

TERMOAKUSZTIKUS PROJEKTFELADAT RIJKE-CSŐ VIZSGÁLATÁRA

Beke Tamás
SZTE-TTIK Fizika Doktori Iskola

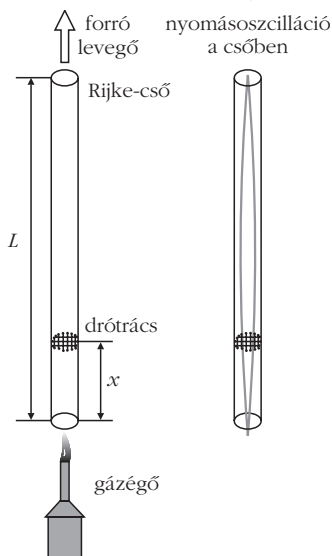
A cikkben Rijke-csővel végzett mérési, vizsgálati feladatot mutatok be. Célunk az volt, hogy a tanulók termoakusztikai ismereteinek bővítésén túl fejlődjön alkalmazott informatikai készségük és szokják a csapatmunkát.

A Rijke-cső

A Rijke-cső egy mindkét végén nyitott cső, amelynek belsejébe egy hőforrást helyeznek el. A hő forrása lehet gázláng vagy elektromos fűtés. Ha a cső függőleges helyzetben van és a hőforrás alul található, a cső erős hangot bocsáthat ki a hőforrás helyzetétől függően. A jelenséget *Petrus Leonardus Rijke* fedezte fel 1859-ben, ezért ezt a termoakusztikus jelenséget, amelynek során hő hatására hanghullám alakul ki az eszközben, Rijke-hanghatásnak nevezik.

A Rijke-cső a 19. században csak egy érdekes eszköznek számított; a 20. században a sugárhajtású repülőgépek és a rakéták megjelenésével változott a helyzet, mert az égés ezek hajtóművében nagyon nagy teljesítménysűrűségű. Ennek az energiának kis hányada is elegendő ahhoz, hogy a hajtómű belsejében hanghatást keltsen és tartson fenn, ami szintén termoakusztikus jelenség. Ez az akusztikus hullám nagyon erőteljes, és akár a hajtómű károsodásához is vezethet. A Rijke-cső azért került néhány évtizeddel ezelőtt újra a figyelem középpontjába, mert bizonyos értelemben jó és egyszerű modellje a sugárhajtású motoroknak és a rakéták hajtóműveinek [3].

1. ábra. Gázégővel melegített Rijke-cső vázlat



A Rijke hanghatás

A mindkét végén nyitott csőben akusztikus állóhullámok alakulhatnak ki: a gáz a cső minden részén váltakozva összenyomódik és kitágul, a gázcseppkék a csőben rezgőmozgást végeznek. Álló hanghullámok könnyen kelthetők a csőben valamilyen energiaforrás segítségével, például a cső egyik végénél (1. ábra).

Ha az energiaforrást kikapcsoljuk, a keltett hanghullám amplitúdója csökken, mivel súrlódás lép fel a cső falával, és az energia elveszik a cső nyitott végénél. Ezek szerint az energiaforrásnak nemcsak az a szerepe, hogy újabb hanghullámokat kelt, hanem a már meglévő hanghullámokat is fenntartja [1, 3].

A Rijke-cső megépítése

A mérésekhez a következő eszközökre van szükség (2. ábra):

