

Termoakusztikus jelenségek vizsgálata projektfeladatban

Ph.D. értekezés

Beke Tamás

Témavezető: Dr. Papp Katalin
egyetemi docens

Fizika Doktori Iskola

Kísérleti Fizikai Tanszék
Szegedi Tudományegyetem
Természettudományi és Informatikai Kar

2011

Szeged

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés.....	3
2. A természettudományos tantárgyak oktatása	6
2.1. A természettudományok oktatási helyzete	6
2.2. A motiváció szerepe	9
2.3. Felsőfokú motiváció középfokon.....	10
2.4. A projektoktatás	12
2.5. A projektoktatás történeti előzményei, helye a mai pedagógiában.....	13
2.6. A projektoktatás értelmezése és gyakorlata.....	16
2.7. A projekttevékenységek megtervezése és végrehajtása	18
2.8. Egy példa a gyakorlatból: a pizza-projekt bemutatása.....	20
2.8.1. A projekt előkészítése, megszervezése és kivitelezése.....	20
2.8.2. A teljesítmények értékelése	22
2.9. A projektmódszer lehetőségei a természettudományok oktatásában	22
3. A termoakusztika alapfogalmai és a szakirodalom áttekintése	25
3.1. Termoakusztikai vizsgálatok	25
3.2. Sztochasztikus termoakusztikus folyamatok	29
3.3. A termoakusztikus folyamatok hasznosítása	31
4. Célkitűzések.....	34
5. A termoakusztikus projekt első állomása: gázzal fűtött Rijke csövek vizsgálata	36
5.1. Rayleigh feltétel	36
5.2. A termoakusztikus projekt	38
5.2.1 Az iskolai projekt	38
5.2.2. A Rijke cső megépítése.....	39
5.2.3. A mérés menete	42
5.3. A rácsok visszahűtésének szerepe.....	45
5.4. Küszöbhatás	45
5.5. Hangkibocsátás a gázégő teljesítményének függvényében	49
5.6. Vízszintes helyzetű Rijke cső	51
5.7. Ferde helyzetű cső.....	52
5.8. Termoakusztikus oszcilláció.....	52
5.9. Összegzés.....	57
6. Elektromosan fűtött Rijke cső vizsgálata	59
6.1. A mérési elrendezés	59
6.2. A mérés menete.....	63
6.3. A rendszer stabilitásának vizsgálata.....	64
6.4. A Rijke cső egyszerűsített modellje	69
6.4.1. A rendszer elemzése	71
6.4.2. A rácshoz tartozó feltételek.....	73
6.4.3. A rendszer gerjeszthetőségének határa.....	79
7. A Rijke cső továbbfejlesztett modellje	84
7.1. A hullámegyenlet megadása	84
7.2. A rendszer csillapítási mechanizmusának vizsgálata.....	87
7.3. A rendszerben fellépő hőátadási folyamatok elemzése.....	88
7.3.1. A hőteljesítmények kiszámítása	90
7.3.2. Hősugárzás	93
7.4. A számítási modell	94
7.5. A rendszer stabilitásának ellenőrzése.....	95
7.6. Hiszterézis.....	99
7.7. A rendszerben kialakuló hang frekvenciáinak eltolódása	100
7.8. Összegző megjegyzések	111

8. A projektmunka hatásainak vizsgálata.....	115
8.1. A termoakusztikus projekt eredményei és hatásai	115
8.2. A projektmunka hatásainak kérdőíves vizsgálata	120
9. Köszönetnyilvánítás	130
10. Felhasznált irodalom	131
11. Összegzés	137
12. Summary.....	142
13. Melléklet.....	147

1. Bevezetés

A XX. századot és a XXI. század első évtizedét tekintve a természettudományok területén történtek a legnagyobb változások és felfedezések, elég, ha az atomenergia katonai, illetve békés célú felhasználására gondolunk. A természettudományos diszciplínákon belül a fizikában és az informatikában óriási léptékű fejlődés következett be, ami jelenleg is tart (pl. az elektronika, majd a mikroelektronika megjelenése és rohamos léptékű terjedése a technikai élet minden szegmensében, a számítógépek tömeges elterjedése, információs-kommunikációs hálózatok kialakulása, stb.). Természetesen a biológiában (élettan), a kémiában, vagy a földtudományokban is előrelépés történt, és más tudományterületek is fejlődnek; mégis bátran kijelenthetjük, hogy a fizika és az informatika gyarapodott a legtöbb újdonsággal. A XXI. század embere magától értetődőnek veszi az őt körülvevő technikai környezet (pl. mobiltelefon, digitális fényképezőgép, GPS navigáció) használatát, igazából csak az tűnik fel neki, ha valamelyik eszköz nem működik megfelelően.

Ezek után azt gondolhatnánk, hogy a természettudományok megbecsültségnek örvendenek a lakosság körében, hiszen szinte mindenki élvezi, vagy legalább hasznosítja a vívmányait. Sajnos a helyzet koránt sincs így. Sokan egyszerűen nem gondolják végig, hogy mit is köszönhetnek a természettudományos diszciplínáknak, ezért nem is tartják fontosnak ezeket a tudományterületeket. Talán csak a biológia kivétel ez alól, mert az általában eszébe jut mindenkinek, hogy ő is egy élőlény, ezért a biológia törvényszerűségei rá is vonatkoznak. Az informatikának annyi előnye van, hogy személyi számítógépet gyakorlatilag mindenki használ és a tudatukban ez összekapcsolódik az adott tudományággal. A fizika és a kémia esetén viszont mintha egyszerűen nem akarnák az emberek tudomásul venni, hogy ezen ismeretek nélkül a mai értelemben vett modern, civilizált élet nem is létezhetne.

Ez az ambivalens helyzet megmutatkozik a természettudományos tantárgyak iskolai oktatásában is. Ha megvizsgáljuk a tanulók átlageredményeit, akkor nagy valószínűséggel a fizika és a kémia lesz a két sereghajtó a legtöbb iskola legtöbb osztályában. Természetesen vannak üdítő kivételek, de sajnos hosszú évek, sőt évtizedek óta ez a szomorú helyzet. Ha csak arról lenne szó, hogy ez a két legnehezebb tantárgy, ezért ezekből kicsit rosszabbak az átlageredmények, az még nem lenne probléma, de általában óriási szakadék tátong a két tantárgy és a többi eredményei között. Egy átlagos osztály – akár az általános, akár a középiskolában – úgy fest, hogy van néhány érdeklődő tanuló, aki valamilyen okból tanulja és tudja ezeket a tantárgyakat, van egy viszonylag szűk réteg, akik legalább néha motiválhatók, és sajnos van egy széles réteg, akiket szinte alig lehet bevonni az adott szaktárgyak tanítási-tanulási folyamatába.

Miért van ez így? Ezt nehéz lenne röviden megválaszolni, de az biztos, hogy az utóbbi két évtizedben nagyon jelentősen megváltozott a társadalom, megváltozott az oktatáspolitikai, megváltozott az egész oktatás, de valahogy az oktatási módszerek nem idomultak eléggé ezekhez a változásokhoz. A pedagógusok többsége alapvetően ma is úgy tanít, mint ahogyan azt 100 esztendővel ezelőtt elődeink tették. Szerencsésebb esetben használ néhány modern technikai eszközt (pl. projektor, digitális tábla), de a módszer maradt a régi: frontális osztálymunka. A tanár kiáll előre az osztályterem közepére, és a diákoknak rá kellene figyelniük és a tudását átvenni. Ez a

módszer – nevezetesen, hogy a tanár a tudás egyetlen forrása, a tanulóknak pedig elegendő ebből a forrásból meríteni – hosszú évszázadokon keresztül működött, és elméletileg működhetne ma is, de valamiért még sincs így.

A tudás alapú társadalom kialakításában nélkülözhetetlen az állampolgárok természettudományos műveltsége, e műveltség nélkül nem képzelhető el hosszú távon sikeres gazdasági-társadalmi berendezkedés. A természettudományos műveltség alapjainak lerakása értelemszerűen a természettudományok iskolai oktatásának feladata. Az Európai Unió szinte minden tagállamában vannak problémák természettudományos tantárgyak oktatásával kapcsolatban, de hazánkban a természettudományos tantárgyak oktatási problémái kritikus szintre emelkedtek. A tanulók közül kevesen érdeklődnek a természettudományok iránt, ezért kevesen választják ezeket a tantárgyakat a középszintű érettségien, főleg fizikából és kémiából. (A biológia és a földrajz ebből a szempontból kedvezőbb helyzetben van.) Az emeltszintű érettségire jelentkezők száma még ettől is sokkal kevesebb, mind fizikából, mind kémiából. (Szerencsére a 2009/2010-es tanévben csekély mértékű emelkedés volt tapasztalható a természettudományos tantárgyak érettségi vizsgájára emelt szinten jelentkezők számában.) A felsőoktatási intézmények jelentős része eddig egyszerűen nem merete megkövetelni e tantárgyakból az emelt szintű érettségit, mert attól tartott, hogy nem lesz elegendő számú hallgatója. Gyakorlatilag szinte bárkit felvesznek a természettudományos szakokra, akinek van érettségije; ez maga után vonja, hogy csökken a felsőoktatás színvonala és/vagy nagy a lemorzsolódás az ilyen irányú szakokon. A tanárképzés tekintetében még aggasztóbb a helyzet. A bolognai rendszerre való átállás sem kedvezett a tanárképzésnek, többen úgy vélik, hogy itt érdemes lenne visszatérni az osztatlan ciklusú képzéshez. A legdrámaibb helyzet a fizika és kémia tanári mesterszakra jelentkezők számában mutatkozik meg. Alig-alig van jelentkező ezekre a szakokra, lassan nem lesz utánpótlás az oktatási rendszerből távozó, nyugdíjba vonuló fizika és kémia szakos tanároknak.

A természettudományos tantárgyak oktatási problémáira nem létezik egyszerű, könnyű és gyors megoldás. Az Országos Köznevelési Tanács (OKNT), illetve a „Bölcsék Tanácsa” kidolgozott egy javaslat csomagot, amelyek remélhetőleg orvosolják a problémákat. A megvalósításukhoz azonban minimum miniszteri rendeletek, de némelyikhez törvénymódosítások is szükségesek. Ezért bármennyire is kívánatos lenne e javaslatok mielőbbi bevezetése és megvalósítása, be kell látni, hogy ez elsősorban nem rajtunk múlik. Mit tehetünk akkor mi, egyszerű pedagógusok? A ránk bízott tanulókkal meg kell értetnünk, hogy miért is fontos tudni a természettudományokat, sőt meg kell szerettetnünk az adott szaktárgyat. Ha sikerül felkelteni a diákok érdeklődését, akkor lesz majd elég fizika vagy kémia szakos tanár, és lesz majd elegendő műszaki szakemberünk, mérnökünk is.

Természetesen, ha korlátok között is, de nekünk pedagógusoknak is van döntési szabadságunk. Dönthetünk arról, hogyan tanítsunk. A tananyag nagyobb része adott, de azért itt is van valamekkora mozgástér. A legfőbb szabadságunk azonban az ismeretek átadásának formájában van. Lehet, hogy nem mindig találó kifejezés az ismeret „átadásáról” beszélni, mert a legmegfelelőbb az lenne, ha nem a pedagógus adná át az ismeretet a diáknak, hanem a tanuló maga

szerezne meg az ismeretet, tanári irányítással, segítséggel. Ha sikerül ezt elérni, akkor nyert ügyünk van, akár a fizikáról, akár a kémiáról legyen is szó, hogy csak a két legnehezebb helyzetben lévő természettudományos tantárgyat említsem; de alapjaiban véve ez lenne az oktatás modern pedagógiai felfogásának lényege. Nincs tehát varázsszer. Nem létezik egyetlen és helyes nevelési-oktatási módszer. Léteznek módszerek, amelyeket a megfelelő helyen, időben és arányban alkalmazva van esély arra, hogy (részben) elérjük pedagógiai céljainkat. A dolgozatomban egy ilyen módszert, a projektmódszert szeretném bemutatni. Az iskolánkban több éve sikeresen alkalmazzuk a tanítási-tanulási folyamat színesebbé tételére.

Az információs technológia hatalmas léptékű fejlődése hatással van az iskolai oktató munkára is. Az informatika alkalmas lehet arra a szerepre, hogy az oktatási rendszerben egyfajta kapocsként működjön egyfelől a tantárgyak között, másfelől a gyermekek és a pedagógusok között is; segítségével olyan feladatokat is megoldhatunk, amelyek a korábbiakban elképzelhetetlenek voltak. Az információs technológiák alkalmazása lehetőséget teremt arra, hogy a tanítási-tanulási folyamatot kibővítsük, színesítsük, részben új alapokra helyezzük. A dolgozatomban erre is mutatok példákat.

