

TERMOAKUSZTIKUS HANGHATÁS VIZSGÁLATA RIJKE-CSŐ SEGÍTSÉGÉVEL

Beke Tamás

Nagyasszonyunk Katolikus Általános Iskola és Gimnázium, Kalocsa

Iskolánkban néhány évvel ezelőtt elindítottunk egy termoakusztikához kapcsolódó projektfeladatot, amelyben a gimnazista diákok megismerkedtek a termoakusztika alapfogalmaival, és méréseket végeztek különböző Rijke-csővel. A termoakusztikus projektben az alapfogalmak megértésére fektettük a hangsúlyt; csak néhány képletet használtunk, olyanokat, amelyek a középiskolai fizika tanítás során is előkerülnek. A projektfeladat néhány részletét már bemutattam [1]; itt csak azokat a részeket írom le újra, amelyek a folyamat megértéséhez szükségesek.

Mivel foglalkozik a termoakusztika?

A termoakusztika a hő hatására létrejövő hanghatást vizsgálja; a termoakusztika fontos szerepet játszik számos technikai alkalmazásban [2].

A Rijke-cső egy mindkét végén nyitott cső, amelynek belsejében egy fémrácsot helyeznek el. Ha a rácsot felmelegítjük, akkor bizonyos esetekben a cső hangot bocsát ki. A Rijke-cső az egyik legegyszerűbb termoakusztikus eszköz [3].

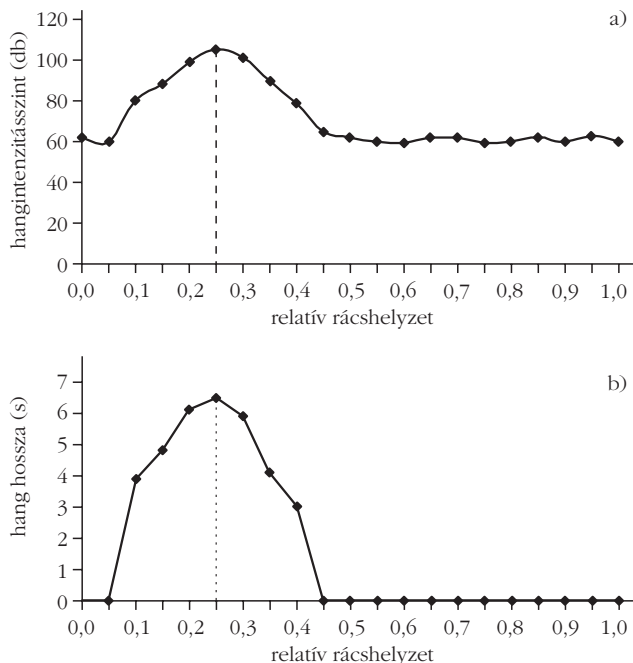
Termoakusztikai instabilitásnak nevezzük, ha egy termodinamikai rendszerben a nyomás oszcillációja párosul az egyenetlen hőátadással; a fűtött rendszerben a kialakuló hang olyan oszcilláló hőátadást eredményez, ami a hangrezgéseket felerősíti. Ha a termikus rendszer által kibocsátott hő függ a nyomás és a rendszerben áramló gáz sebességének fluktuációjától, akkor egy visszacsatolási hurok jön létre, ami „destabilizálhatja” a rendszert. A Rijke-cső esetében a sebes-

ség és a hőmérséklet fluktuációja játszik szerepet a termoakusztikus instabilitás kialakulásában.

A Rijke-csőekben alapvetően két különböző típusú fűtést szoktak alkalmazni: gázlángos vagy elektromos fűtést. A gázlángos fűtés megvalósítása sokkal egyszerűbb, viszont kevésbé kontrollálható; az elektromos fűtés ezzel szemben nehezebben megvalósítható, de jobban szabályozható. A dolgozat célja a Rijke-csővel végzett termoakusztikus kísérletek népszerűsítése, ezért most csak a gázfűtésű Rijke-csővel foglalkozom. A mérések során különböző Rijke-csővel dolgoztunk. Alumínium-, acél-, réz- és üvegcsőket is használtunk; egy-egy tanulói csoport vizsgálta az egyes csövek viselkedését.