- Rijke-csővek állványzattal (1 db alumínium- és 1 db rézcsövet, illetve egy üvegből készült csövet is használtunk, mert azon könnyű volt szemléltetni a drótkadály helyzetét).
 - Gázégő (szabályozható teljesítményű).
 - Drótháló (rács), amelyet a cső belsejébe helyezünk, ezt melegítjük a gázláng segítségével.
 - Hang rögzítésére és mérésére szolgáló eszköz (pl. egy mikrofon és számítógép hangkártyával).
 - Hőmérő, amely több száz °C hőmérsékleten is használható, a mérésekhez IR-380 típusú infravörös digitális hőmérőt használtunk.
 - A levegő áramoltatásához egy berendezés (pl. hajszárító vagy porszívó).
 - Hangintenzitás-mérő műszer. (A kvantitatív eredményekhez van szükség a műszerre, egyébként e nélkül is elvégezhetők a kísérletek.) A mérésekhez Voltcraft 322 Datalog típusú digitális zajszintmérőt használtunk; a műszert az SZTE-TTIK Kísérleti Fizikai Tanszékéről kaptuk kölcsön, amiért köszönetet mondunk.
- Ezen eszközök egy része (állvány, cső, gázégő, drótrács) minden iskolai fizikaszertárban megtalálható, más részük (mikrofon, számítógép hangkártyával, illetve porszívó) szintén megtalálhatók az oktatási intézményekben; ezek tehát nem kerülnek külön pénzbe. Szerencsére nem feltétlenül szükséges a felsorolt eszközök mindegyike, tulajdonképpen a mikrofon és a számítógép elegendő ahhoz, hogy relatív



2. ábra. Rijke-cső a mérőműszerekkel együtt



3. ábra. A tanulók méréseket végeznek a projektfeladat során

hangosságokat megállapítsunk. A mérések elvégzése nem igényel külön ráfordítást az iskolától, ez összhangban van a Rocard-jelentéssel [4].

A mérések során a következő összefüggésekre kerestünk választ:

- A cső hossza és a hőforrás helyzete hogyan befolyásolja a hang keletkezését?
- A hőteljesítmény változtatása miképpen befolyásolja a kibocsátott hang hosszát, illetve intenzitását?
- A rács hőmérsékletétől hogyan függ a cső által kibocsátott hang hossza és intenzitása?
- Ha a csőben külön légáramoltatás is van, akkor ez befolyásolja-e a hangkibocsátást?

Az iskolai projekt

Az iskolai projektek középpontjában általában valamilyen gyakorlati jellegű feladat – egy megoldandó probléma – áll. A megfelelően előkészített és kivitelezett projektfeladat megoldása közben a gyermekeknek épp azok a tulajdonságai, készségei, kompetenciái fejlődnek, amelyekre egész életükben szükségük van (tervezés, szervezés, kommunikáció, információ-feldolgozás, együttműködés, feladatok megosztása stb.).

Iskolai projektünkben önkéntes alapon vehettek részt a Nagyasszonyunk Katolikus Általános Iskola és Gimnázium tanulói. A méréseket délutánonként végeztük fizika szakkör-foglalkozásokon; 3–6 tanuló dolgozott minden csoportban (3. ábra).

A mérések során 3 különböző Rijke-csővel dolgoztunk; egy-egy tanulói csoport vizsgálta az egyes csövek viselkedését. Az eszközök egy részét (pl. zajsztímérő, digitális hőmérő) közösen használtuk. Ez külön szervezést igényelt. Ezen kívül arra is ügyelnünk kellett, hogy az egyik csapat Rijke-csővének hangja ne zavarja meg a másik csoport mérését. Ezért a munkánkat össze kellett hangolni, hiszen néhány eszközön osztoztunk, illetve egymás zavarása nélkül kellett dolgoznunk. Ezzel – mintegy mellékesen – a tanulók szervezőképességét is fejlesztettük, sőt a szociális kompetenciák (eszközök közös használata) is fejlődtek. (Amíg a projekt elején előfordult, hogy nem tudtak megegyezni, hogy ki mit használjon, addig ez a későbbiek folyamán gördülékenyen ment.) Minden mérést ötször megismételtünk és az átlagértékekkel számoltunk tovább, a kapott eredményeket számítógépen rögzítettük.