Az értekezés 2. fejezetében a természettudományos tantárgyak tanítási-tanulási folyamatában a motiváció szerepét ismertetem röviden. Ebben a fejezetben a projektpedagógia történeti kialakulásával és a módszer jellemzőivel is foglalkozok, illetve bemutatok egy kisebb iskolai projektet, amelyben több természettudományos tantárgy integrált módon összekapcsolódott. A dolgozatom további részeiben az általunk kidolgozott termoakusztikai projektfeladat részleteinek és eredményeinek bemutatására fókuszálok. A 3. fejezetben a termoakusztikával kapcsolatos legfontosabb alapfogalmakat mutatom be és áttekintem a téma szakirodalmát; a 4. fejezetben a célokat ismertetem. A dolgozatom 5. fejezete a gázzal fűtött Rijke csövek termoakusztikus tulajdonságait, folyamatait mutatja be. A csövek viselkedését a Nagyasszonyunk Katolikus Általános Iskola és Gimnázium gimnazista tanulóival vizsgáltam projektfeladat keretei között. A termoakusztikus projektfeladat 2007. szeptemberében indult és 2010. februárjában fejeződött be. A projekt témájának ötlete Dr. Papp Katalin tanárnőtől, témavezetőmtől származik, aki javasolta, hogy vizsgáljam meg diákjaimmal a Rijke-féle hangjelenséget. A gázfűtésű Rijke csövekkel több mint egy évig végeztünk méréseket, számos összefüggést „felfedeztünk”, de ezek inkább csak kvalitatív jelegű megállapítások voltak. A mérési eredmények nagyfokú bizonytalanságot mutattak, ezért úgy döntöttem, hogy építünk egy elektromos árammal fűtött Rijke csövet és azzal pontosabb méréseket végzünk. Ez volt a projekt második lépcsőfoka, ami szintén egy évnél hosszabb időt vett igénybe. A dolgozatom 6. fejezetében az elektromosan fűtött Rijke csővel végzett méréssorozat jellemzőit mutatom be. Ezek után következett egy számítógépes szimulációs program kifejlesztése, ami a csövek termoakusztikus viselkedését modellezi; a kapott eredményekről a dolgozat 7. fejezetében számolok be. Végezetül összefoglalást adok a projektfeladat eredményeiről, tapasztalatairól.

2. A természettudományos tantárgyak oktatása

Az Európai Unió kormányfőinek 2000-ben Lisszabonban tartott találkozóján megfogalmazták, hogy az EU szempontjából létkérdés a versenyképes tudás alapú gazdaság megteremtése; ez azonban csak úgy valósítható meg, ha versenyképes tudás alapú oktatásban és képzésben részesülnek az unió állampolgárai. A megfelelő természettudományos ismeretekkel rendelkező személyek tudnak csak érett és felelősségteljes döntéseket hozni. A cél megvalósítása érdekében azt tervezték, hogy 2010-re az EU-ban a GDP 3%-át szentelik a kutatási területek finanszírozására. Azóta eltelt egy évtized, de a célokat csak részben sikerült megvalósítani.

2.1. A természettudományok oktatási helyzete

A PISA vizsgálatokban (Programme for International Student Assessment = Program a tanulók nemzetközi értékelésére)¹ a világ különböző részein élő tizenöt éves diákok olvasási-szövegértési képességét, matematikai és természettudományos műveltségét mérik. Maga a vizsgálat az OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development = Gazdasági Együttműködési és Fejlesztési Szervezet)² kezdeményezésére jött létre. A PISA felmérésekben tudatosan olyan komplex feladatokat állítanak a diákok elé, amelyek nem oldhatók meg egyetlen tantárgy vagy képlet ismeretével. A feladatok többsége nem nehéz a szó klasszikus értelmében, de a megoldásukhoz „tantárgyakon átívelő” gondolkodási képességre van szükség. A tanulók a korábban megszerzett „tudáshalmazukból” merítve, a „tudásmorzsákat” szintetizálva tudják a problémákat megoldani, nagyon hasonlóan ahhoz, ahogy az életben is többségében összetett problémák jelentkeznek, melyekre nincs sablonválasz. A PISA mérések eredményei kiértékelésének fontos megállapítása, hogy Magyarországon az iskolák színvonala között hatalmas különbségek vannak. A magyar iskolák jellemzője, hogy a családi szociokulturális háttér hiányosságait csak kevésbé, vagy egyáltalán nem tudják kompenzálni az oktatási-nevelési intézmények. A magyar oktatási rendszer az iskolák eltérő színvonala miatt szegregációt idéz elő, amely tovább növeli az egyébként is erős társadalmi különbségeket (Balázsi és mtsai, 2007). A dolgozatomban bemutatásra kerülő projektmódszer alkalmas lehet a szegregáció csökkentésére, az integráció erősítésére.

Fizikatanárként a PISA mérésnek a természettudományos része a legizgalmasabb, de mindenkinek tudni kell, hogy a jó fizikatanár a matematikai és az olvasás-szövegértési képességeit is fejleszti a diáknak. Semmiképpen sem lehet csak és kizárólag a magyartanárookra hárítani a diákok olvasás-szövegértésének javítását, ahogy nem csak a matematika szakos kollégák „felelnek” egy személyben a gyermekek matematikai eszköztudásáért. Ebből a munkából minden egyes kollégának ki kell venni a részét, mégis valahogy úgy érzem, hogy ránk, fizikatanárookra a többiekénél is nagyobb feladat hárul. Gondoljuk csak végig, nincs még egy olyan tantárgy, melyben ennyire komplex módon benne lenne a PISA felmérés mindhárom diszciplínája. (Íme még egy érv amellet, hogy a fizika óraszámokat miért kellene növelni.)

¹ OECD-PISA Nemzetközi tanulói teljesítménymérés: <http://www.oecd-pisa.hu/>

² OECD web site: http://www.oecd.org/home/0,2987,en_2649_201185_1_1_1_1_1,00.html

A magyar diákok sajnos nem remekeltek a PISA teszteken, nagyjából a középmezőnyben végeztek mindegyik felmérésben. Hiba volna, ha nem vennénk komolyan a vizsgálatok eredményeit, hiszen látható, hogy a magyar diákok képességei fejlesztésre szorulnak. Azonban ne essünk át a ló túlsó oldalára se! Ha csak a kompetenciák megszerzését tűzzük ki célul, akkor lehet, hogy az elkövetkező vizsgálatokon jobban fogunk szerepelni, de nem hihetjük, hogy ez az oktatás-nevelés egyetlen mércéje. Az iskolában megszerzendő tudás és a fejlesztendő kompetenciák, készségek között kell megtalálnunk az arany középutat, melynek eredményeképpen a tanulók a lehető legjobban fognak majd boldogulni az életük folyamán. Hozzáteve azt is, hogy igazából csak az alapokat tesszük le az iskolákban, mivel mindenki számára csak az élethosszig tartó tanulóssal képzelhető el a sikeres, eredményes jövő.

2007-ben hozták nyilvánosságra azt a jelentést, melyben az Európai Unióban alkalmazott természettudományos oktatás megújításának szükségességét vizsgálták. A jelentés kitér arra, hogy az utóbbi években az EU tagállamaiban szinte egységesen csökken a felsőoktatásba jelentkező mérnökök száma, illetve a természettudományos és műszaki irányultságú szakokra jelentkezők is egyre kevesebben vannak (Rocard és mtsai, 2007). (Van olyan egyetem, melynek fizika szakos képzéseire tavaly csak fele annyi érettségizett jelentkezett, mint egy évtizeddel ezelőtt; sőt az sem ritka, hogy nagy múltú egyetemeken nem tudják elindítani a fizika mesterszakot, mert egyszerűen nincs rá jelentkező.) A fiatalok nagy része nem érdeklődik a természettudományos tantárgyak és a matematika iránt, annak ellenére sem, hogy számos program indult a kedvezőtlen irányú folyamatok ellensúlyozására. Folyamatosan csökken a természettudományos érdeklődés a tanulók körében; habár a (felnőtt) lakosság jelentős része tudatában van annak a ténynek, hogy ezen ismeretekre, illetve szakképzettségre szükség van (vagy legalábbis szükség lenne).

A hanyatló érdeklődés legfőbb okaként a Rocard Bizottság a természettudományos tantárgyak oktatási módszerét teszi felelősnek. A legfontosabb újítás a pedagógiai megközelítésben az lehet, ha sikerül a „hagyományos” oktatásról áttérni az érdeklődés (kutatás) alapú természettudományos oktatásra (IBSE = Inquiry Based Science Education). Mind az általános, mind a középiskolában ez lehet a módja annak, hogy megfelelően motiváljuk a tanulókat, akár a leggyengébb képességűekről, akár a legtehetségesebbekről is legyen szó; de a felsőoktatásban is célravezető lehet (Rocard és mtsai, 2007). A gyakorlatban a „hagyományos” megközelítés és az „érdeklődés alapú” módszer nem zárják ki egymást teljes mértékben, a megfelelő helyen és időben alkalmazva mindkettőnek helye van az oktatásban. Az IBSE lehetőséget biztosít a tanárokon és tanulókon kívül a szülőknek, cégeknek, vállalatoknak, egyesületeknek, helyi szervezeteknek, stb. is, hogy bekapcsolódjanak az oktatási folyamatba. Az IBSE jelenthet terepmunkát, kísérletezést, tanári vezetés mellett végzett önálló vagy csoportos munkát, tantárgyakon átívelő projektmunkát, problémaközpontú megközelítést, „lentől felfelé irányuló ismeretszerzési folyamatot”. A matematikában ezt „probléma alapú” tanulásnak nevezik (PBL = Problem Based Learning), melyben a probléma megoldása a tanulás hajtómotorja. Az IBSE-re tekinthetünk úgy, mint a PBL kiterjesztésére a természettudományok területén. Javítja a tanulók verbális kifejezőkészségét, az írásos

munkavégzésüket, sőt megtanítja őket csoportban dolgozni, ami a jövőjük szempontjából nagyon lényeges momentum.

Csökkenteni kell a természettudományos oktatás költségeit azáltal, hogy kevésbé specifikus, olcsóbb anyagokat használunk fel! A projektekben arra kell törekednünk, hogy olcsó és egyszerűen kivitelezhető kísérleteket végezzenek a tanulók. Ezekkel is ugyanúgy „megtanítható” a fizika vagy más természettudományos tantárgy. A mai költségtakarékos világban szinte csak ez lehet a járható út, hogy a diákok nagy tömegei végezhesenek kísérleti megfigyeléseket, méréseket. A tanulók egy szűkebb rétege számára nyilvánvalóan ma is rendelkezésre állnak drága, modern berendezések, műszerek, alapanyagok, és ez így lesz a jövőben is. Sajnos a többség számára nincsenek meg ezek az optimális körülmények, ezért nagyon fontos, hogy a tanulóiban azt tudatosítsuk, hogy az egyszerű kísérletekből is rengeteg új ismeretet lehet megszerezni.

A változatos tanítási módszerek (frontális osztálymunka mellett vagy helyett csoportmunka, egyéni differenciált feladatok, stb.) a tanulók természetes kíváncsiságát, érdeklődését kell kihasználnunk; másrészt kisebb-nagyobb projektjellegű feladatokkal színesíthetjük a tanulók ismeretszerzési folyamatát. Ezek lehetnek egy adott szaktárgyon belül is; de nyugodtan tervezhetünk tantárgyak felett átívelő, ún. multi- (inter-) diszciplináris projekteket. Kiváló módszer arra, hogy a tanulók megismerkedjenek a mindennapi élet problémáival, célorientált gondolkodási és cselekvési folyamataival. Közben pont azok a tanulói kompetenciák fejlődnek (pl. tudjon csapatban dolgozni, a többiekkel együttműködni), amelyekre ténylegesen szüksége van az egyénnek a társadalomban, a gyakorlati („hétköznapi”) életben.

Ha a fizika tantárgyat tekintjük, akkor adhatunk a diákoknak pl. olyan összetettebb projektfeladatot, amelyben a fizika mellett informatikai, biológiai, vagy egyéb természettudományos ismereteknek is utána kell nézniük. Az információ keresgélése közben használják az Internetet, a végén készítenek egy prezentációt és közben fejlesztik az információs-kommunikációs kompetenciájukat, egyszóval több pozitív hatás is éri a tanulót a projektmunka végzése közben. A dolgozatomban egy ilyen konkrét projektjellegű fizikai mérési és vizsgálati feladatot mutatok be részletesen. A projekt célja az volt, hogy a tanulók termoakusztikai ismereteinek bővítése mellett egyrészt az alkalmazott informatikai, másrészt a team-munka jellegű képességeik és készségeik is fejlődjenek (Beke, 2009a-d).

Az utóbbi néhány évben egyre több fórum foglalkozik a természettudományos tantárgyak oktatásának aggasztó állapotával. „*A különböző hazai és nemzetközi tudásszintmérő tesztek eredményei szerint Magyarországon egyre romlik a tanulók teljesítménye a természettudományi műveltség területén.*” – írja Radnóti (2009). 2008-ban a közoktatásért felelős miniszter tanácsadó testülete, az Országos Köznevelési Tanács (OKNT) napirendre tűzte a természettudományos közoktatás helyzetének átfogó vizsgálatát. A bizottság megvizsgálta a természettudományos oktatás helyzetét Magyarországon és javaslatokat fogalmazott meg a problémák megoldására.³ Az OKNT Bizottság megállapításaival és javaslataival majdnem teljes egészében egyetértek. Remélhetőleg minél több megvalósul belőlük belátható időn belül. A szakmai javaslatok azonban

³ OKNT Bizottság: A természettudományos közoktatás helyzetének felmérésére www.phy.bme.hu/~termtud/

néha kevesek, hiszen sokszor politikai okok miatt késve, vagy csak részlegesen valósulnak meg. Egy „egyszerű” pedagógusnak ebbe már nagyon kevés „beleszólása” van. A következő részfejezetben ezért egy olyan témakörrel szeretnék foglalkozni, amibe nekem, mint egyszerű természettudományokat tanító pedagógusnak is beleszólásom lehet.