A mérésorozat

A Rijke-csővek alapesetben függőleges helyzetben voltak. (A következőkben az L hosszúságú Rijke-cső hosszanti tengelyét x tengelynek nevezzük. Az $x = 0$ a cső alját, az $x = L$ a cső tetejét jelenti.) Egy adott cső esetén először a cső aljánál helyeztük el a rácsot, majd adott teljesítménnyel adott ideig melegítettük a rácsot, ezután kihúztuk a gázégőt és figyeltük, hogy keletkezik-e hang. A továbbiakban a melegítés idejét növeltük (körülbelül másodperces ugrásokkal), majd ezt követően növeltük a gázégő teljesítményét is. Ha egy adott rácshelyezetnél megvizsgáltuk a különböző fűtőteljesítményekhez és fűtési időkhöz tartozó eseteket, akkor egy kicsivel feljebb toltuk a rácsot és előlről kezdtük a tesztelést.

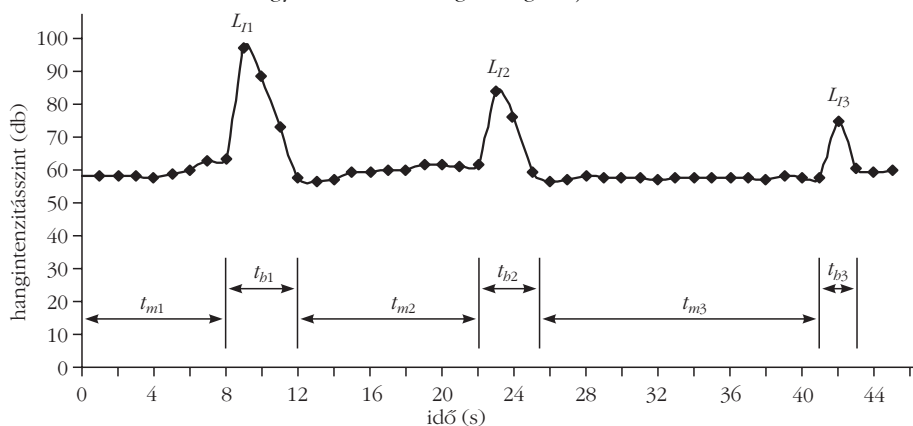


1. *ábra.* A relatív rácshelyzet $x_r/L = 0,25$ esetén lesz a hangintenzitásnak és a kibocsátott hang hosszának is maximuma. a) Hangintenzitás a relatív rácshelyzet függvényében. b) Kibocsátott hang hossza a relatív rácshelyzet függvényében. (A 470 mm-es rézcsőben az égőtelteljesítmény mintegy 350 W volt. A körülbelül 60 dB-es hangintenzitás az alapszintet felelt meg.)

A kísérletek során több, különböző méretű, anyagú és „szövésű” dróthálót is kipróbáltunk. Legjobban egy „közepesen sűrű szövésű” rácst vált be a kísérleteinkhez, amely magas olvadáspontú acéldrótokból állt. Ez a rácst általában jó néhány melegítést is kibírt károsodás nélkül, míg a többi rácst, amelyek másfajta acélból készültek, sokkal gyakrabban „szétégték”, elrepedeztek.

A rácst helyzetét tekintve a függőleges helyzetű cső alsó végétől indultunk és minden mérésorozat után fokozatosan egyre feljebb helyeztük el a rácst (köriből 1-2 cm-es ugrásokkal). A kibocsátott hang hossza és intenzitása is fokozatosan nőtt, amíg el nem értünk a cső negyedrézének közelébe. Az $x_r = L/4$ rácshelyzet körül található mind a hangintenzitás,

2. *ábra.* A kibocsátott hang intenzitása és hossza is csökken, ha nem hagyjuk visszahűlni a csövet. A rácst a 400 mm-es üvegcső negyedrézénél helyezkedett el, az égőtelteljesítmény körülbelül 270 W volt. (Ebben az esetben az egyik kísérlet után rögtön végrehajtottuk a következő mérést.)



mind a hanghossz maximuma (1. *ábra*). A 60 dB-es hangintenzitás az „alapszintet” felelt meg, ugyanis a gázegőnek és a konvekciós áramlásnak is van hangja. Ha a Rijke-cső megszólalt, akkor a hangintenzitás szint legalább körülbelül 80 dB-re emelkedett, de gyakran 100 dB feletti értékeket is mértünk.