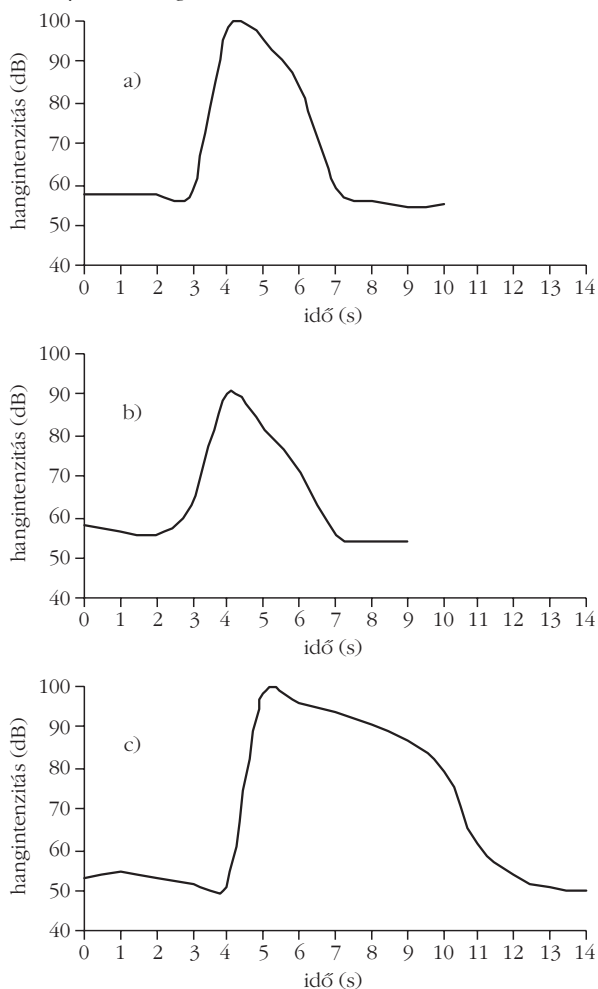
A mérés menete

Első lépésként a gázégők teljesítményét határoztuk meg; a teljesítmény mérését visszavezettük a hőmérsékletváltozás és az idő mérésére; meghatározott mennyiségű (ismert tömegű) és kezdőhőmérsékletű vizet melegítettünk a forráspont eléréséig, így a hőmérsékletváltozást könnyen kiszámolhattuk. A víz fajhőjének ismeretében kiszámítható a belső energia változása, de a határfokot nem ismertük, hiszen mele-

gedett a tárolóedény, a tartóállvány, a környező levegő is. Ezt úgy küszöböltük ki, hogy különbségi méréseket végeztünk.

Második lépésként a Rijke-csőbe helyezett rácsok átteresztőképességét határoztuk meg. Első ötletünk az volt, hogy a csőhöz egy porszívót kötünk, majd mérjük az adott idő alatt átáramlott levegő mennyiségét úgy, hogy a csőben benne van a rács, illetve úgy, hogy nincs rács a csőben. A két mérés aránya megadja a rács átteresztőképességét. Sajnos ez a módszer a gyakorlatban nem működött, ugyanis nem volt mérhető különbség a két eset között, ezért más módszert választottunk. A rácsokról digitális fényképet készítettünk szupermakro módban, majd megmértük egy üres négyzetrács méretét, megszámláltuk a cső belsejébe eső ilyen négyzetrácsok számát (a szélén lévő torzult négyzeteket félnek vettük), majd összesítettük a területeiket. Az összes üres terület és a cső belső keresztmetszetének hányadosa megadja a rács átteresztőképességét. Az általunk használt 3 különböző rács átteresztőképessége rendre 68%-nak, 78%-nak, illetve 85%-nak adódott. Mindhárom ráccsal végeztünk méréseket. Jelentősebb eltérést nem találtunk az

4. ábra. $x = L/4$ rácshelyzetnél a hang intenzitása az időtartam függvényében: (a) üvegcső, égőteljesítmény mintegy 300 W, (b) rézcső, égőteljesítmény körülbelül 340 W, (c) alumíniumcső, égőteljesítmény közelítőleg 430 W.



egyes esetekben. Sokkal inkább a rács anyaga számít; bár mindhárom rács acélból készült, a legsűrűbb rács bizonyult a legmegfelelőbbnek; mindenképpen célszerű valamilyen magas olvadáspontú rugalmas fémrácsot beszerezni.

