a hullámforma jellemzően gömbhullám. A legtöbb esetben hallható hang képződik a jelenség következtében. A termoakusztikus oszcilláció tulajdonképpen a hő hatására bekövetkező nyomásoszcilláció keltette hanghatás. Amíg csak a longitudinális nyomáshullámokkal foglalkozunk a gázban, a következő hullámegyenletet kell megoldanunk [6]:

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} = \frac{\rho}{\kappa} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2}, \quad (3)$$

ahol

$$\kappa = -V \frac{d\rho}{dV}. \quad (4)$$

A megoldás:

$$\Psi = A \cos(\omega t \pm kx) + B \sin(\omega t \pm kx). \quad (5)$$

Ahhoz, hogy állóhullámok alakuljanak ki a két hullámnak (y_1 és y_2) egymással szemben kell haladnia azonos amplitúdóval (A):

$$\Psi_1 = A \sin(\omega t + kx), \quad (6a)$$

és

$$\Psi_2 = A \sin(\omega t - kx). \quad (6b)$$

A két hullám összege:

$$\begin{aligned} \Psi &= \Psi_1 + \Psi_2 = \\ &= A [\sin(\omega t + kx) + \sin(\omega t - kx)] = \\ &= 2 A \sin(\omega t) \cos(kx). \end{aligned} \quad (7)$$

Ennek eredményeként a csomópontokban y értéke 0, minden félhullámban; a duzzadóhelyeknél a kitérés maximális, a csomópontoktól negyedhullámnyi távolságban. A csomópontok száma függ az állóhullám harmonikusainak számától és a határfeltételektől.

Abban a csőben, amelynek mindkét vége nyitott (Rijke-cső) a határfeltételek értelmében a cső mindkét végénél a kitérésnek duzzadóhelye van. Ebben az esetben:

$$L = \frac{\lambda}{2} n, \quad (8)$$

és $n = 1, 2, 3, 4, \dots$ lehet. A kialakuló hangrezgés frekvenciája (f):

$$f = \frac{v_b}{\lambda} = \frac{v_b}{2L} n, \quad (9)$$

ahol L jelöli a cső hosszát, v_b a hang sebességét, n pedig a harmonikusok számát; az elsőt ($n = 1$) alapharmonikusnak nevezzük.

Abban a csőben, amelynek az egyik vége zárt, a másik nyitott (Sondhauss-cső) a határfeltételek értelmében a nyitott végénél a kitérésnek duzzadóhelye van és a zárt végénél csomópontot találunk. Ekkor a felharmonikusok hullámhosszára:

$$L = \frac{\lambda}{4} (2n - 1), \quad (10)$$

ahol n a harmonikusok sorszáma. A kialakuló hangrezgés frekvenciája (f):

$$f = \frac{v_b}{\lambda} = \frac{v_b}{4L} (2n - 1). \quad (11)$$

Láthatjuk, hogy a frekvencia függ a harmonikusok sorszámtól, a közegbeli hangsebességtől és a cső hosszától. A cső hosszának csökkenésével az alapharmonikus hullámhossz is csökken, ennek megfelelően a felharmonikusok hullámhosszai is csökkennek (állandó gázbeli hangsebesség esetén). Valójában a hangsebesség nem állandó, mivel a hőmérséklet és a nyomás is folytonosan változik:

$$v_b(T) = \sqrt{\left(\frac{c_p}{c_v} - 1\right) c_p T}, \quad (12)$$

ahol c_p a levegő állandó nyomáshoz, c_v a levegő állandó térfogathoz tartozó fajhője, T pedig a levegő abszolút hőmérséklete.

A termoakusztikus folyamatok hasznosítása

Az eddigi példákból az derült ki, hogy a termoakusztikus oszcillációt lehetőleg ki kell küszöbölni; a termoakusztikus instabilitás azonban nem mindig káros jelenség. Aktív kutatás folyik abban az irányban is, hogy a pulzáló égőkamrákat, termoakusztikus motorokat hogyan használhatnánk primer mozgás-átalakítóknak, hatékony fűtésre, vagy hűtőszekrénynek. Ehhez feltétlenül szükséges, hogy a berendezésben lezajló termoakusztikus folyamatokat alaposan ismerjük.