A cső visszahűtésének szerepe

Amikor azonos égőtelteljesítmény mellett egy határon túl növeljük a melegítés t_m időtartamát és a mérések közben nem hagyjuk kihűlni a Rijke-csövet, akkor a kibocsátott hang L_i intenzitás szintje és a hang t_b időtartama is csökken (2. *ábra*). A cső belseje ilyenkor egyre forróbb lesz, ezért egyre kisebb a hőmérsékletkülönbség a rácst és a cső között. Mivel csökken a köztük lévő hőmérsékletkülönbség, ezért a Newton-féle hőtáradási törvény értelmében csökken a rácst és a csőben áramló levegő közötti hőtáradás.

Ha egy adott rácshelyzet esetében a cső hangot bocsát ki, és ezután még tovább növeljük a rácst fűtőtelteljesítményét, akkor egy idő után csökken a hanghossz időtartama, mivel a cső egyre melegebb lesz, és így csökken a rácst és a cső közötti hőmérsékletkülönbség. A cső felforrósodása jelentősen befolyásolta a kapott értékeket, ezért a kísérletekben minden mérés után vártunk, hogy a rácst és a cső nagyjából szobahőmérsékletre visszahűljön.

Hangkibocsátás a gázegő teljesítményének függvényében

Függőleges Rijke-cső, alsó rácshelyzet

A fűtőtelteljesítményt és a melegítés idejét külön-külön fokozatosan növelve egy optimális ponthoz jutunk, ahol a leghosszabb ideig hallható a csőben keletkező hang. Még tovább növelve a teljesítményt – egy idő után – nem csupán csökkent a hang hossza, hanem teljesen megszűnt a hangkibocsátás. E jelenség oka több is lehet: egyfelől a nagy gázegő-teljesítmény maga után vonja a csőben áramló levegő sebességének növekedését, az áramlás akár turbulenssé is válhat, ez akadályozza a hanghullámok kialakulását, másrészt a „túl nagy” teljesítményű láng szétolvasztja a rácst, ezáltal megszűnik a hangot keltő „energiaforrás”.

Ha a rácst fokozatosan toltuk felfelé, a cső negyed része és a fele közé helyeztük (azaz $L/4 < x_r < L/2$), akkor fokozatosan csökkent a kibocsátott hang intenzitása és hossza is (1. *ábra*). A cső felének közelében eljutunk egy olyan ponthoz, ahol már nincs hangkibocsátás.

Függőleges Rijke-cső, felső rácshelyzet

A kutatók egy része azt állítja, hogy felső rácshelyzet esetén (azaz $x_r > L/2$) nem keletkezhet hang a Rijke-csőben. A legtöbb cső esetén tényleg nem tapasztaltunk hanghatást felső rácspozíció esetén. A 768 mm hosszúságú alumíniumcső esetén viszont néhány esetben mégis keletkezett hang, annak ellenére, hogy a rács a cső felső felében – $x_r = 0,65L$ környékén – helyezkedett el. Előfordult olyan eset, amikor csak halkán lehetett hallani a kibocsátott hangot (körülbelül 75 dB volt az intenzitás szint), de néhány esetben a cső nagyobb intenzitású (körülbelül 90 dB), rövid ideig tartó (körülbelül 1,5-2,5 s) hangot bocsátott ki. Sajnos a jelenség nem volt jól reprodukálható, csak néhányszor sikerült megszólaltatni a csövet, de a legtöbb esetben nem. Szerencsére számítógéppel rögzítettük, ezért később elemezni tudtuk a (néha) megszólaló hangot.

Vízszintes helyzetű Rijke-cső

Vízszintes csőhelyzetben, alapesetben – külön légáramoltatás nélkül – nem keletkezik hang, mivel a levegőnek nincs természetes konvekciós áramlása, úgy is mondhatjuk, hogy nem működik a „kéményhatás”, nyomásoszcilláció sem alakul ki. Más a helyzet, ha – például egy porszívó segítségével – külön légáramlást biztosítunk a csőben. Ekkor már keletkezhet hang, méghozzá nagyjából hasonlóan ahhoz, ahogy a cső függőlegesen helyezkedik. Az $x_r = L/4$ hely közelében van a rács optimális helyzete.