A hőmérséklet mérése IR-380 típusú érintésmentes mérőműszerrel történt, amely a hőmérsékletet az objektum által az infravörös tartományban kisugárzott energia alapján határozza meg, az emisszió-fok figyelembe vételével.

Hangkibocsátás a gázegő teljesítményének függvényében

Ha a függőleges helyzetű csőben lévő rácsot gázlánggal kezdjük melegíteni, akkor rövid időn belül felforrósodik a rács. Ha ezután is folytatjuk a melegítést (azonos teljesítménnyel), akkor a rács hőmérséklete már nem nagyon emelkedik, legalábbis a mérési pontosságon belül ezt tapasztaltuk. Ha közben vizsgáljuk a Rijke-cső által kibocsátott hangot, akkor azt figyeltük meg, hogy a hangkibocsátás időtartamának jól érzékelhető maximuma van, méghozzá közelítőleg akkor lesz a leghosszabb a kibocsátott hang, amikor a rács a melegítés során eléri a hőmérsékleti plató kezdetét. További melegítésre rövidül a kibocsátott hang. Van tehát egy optimális időtartam, amíg célszerű melegíteni a rácsot. Ha a kísérlet közben a csővég hőmérsékletét is mérjük, akkor azt állapíthatjuk meg, hogy az fokozatosan növekszik, a cső anyagától, geometriai méretétől (közvetve a tömegétől), a melegítés intenzitásától, illetve a rácshelyzettől függően. Ezek után az idő függvényében ábrázoltuk a rács és a csővég hőmérsékletének különbségét, és azt kaptuk, hogy ennek a függvénynek maximuma van, méghozzá nagyjából azon a helyen, ahol a kibocsátott hang hosszának is. Azt mondhatjuk tehát, hogy a hangkibocsátás időtartama függ a rács és a csővég hőmérsékletének különbségétől.

Különböző égőteljesítmények esetén is vizsgáltuk a cső hangkibocsátását. Ebben az esetben a rács helyzete és átteresztőképessége nem változott. Minden fűtőteliesség és minden rácshelyzet esetén mértünk meghatározott időtartamú melegítés után. A keletkezett hang intenzitásának és hosszának időfüggésében is hasonlókat tapasztaltunk ahhoz, amit az előzőekben leírtam; azaz van egy optimális melegítési idő, ami után a kibocsátott hang időtartama és intenzitása már nem nő tovább. A rács helyzetét (x) tekintve a cső alsó végétől indultunk és minden méréssorozat után fokozatosan egyre feljebb helyeztük el a rácsot. A kibocsátott hang hossza és intenzitása is fokozatosan nőtt, amíg el nem értünk a csőhossz (L) negyedrészeinek közelébe. Az $x = L/4$ hely körül található mind a hangintenzitásnak, mind a hang időtartamának maximuma (4. ábra).

A cső negyedrészt elhagyva fokozatosan csökkentek a kibocsátott hang időtartamának és intenzitásának értékei. Érdekes, hogy nem szimmetrikus a cső első és

második negyedrészeének viselkedése. A második negyedben gyorsabban csökkentek a mért értékek, mint amennyire az első negyedben emelkedtek. A cső felének közelében eljutunk egy olyan ponthoz, ahol már nem bocsát ki hangot a cső. Hiába változtattuk a melegítés idejét, illetve teljesítményét, nem keletkezett hang a Rijke-csőben, ekkor a gáznyomás és a hőátadás ellentétes fázisban vannak egymáshoz képest [3].