A Rijke-féle jelenség egyik ipari alkalmazása a széntüzelésű égőtérrel kapcsolatos. Ha az égéstérben az üzemanyag és a levegő arányát kedvezően változtatjuk, ezzel növelhetjük a berendezés hatásfokát. A széntüzelésű égőtérben a finom hamuszemcséknek majdnem 70%-a elillan a beszerelt szűrőberendezések ellenére, mert ezek a részecskék körülbelül 5 mm nagyságúak, ami túl kicsi ahhoz, hogy a hagyományos szűrők felfogják. Ha növeljük a berendezésben kialakuló akusztikus hullám energiáját, akkor ezek a parányi hamuszemcsék az ütközések során összeragadhatnak, így effektív méretük megnő, és ezeket a nagyobb részecskéket hagyományos szűrési eljárásokkal már könnyebb eltávolítani a füstből. Ebben az esetben az akusztikai oszcilláció kívánatos jelenségnek számít, amelyet a Rijke-csővel modellezhetünk a kutatók, hogy a szűrés szempontjából a lehető legkedvezőbb legyen a részecskék mozgása [4].

A termoakusztikus energiaátalakítás lényege, hogy a hanghullámok tulajdonságait használja a közvetlen hő-villamos energia konverzióhoz. A jövőben kiválthatja a kondenzációs hűtőgépeket és hőszivattyúkat, illetve versenytársa lehet a napelemeknek. Napjainkban intenzív kutatás folyik egy különleges fűtő-hűtő-áramfejlesztő eszköz létrehozására. A SCORE nevű berendezést négy brit egyetem, számos afrikai és ázsiai egyetem kutatói, a Los Alamosi Nemzeti Laboratórium, egy nemzetközi jótékonyági szervezettel karöltve, közösen fejlesztik [7]. A szerkezet biomasszával üzemel, tehát a faforgácstól kezdve a biogázokig rengetegféle anyaggal fűthető. A SCORE-ban tulajdonképpen termoakusztikus úton állítanak elő áramot. Az égés során keletkezett hőből hangot állítanak elő, majd ezt a hangot „árammá alakítják”, ami üzemelteti a hűtőszekrényt és ezen kívül áramforrásként is szolgál. Az elkövetkező néhány évben a projekt két állomáson megy keresztül. Elején a tudományos kutatásokra fókuszálnak. Ide tartozik egy biomasszával fűtött termoakusztikus hajtómű tervezése, amely áramgenerátorként és hűtőgépként is funkcionál, illetve olcsó és robusztus váltakozó áramú generátor tervezése, amely alkalmas a tömegtermelésre. Ezt követően a technológiát szeretnék megismertetni és elterjeszteni az érintett lakosság körében. Ha a berendezést sikerül úgy megépíteni, hogy gazdaságosan működtethető legyen, akkor a világ olyan részein is használható lesz, amelyek eddig nem is álmodhattak róla; így az eszköz Afrika és Ázsia legszegényebb vidékeire juttathatja el a hatékony fűtés, hűtés és áramfejlesztés megfizethető lehetőségét.

Végezetül bemutatok egy olyan példát, ahol a Rijke-csővet egy közlekedésbiztonsági vizsgálathoz használták fel. 2003-ban Norvégiában nagyszabású teszt sorozatot hajtottak végre az 1650 m hosszú Runehamar alagútban. A vizsgálatok célja az volt, hogy a közlekedési alagutakban kialakuló tüzesetekről pontosabb információkat szerezzenek. Sajnos a világ különböző pontjain számos olyan katasztrófa történt, amikor egy alagútban valamilyen okból tűz keletke-

zett és ennek következtében már nagyon sokan életüket veszítették. A tesztek során az alagútban különböző járműveket helyeztek el, majd az alagút egy adott helyén tüzet gyújtottak és vizsgálták, mi történik az alagút különböző pontjain. (Az alagútban még külön légáramlást is lehetett kelteni hatalmas teljesítményű ventilátorokkal.) A kutatókat is meglepte, hogy bizonyos esetekben (például amikor gyúlékony vagy robbanásveszélyes anyagot szállító tehergépjárműveket helyeztek el az alagútban) a tűz milyen sebességgel terjed, illetve az előzetesen számított értékeknél sokkal magasabb hőmérséklet alakul ki az alagútban. A kutatók észrevették, hogy az alagút bizonyos szempontból úgy viselkedik, mint egy vízszintes helyzetű Rijke-cső. Benne is kialakulhat gázoszilláció, hasonlóan a Rijke-csővekhez, az oszcilláció periódusideje néhány másodperc volt, tehát hallható hang nem keletkezett. A kutatók megállapították, hogy a tűz terjedését viszont befolyásolja ez az oszcilláció, ezért a Rijke-cső az alagútban terjedő tüzek „termoakusztikus” modelljéül szolgált. Remélhetőleg a vizsgálat hozzájárul ahhoz, hogy a jövőben biztonságosabb alagutakat tervezhessenek a mérnökök.

Összegzés

Ebben a cikkben néhány érdekes termoakusztikus jelenséget mutattam be, amelyek alkalmasak lehetnek arra, hogy a diákjainkat motiváljuk a termoakusztikus folyamatok megismerésére.