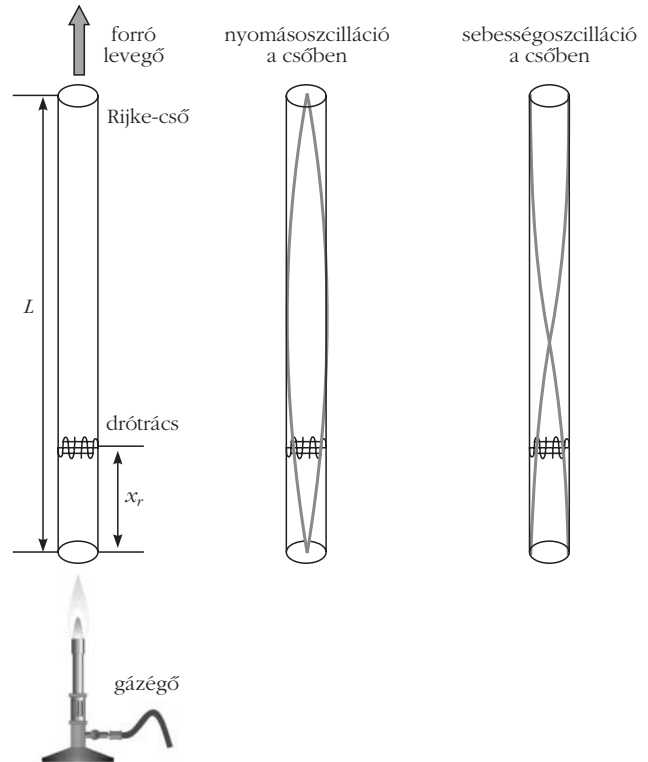
Vízszintes csőhelyzet esetén is tapasztaltuk, hogy még az optimális ($x_r = L/4$) rácshelyzet esetén is jelentkezik a hőteljesítményben a felső küszöbhatás. Ha a gázégő teljesítményét fokozatosan növeltük, miközben a légáram-intenzitás maximális volt, egy bizonyos érték felett már nem szólalt meg a Rijke-cső. Ha még ezután is tovább növeltük a teljesítményt, akkor egyszerűen szétolvadtak a rácsok.

A tapasztalt jelenségek magyarázata

Eddigiekben bemutattam a gázlángos kísérleteink eredményeit; az alábbiakban megpróbálom egyszerű, akár középiskolai szinten is megérthető magyarázatot adni a megfigyelt jelenségekre.

Állóhullámok a csőben

Egy mindkét végén nyitott csőben energiaközlés hatására akusztikus állóhullámok alakulhatnak ki. (Az állóhullám két, ellentétes irányban haladó longitudinális hanghullám eredője.) A gáz a cső minden részén váltakozva összenyomódik és kitágul. Álló hanghullámok kelthetők a csőben olyan energiaforrás segítségével, amelynek teljesítményét a hang modulálni képes. Ha az energiaközlés megszűnik, akkor az előzőleg keltett hang is előbb-utóbb elhal, mivel



3. ábra. A Rijke-csőben az akusztikus nyomás és sebesség szemléltetése (alapharmonikus eset).

súrlódás lép fel a cső falánál és energia távozik a cső nyitott végénél is.

A Rijke-csőben keletkező állóhullámok esetén a p' nyomásfluktuációnak csomópontja van a cső végénél, ugyanitt az u' sebességfluktuációnak duzzadóhelye van; a nyomásfluktuációnak duzzadóhelye van a cső közepénél, ugyanitt a sebességfluktuációnak csomópontja van (3. ábra). A fűtött rács közelében az akusztikus nyomásban, a sebességben és a hőmérsékletben is van valamekkora ugrásszerű változás, de ezt most – az egyszerűség kedvéért – elhanyagoljuk.

A csövek által kibocsátott hang frekvenciaspektrumát Audacity programmal vizsgáltuk. A csőben keletkező hang függ a Rijke-cső L hosszától. A hullámtan szerint a cső hossza az l hullámhossz felének egész számú többszöröse. A kialakuló hangrezgés frekvenciája:

$$f = \frac{v_b}{\lambda} = \frac{v_b}{2L} n, \quad (1)$$

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

A Rijke-csőben a hangsebesség függ a hőmérséklettől:

$$v_b = \sqrt{\left(\frac{c_p}{c_v} - 1\right) c_p T}, \quad (2)$$

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

Az egyszerűség kedvéért feltételezhetjük, hogy az akusztikus módusok (sajátrezgések) függetlenek egymástól. A valóságban lehet bizonyos csatolás a sajátrezgések között.