Ha a hangkibocsátást a gázgő teljesítményének függvényében jellemezzük, akkor küszöbszerű viselkedést tapasztaltunk. Túlzottan kis teljesítmény esetén egyik cső sem szólalt meg. Próbálkoztunk gyertyalánggal, illetve borszeszgő lángjával megszólaltatni a csöveket, de ez nem sikerült; valószínűleg azért, mert nem tudták kellőképpen felmelegíteni a rácsot. Ha növeltük a gázgő teljesítményét, akkor már megszólaltak a csövek.

Az alumíniumcső körülbelül 150 W teljesítmény felett bocsátott ki hangot. A teljesítményt és a melegítés idejét külön-külön fokozatosan növelve eljutunk egy optimális ponthoz, ahol a leghosszabb ideig hallható a csőben keletkező hang. Ez a csőtől és a rács-helyzettől függően 300–500 W közötti teljesítményt jelent. Ha még tovább növelem a teljesítményt, akkor egy idő után nemcsak csökken a hang hossza, hanem teljesen megszűnik a hangkibocsátás. Ennek oka két dolog is lehet: egyfelől a nagy gázgő-teljesítmény maga után vonja a csőben áramló levegő sebességének növekedését, ami akadályozza a hanghullámok kialakulását, másrészt a túl nagy teljesítményű láng egyszerűen szétolvashatja a rácsot, ezáltal megszűnik a hangot keltő „energiapumpa”.

Vízszintes helyzetű cső

Ha a csövet vízszintes helyzetbe fordítjuk és így melegítjük a rácsot, akkor alapesetben (külön légáramoltatás nélkül) nem keletkezik hang, hiszen nincs a levegőnek természetes konvekciós áramlása, (kéményhatás), ezért nyomásfluktuáció sem alakul ki. Ekkor semmilyen rács-helyzet és semekkora égőteliesség esetén sem bocsát ki hangot a cső. Más a helyzet, ha külön légáramlást biztosítok a csőben, például egy porszívó segítségével. Ekkor már keletkezik hang, még hozzá nagyjából hasonlóan ahhoz, ahogy a cső függőleges helyzetben viselkedik.

A porszívó szívási teljesítményét úgy számítottuk ki, hogy felfújtunk egy nagyobb (kb. 50 literes) műanyag zacskót, majd rövid ideig kiszívtuk belőle a levegő egy részét. A szívási teljesítményt ($\Delta m/\Delta t$) a gáztörvényből kaptuk:

$$\Delta m = \frac{p \cdot M \cdot \Delta V}{R \cdot T},$$

ahol T a gáz abszolút hőmérsékletét, p a levegő nyomását, M a moláris tömegét, ΔV a levegő térfogatának megváltozását jelenti, R pedig az univerzális gázállandó. Feltételeztük, hogy a nyomás közel állandó, mivel csak kevés levegőt szívunk ki; azaz elég volt a zacskó

kó térfogatnak megváltozását mérni. (A nyomást 10^5 Pa-nak, a hőmérsékletet 293 K-nek vettük.) Ebből a porszívó szívási teljesítményére 0,9 g/s adódott.

Az $x = L/4$ helyzet közelében van a rács optimális helyzete, és az $x > L/2$ rács-helyzet esetén nem tapasztaltunk hangot. Sajnos a porszívó szívási teljesítményét nem tudtuk megfelelően szabályozni, ezért azt nem tudjuk megmondani, hogy mekkora minimális légáram-intenzitás esetén szólal meg a Rijke-cső, illetve mekkora az a maximális légáram-intenzitás aminél még keletkezik hang a csőben. Az biztos, hogy itt is van küszöbhatás. Ezt úgy tudtuk demonstrálni, hogy állandó értékű égőteliesség esetén a porszívó csövet távolabb vittük a Rijke-cső szájától, majd fokozatosan közelítettünk a porszívóval a Rijke-cső felé a kísérletek során, így a Rijke-csőben átáramló levegő mennyisége is fokozatosan növekedett. A cső kezdetben nem bocsátott ki hangot, de egy idő után már elegendő volt a légáram, és megszólalt a Rijke-cső.