2.2. A motiváció szerepe

„A természettudományok megértése munkaigényes, hosszú folyamat: a tudomány fejlődése miatt itt is kulcskérdés az egész életen át tartó tanulás igényének kialakítása, emiatt a motiváció lényeges kérdés.” (Réti, 2009). A diákok képességei, készségei csak úgy tudnak optimálisan kibontakozni, a tudásuk csak úgy tud elmélyülni, ha a személyiségüket folyamatos ösztönző, bátorító közeg veszi körül. Ennek a motiváló „környezetnek” a megteremtése nagyrészt a pedagógusok feladata, természetesen a szülőkkel összefogva. A tanítás során törekednünk kell arra, hogy a tanulók mindig motiváltak legyenek. Ha ez teljesül, akkor szinte „gyerekjáték” megtanítani nekik a fizikát, vagy akármelyik természettudományos tantárgyat, sőt az összes tantárgy tanításának ez a kulcs tényezője. Változatos tanítási módszereket alkalmazva (frontális osztálymunka mellett vagy helyett csoportmunka, egyéni differenciált feladatok, projektrendszerű megközelítés, stb.) a tanulók természetes kíváncsiságát, érdeklődését kell kihasználnunk; a tanulók tanórai, illetve tanórán kívüli aktivitását kell magasabb szintre juttatni.

A tanulói aktivitáson alapuló módszerek – sem idehaza, sem külföldön – nem eléggé elterjedtek a mindennapok természettudományos oktatásában. Ha sikerül elérnünk, hogy a tanulók konstruktív módon álljanak az adott tantárgy „tanulásához”, akkor ezzel a diák és a tanár munkájának „hatásfoka” is növekszik (Papp és Nagy, 2007).

Az egész nevelési-oktatási folyamatnak talán legfontosabb aspektusa a pedagógus személye, személyisége. Ebbe beletartozik a szakmai felkészültségtől kezdve a módszertani változatosságon át a gyermekközpontú szemléletmódig minden momentum. Mivel a tanárok a kulcsszereplői a természettudományos oktatás megújításának, ezért első lépésként az ő motiváltságukat kell elérni (Rocard és mtsai, 2007). Magától értetődő, hogy csak a motivált pedagógus tud úgy ismereteket és „személyes példát” közvetíteni, hogy a tanítványaiban is felébredjen a motiváció és aktív szereplői legyenek a nevelési-oktatási folyamatnak, ahelyett hogy passzív módon „elviselnék”, netán „elszenvednék” azt. A kevésbé motivált tanároknak új pedagógiai ismeretekre van szükségük, hogy képesek legyenek elsajátítani és oktatni az „érdeklődésen alapuló” módszerrel.

A természettudományos oktatás fejlesztése mérőszám a technológiai újítások megértése, a környezetünk megóvása és a gazdaság fejlesztése szempontjából is. Olyan nyitott, befogadó környezetet kell teremtenünk elsősorban az iskolákban, amely minden gyerek számára erősítőleg hat a természettudományos kíváncsiság kibontakoztatása tekintetében. Szinte az összes kisgyermekben „természetes” kíváncsiság él a természet dolgaival kapcsolatban; egészen addig, amíg a helytelenül megválasztott tanítási módszerekkel ezt ki nem „írtjuk” belőlük. Egyszóval sok esetben a rossz tanítási módszer az, ami a legtöbbet árt.

A tanárok nagy része a „kréta fizikát” kedveli, vagy legalábbis ezt alkalmazza; amikor kiáll az osztály elé, teleírja a táblát képletekkel és ugyanezt várná el a tanítványaitól is. Az érdeklődésen

alapuló természettudományos oktatás lényege pontosan az, hogy a gyermekekben meglévő kíváncsiságot, mint motiváló erőt használjuk fel arra, hogy a tanulók ismereteit gyarapítsuk, látókörüket szélesítsük. Ez persze nem működik a hagyományos frontális osztálymunka kizárólagos keretein belül. Nem azt állítom, hogy ezt a módszert el kell felejteni, de mellette sok egyéb lehetőségünk is van, amit érdemes kihasználni. Tulajdonképpen nem az a fizika (kémia, stb.) oktatás lényege, hogy százszámra képleteket magoltatunk be a diákokkal, sokkal inkább egy átfogó és lehetőleg korszerű tudományos világképet kellene a gyerekekben kialakítani, kinek-kinek a saját értelmi szintjén. Természetesen nem a képletek mellőzését akarom ezzel elérni. Igenis szükség van rájuk a maguk helyén és idején, de ne ez legyen a fizikaoktatásunk legfontosabb „üzenete”.

Kopasz és Papp szerint a nemzetközi átlagnál is jóval kisebb mértékben alkalmazzák hazánkban a tanárok azokat a tanítási módszereket, amelyek fokozott tanulói aktivitást igényelnek. *„Kevés az önálló kísérletezés, a kiscsoportos munka, pedig ezeknek jelentős szerepük van a kreativitás és az együttműködési készség fejlesztésében. Ritkán hozzák szoba a fizika műszaki alkalmazásait, holott ma már majdnem minden percben használunk olyan eszközöket, amelyek működése fizika nélkül megérthetetlen. Ha nagyobb hangsúlyt fektetnének erre a fizikatanárok, akkor talán kevesebbszer merülne fel a kérdés, hogy miért van szükség egyáltalán a fizika oktatására a középiskolában.”* – írja Kopasz és Papp.⁴

Az érdeklődésen alapuló tanulás-tanítás lehet a kivezető út, amelyhez elsősorban a pedagógusokat kell megnyerni. A sikeresen kipróbált pedagógiai módszereket be kell mutatni minden tanár számára, hogy a szakmai munkájukban felhasználhassák az eredményeket.

2.3. Felsőfokú motiváció középfokon

Kissé talányos a fejezetrész címe, szándékosan. Mit is jelent? A felsőfokú jelző gyakorlatilag a magas szintű, hatékony munkavégzést jelenti. A motiváció az a folyamat, mely során valakit ösztökélünk, ösztönzünk egy tevékenység elvégzésére. A középfok jelen esetben a középiskolai oktatást jelenti, nevezetesen a természettudományok középiskolai oktatását; ezen belül szűkebben a fizika tantárggyal kapcsolatos módszertant. A középszintű oktatás önmagában is érdekes, de valójában csak rendszerbe ágyazva látható át, azaz az előzmények (általános iskola) és a folytatás (felsőoktatás) is befolyásolja a nevelési-oktatási folyamatnak e középső szegmensét. Az óvodai nevelés nem képezi a dolgozat témáját, bár hiszem és vallom, hogy megfelelő tálalásban már az óvodások is képesek fizikai elveket megérteni a saját szintjükön. Egy a lényeg, nem szabad túlbonyolítani a dolgokat és csak olyan jól megfigyelhető jelenségekről beszéljen az óvópedagógus, amit minden kisgyermek a saját tapasztalataiból is tud. Példának okáért: *„Ha kiejtek egy labdát a kezemből, akkor az mindig lefelé esik. Miért van ez?”* Válasz: a Föld vonzása miatt. A gravitáció hatását vezetjük be egy kisgyermek gondolkodásmódjába. Nem kell kitérni arra, hogy a Föld nevű bolygónak mekkora a tömege, stb. Elegendő, ha egy intuitív kép alakul ki az óvodásban, amelyből azt érti meg, hogy az elejtett testek lefelé esnek, mert a Föld vonzza őket. Egy másik példa: *„A hóban olyan könnyedén tud húzni apa a szánkóval, de amikor „betonos” részhez érünk, akkor*

⁴ Kopasz K. és Papp K.: Aktív tanulói eljárások a fizikatanításban. <http://www.physx.u-szeged.hu/modszertan/private/AktivTanEljAFizOkt.pdf>

nagyon kell erőlködni. Miért?” Válasz: a betonon nem csúszik olyan jól a szánkó, mint a havon, vagy a jégen. A betonon nagy a súrlódás. (Ezt még hallja is a gyerek.) Itt megint nem arról van szó, hogy a súrlódási erőt töviről hegyire el kellene magyarázni, de igenis felfogja a gyermek, hogy a súrlódás egy olyan valami, ami gátolja a test (szánkó) mozgását, és ezért az apukájának jobban kell „erőlködni”, azaz az erőfogalom megértésének is leteesszük az alapjait. Bár nem óvópedagógus vagyok, de a környezetemben több óvodáskorú kisgyermek is van, akiknél kipróbáltam a „módszert” és működik; a legcsekélyebb gond nélkül „megtanulták a fizikát” az ovisok. Pár hét múlva többször is rákérdeztem csak úgy „mellékesen” a témára, és a válaszokból kiderült, hogy beépült a „tudásbázisukba”.

A középiskolai oktatásban személy szerint mindig arra törekszem, hogy gyakorlatias, „életságú” példákat adjak a tankönyvek és példatárak „száraz” feladatai helyett. Ez néha egyszerűen csak azt jelenti, hogy elég néhány szót megváltoztatni, kicsit átfogalmazni a feladatot és máris jobban tetszik a tanulóknak. Nézzünk egy példát ennek illusztrálására!

1. Az 54 km/h sebességgel ellökött korong 25 m-es úton áll meg a vízszintes talajon. Mekkora a súrlódási együttható a korong és a talaj között?
2. Az 54 km/h sebességgel vízszintes úton haladó személygépkocsi 25 m-es úton tud teljesen lefékezni. Mekkora a súrlódási együttható az úttest és a kerekek között? Mekkora lenne ugyanennek a járműnek a fékútja, ha 108 km/h sebességgel haladt volna? Hogyan függ a fékút a test kezdősebességétől?

A feladat értelmezése, az adatok kigyűjtése és az átváltások után a két feladatot elvileg hasonlóképpen oldhatjuk meg, Newton törvényeivel, vagy pl. a munkatétellel. Egy jól felkészült tanulónak egyik feladat sem jelent gondot; ám, ha egy kevésbé felkészült diáknak kell megoldani a feladatokat, akkor az elsőt egy „*elméletieskedő valaminek*”, a másodikat viszont „*gyakorlat közeli problémának*” értékeli. Az 1. feladat esetében a tanulók egy részének az energiája elveszik a folyamatos méltatlankodásban, miszerint: „*Miért kell ezt nekünk tudni? Hol fogom én ezt valaha is hasznosítani?*”; a 2. feladatnál eszükbe sem jut ilyeneket kérdezni, hiszen az maga a „*NAGYBETŰS ÉLET*”. A 2. példával kapcsolatosan nem feledkezhetünk meg arról, hogy felhívjuk a diákok figyelmét arra, hogy a fékút hossza a kezdősebesség négyzetével arányos; ha tehát kétszer akkora sebességgel haladsz, akkor négyszer akkora lesz a megálláshoz szükséges fékút hossza. Jól jegyezd meg, mert az életed múlhat rajta! (Természetesen azt is érdemes kihangsúlyozni, hogy ilyen kérdést szoktak a KRESZ-vizsgán is kérdezni, és aki nem tudja, az számíthat rá, hogy „megbuktatják”. Erre tényleg mindenki felkapja a fejét; mert még nem találkoztam olyan középiskolással, aki előbb vagy utóbb ne szeretne jogosítványt szerezni.)

Innentől kezdve valószínűleg minden tanuló elhiszi, hogy ez egy nagyon lényeges, „*életbevágó*” fizikai probléma és általában megjegyzi a feladatot és a vele kapcsolatos elveket; az első feladat megoldása után ugyanezt nem mondhatjuk el. Az elvekben nincs különbség, de a tanulóknak a második esetben olyan érzést ébresztünk, hogy ez tényleg szükséges és hasznos tudás a mindennapi életben, ezért fontosnak tartják a probléma megértését, kíváncsiak a megoldásra. Egyszerűen motivált tanulókkal hatékonyabban dolgozhatunk. „*A diákok természettudományok és technika*

iránti érdeklődésében nagy szerepet játszik az, hogy milyen a viszonyuk ehhez a két tudományághoz. A tanulók bizonyosan motiváltabbak, ha a természettudomány-oktatás olyan problémákkal is foglalkozik, amelyek személyesen érintik őket.” (Balázs és mtsai, 2007).

A csoportmunka is szóba jöhet pl. az egyik csoport Newton törvényeivel, a másik a munkatétellel oldja meg a feladatot, majd bemutatják egymásnak a megoldásaikat. (Közben a feladat ellenőrzését is megoldottuk.) A kíváncsiság felkeltése és ezen keresztül a tanulók ilyen irányú motiválása azt hiszem, nem kerül pénzbe, legfeljebb egy kis tanári gondolkodásba. A befektetett munka viszont kamatostul megtérül, mert a saját munkánkat is megkönnyítjük és a gyerekek tudását is gyarapítjuk. Az érdeklődésen alapuló természettudományos oktatásnak ezek a kezdőlépései. Azt hiszem akár át is fogalmazhatnám a fejezet rész címét: „felsőfokú motiváció minden szinten”. A diákok mellett a tanároknak, magának a tanárképzésnek, sőt egyáltalán a természettudományokhoz való hozzáállásban is szükség van a motivációra, ösztönzésre, az aktivitás növelésére, ahhoz, hogy a korral haladni tudjunk.