A függőleges csőben a levegő mozgása két részből tevődik össze. A gázláng hatására felforrósodott levegő „kitágul”, sűrűsége csökken és felfelé kezd áramlani (konvekciós áramlás, amit „kéményhatásnak” is szoktak nevezni). Ehhez járul még a kialakuló longitudinális hullám; a konvekciós áramlásra egy állóhullám szuperponálódik.

Egy fél vibrációs ciklusban a levegő a cső mindkét végéből a belsejébe áramlik, amíg a nyomás el nem éri a maximumot. A következő félciklusban a levegő kifelé áramlik egészen addig, amíg a nyomás el nem éri a minimumot. A levegő áthalad az előzőleg felfűtött fémhálón és a felforrósodott hálótól tovább nő (nöhet) a levegő nyomása. A periódus első felében a levegő felfelé áramlásánál a háló már forró, de a körülötte lévő levegő még nem. Mielőtt a nyomás elérné a maximális értéket az áramló hidegebb levegő egy része érintkezésbe kerül a hálótól és nyomása megnövekszik, ez felerősíti a vibrációt. A következő félciklusban, amikor a nyomás csökken, a rács feletti meleg levegő lefelé áramlik, keresztül a hálón, amely még forró, ezért a nyomásban alig történik változás, gyakorlatilag szinte nincs hőátadás, vagy csak kisebb értékű [4]. Az egész akusztikus ciklust tekintve a rendszer visszacsatolása pozitív, felerősítő állóhullámot kapunk. A gáz a cső minden részén változva összenyomódik és kitágul, longitudinális levegőoszilláció, azaz hang alakul ki.

A keletkezett hang hatására a rácson keresztüláramló levegő sebessége oszcillál, a rács hőmérséklete is oszcillál, ami a környező levegő nyomásának oszcillációját eredményezi, így a hanghatás fennmarad, de csak addig, amíg a rendszerből folyamatosan távozó energia miatt a folyamat le nem áll. Az energiaveszteségek miatt a hanghatás néhány másodperc múlva megszűnik.

A hőátadás a forró rács és az áramló levegő között az akusztikus ciklus egyik felében nem ugyanakkora, mint a ciklus másik felében [4]. A \dot{Q} hőteljesítményt két részre oszthatjuk, egy átlagos \dot{Q}_0 részre és egy időben változó \dot{Q}' részre, amelynek egy periódusidőre vett átlaga nulla:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_0 + \dot{Q}' \quad (3)$$

A csőben lévő p nyomás szintén két részre bontható:

$$p = p_0 + p' \quad (4)$$

ahol p_0 az átlagos nyomás, p' az időben változó komponens. A p' oszcillációs nyomás maximuma a cső középpontja közelében van, a cső nyitott végeinek közelében minimális az értéke, azaz p' értéke az $x = 0$, illetve az $x = L$ helynél közelítőleg zérus (3. ábra).

A csőben áramló részecskék u sebessége is két részből tevődik össze:

$$u = u_0 + u' \quad (5)$$

ahol u_0 az átlagos sebességet, u' pedig az időben változó részt jelöli.

Az akusztikus ciklus egyik felében u_0 és u' egyirányúak, és a hőforrás kapcsolatba kerül a friss hidegebb levegővel, ilyenkor a rács és az áramló levegő közötti hőközlés növekszik [4]. A ciklus másik felében a hőközlés csökken, mivel u_0 és u' ellentétes irányúak, így a légáramlás eredő sebessége csökken, kevesebb levegő áramlik át a rácson; ha az alapáramlás sebessége kisebb, mint u' , akkor a hőforrást körülveszi egy „előmelegített” légréteg, amely csökkenti a hőátadást a ciklus ezen felében.

Rayleigh-feltétel

Lord Rayleigh szerint, egy akusztikus ciklust tekintve, ha hőt közlünk ($\dot{Q}' > 0$) az összenyomási félciklusban ($p' > 0$); vagy hőt vonunk el ($\dot{Q}' < 0$) a tágulási félciklusban ($p' < 0$), akkor hanghullám keltethető, illetve tartható fenn [5]. Matematikai formában a Rayleigh-kritérium az I Rayleigh-integrállal fejezhető ki:

$$I = \frac{1}{T_c} \int_{t_0}^{t_0 + T_c} p' \dot{Q}' dt \quad (6)$$

ahol T_c a periódusidő, p' a hangnyomás, \dot{Q}' hőteljesítmény fluktuációja, t pedig az idő. (A középiskolások az egyszerűség kedvéért tekinthetnek az integrálra úgy, mint egy szummázásra, ahol a dt tulajdonképpen a nagyon-nagyon kicsi Δt időt jelenti.)