Irodalom

1. K. I. Matveev: *Thermoacoustic Instabilities in the Rijke Tube: Experiments and Modeling*. California Institute of Technology, Pasadena, CA, 2003.
2. Lord Rayleigh (J. W. Strutt): *The Theory of Sound 2.* (2nd ed.) Macmillan, London, 1896,
3. A. M. Annaswamy, M. Fleifil, J. W. Rumsey, R. Prasanth, J. P. Hathout, A. F. Ghoniem: Thermoacoustic Instability: Model-based Optimal Control Designs and Experimental Validation. *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 8/6 (2000) 905–918.
4. S. M. Sarpotdar, N. Ananthkrishnan, S. D. Sharma: The Rijke Tube – a Thermoacoustic Device. *Resonance* 8/1 (2003) 59–71.
5. B. W. Entezam, W. K. Van Moorhem, J. Majdalani: Two-dimensional Numerical Verification of the unsteady thermoacoustic field inside a Rijke-type pulse combustor. *Numerical Heat Transfer A* 41 (2002) 245–262.
6. D. Fahey, P. Timbie: Thermoacoustic Oscillations. *Wave Motion and Optics*, Spring (2006) 1–9.
7. The SCORE thermoacoustics technology web site: <http://www.score.uk.com/research/default.aspx>

AKIKET AZ ELEKTROMOSSÁG SZIKRÁJA MEGCSAPOTT...

Daróczy Csaba Sándor
MTA MFA

Jelen írás apropója egy, az *Élet és Tudomány*ban megjelent cikk [1], amelynek középiskolás szerzője az intézetünkben (MTA MFA) végzett tudományos munkájának szakmai beszámolója mellett utal egy bizonyos nanotechnológiai kísérlettel kapcsolatos áramütéses esetre is. A történet nálunk szájhagyomány útján terjed, így szolgál figyelmeztető példaként, mintegy aláhúzva a munkavédelmi rendszabályok betartásának szükségességét. De nyomtatásban látva a cikket kisebb vita támadt közöttünk, hogy vajon nem lett-e félreérthető, nem csábít-e „rosszra”. Ezért az MFA Nyári Iskola szervezőjeként úgy gondoltam, hogy talán hasznos lenne a témát közelebbről is áttekinteni. Annál is inkább, mert a természettudományokkal való ismerkedést egyszerűen nem lehet túl korán kezdeni [2, 3], ami viszont magával hoz bizonyos veszélyeket.

Szóval a természettudományok kísérletes művelése *veszélyes üzem*. Sejtethetnek ebből valamit még Hollywoodban is, különben nem születne annyi ilyen tárgyú katasztrófafilm. Persze a veszélyekkel mi, kutatók is tisztában vagyunk, hiszen mi találkozunk velük a leghamarább! De a személyes okulás egy bizonyos szint fölött önmagában nem elég, szükséges a részletes és szigorú szabályozás – amelynek minden fontos pontját korábbi balsikerű események indokolják. Ezért aki például nálunk szeretne dolgozni, akárcsak egy nyúlfarknyinak tűnő hétre is, annak tűz- és munkavédelmi oktatásban kell részesülnie, amit vizsga követ,

és ez alól még a nálunk dolgozó diákok sem kivételek! A veszélyek megismeréséhez honlapunkon jó előre megadunk minden segítséget, továbbá részletes leírások olvashatók a laboratóriumok megfelelő helyein is, de munkatársaink is sokkal jobban odafigyelnek az újoncokra. Talán ennek is köszönhető, hogy az elmúlt években egyetlen ilyen természetű baleset sem fordult elő! Ám lelkiileg meglehetősen nehéz azonosulni a szigorú rendszabályokkal, ha az ember nem látja maga előtt a negatív példákat. Szükség van az elrettentésre! (Alighanem még a *Grimm* fivérek rémtörténeteinek is volt ilyen szándékosan elrettentő célja.) Véleményem szerint nagyon fontos a legfiatalabb korú kísérletezőket is ráébreszteni a veszélyekre, és erre mi lenne alkalmasabb, mint saját megélt tapasztalataink?! Az alábbiakban tehát az én történeteimből jön egy csokor, de biztos, hogy másoknak is akad, csak vissza kell rá emlékezni! Leginkább saját elektromos eseteimből fogok idézni, még gyermek- és ifjú koromból. Munkahelyi példát sajnos nem tudok hozni – ki tudja, tán végre benőtt a fejem lágya ☹️

A legelső horror

Édesapámnak volt egy próbálampája (220 V-os izzólámpa, hozzá csatlakozó vezetékekkel), bizonyos elektromos szereléseknél a fáziskeresőt helyettesítette