Termoakusztikus oszcilláció

A termoakusztika szerint a hanghullám a hőterjedés során alakul ki a *szonikusan indukált hőmérsékleti gradiens* következtében. A gázmolekulák a cső hidegebb vége felé gyorsulnak, ezáltal a tubus fűtött végénél a relatív gáznyomás lecsökken, újabb gázrészecskék gyorsulnak a fűtött csővég felé, ahol feltöltik az alacsonyabb nyomású térfogatrészt. Itt a gáz újra felmelegszik, majd az egész folyamat kezdődik előlről. A gázmolekulák felgyorsulása és lelassulása az időben szinuszosan történik, végeredményül egy önfenntartó szinuszos longitudinális gáznyomás-oszcilláció jön létre. A Rijke-csőben keletkező állóhullámok esetén a kitérésnek duzzadóhelye van a cső mindkét végénél, azaz a cső hossza a hullámhossz felének egész számú többszöröse [2]:

$$L = \frac{\lambda}{2} \cdot n \text{ és } n = 1, 2, 3, \dots$$

A kialakuló hangrezgés f frekvenciája:

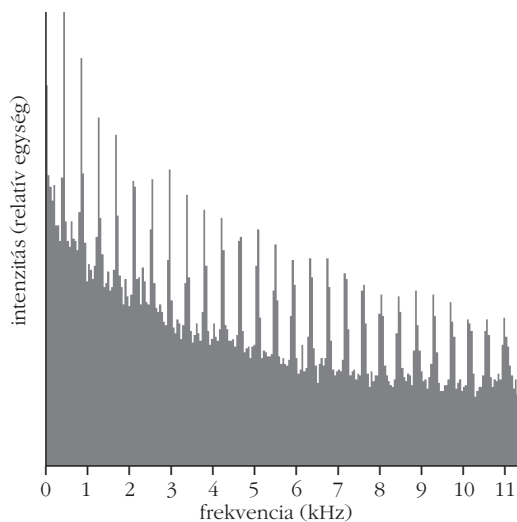
$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{c}{2 \cdot L} \cdot n,$$

ahol n a harmonikusok száma ($n = 1$ -et nevezzük alapharmonikusnak), c a közegbeli hangsebesség.

Láthatjuk, hogy a frekvencia függ a harmonikusok számától, a közegbeli hangsebességtől és a cső hosszától. A tubus hosszának csökkenésével az alapharmonikus és a felharmonikusok hullámhosszai is csökkenek (állandó gázbeli hangsebesség esetén).

Valójában a hangsebesség nem állandó, mivel a hőmérséklet és a nyomás is folytonosan változik. A cső által kibocsátott hang frekvenciaspektrumát Audacity 1.3 Beta (freeware = szabadon letölthető) programmal vizsgáltuk (5. ábra).

Az üvegcső legerőteljesebben megszólaló frekvenciája 512 Hz, amely nem esik messze az „elméleti alapharmonikus” (460 Hz) frekvenciájától. A rézcső



5. ábra. A részcső által kibocsátott hang frekvenciaspektruma

esetén az alapharmonikus mért értéke 453 Hz, számított érték 329 Hz; az alumíniumcső esetén a mért frekvencia 232 Hz, a számított érték 228 Hz. Látható, hogy az alumíniumcsőnél nagyon jól közelít egymáshoz a mért és a számított alapharmonikus érték. A két kisebbik cső esetén az eltérést valószínűleg az okozta, hogy ezek a csövek hamarabb felforrósodtak, ezért a hangsebesség jelentősen megváltozott.