A csőben a gázláng által felforrósított rács nem egyenletesen melegíti a környezetét. A csőben áramló levegő periodikus mozgásának következtében a hőátadásban is periodikus jellegű fluktuáció figyelhető meg. Ha a hőforrás a cső alsó felében van, akkor – alapharmonikus esetén – a \dot{Q}' hőteljesítmény-fluktuáció és a csőben lévő p' gáznyomás-oszcilláció közel azonos fázisban van, a hőátadás fluktuációjának egy része erősíti a részecskék elmozdulását, hanghullámot generál (ekkor $I > 0$ az alapharmonikusra). Ellenkező esetben, ha a hőforrás a cső felső felében van, akkor – alapharmonikus esetén – \dot{Q}' és p' ellentétes fázisban vannak, azaz nem gerjesztődik hang (ekkor $I < 0$ az alapharmonikusra). Ha a hőforrást a cső közepéhez helyezzük, akkor elméletileg sem erősítés, sem gyengítés sincs a hullámban ($I = 0$), a gyakorlatban mi sem tapasztaltunk hanghatást.

A Rayleigh-kritérium szerint, ha $I \leq 0$, akkor vagy eleve nem is keletkezik hang, vagy, ha volt hang, akkor az gyengülni fog és megszűnik. A rendszerben ugyanis a veszteségeket (viszkózitás, hangsugárzás) is fedezni kell. Épp ez az oka annak, hogy a fűtésnek van egy küszöbteljesítménye, ami alatt a hang meg se szólal, pedig a fázisok „rendben” vannak és $I > 0$. Tehát csak egy küszöbérték felett számíthatunk hanghatásra, azaz, ha $I \geq I_{\text{küszöb}} > 0$.

Ha a dróthálót a függőleges cső felső felében helyezzük el, akkor – alapharmonikus esetén – a hőközlés és a nyomás oszcillációja ellentétes fázisban vannak egymáshoz képest. A felmelegített rács a nyomás csökkenésekor érintkezik az alulról bejövő hideg levegővel, vagyis épp ellentétes fázisban történik a gerjesztés, mint ahogy az alapharmonikus rezgés végbemegy. Ez azt jelenti, hogy a rendszer visszacsatolása negatív, a stacionárius feláramlás stabil marad. Ezért az alapharmonikus nem gerjesztődik, ha $x_r > L/2$. A felharmonikusok gerjesztésére viszont elméletileg van lehetőség, ezért „elméletileg” felső rács helyzetben is lehet hangkibocsátás. A „hangvesztések” arányosak a keletkező hang frekvenciájával, a magasabb harmonikusok gerjesztése ezért nehezebb. (Felső rács helyzet esetén tehát csak a felharmonikusok gerjesztése lehetséges, ami sokkal nehezebb, nekünk is csak néhány esetben sikerült. Felső rácspozícióban nehéz megtalálni azt a lángteljesítményt, amely valamelyik felharmonikust gerjeszti, de a rács még nem olvad szét.)

A küszöbhatás magyarázata

A kísérletek során több paraméter esetén is küszöbszerű viselkedést tapasztaltunk, azaz csak bizonyos paraméter-tartományokban sikerült a Rijke-csőveket megszólaltatni.

Küszöbhatás a rács helyzet esetén

A függőleges Rijke-cső legaljához helyezett, felmelegített rács esetén a cső nem bocsát ki hangot. Ha a rácsot fokozatosan egyre feljebb toljuk – és kellően nagy hőteljesítményt alkalmazunk –, akkor előbb-utóbb megszólal a cső. A cső negyedrésze tájékán van a hangintenzitás maximuma. Ha még feljebb toljuk a rácsot, akkor fokozatosan csökken a kibocsátott hang hossza és intenzitása is, a cső fele tájékán megszűnik a hanghatás. Tapasztalataink szerint, közelítőleg a $0,1L \leq x_r \leq 0,4L$ rácspozícióknál gerjeszthető az alapharmonikus (3. ábra). Ennek oka az lehet, hogy ebben a rácspozíció-tartományban a hőteljesítmény fluktuációja és a nyomás fluktuációja közel azonos fázisban van, így a rendszer visszacsatolása pozitív.