2.4. A projektoktatás

A projekt típusú oktatási forma egyelőre nem terjedt el Magyarországon, bár vannak iskolák, ahol már használják. Reményeim szerint a projektszemléletű oktatás egyre hangsúlyosabb szerepet kap a jövő természettudományos oktatásában (Beke, 2009ab). Ezért célszerű összefoglalni és bemutatni a módszer jellemzőit, előnyeit. Hortobágyi (1991) meghatározása alapján a projektet tekinthetjük a tanulási folyamat konkrét egységének: *„A projekt egy sajátos tanulási egység, amelynek a középpontjában egy probléma áll. A feladat nem egyszerűen a probléma megoldása vagy megválasztása, hanem a lehető legtöbb vonatkozásnak és összefüggésnek a feltárása, amely a való világban az adott problémához organikusan kapcsolódik.”*

A modern iskolai oktatás kifejlődésének hosszú történelmi korszaka alatt tagolt és bonyolult iskolarendszer alakult ki, amely állandó változásokon ment keresztül és megy át napjainkban is. A tudomány és technika fejlődésének megfelelően változik az oktatás tartalma, a kor követelményei szerint bővülnek a tanítás és a nevelés módszerei és eszközei. A fejlődés az oktatás igazodását igényli az új és időről-időre változó követelményekhez. A múltat őrző és a jövőt építő iskolákban – ha lassan is, de – változnak a célok és velük a pedagógiai munka minden kelléke, a tanári tevékenységek formái is.

Az ismeretanyag hallatlan mértékben bővül, képtelenek vagyunk ezt a megnövekedett információmennyiséget átadni. *„Az oktatási-nevelési rendszerünk valós és hatékony reformjának mindenekelőtt arra kellene irányulnia, hogy az exponenciális mennyiségi információnövekedés helyett előtérbe helyezze a minőségi növekedést. ...Élményt kell adni.... Élményre van szükség. Minden élmény-közvetítés: nevelés.”* – írja Korzenszky (2004). A jelen oktatási gyakorlatban sajnos sok pedagógus számára ismeretlen fogalom a kooperativitás, a kognitív tanulás, a szervezőkészség fejlesztése, a tolerancia, a humor, a játékos feladatvégzés. Meg kell változtatni az eddigi megszokott stratégiákat, amelyek ugyan alkalmasak voltak az új tudás átadására, befogadására, de a megszerzett tudás alkalmazására már nem tették képessé a tanulókat. A

pedagógusoknak át kell értékelniük a tanítás-tanulás folyamatában betöltött szerepüket (Piskoltiné, 2006).

Ha a diákok legfőbb céljának az önálló ismeretek elsajátítását és elmélyítését tekintjük, akkor nagy valószínűséggel valamilyen kooperatív tanulásszervezéssel működő projektben tudják leginkább megvalósítani önmagukat; hiszen így saját maguk határozzák meg, hogy mit és hogyan tanulnak, hogyan formálják, alakítsák és mutassák be vizsgálódásaik eredményeit. A tudás átadás célja önállóan dolgozó és gondolkodó emberek képzése, ezért a projektoktatás megfelelő út lehet a céljaink eléréséhez. A módszer jellemzője az adott probléma sokoldalú megközelítése és a munkamegosztáson alapuló együttműködés. A projekt módszer által a diákok megfelelő motivációval, folyamatosan dolgoznak, megízlelhetik a kísérletezés és az előadás örömét, és egyben felerősödik bennük a tudásvágy; rádőbbenhetnek arra is, milyen jó is „*játszva tanulni*”, és az így szerzett „*heuréka élmény*” további ösztönzést adhat nekik. A különböző projektek a megismerő képesség, a divergens, konvergens gondolkodási képesség mellett hatalmas erőket mozgósítanak; feltétlen hasznukként említhető a flexibilitás, a gondolkodás rugalmasságának fejlődése (Dombi, 2006).

2.5. A projektoktatás történeti előzményei, helye a mai pedagógiában

Napjaink pedagógiai „útkeresésében” a projekt módszer nem új keletű, hiszen alkalmazása már fellelhető a XIX. század végén, illetve a XX. század elején is, amikor gyermekbarát pedagógiai irányzatok indultak hódító útjukra, elsősorban Nyugat-Európában és Észak-Amerikában. Az ilyen típusú irányzatok középpontjában a kreatív fejlesztés, a gyermeki gondolkodásból való kiindulás és annak kognitív és érzelmi vonzatai álltak (Dombi, 2006).

A „projekt” kifejezést pedagógiai értelemben először a XIX. század legvégén alkalmazták az Amerikai Egyesült Államokban a szakmai oktatáshoz kapcsolódóan, ezt a terminust terjesztette ki a későbbiekben John Dewey (1900) és tanítványa, illetve követője William Heard Kilpatrick (1919). A reformpedagógia e jelentős személyiségei többek között a „projekt eljárással” kívánták a valódi, személyes tanulási tapasztalatokat, a valóságos tevékenység szerepét biztosítani a gyerekektől idegen tantárgyi tartalmak helyett (M. Nádas, 2003).

A világ megismerésére törekvő tudomány analitikus jellegű volt, azaz részekre bontotta a világot, az iskola is erre a logikára építette ismeretközvetítő technológiáját. Az oktatási rendszerben a világ tantárgyakra oszlik, a bennük megismerhető „világ darabkák” között jószerivel elvesz minden kapcsolat. Míg a tudóst a maga részterületének mélységei mágikus erővel vonzzák, kiapadhatatlan erőt adva a vége nincs megismeréshez, a részleteknek még el nem kötelezett gyereket elkedvetleníti, a megismerésben „demotiválja” (Hortobágyi, 1991).

A XX. század elején az oktatás megújításának központi gondolatává vált a gyermekből, a gyermek gondolkodásából és érzelmi igényeiből való kiindulás. Ha a világon minden dolog komplex, ha mindenben, ami létezik együtt és egymásba fonódva zajlanak a különböző folyamatok, miért ne lehetne megkísérelni ezek együttesét, kölcsönhatását tanulmányozni, hogy így megőrizhessük azt a szépséget és sajátosságát, ami csak az együttes létezésben és kölcsönhatásban tárul fel? Ezeket a kérdéseket tanulásszervezési újítások követték, megjelentek az

ún. projektek. A gyerekek „felszabadításának” érdekében néhány híres reformiskolában szétördelték a tantárgyak és tanórák rendszerét, a gyerekeket egy-egy komplex feladat megoldása elé állították. Az ismeret tudományos maradt, de az építkezés logikája szakított a tudományos megismerés logikájával (Hortobágyi, 1991).

A projektmódszer a megismerés egyik (fő) forrásává a gyermek tapasztalatát teszi. John Dewey, akitől a projektmódszer első átfogó, elméletileg megalapozott kifejezése származik és nevéhez e módszer első tudományos igényű alkalmazása is fűződik, a gyermek múltbéli és folyamatosan jelenlevő tapasztalatára épített. A projekteket egyszerre tekintette a már megszerzett tapasztalatok alkalmazásának és új tapasztalatok szerzésének fő területének (Dewey, 1900). Dewey 1896-ban Chicago-ban megnyitotta kísérleti elemi iskoláját, ahol elsőként alkalmazták alapvető megismerési módszerként a projektekben való tanulást. A tanulás új értelmezése Dewey (1976) filozófiájából ered, mely szerint a gondolkodás csupán a gyakorlati aktivitás meghatározott megnyilvánulási módja. Ebből következik, hogy a megismerést nem a változatlan valóság elvont tanulmányozásaként értelmezte, hanem olyan funkciónak, amely a tapasztalat újjáalakítása az eleven tapasztalás folyamatában; arra a következtetésre jutott, hogy a nevelő feladata segíteni a gyermekeknek már meglévő és a gyakorlati tevékenység közben éppen születő tapasztalataik összekapcsolásában (Hortobágyi, 1991).

A projekt – mint egy tanulási egységet jelentő fogalom – jóval korábbi eredetű, egészen a XVIII. századra nyúlik vissza. A párizsi Építészeti Akadémián „projekt”-nek nevezték a nagyobb építési vállalkozások azon viszonylag önálló részleteit, amelyeket a diákok önálló kidolgozásra kaptak (pl. egy épületszárny megtervezése). Az Egyesült Államokban a XIX. század közepén az építészeti és a mérnöki főiskolákon jelent meg a módszer, majd áterjedt az általánosan képző iskolákra és a szakiskolákra az ipari, mezőgazdasági és a művészeti tárgyakban (Hortobágyi, 1991).

A XX. század elején néhány európai országban is megjelent a módszer, szerves részeként a reformpedagógiai mozgalomnak (pl. a Szovjetunió oktatáspolitikájában a 1920-as évek végéig széles körben alkalmazták). Európa legtöbb országában azonban a projektoktatás a közoktatási gyakorlatban nem játszott jelentős szerepet. *„A gyakorlatot a herbarti pedagógia uralta, amelynek tartalom centrikusságába, tudásátadás-átvétel koncepciójába nem fért bele a projektoktatással együtt járó tanulói önállóság, tartalmi, folyamatbeli külső szabályozatlanság.”* (M. Nádasi, 2003).

Nyugat-Európában – főként német nyelvterületen – az 1960-as évek végén, illetve a '70-es évek elején jelent meg ismét a projektmódszer, a változást igénylő politikai törekvésekhez, elsősorban a diákmozgalmakhoz kapcsolódva. A diákok nagyobb beleszólási jogot követeltek saját oktatásuk tartalmába, módszereibe, ezért a projektoktatás igényét az oktatási reform stratégiai kérdésekként hangoztatták; így a német nyelvű pedagógiai sajtó a hetvenes évektől újra foglalkozott a projektoktatás kérdésével (M. Nádasi, 2003). Németországban a decentralizált oktatásirányítás következtében meglehetősen nagy különbségek alakultak ki a projektoktatás területén az egyes tartományok között: pl. Baden-Württemberg tartományban központilag javasolták a projektoktatásban feldolgozható témákat és a feldolgozásuk módját; ezzel szemben Schleswig-

Holstein tartományban a projektoktatás inkább csak mint egyfajta iskolai innováció jelent meg a pedagógiai szakfolyóiratokban; Tübingiában pedig a projektoktatás gyakorlatilag a fizikai munka alkalmazását jelentette az iskolai oktatás keretein belül (M. Nádasi, 2003).

A magyar reformpedagógiai iskolák közül úttörő szerepe volt a projektoktatással való munkában Nemes Aurélné Müller Mártának, aki Családi Iskolájában (1915-1943) már alkalmazta az ún. *„életegységekben folyó oktatást”* (Nemesné, 1933). Az államilag előírt, kötelező tananyagot tudomásul véve, a tantárgyak közötti koncentrációs lehetőségeket megtalálva, a tanulók érdeklődésük és *„tevékenységvágyuk”* irányát felismerve dolgozták fel az egyes évek tananyagát komplex életegységekben, projektszerűen (Pukánszky és Németh, 1996).

Alkalmazták a projektoktatást a Domokos Lászlóné által alapított Új Iskolában (1915-1949) is, ennek tantervét, pszichológiai alapjait Nagy László dolgozta ki. Az egész iskolát átfogó tematikus munkák részfeladatait a tanulók érdeklődésének megfelelően választották ki, illetve a megoldások az érdeklődés sajátosságait tükrözték; majd az eredményeket tanév végi kiállításon mutatták be (M. Nádasi, 2003). Nagy László pedagógiájának központi alakja a gyermek volt; az iskola *„cselekvő iskola”*, ahol a gyermek *„munkája, tevékenysége uralkodik”*, szemben a tradicionális tanárközpontú *„herbarti tanulóiiskolával”*, ahol a tanár és a gyerekek belső lelki aktivitása, képzetgyarapodása dominált (Pukánszky és Németh, 1996).

Németh László (1901-1975) író, orvos, pedagógus – a Nemzeti Parasztpárt felkérésére – 1945 őszén megjelent *„A tanügy rendezése”* című írásában foglalkozott az iskolarendszer átalakításának lehetőségeivel. Régi álma volt a tananyag átfogó egységekbe rendezése, a tantárgyak összevonása, bizonyos tantárgycsoportok kialakítása; melyeket az amerikai reformiskolákból jól ismert életszerű *„projektekre”* és *„komplexekre”* emlékeztető módon képzelt el. Németh László szerint *„a szenvedélyes, magas hőfokon végzett tanulás eredményez igazán használható tudást. Nem haszontalan ismerethalmazt, meddő könyvtudást, hiszen ma a kutató tudós is polcon tartja az emlékezetét, azt tudja hová kell nyúlnia.”* – idézi Pukánszky és Németh (1996). A tudás Németh László értelmezésében képesség és tájékozottság; a pedagógusnak tehát az a dolga, hogy megmutassa mi a lényeges, mi a lényegtelen, melyek a továbbhaladáshoz szükséges rendezőelvek, hogy így tanítványait rávezesse az *„igazi tudáshoz”* vezető útra (Pukánszky és Németh, 1996).

A II. világháború után hazánkban a szovjet hatás nagyon erőteljesen érvényesült az élet minden területén. Mivel a Szovjetunióban ebben az időben a projektoktatás gyakorlatilag már nem szerepelt a központi tantervekben, ezért Magyarországon is hasonlóképpen alakult a helyzet. A rendszerváltás után hazánkban újra megjelent az iskolai projektoktatás gondolata (M. Nádasi, 2003); 1998-ban jött létre a Pedagógiai Projekt Társaság Kecskeméten, melynek célja: *„a projektpedagógiai elméletek tisztázása, kutatások kezdeményezése, a projektpedagógia népszerűsítése, szakmai elismertetése Magyarországon. Feladatai: konferenciák, pedagógus továbbképzések szervezése, széles körű publikációk és elszigetelt alkalmazások nyilvánossá tétele.”* (Hegedűs, 2002).