Összegzés

A cikkben Rijke-csővel végzett termoakusztikus projektfeladat eredményeit mutattam be. A csővel végzett kísérleteket csoportmunkában, projektszerűen oldottuk meg. Alapvetően olcsó, minden iskolában megtalálható eszközöket használtunk, amelyek nem voltak meg a mi iskolánkban, kölcsönkértük, így ez nem okozott extra kiadásokat.

ÜSTÖKÖS AZ ASZTALON

– Hogyan „főzzünk” csillagászati demonstrációs eszközöket?

Kopasz Katalin, Papp Katalin, Szabó M. Gyula, Szalai Tamás
SZTE-TTIK Kísérleti Fizikai Tanszék

Az alábbi válogatás az 52. Országos Középiskolai Fizikatanári Ankét és Eszközbemutató, Kaposváron tartott műhelyfoglalkozás alapján készült. Az ott bemutatott csillagászati demonstrációs eszközöket a bemutatóhelyük, tanítási alkalmazásuk szerint csoportosítottuk. A működő modellek, kísérletek társíthatók az Eötvös Loránd Fizikai Társulat Csongrád Megyei Csoportja és az SZTE-TTIK Fizikus Tanszékcsoporthoz, de iskolán kívüli tanulói aktivitásokhoz, bemutatókhoz, de iskolán belüli alkalmazásuk is lehetséges.

A tanulóknak nemcsak a termoakusztikai ismereteik bővültek, hanem a természettudományos gondolkodásuk, problémalátó és -megoldó képességük is fejlődött. A természettudományos kompetenciák mellett a szociális jellegű (team-foglalkozás, feladatelosztás, eszközök megosztása stb.) készségeik is fejlődtek, amit mindenképpen hasznosnak ítélek a jövő szempontjából. A gázzal melegített Rijke-cső vizsgálatát projektünk első lépcsőfokának tekinthetjük. A következő lépésben szeretnénk pontosabb adatokat kapni úgy, hogy építünk egy elektromosan fűtött Rijke-csővet.

A projektszemléletű oktatás új lehetőséget teremt az ismeretátadásban, a kísérletezésen alapuló tanulásban, valamint a csoportos tanulás módszereinek kialakításában. A kollégák számára bátran ajánlom, hogy próbálják ki ezeket, vagy szervezzenek hasonló termoakusztikai kísérleteket.

Köszönetnyilvánítás

Az írás a Szegedi Tudományegyetem Természettudományi és Informatikai Karán Fizika PhD-program (*A közép- és a felsőfokú fizika oktatásának fejlesztésére irányuló kutatások*) keretében készült. Külön köszönetem szeretném kifejezni a témavezetőnek, Papp Katalin tanárnőnek, aki hasznos információkkal és adatokkal segített a cikk megírásában, illetve a hiányzó mérőműszerek beszerzésében.

Irodalom

1. B. 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, Part A* 41 (2002) 245–262.
2. D. Fahey: Thermoacoustic Oscillations. *Wave Motion and Optics* (2006) Spring.
3. S. M. Sarpotdar, N. Ananthkrishnan, S. D. Sharma: The Rijke Tube – A Thermo-acoustic Device. *Resonance* (2003) January, 59–71.
4. Rocard jelentés: *Science Education NOW: A renewed Pedagogy for the Future of Europe*. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2007.

Fizikátörténeti kiállítás a víztoronyban

A szegedi Szent István téren áll a 2006-ban felújított víztorony, az „Öreg hölgy”. Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat Csongrád Megyei Csoportjának köszönhetően a víztorony hetedik emeletén helyet kapott egy állandó kiállítás, amelynek anyagát a szegedi középiskolák és az egyetem szertáráiból származó, 100–120 éves kísérleti eszközök alkotják. A víztorony látogatói számára előzetes egyeztetés alapján lehetőség van rendhagyó fizikaórák tartására is, ahol az érdeklődők működés