Küszöbhatás a rács átteresztőképessége esetén

Különböző átteresztőképességű rácsokat is kipróbáltunk a kísérletek során. Sem a nagyon kicsi, sem a nagyon nagy átteresztőképesség esetén sem tapasztaltunk hanghatást.

A drótháló átteresztőképessége hatással van a csőben a légáramlásra és a hőátadásra is. Ha nagy a drótrács átteresztőképessége – ami akkor fordul elő, ha kicsi a drótháló felülete, azaz ritka a drótháló szövése –, akkor nagy lehet a légáram intenzitása, de kicsi az a felület, ahol a levegő érintkezik a felfűtött dróttal, ezért a Newton-féle hőátadási törvény szerint kisebb mértékű a háló és az áramló levegő között a hőátadás. Ellenkező esetben, ha kicsi a drótrács átteresztőképessége (sűrű a drótháló szövése), akkor

kicsi a háló „szabad légáteresztő” felülete, ilyenkor a nagy rácsfelület miatt nagyobb mértékű lehetne a háló és az áramló levegő között a hőátadás, de a légáram intenzitása kicsi, ezért mégsem tud a háló elég energiát átadni a levegőnek. Ezek alapján sem a nagyon ritka, sem a nagyon sűrű szövésű dróthálók sem felelnek meg. (A kvantitatív eredmények most nem annyira fontosak, ebben a cikkben ugyanis csak a jelenségek megértésére koncentráltunk.)

Küszöbhatás a fűtési idő esetén

Ha olyan rácspozícióban vagyunk, ahol a cső gerjeszthető, és csak 1-2 másodpercig melegítjük a rácsot, majd a gázégőt visszahúzzuk, akkor a cső nem bocsát ki hangot. Ennek oka az, hogy ilyenkor a rács nem tudott kellően magas hőmérsékletűre melegedni, ezért nem tud elég energiát átadni a környező levegőnek. Tapasztalataink szerint legalább 3-4 másodperc melegítés szükséges a gerjesztéshez, és 5-10 másodperc melegítés esetén lesz a hangintenzitás szint a maximum környékén, mert ilyenkor a rács kellően felforrósodik, a csőben lévő levegő és a cső viszont még nem lesz annyira meleg, ezért nagy a hőmérséklet-különbség a rács és a környezete között, ami növeli a hőátadás mértékét. Ha a rácsot nagyon hosszú ideig melegítjük a csőben, majd visszahúzzuk a lángot, akkor nincs hangkibocsátás; ugyanis ebben az esetben gyakorlatilag az egész cső belsejében majdnem azonos a hőmérséklet, a rács nem tud energiát átadni a környezetének.

Küszöbhatás a fűtési teljesítmény esetén

Ha olyan rácspozícióban vagyunk, ahol a cső gerjeszthető, és nagyon alacsony a hőteljesítmény, akkor a cső nem szólal meg, mivel a rács nem tudott kellően magas hőmérsékletűre melegedni. A fűtőteljesítményt fokozatosan növelve eljutunk egy olyan küszöbértékhez, ahol a cső hangot bocsát ki. A rendszerbe bevitt energia ekkor már elegendő ahhoz, hogy a rendszerből távozó energiát pótolja. Ha fokozatosan növeljük a hőteljesítményt, akkor eljutunk egy olyan „tartományba”, ahol a kibocsátott hang hossza és intenzitása is nagyjából maximális, ha még tovább növeljük a fűtőteljesítményt, akkor a hang hossza és intenzitása is csökkenni kezd, majd eljutunk egy olyan pontra, ahol megszűnik a hanghatás. Ennek oka vagy az, hogy a nagy hőteljesítmény hatására az egész cső felforrósodik és nincs hőmérséklet különbség a rács és a környező levegő között; vagy egyszerűen elolvad a rács és megszűnik a hanghatást fenntartó „energiaforrás”.