A projektoktatás, vagy más néven a projektorientált oktatás több mint százéves pedagógiai módszer. A projektoktatás jelenléte a világ több országában is természetessé vált, de még a hazai,

hagyományos pedagógiai szellemben működő közoktatási rendszerből sem hiányzott teljesen, megjelent a reformpedagógiai intézményekben, a kísérleti iskolákban, a szabadidős tevékenységekben. Gyakoribb alkalmazásának objektív akadálya nincs, a pedagógusok hozzáállásán, felkészültségén múlik a legtöbb (M. Nádasi, 2003).

„A jelenlegi oktatásunk domináns szervezési módja még mindig a frontális osztálymunka, ahol a pedagógus közöl, kérdez, feladatot ad, ellenőriz, értékeli, engedélyt ad a gyerekeknek a válaszadásra; a diákok pedig párhuzamos padosorokban ülnek, mindannyian a tanárra néznek, egymásnak csak a hátát látják. Pedig ezeknek a gyerekeknek a mozgásigénye, kíváncsisága, társas aktivitása más módszereket tenne szükségessé.” (Fülöp, 2008). Széplaki (2008) szerint fontos, hogy a tanulók lehetőleg komplex, életszerű feladatokat oldjanak meg az iskolában, nagyobb teret kapjon a csoport- és páros munka; ezáltal a jelenleg magányos tanulási folyamat élet-közele, társas cselekvéssé válik.

2.6. A projektoktatás értelmezése és gyakorlata

A projektpedagógiai módszerek alkalmazását az integrált nevelés egyik eszközének tekinthetjük. Köznyelvi értelmezésben a projekt valamely összetett, komplex feladat elvégzésének feltételeit, folyamatát, eredményeit meghatározó terv. A projekt célja többnyire valamilyen új produktum létrehozása. A pedagógiai projekt a nevelési-oktatási folyamatban valamely összetett, komplex téma, amely gyakran a mindennapi életből származik; a témafeldolgozáshoz kapcsolódó célok, feladatok meghatározása, a munkamenet és az eredmények megtervezése, az eredmények prezentálása (M. Nádasi, 2003).

A projekt a pedagógiában eszme, oktatás, tanulás, módszer, oktatási stratégia, tanulásszervezési forma, paradigma, szemlélet (Radnóti, 2008b). A projekt megvalósítása önálló egyéni munkán és/vagy pármunkán és/vagy csoportos munkavégzésen alapul. A projektoktatás oktatási stratégia, valamely komplex téma olyan feldolgozása, amelynek során a téma meghatározása, a munkamenet megtervezése és megszervezése, a munka eredményeinek létrehozása és bemutatása a gyerekek valódi önálló (egyéni, páros, csoportos) tevékenységén alapul. A pedagógus feladata a gyerekek önállóságának helyt adni, ezt az önállóságot tanácsadóként segíteni (M. Nádasi, 2003).

A projekt olyan témaegység, amely a mindennapi élet valamilyen, a diákok által megtervezhető feladatát veszi alapul, és kapcsolódik ehhez a megoldáshoz szükséges elméleti és gyakorlati tudás kialakítása is. A projekt feladata nem csupán a probléma megoldását jelenti, hanem közben olyan összefüggések feltárása is történik, melyek az adott problémához a való életben szervesen kapcsolódnak. A módszer lényege tehát, hogy a diákok szembe kerülnek egy, a mindennapi életből vett problémával, amelyet a tanulók több aspektusból, több síkon megvizsgálhatnak (műszaki, technikai, fizikai szempontok alapján), és mindezek ismeretében megtervezik a megoldáshoz vezető alternatívákat, majd ezeket kivitelezik és levonják a következtetéseiket (Dombi, 2006). A tanítási-tanulási folyamat középpontjából tehát a tanár „kikerül” és „átadja helyét” a tanulóknak.

Általános tapasztalat, hogy a legtöbb iskolában nem szívesen alkalmaznak olyan módszereket, amelyek bizonyos mértékig felborítják a megszokott, hagyományos „rendet”. A tanárok sokkal nagyobb mértékben alkalmazzák a hagyományosnak mondható, tanárközpontú tanítási

módszereket, mint azokat, amelyek nagyobb önállóságot biztosítanak a gyerekeknek az ismeretek megszerzésében. Ilyen hagyományos módszer a magyarázat, beszélgetés, szemléltetés (Radnóti, 2008a). A projektmódszer fontos jellemzője, hogy akár önmagában is meglehetősen széles módszertani repertoárt biztosíthat a nevelési-oktatási folyamatban. A projektmódszer komplex, vagyis az adott témát sok oldalról kell körüljárni, mert csak így alakulnak ki a tudáselemek között azok a sokrétű kapcsolatok, az a hálózat, amely egy-egy ismeretet, készséget, képességet sokféle helyzetben előhívhatóvá tesz. Ez a ténylegesen alkalmazható tudás kialakulásának egyik fontos előfeltétele. A projektmódszer alkalmazásának fő motívuma, hogy képes fejleszteni a különböző kompetenciák, személyiségvonások széles körét. A projektmódszer általában pozitív hatásokat gyakorol a résztvevőkre (Radnóti, 2008a; Beke, 2011c):

- bővül az alkalmazható szaktárgyi tudásuk;
- a másokkal való együttműködés során megtanulják kezelni a felmerülő konfliktusokat;
- fejlődik a gondolkodásmódjuk;
- megtanulják a munka szervezését, és az idejük beosztását;
- fejlődik az esztétikai érzékük;
- a projekt eredményeinek bemutatásakor a résztvevők a saját csoporttársak, illetve más csoportok előtt szerepelnek, ez hozzásegíti őket a lámpaláz leküzdéséhez;
- a résztvevőkben tudatosul a világ komplexitása;
- kialakul, illetve fejlődik a felelősségvállalás a társak iránt;
- nyitottabbá válnak a világ dolgai iránt;
- a különböző ismeretforrások (internet, könyvtár, folyóiratok, tévé, rádió stb.) használata, a kapott információk kezelése és kritikus felhasználása révén fejlődik az értő olvasás;
- fejlődik a tanulási technikájuk, ez elősegíti az élethosszig tartó tanulást;
- megtanulják használni az előzetes ismereteiket különböző helyzetekben;
- fejlődik a „probléma-érzékeny” gondolkodásmódjuk, a problémamegoldással kapcsolatos tudásrendszerük;
- növekszik a kreativitásuk;
- javul a kommunikációs kompetenciájuk;
- megtanulják mások véleményét is meghallgatni, tiszteletben tartani;
- kialakul, vagy fejlődik a reális énképük.

A tanulás nem egyszerűen csak tudás átadását-átvételét jelenti, a tudásnak a gyermek személyes konstrukciójának kell lenni. A projektmódszer a fejlesztő differenciálás eszköze, a legfőbb értéke maga a munkafolyamat, a munka eredményei és végtermékei mellett (Radnóti, 2008b).

Egy-egy projekt, új produktum elkészítése jól elkülöníthető szakaszokra bontható: témaválasztás, tervekészítés (célok, feladatok megfogalmazása), szervezés, adatgyűjtés, téma feldolgozása, produktum összeállítása, projekt értékelése, korrigálás, produktum bemutatása, nyilvánossá tétele. A projektek rendkívül sokfélék lehetnek. A projekttevékenység jellege szerint (folyamatorientált, eredményorientált, vegyes); a projekt célterülete szerint (technikai, természettudományos, művészeti, sport, környezeti nevelési, gazdaságismereti, kutatási, vegyes);

integráltabb tartalmi kategóriák szerint (reál, humán, vegyes). A projekt tartalma szerint lehet: tantervi célokat, tartalmakat, követelményeket feldolgozó projekt; teljes egészében a tanterven kívüli célokat, tartalmakat feldolgozó projekt; illetve részben tantervi, részben azon kívüli célokat feldolgozó, ún. vegyes projekt (Radnóti, 2008b). A projektorientált oktatás sajátossága a tartalmi komplexitás, a tantárgyak közötti integráció: a tartalma lefedheti az előírt tananyag egy részét, kiegészítheti, mélyítheti azt, de az is előfordul, hogy tantervi tananyaghoz nem kapcsolódik (M. Nádasi, 2003).

A projekt időstruktúrája szerint megkülönböztethetünk folyamatos időtartamú projekteket, ezen belül azonban nagyon széles időskála lehetséges: egy óránál rövidebb, néhány óras, egy napos, többnapos, egyhetes, kéthetes projekt. A folyamatos munkát igénylő projektek esetén ettől hosszabb idő általában nem áll rendelkezésre a hagyományos oktatási rendszerben. Természetesen előfordulhat, hogy egy tanévben több folyamatos időrendű projekt is megvalósul. A nem folyamatos időtartamú projektek esetén a „téma” feldolgozása során időnként meg-megszakítják a munkát, heti néhány órányi tevékenység után visszatérnek a projektre a következő héten, vagy a következő hónapban, esetleg a következő tanévben.

2.7. A projekttevékenységek megtervezése és végrehajtása

Sokan – külső szemlélők, de akár olyan pedagógusok is, akik még nem vettek részt projektmunkában – úgy vélekednek, hogy a projektoktatásban a tanárnak „semmi”, vagy legalábbis nagyon kevés dolga van. Ez súlyos tévedés, bár azt elismerem, hogy ha gondosan előkészítettük a projektet, akkor egy idő után remélhetőleg tényleg gördülékenyen mennek a dolgok, és a diákok „szinte varázsütésre”, maguktól tudják, hogy mit is kell „csinálniuk”. Ehhez azonban nem szabad szem elől téveszteni, hogy a projektszerű oktatás nagyon gondos tervezést és előkészítést igényel. Tisztáznunk kell a projekt elején számos fontos dolgot.

Egy projekt megvalósításának lépései, folyamatai: tervezés, szervezés, kivitelezés, értékelés. A „projekt-téma” meghatározásának több módja van (Radnóti, 2008b):

- a tanulók, tanulócsoportok érdeklődésük alapján teljesen maguktól, vagy tanári ösztönzésre, de mégis maguk határozzák meg;
- közös élményből vagy gondolatcseréből születik;
- egy korábbi téma feldolgozását követően vetődik fel;
- a pedagógus határozza meg a témát.

Mi a projekt célja? Ez lehet egy konkrét munkadarab elkészítése, egy mérésorozat, vagy megfigyelés elvégzése, stb. Ezen keresztül különböző készségeket, képességeket, kompetenciákat szeretnénk fejleszteni, tehát a nevelés-oktatás szempontjából ez az elsődleges cél.

Milyen formában kell a végén a „projektterméket” beadni. Kell-e mindenkinek prezentációt készíteni, vagy csoportonként csak egyet?

Kik vesznek részt a projektben? Egy adott osztályba, vagy egy évfolyamba járó diákok; esetleg vegyesen több évfolyamon tanulók is tagjai lehetnek a különböző projekt csoportoknak.

Milyen szempont alapján állítjuk össze a projekt csoportokat? A legideálisabb, ha a tanulók maguktól olyan csoportokat alakítanak ki, melynek tagjai jól együtt tudnak működni. Ez persze

nem mindig sikerül. Ilyenkor a tanárnak kell valamilyen kompromisszumos megoldással összeállítani a csoportokat (Beke, 2009a). Ha megvannak a csoportok, következhet a „szerepek kiosztása”, azaz ki miért felel a csoportmunka során; milyen erőforrásokra, alapanyagokra, eszközökre, mérőműszerekre, stb. van szükség előre láthatólag a projekt megvalósításához? Ide tartozik a várható költségek megtervezése, pénzforrások előteremtése, esetleg szponzorok felkutatása.

A projekt cél eléréséhez mennyi idő áll rendelkezésre? Kisebb projekt esetén elegendő a végső „beadási” határidőt megadni; összetettebb feladat esetén célszerűbb, ha a részfeladatok elvégzését is időpontokhoz kötjük, ez segít abban, hogy a teljes projekt határideőre elkészüljön (Beke, 2009a).

A projektet mindig értékelni kell! Az értékelés módja esetleg lehet osztályzás (egyszerűbb esetben), szóbeli vagy írásbeli értékelés (vagy ezek együttesen). Nyilvánvaló, hogy egy komplex csoportmunkában végzett projekt minősítését nem lehet egyetlen mondattal elintézni, ezért célszerű a tanár számára is, ha menet közben feljegyzéseket készít a tanulók munkájáról. A projekt értékelésének szempontjait előre kell tisztáznunk, azaz mindenkinek tudni kell, hogy mi alapján minősítjük a projekt közben végzett munkáját. Ezt persze csak irányelvnek tekinthetjük, hiszen menet közben olyan tényezők is hatnak, amelyekre esetleg nem is gondoltunk az elején és ezek befolyásolhatják az értékelést (Beke, 2009a).

A projektmunka értékelésének legfontosabb pedagógiai funkciója az, hogy a tanulók értékeljék saját tudásuk adaptivitását (Radnóti, 2008b). A projekt során intenzív, komplex tevékenység zajlik a csoportban, ami azt jelenti, hogy az egyes tagok tudása, elképzelései, képességei és készségei szinte minden pillanatban megmérettetnek. A projekt kvalitatív értékelésének szempontjai (Radnóti, 2008b):

- a kész produktum;
- a projekt tervezése során megfogalmazott kompetenciák;
- a résztvevők szaktárgyi, metakognitív tudásrendszerének gyarapodása;
- az együttműködés színvonala, csoporton belüli szervezettség foka;
- a tagok önálló munkavégzésének, kreativitásának fejlődése;
- a tervezési folyamat érvényesülése.

A megfelelően előkészített és kivitelezett projektfeladat megoldása közben a gyermekeknek pont azok a tulajdonságai, képességei, készségei, kompetenciái fejlődnek, amelyre az életük további részében szükségük lesz: kommunikáció, információ-feldolgozás, együttműködés, feladatmegosztás, stb. (Beke, 2009a).

A projektmunka alkalmazása során nemcsak a tanár szerepe változik meg, hanem a tanulók szerepe is módosul. A projektben a tanulók általában csoportokban dolgoznak, ez a tanulási forma nagyon különbözik a tanulók többsége által korábban megszokott módszerektől; eleinte számukra is nehézséget jelenthet ennek az újszerű helyzetnek a kezelése, a gondolkodásmód elsajátítása ez az újszerű „önirányított” tanulás. A kezdeti meglepettséget és ellenállást követően azonban remélhetőleg kialakul az elfogadás és bizalom (Radnóti, 2008b).

A gondosan előkészített és jól szervezett projektmunka minden tanuló számára lehet értelmes tevékenység. A projektoktatás során a tanuló olyan cél érdekében tevékenykedik, amely számára vonzó; olyan tartalommal, részlettel foglalkozik, amelyet érdekesnek tart; választhatja az egyéni vagy a társas tanulás körülményeit. A páros vagy csoportos tanulás, kutatás esetén azokkal dolgozhat együtt, akikkel ezt szívesen teszi; az oktatás időbeli körülményeinek alakításában döntő szava lehet; nem azzal küszködik, hogy milyen külső követelményeknek kell a folyamat végére eleget tenni, hanem a projekt kidolgozása során a belső motivációra épülő tanulás természetes következmény. A gyermek számára nem a tanulás a cél, hanem a projektből rá háruló feladat minél jobb megoldása, aminek eredménye a nagy energiával végzett, értelmesnek érzett tevékenység, azaz a tanulás (M. Nádasi, 2003).

2.8. Egy példa a gyakorlatból: a pizza-projekt bemutatása

Ebben a részfejezetben egy, a pizza-sütéssel kapcsolatos projektet szeretnék bemutatni, ami első hallásra kicsit meglepő lehet. Az elején nekem is voltak fenntartásaim vele kapcsolatban, de a gyakorlat azt mutatta, hogy ez volt az egyik legjobban sikerült projektünk. A téma kiválasztása és megtervezése a tanulókkal közösen fizika, biológia, informatika, illetve technika (háztartástan) órák során felmerült beszélgetések eredményeképpen született meg. A biológia tantárgyat tanító kollégával és az osztályfőnökkel végig szorosan együttműködtünk a projekt során. A projekt témát a diákok kérésére választottam, a téma iránti felfokozott érdeklődésből adódóan.

- A projekt témája: a pizza története, elkészítése;
- Szükséges segédanyagok: pizzéria étlapok, az „egészséges” pizza alapanyagai, kalóriatáblázatok, receptek;
- A projekt résztvevői: iskolánk (hatosztályos általános iskola és hatosztályos gimnázium) 8. osztályos tanulói (10 db 3 fős csoport);
- A projekt időtartama: a projekt elosztott időstruktúrában valósult meg; 2 héten keresztül (össességében 2 fizika, 2 biológia, 2 informatika, 1 kémia, 2 osztályfőnöki és 2 technika (háztartástan) órát vett igénybe; ezen kívül a diákoknak önálló kutatómunkát is kellett végezniük, illetve magának a pizzának az elkészítése és az „eredmények tárlása” egy délutáni foglalkozáson történt);
- A projekt költségei: a pizza-sütés alapanyagai (csoportonként).

„A pizza-történet, pizza-készítés, egészséges és egészségtelen táplálkozás, élettani-fizikai hatások” című projekt olyan átfogó, integratív és interaktív témakör, amely alkalmasnak bizonyult a szaktárgyi ismereteken messze túlmutató összefüggések és lényeges alapvető kultúrtörténeti, biológiai, fizikai, kémiai, élettani ismeretek, hatások feltárására és bemutatására.

2.8.1. A projekt előkészítése, megszervezése és kivitelezése

Az egyes témák feladatait a tanulók csoportonként vállalták, melyek között voltak kötelező és szabadon választható feladatok is. A projekt során az alábbi témák kerültek feldolgozásra:

I. A pizza kultúrtörténetének ismertetése, számítógépes prezentációk készítése informatika órán:

- a „pizza” első feltűnése (ókori Egyiptom lapos kenyerei, dél-itáliai görög kolóniák); Vergilius, Cato leírásai a „lapos kelt tésztáról, fűszerekről”;

- a középkori pékek és a kemencék használata;
- a XIX. századi nápolyi Raffaele Esposito Brandi pizzériája, Margherita királyné látogatása;
- pizza és az olasz nemzeti színek (balsalikom, mozzarella sajt, paradicsom);
- a XIX. századi olasz bevándorlók Amerikában.

II. A XXI. század pizzériái: látogatás egy helyi pizzériában, videofilm készítése, alapanyagok áttekintése.

III. Receptek gyűjtése: a világ különböző pontjain készült pizzák összehasonlítása.

IV. Érvek és ellenérvek a pizzával kapcsolatban:

- egészséges és egészségtelen táplálkozás jellemzői; egészséges és egészségtelen pizzák és pizza-fogyasztás;
- kutatómunka: üzletekben kapható félkész (fagyasztott) pizzák és az otthon házilag készített pizzák jellemző tulajdonságainak összehasonlítása.

V. Az alapanyagok jellemzői és élettani hatásai vizsgálata (lisztek, élesztő, kovász, paradicsom, fűszerek, sajtok, feltétek, mesterséges adalékanyagok, ízfokozók, tartósítószer).

VI. Mennyibe kerül a pizza elkészítése? A költségek előzetes kiszámítása (becslése), majd a projekt végén a tényleges anyagi ráfordítások számba vétele. (Ehhez informatika órán táblázatkezelő programot használtunk.)

VII. Saját készítésű egészséges pizza: csoportonként közös pizza-sütés az iskola tankonyhájában, majd a pizzák elfogyasztása a szülőkkel és vendégekkel együtt.

VIII. A kutatási eredmények bemutatása egymásnak és az érdeklődőknek: a tanulócsoporthoz a választott témáról írásos (elektronikus formájú) anyagot, beszámolót, számítógépes prezentációt készítettek, amely tartalmazta az anyaggyűjtést, a téma bemutatását, a kérdések és felmerülő problémák felvetésének fázisait. (A csoportok által elkészített írásos produktumokat megelőzte egy közös beszélgetés, amely során beszámoltak az addig elvégzett munka eredményéről és együtt tisztáztuk az esetleges bizonytalan kérdéseket.)

IX. Mennyi energiát használtunk fel a pizza sütéséhez a tankonyhában? A pizzák egy részét gáztűzhelyben, egy másik részét villanytűzhelyben készítettük. Hogyan lehet meghatározni, hogy mennyi elektromos energiát használtunk fel, illetve mennyi hőt használtunk a gáztűzhelyeknél a pizzák elkészítéséhez? (Ehhez tudnunk kell, hogy a pizza-sütésre tavasszal került sor, az egyik délután. Ez azért fontos, mert már nem volt fűtés az iskolában és délután már az iskola „rendes” konyhájában sem főztek. Az ebben az időszakban „elfogyasztott” gázmennyiséget tehát gyakorlatilag teljes egészében mi használtuk el a pizzák megsütésére. Ha tehát leolvassuk az iskola gáz mérőórájának állását a sütés előtt és után, akkor megkaphatjuk a felhasznált gázmennyiséget, majd ebből kiszámíthatjuk a költségeket és a felszabaduló hőmennyiséget is. A villanytűzhelyek esetén természetesen másként jártunk el. Mivel a feladatokat előre megbeszéltük a tanulókkal, ezért volt idejük gondolkodni a megoldási módokon. A megoldásra az egyes tanulói csoportoknak kellett rájönni. A feladat kiváló lehetőséget biztosított arra, hogy a pizza sütés tapasztalatait beépítsük a következő fizika órák anyagába.

2.8.2. A teljesítmények értékelése

A tanulók könnyen magukra találtak a szokásos iskolai gyakorlattól nagymértékben különböző új szerepükben. A diákok ragaszkodtak ahhoz, hogy saját elképzeléseiket önállóan kivitelezzék, de saját megoldásaikkal időnként elégedetlenek voltak, így egy kis tanári, illetve más csoportokból származó ötlettel, segítséggel sikerült új lendületet vinni a folyamatokba. Az egyes csoportok között egészséges vetélkedés alakult ki, a csoportokon belül azonban zökkenőmentesen tudtak együttműködni, egymást segíteni; a gyengébb képességű tanulók pedig több esetben vezető szerepet játszottak gyakorlatias tudásuk, „életismeretük, élettapasztalatuk” révén.

Az osztályzatokkal való értékelés „ellenkezik” a projekt módszer alapelveivel, melynek köszönhetően sokkal oldottabb, feszültségektől mentes légkör alakult ki, ennek következtében színvonalas produktumok születtek. A csoportok munkájáról teljes „projekt-közönség” előtt adtak számot, az osztálytársak, testvérek, szülők és pedagógus kollégák részvételével. A beszámolók a színvonal, szakszerűség szempontjából jól összefértek a diákhumorról, vidám szerepjátékokkal. A projekt ünnepélyes záróproduktuma a tanulócsoporthoz által elkészített egészséges, adalékanyagoktól mentes pizzák elkészítése, megkóstolása volt, mely fergeteges sikert aratott. A későbbi beszámolókból kiderült, hogy a projekt hatására több tanuló családjában is a helytelen táplálkozási szokásaik megváltozására került sor. Azt persze nem tudhatjuk, hogy ez a hatás mennyire lesz tartós, de már az is fontos eredmény, hogy legalább a kezdeti lépések megtörténtek ilyen irányban. Külső szemlélő számára furcsa lehet, hogy néhány szülő eddig miért nem foglalkozott az egészséges táplálkozással, de az a tapasztalat, hogy vannak olyanok, akiknek kell az ilyen jellegű „útmutatás”. A pizza-projekthez hasonlóan szerveztünk zöldség-, illetve gyümölcs-projektet is. Ezek is pozitív eredményeket hoztak, de talán mégis a pizza-projektnek volt a legnagyobb sikere.

2.9. A projektmódszer lehetőségei a természettudományok oktatásában

„Kevésbé az a fontos, hogy mit tanulnak a gyerekek az iskolában, inkább az, hogyan tanulják, mert ez meghatározza a tudásuk felhasználását egész életük során.” idézi Max Planck szavait Fülöp (2008). A hazai iskolarendszerben uralkodó hagyományos pedagógiai módszerek, a tekintélyelvűt érvényesítő frontális ismeretközlés általában nem vezet megfelelő eredményekre olyan iskolákban, amelyekben a tanulók összetétele nagyon különböző és amelyekben növekszik a kevésbé teljesítményorientált tanulók aránya. A probléma megoldására alkalmas korszerűbb pedagógiai megközelítés kulcsa a differenciált nevelés és oktatás. Az elmúlt 30 évben változott a természettudományos tárgyak oktatása: az 1970-es évek végétől az alapszemlélet az volt, hogy a természet jelenségei a diákok számára is megérthetőek, ezért olyan elméleti tudással akarták felvértezni őket, amely a megértést lehetővé teszi; igyekeztek a különböző természettudományos tantárgyakat koordinálni, azokat egymásra építeni, így a korábbi leíró jellegű tárgyalásmód helyett sokkal elméletibb anyag alakult ki. Mindez jól működött a jó képességű diákok esetében, de a többiek számára nehezen volt érthető. Nemcsak maga a tananyag elvonása okozott nehézséget, hanem az általa fellépő motivációcsökkenés is. Ehhez járult a világszerte megfigyelhető elfordulás a természettudományoktól. Különböző hazai és nemzetközi felmérések alapján több kutató, szerző

is állítja, hogy Magyarországon az elméleti felkészültség jó, de az elméletet a tanulók nem tudják alkalmazni (Victor, 1991; Ujházy, 2004). A tények ismerete jó, alkalmazása közepes, a gyakorlati feladatok megoldása gyengébb, a tanulók teljesítménye csökken (Báthory, 1999).

„A mai természettudományos oktatásunkból a legtöbb helyen hiányzik a tapasztalat, holott ez volna a tanítás alapja. A tananyagnak, a módszereknek ezt kell szolgálnia, erre kell épülnie...” (Ujházy, 2004). A természettudományos tantárgyak oktatása során a tananyagban megfordult a természetes („logikus”) sorrend: *„az elmélet nem a tapasztalatokat segíti rendszerezni, hanem az elmélet igazolására mutatunk be néhány kísérletet. Elegendő tapasztalat nélkül a gyerekek elvont, érthetetlen és főleg értelmetlen az elmélet. Ezért nem érdekli, nem akarja megérteni, nincs mihez kötnie.”* (Ujházy, 2004).