Küszöbhatás a légáram-intenzitás esetén

Függőleges csőben, alsó rácspozíció esetén – ha kellően nagy a hőteljesítmény – a Rijke-cső megszólal. Ilyenkor a természetes konvekciós áramlás is elegendő a hanghatáshoz. Ha befedjük a cső száját, akkor a légáramlás megszűnik, a hanghatás is abbamarad. Vízszintes csőben külön légáramoltatás nélkül nincs hangkibocsátás. Ha a vízszintes csőben a változ-

tatható szívásteljesítményű porszívó segítségével fokozatosan növeljük a légáram intenzitását, akkor eljutunk egy olyan pontba, ahol a cső gerjesztődik. Ha tovább növeljük a légáram intenzitását, akkor egy darabig továbbra is gerjeszthető a cső, de elérkezünk egy olyan pontba, ahol megszűnik a hanghatás.

Függőleges cső esetén is jelentkezik ez a felső küszöb. Ha a függőleges Rijke-csőben felülről extra légáramot keltünk a porszívó segítségével, akkor a cső eleinte hangot bocsát ki; majd ha fokozatosan növeljük a légáram intenzitást, akkor a hang itt is megszűnik. Tehát a légáram-intenzitás esetében is van alsó és felső küszöbérték a hanghatás kiváltásában.

Ezen jelenségeknek az a közös magyarázata, hogy a hanghatás fenntartásához szükség van légáramra természetes, vagy mesterséges formában. Ha ez a légáram hiányzik, akkor hiába közlünk hőt a ráccsal, az csak a közvetlen környezetének tudja az energiát átadni. (Itt az egyszerűség kedvéért a hővezetés és a hőszugárzás hatását elhanyagoljuk.) A rács körül lévő levegő felmelegszik, de ezután a forró rács már nem tud több energiát a környező forró levegőnek átadni. A hang keltéséhez és fenntartásához folyamatos „energia-utánpótlásra” lenne szükség, mivel az állóhullám (ha kialakul) energiája csökken a sűrűdés és a csővégeken fellépő hangszugárzás következtében. Ha nincs légáram, akkor vagy nem is keletkezik hang, vagy ha előtte volt hanghatás, akkor az hamarosan megszűnik.

Ha a légáram-intenzitás értéke túl magas, akkor az áramlás sebessége jelentősen növekedhet, ami nem kedvez a hanghullámok kialakulásának. A hangkeltés tulajdonképpen egy „zavarkeltés”, ami a közeget ki-

mozdítja az „egyensúlyi állapotából”; ez lehet például nyomásváltozás, vagy sűrűségváltozás. Az erős áramlás „elsodorja” ezt a „zavart” [6].

Összegzés

A diákokkal gázfűtésű Rijke-csővek hanghatását vizsgáltuk kísérletileg. Méréseink alapján megállapítottuk, hogy a cső hangkibocsátását a cső geometriai paraméterein kívül a rács helyzete, áteresztőképessége, a rácsra jutó hőteljesítmény, a rács hőmérséklete, a csővön átáramló légáram intenzitása határozza meg. Ezek a tapasztalatok jó összhangban vannak a mások által kapott eredményekkel. A tapasztalt jelenségeket elméleti szempontból is elemeztük.

Köszönetnyilvánítás

Az írás az ELTE Fizika tanítása PhD-program keretében készült. Köszönetem szeretném kifejezni a témavezetőnek, *Bene Gyulának*, aki hasznos tanácsokkal segített a cikk megírásában.

Irodalom

1. Beke T.: Termoakusztikus projektfeladat Rijke-cső vizsgálatára. *Fizikai Szemle* 59/7-8 (2009) 253-257.
2. Beke T.: Termoakusztikai érdekességek. *Fizikai Szemle* 61/5 (2011) 165-169.
3. P. L. Rijke: Notiz über eine neue art, die luft in einer an beiden enden offenen Röhre in schwingungen zu versetzen. *Annalen der Physik* 107(1859) 339-343.
4. S. M. Sarpotdar, N. Ananthkrishnan, S. D. Sharma: The Rijke Tube – a Thermoacoustic Device. *Resonance* 8/1 (2003) 59-71.
5. Lord Rayleigh (J. W. Strutt): *The Theory of Sound* 2. (2nd ed.) Macmillan, London, 1896.
6. Bene Gy.: *Áramlások fizikája* (előadásjegyzet 8.) http://arpad.elte.hu/~bene/hidro/eloadas/8_eloadas/8_eloadas.html