A 2005-ben bevezetett új típusú érettségi hozott néhány fontos eredményt, például azzal, hogy kötelezően rendszerbe állította a kísérletezést, mérést. Akik fizikából érettségiznek, mindenképpen találkoznak gyakorlati problémákkal, illetve ezekkel kapcsolatos mérésekkel; és mivel ezekre a mérésekre az érettségi miatt amúgy is fel kell készülni, a jó tanár ezeket azoknak is megmutatja, akik nem érettségiznek (Knausz, 2009). Az is igaz persze, hogy egy természettudományos szaktárgyat tanító „jó” pedagógus számára a világ legtermészetesebb dolga az, hogy szeretné az összes diákja számára a lehető legtöbb kísérletet és gyakorlati alkalmazást bemutatni, sőt lehetőleg a diákokkal közösen elvégezni ezeket a kísérleteket. Ennek sajnos számtalan akadálya van (pl. alacsony óraszámok, hiányzó eszközök, stb.), de a szándék nem hiányozhat senkiből sem.

A természettudományokra az általános iskolás korú gyerekek a legfogékonyabbak; az ebben az időszakban felkeltett érdeklődés a későbbiekben is kitart, melyre a közép- és felsőoktatás is építhet. Ha tanárként elmulasztjuk a korszak adta lehetőséget kiaknázni, akkor később már csak nehezen hozható helyre a mulasztás. Persze ez sem lehetetlen. Előfordulhat, hogy az általános iskolában a tanuló szinte soha, vagy csak nagyon ritkán találkozott kísérletekkel, érdekes életközeli példákkal; ezért semmifajta késztetést sem érez a természettudományok mélyebb megismerése iránt. A középiskolában az „új” tanárának ettől függetlenül mindent meg kell tennie, hogy mégis megpróbálja megszerettetni, vagy kezdetben legalább elfogadhatóvá tenni az adott szaktárgyat. Nem könnyű azonban egy „rossz” módszertani kultúra, vagy kultúrátlanság miatt motiválatlan tanulót aktivizálni. Ehhez még a szokásosnál is több erőfeszítést kell tennünk. Természetesen a fordított eset is létezik, amikor a korábbi „tündöklő” tanár egyéniség után kap a diák egy megszürkült, elfásult pedagógust. A legideálisabb szituáció az, ha mind a tanár, mind a tanuló megfelelően motivált; és aktív résztvevője akar lenni a magasabb szintű tudáshoz, megismeréshez vezető útnak. A projekt módszer alkalmazásának az egyik legfontosabb jellemzője, hogy segíti a diákokat és a pedagógusokat is ennek az aktivációs energiának a felszabadításában. Szinte nem tudok elképzelni olyan természettudományos tantárgyat, amelyben nem lehetne hasznosítani a projektpedagógia vívmányait.

Az iskolai projektek középpontjában valamilyen megoldandó gyakorlati jellegű probléma áll; ez legtöbbször így van a valós életben is. Gondoljunk például a 4-es metro-projektre, vagy valamelyik autópálya építésre. Itt szinte nap-nap után újabb és újabb problémák jelennek meg, egyre újabb

feladatok fogalmazódnak meg menet közben, melyeket meg kell oldani. Természetesen a mi iskolai projektjeinkben nem ekkora horderejű problémák szerepelnek, de az előbbi példákat nyugodtan megbeszélhetjük a tanulókkal, hiszen a média is állandóan foglalkozik velük és legalább a diákok is láthatják, hogy a projekt alapú célmegvalósítás ténylegesen jelen van a hétköznapi életben (Beke, 2009a). Ez mindenképpen javíthat a projekt-oktatás tanulói megbecsültségén, hiszen a legtöbb diák a hagyományos tanítási módszereket és tananyagot főleg azzal kritizálja, hogy *„úgyisincs erre szükség a valódi életben”*.

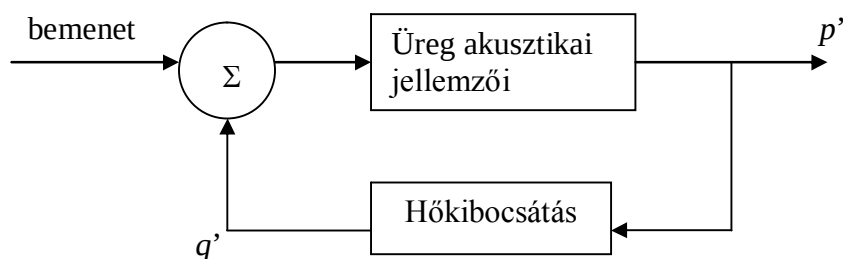
A projektfeladatokat legcélszerűbb csoportmunkában megoldani; létezik ugyan egyszemélyes projekt is (pl. vizsgamunka, szakdolgozat) vagy pármunka, de az iskolai projektekben általában 3-5 fős csoportokban tevékenykednek a diákok. Közben a tanárnak minden csoportra ügyelni kell, hogy mindenhol rendes ütemben haladjanak a tanulók a projektcél elérése felé, de ez a tanári szerep már nem a hagyományos oktató szerep. A projekt megvalósítása során a pedagógus sokkal inkább egy külső tagja (póttagja) minden csoportnak, egyfajta *„mentorálási”* feladatot végez úgy, hogy lehetőleg nem avatkozik bele direkt módon a csoportmunkába (Beke, 2009a). (Ez persze néha elkerülhetetlen, de alapvetően hagyni kell a gyermekeket kibontakozni, ha maga a projekt *„jó irányba”* halad.)

A dolgozatom hátralévő részében iskolánk gimnazista tanulóival végzett termoakusztikus projektfeladat részleteit és eredményeit szeretném bemutatni. Ebben a projektben önkéntes alapon vehettek részt a diákok. A projekt 2007/2008-as tanév őszén indult és 2010. februárjában fejeződött be. Láthatjuk, hogy 3 nevelési-oktatási éven ívelt keresztül a projekt, közben jó néhány tanuló leérettségizett és elhagyta a gimnáziumot, illetve újabb és újabb tanulók érkeztek. Szerencsére ez nem okozott különösebb problémát; sikerült úgy megszerveznem a munkát, hogy az újonnan érkezettek zökkenőmentesen be tudtak kapcsolódni a projektbe.

3. A termoakusztika alapfogalmai és a szakirodalom áttekintése

A dolgozat további részében a Rijke csövekkel végzett iskolai termoakusztikus projektfeladatot szeretném bemutatni. Ehhez azonban elsőként a termoakusztika alapfogalmaival kell megismerkednünk. Ebben a fejezetben a témakör szakirodalmát is áttekintem.

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 (Beke, 2011b). Ezt szemlélteti a 3.1. ábra (Matveev, 2003 alapján). A termoakusztika alapvető szerepet játszik számos technikai alkalmazásban pl. folyékony tüzelésű rakétahajtóművek, vagy gázturbinák és égőkamrák instabilitásai (pl. Culick, 1988; Sarpotdar és mtsai, 2003; Matveev és Culick, 2003b), illetve a termoakusztikus motorok esetében is (pl. Wheatley és mtsai, 1985; Swift, 1988; Backhaus és Swift, 1999, 2000). A kialakuló vibráció és a fokozott hőátadás rontják a berendezés működésének hatásfokát, illetve csökkentik az élettartamot; ezért is fontos a szakemberek számára, hogy a jelenség részleteit megismerjék (Beke, 2011b).



3.1. ábra A termoakusztikai rendszer vázlata.

3.1. Termoakusztikai vizsgálatok

A termoakusztikai vizsgálatoknak érdekes történeti előzményei vannak. Már két évszázad eltelt azóta, hogy az első termoakusztikával kapcsolatos megfigyelést publikálták és azóta számos eredmény született (Beke, 2011b). Higgins (1802) felfedezte az „éneklő 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. Sondhauss 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.

Petrus Leonardus Rijke (1812-1899) fizikaprofesszor volt a Leydeni Egyetemen Hollandiában. Rijke (1859) felfedezte, hogyan lehet egy mindkét végén nyitott csőben hanghatást fenntartani. A kísérletekhez egy kb. 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 elektromos fűtést is, ehhez viszonylag nagy erősségű áramot kellett átvezetni a hálón, hogy az izzásba jöjjön.

A folytonos fűtés esetén folytonos hanghatást észlelt; a hang meglehetősen erős volt, még a három teremmel arrébb lévő kollégái is panaszkodtak miatta. Rijket eredetileg a jelenség a zenei hangok szempontjából érdekelte, de a kísérletek elvégzése után nem találta a csövet megfelelő „hangszernek” (Beke, 2011b). A jelenségre a legkorábbi magyarázatot maga Rijke adta, mely szerint a forró háló átadja a hőt a szomszédos légtömegnek, amely kitágul, a sűrűsége lecsökken, elkezd felfelé emelkedni 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 (Sarpotdar és mtsai, 2003). 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. A jelenség elméleti analízisét Riess (1859, 1860) adta meg.

Lord Rayleigh (John William Strutt) (1896) „*hatásosan bemutatható jelenségként*” említi a Rijke cső hanghatását. Lord Rayleigh (1878, 1879) a kísérleteihez egy 1,5 m hosszú, 12 cm átmérőjű acélcövet használt, a fémháló szintén acélból készült és a cső alsó részében helyezte el, a cső negyedrésznél. Az acélhálót annyira felfűtötte, hogy a kialakuló hang hatására megremegett a kísérleti labor. Lord Rayleigh (1896) megfogalmazott egy kritériumot arra, hogyan lehet hő közlésével kelteni és fenntartani hanghullámot: *„Ha hőt közlünk, illetve elvonunk, a levegő rezgésbe jön a hengeres csőben. A hatás a hőközlés és a rezgés közötti fázistól függ. Ha a hőt akkor közöljük a levegővel, amikor az a legjobban összenyomódik, vagy akkor vonjuk el, amikor leginkább ritkul, ez a vibráció erősödését okozza. Másfelől, ha a legnagyobb ritkulás pillanatában közöljük a hőt, vagy a legnagyobb összenyomódás pillanatában vonunk el hőt, ez a vibrációt csillapítja.”* Bevezette a Rayleigh integrál fogalmát, ami a rendszer stabilitását jellemzi.

A Rijke jelenség első kvantitatív analízise Lehmann (1937) nevéhez fűződik. Azt feltételezte például, hogy a rács csak akkor ad át hőt a levegőnek, amikor az felfelé áramlik a csőben, a fordított irányú légáramlásnál nincs hőátadás. Lehmann elmélete több szempontból is hibásnak bizonyult, mint arra Feldman (1968) és Raun és mtsai (1993) rámutattak.

Neuringer és Hudson (1952) modellezték a Rijke csőben lezajló oszcillációt és arra következtettek, hogy a hang a légáram turbulenciájának és a rács körüli sebesség-gradiensnek köszönhető. Az eredményeiket csak részben tudták kísérleti adatokkal bizonyítani. Megállapították azt is, hogy ha a hőforrás a cső első (alsó) felében van, akkor a rendszer első gerjesztett módja lehetséges, ha a hőforrás a cső másik (felső) felében helyezkedik el, akkor ez a típusú gerjesztés nem valósulhat meg. Putnam és Dennis (1954) megadott egy hullámegeyenletet a hőátadással kapcsolatosan, mellyel a Rayleigh feltételt igazolták: csak akkor jöhet létre növekvő instabilitás a Rijke csőben, ha a nyomás és a hőátadás fluktuációja között a fázisszög kedvező, azaz kevesebb, mint 90°.

Carrier (1955) vizsgálta a termoakusztikus rendszer dinamikai jellemzőit, a hő forrásául egy felmelegített szalag szolgált a modelljében. Carrier modelljének kísérleti vizsgálatát Bailey (1957) végezte el, melyben igazolta, hogy létezik egy minimális szalag méret, ami az oszcilláció

létrehozáshoz szükséges. Ez tulajdonképpen azt mutatja, hogy a termoakusztikai rezonancia jelenség kiváltásához szükség van arra, hogy egy alsó küszöb, vagy más néven kritikus teljesítménynél nagyobb fűtő teljesítményt juttassunk a rendszerbe. 1957-ben Merk kidolgozott egy matematikai modellt, melyben olyan termoakusztikus rendszereket vizsgált, ahol a hőforrást pontszerűnek (lokálisan koncentrálnak) lehet tekinteni, a rendszer belsejében a hőmérsékletet állandónak tekintette. Bevezette a transzfer függvény fogalmát a rács hőátadásával kapcsolatosan, amelyet ma is gyakran használnak. 1963-ban Maling a hőforrást delta függvénnyel reprezentálta, és egy viszonylag egyszerű egydimenziós stabilitási egyenletet állított fel a rendszerrel kapcsolatban. Ez a modell Putnam és Dennis (1953), Kerwin (1954), Carrier (1955), illetve Merk (1957) korábbi eredményein alapult. Ezt követően számos cikket publikáltak, melyekben általában a termodinamikai rendszerek egy-egy jellemző tulajdonságát vizsgálták, illetve ezeknek a Rijke csővel való modellezési lehetőségeit kutatták.

1969-ben Nicholas Rott elkezdett egy publikációsorozatot, amely a termoakusztikával foglalkozik (Rott, 1969, 1976, 1980, 1983). Az első jelentős témakör a Taconis-oszcilláció volt, mely akkor következik be, ha egy gázzal töltött csövet folyékony nitrogénba merítenek és lehűtenek nagyon alacsony, ún. kriogenikus hőmérsékletre. (A cseppfolyós nitrogén forráspontja $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$, a fagyasztó berendezések üzemi hőmérséklete kb. $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$) Amikor a csövet kihúzták a hűtőközezből az berezonált és hangosan „énekelni” kezdett. Feldman és Carter (1970) a Sondhauss oszcillációt vizsgálták. Az elméleti modell eredményeit néhány kísérleti megfigyeléssel is alátámasztották. Ehhez hasonló jelenségek olyan esetben fordulhatnak elő, amikor a rendszerben nagy a hőmérséklet gradiens (pl. rakéták hajtóműve, vagy bizonyos gázégő típusok).

Az említett művek többségének „hiányossága” az volt, hogy a hőmérsékletet végig egyenletesnek tekintették a rendszerben; a valóságban a hőmérséklet eloszlása egyenetlen, ez meghatározó a rendszer stabilitása vagy instabilitása szempontjából. Kivételt jelent ez alól Raun és Beckstead (1993), illetve McIntosh és Rylands (1996) művei. Raun és Beckstead (1993) kifejlesztett egy interpolációs eljárást, melynek segítségével ki lehet számítani a cső belsejében az egyes helyek átlagos hőmérsékleti profilját egy viszonylag egyszerű hőmérséklet mérési módszer alapján. Ehhez hasonló eljárást használt McIntosh és Rylands is 1996-ban, akik a termoakusztikai instabilitások során fellépő energia veszteséget modellezték.

A lineáris modell kiterjesztésével foglalkoztak Cao és mtsai (1996), amelyben megmaradási egyenletek felhasználásával kerestek numerikus megoldást a rendszer stabil állapotának meghatározására. Ezt a modellt fejlesztette tovább Worlikar és Knio (1996, 1999), illetve Worlikar és mtsai (1998), melyben igyekeztek a bonyolult matematikai formulák megoldására egyszerűbb módszert megadni. Yuan és mtsai (1997) bemutattak egy numerikus módszert, amely a lineáris elmélet kvázi egydimenziós közelítésének tekinthető. A számítások meglehetősen összetettek voltak, így nehézkes volt különböző paraméterek esetén a rendszer ellenőrzése. Gopinath és mtsai (1998) megadtak egy nemlineáris modellt a rendszer stabilitásának ellenőrzésére. Ebben kiszámították a hőmérséklet eloszlását a rezonátorként szolgáló üreg belsejében, majd ezt felhasználva vizsgálták a rendszer viselkedését.

A termoakusztikus rendszer stabilitásának egyik fontos jellemzője a hőtranszfer. A hőtranszfer tulajdonságait néhány speciális esetre megvizsgálta Merk (1957), Kwon és Lee (1985), Bayly (1986), illetve Nicoli és Pelce (1989). Bayly (1986) kidolgozott egy korlátozott tartományban érvényes elméleti modellt, amelyben a hőtranszfert nemlineárisnak tételezte fel; meghatározta a rendszer stabilitásának korlátait. A modellből megjósolta, hogy a rendszerben elképzelhető hiszterézis jelenség is. Kwon és Lee (1985) a hőforrást forró hengerekkel modellezték, az áramló levegőt összenyomhatatlannak tekintették. Nicoli és Pelce (1989) egydimenziós modellben vizsgálta a Rijke csövet, a csőben áramló gázt összenyomhatónak tekintették és néhány áramlási tulajdonság is változtatható volt; kiszámították levegő részecskéinek rácson való áthaladási sebességét. Meghatározták a rendszer stabilitásának feltételét úgy, hogy a hőmérsékletet végig állandónak vették.

Hantschk és Vortmeyer (1999) a Rijke csőben lezajló fluktuációs folyamatokat számítógépes CFD (Computational Fluid Dynamics) analízissel vizsgálták, majd a kapott eredményeket összevetették a kísérleti eredményekkel. A modell jól jellemezte a valódi rendszert, de ezt csak néhány paraméter esetén ellenőrizték le. McQuay és mtsai (2000) a Rijke típusú égőkamrák instabilitását befolyásoló néhány paramétert vizsgálták. Garrett és Backhaus (2000) egy érdekes összehasonlítást adott a termoakusztikus berendezésekben lezajló akusztikus rezonancia, illetve a lézerekben lejátszódó optikai hullámerősítés között. (Mindkét berendezésben van egy-egy rezonátor üreg, amelyben hullámok erősítése játszódik le. Mindkét rendszerben szükség van energia betáplálására és önerősítő visszacsatolásra is.)

Yoon és mtsai (2001) olyan modellt dolgoztak ki, amelyben a Rijke cső akusztikai tulajdonságainak két módozata is lehetséges volt. A hő forrása térben koncentráltan helyezkedett el és számoltak a sebesség fluktuációjával is, de más hatásokat figyelmen kívül hagytak az egyszerűség kedvéért. Majdalani és mtsai (2001), majd Entezam és mtsai (2002) numerikus szimuláció segítségével vizsgálták a Rijke csőben lezajló tranziens folyamatokat. A modellben néhány egyszerűsítő feltételt használtak, a kapott eredmények kísérleti alátámasztásáról azonban nem számoltak be. Matveev (2003) egy átfogó elemzést készített, melyben azt vizsgálta, hogy milyen feltételek esetén alakulhat ki oszcilláció a Rijke csőben.

Az utóbbi két és fél évtizedben számos olyan publikáció látott napvilágot, amelyekben azt vizsgálták, hogyan akadályozható meg a termoakusztikus instabilitások kialakulása. A hőátadás fluktuációja és a nyomás fluktuációja kölcsönösen hatást gyakorolnak egymásra, ami a rendszer instabilitásának forrása. A kialakuló oszcilláció károsíthatja magát a berendezést is (pl. a berendezésekben repedések keletkezhetnek, vagy a rázkódás hatására leszakadhatnak különböző alkatrészek), ezért a gyakorlati életben legtöbbször célszerű megakadályozni azt, hogy kialakulhasson a nagy amplitúdójú oszcilláció (Beke, 2011b). Heckl (1985, 1988) bemutatta, hogyan lehet aktív szabályozással csökkenteni a Rijke csőben lévő instabilitásokat egy speciális visszacsatoló rendszer segítségével. Heckl (1990) vizsgálta a csőben lezajló nemlineáris folyamatokat és kísérleti úton kidolgozott egy modellt a rendszer stabilitásának meghatározására.

Általában valamilyen speciális cél érdekében történik a termoakusztikus folyamat szabályozása: pl. az égőkamrában az égés tökéletesítése, a hatásfok növelése, az égetőmű teljesítményének növelése, az égés során képződő nitrogén-oxidok mennyiségének csökkentése (Beke, 2011b). A kísérleti adatokból az derült ki, hogy az égőkamrákat általában jól lehetett kontrollálni, de bizonyos esetekben mégis instabillá váltak (pl. Bloxidge és mtsai, 1987; Gulati és Mani, 1992). Billoud és mtsai (1992) vizsgálták, hogyan lehet az égőkamrák működési tartományát kiszélesíteni. Widrow és Stearns (1985), Neumeier és Zinn (1995) az égőkamrákban lezajló égés közbeni bizonytalansági hatásokat tanulmányozta. Fung és mtsai (1991), Fung és Yang (1992) az égéstérre különböző megmaradási és dinamikai egyenleteket adott meg, amelyekkel optimalizálni lehetett az égést. Az égéstérben fellépő akusztikus hatásokat is figyelembe vették. Culick és Yang (1992) hasonló elemzést végzett rakétahajtóművekre.

Annaswamy és mtsai (1997), Hathout és mtsai (1998), Fleifil és mtsai (1998), Annaswamy és mtsai (2000) modelleket készítettek az égőtérben zajló folytonos égés leírására. Az égés közben a gáz áramlását laminárisnak feltételezték. A rendszerben fellépő termoakusztikai rezgéseket úgy szabályozták, hogy egy érzékeny mikrofont helyeztek el az üreg belsejében, ez szenzorként funkcionált. A mikrofon jeleit digitális formában egy számítógépbe vezették, ahol egy program döntött arról, hogy be kell-e avatkozni a rendszer működésébe; ami úgy történt, hogy egy hangszórót is elhelyeztek a rendszer belsejében, ez töltötte be az aktuátor szerepét; a hangszóró vezérlését a számítógépes program végezte. A numerikus modellből kapott eredményeket kísérleti adatokkal is alátámasztották.

A véges-dimenziójú, vagy más néven Galerkin modelleket (Meirovitch, 1967) széles körben használják termoakusztikus kölcsönhatások tanulmányozására (pl. Zinn és Lores, 1972; Culick, 1976; Dowling, 1995). A rakétamotorok vizsgálata során általában azt feltételezik a kutatók, hogy ezek a Galerkin módok egymástól lineárisan függetlenek (Culick, 1976; Culick és mtsai, 1995; Ananthkrishnan és mtsai, 2005). Az elsődleges cél az volt, hogy a frekvencia növekedésére és a csillapítási jelenségek leírására zárt alakú megoldást dolgozzanak ki. Az eljárás lehetővé tette, hogy újabb és újabb fizikai hatásokat vegyenek figyelembe a rendszer analízisekor, anélkül, hogy az egész modellt át kellene dolgozni. Culick (1997) megmutatta, hogy a Galerkin módok közötti lineáris csatolás elhanyagolása, érdemben nem (vagy csak kis mértékben) módosítja a rendszer saját frekvenciáit; azaz a lineáris csatolással nem kell feltétlenül számolni. Ez megkönnyíti a további számításokat. (Azért lényeges ezt megemlítenem, mert az általam kidolgozott Rijke cső modellben élek ezzel az egyszerűsítési lehetőséggel.) Balasubramanian és Sujith (2008a) kiemeli, hogy a termoakusztikának fontos szerepe van az égetőművek normálistól eltérő égésében; a rendszer stabil és instabil állapota közötti tranziens állapot jellemzőit vizsgálták.

3.2. Sztochasztikus termoakusztikus folyamatok

A gyakorlati életben alkalmazott égető- és hajtóművek esetében az égés zajos közegben történik, gyakran turbulens áramlási környezetben, sőt az égéstér különböző részein eltérőek az áramlás jellemzői. Az ebből eredő örvényes és entrópia hullámok a forrásai a termoakusztikus instabilitásoknak (Burnley, 1996). 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) bemutatta, hogy a nyomásingadozások ciklusról ciklusra is változnak. Burnley (1996), illetve Clavin és mtsai (1994) azt javasolták, hogy az instabilitás jellemzésére valószínűségi változókat kell használni a termoakusztikus sztochasztikus folyamatokban. Lieuwen (2003), illetve Kedia (2008) statisztikai elemzést adott az égés instabilitásának meghatározására. A sztochasztikus folyamatoknak komoly gyakorlati következményei lehetnek, módosíthatják mind a lineáris, mind a nemlineáris viselkedését a hajtóműnek. 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 „újra-indításával” ezek a jelenségek általában megszűnnek. A valós gyakorlati technikai alkalmazások során ezt a kiszámíthatatlan működési tartományt kerülni kell (Beke, 2011b).

A rendszerben lezajló véletlenszerű folyamatok pontos hatásmechanizmusa egyelőre nem ismert, a jelenség analízise nagyon komplex probléma. Lieuwen és Banaszuk (2005) vizsgálta a rendszer stabilitási határának módosulását, miközben bizonyos sztochasztikus jellemzők változtak. Arra következtettek, hogy az égési környezetben lezajló turbulens áramlások pontos elemzése elengedhetetlen a folyamatok jobb megértéséhez. Farrell és Ioannou (2002) atmoszférikus áramlású környezetben vizsgálta a véletlenszerű folyamatokat egy perturbációs modell segítségével. Ehhez hasonlóan Schmid (2007) a rendszer hidrodinamikai stabilitását vizsgálta a Navier-Stokes egyenletek alapján.

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 nevezzük; a következményük akár szerkezeti károsodás is lehet (Zinn és Lieuwen, 2005). 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. A szilárd hajtóanyagú és a folyadék hajtóanyagú hajtómű rendszerek is hajlamosak az instabilitásokra (Culick, 1988; Margolin, 1999).

Manapság a repülőgépipar számára is komoly követelményeket állít a környezetvédelmi normáknak való megfelelés. A nitrogén-oxidok kibocsátása az egyik legkényesebb témakör. A nitrogén-oxidok emissziója arányos 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 a bennük lezajló termoakusztikus instabilitások következtében kialakuljon egy alacsony frekvenciájú (50 – 150 Hz) longitudinális hullám. Ez az akusztikus hullám nagyon erőteljes („szkreccs”-nek vagy „buzz”-nak nevezik a mérnökök, ami

zümögést, mormogást, döngést, sercegést jelent magyarul) és akár a hajtómű fizikai károsodásához vezethet; sőt esetleg teljesen tönkre is mehet a berendezés.

A XX. században megjelentek, majd elterjedtek a sugárhajtású repülőgépek (jet) és a rakéták; az égés ezeknek a hajtóművében nagyon nagy teljesítménysűrűségű (GW/m^3 nagyságrendjébe esik). Ennek az energiának nagyon kis hányada is elegendő ahhoz, hogy a hajtómű belsejében hanghatást keltsen és tartson fenn. A Rijke cső azért került a figyelem 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” (Sarpotdar és mtsai, 2003).

Ehhez hasonló jelenségről számol be Pun (2001): 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 szakemberek a szemétegető által keltett hang vizsgálatára Rijke csövet használtak, ami a szemétegető egyszerűbb laboratóriumi modelljéül szolgált.

3.3. 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-átalakítónak, hatékony fűtésre, vagy hűtőszekrénynek, stb. Ehhez feltétlenül szükséges, hogy a berendezésben lezajló termoakusztikus folyamatokat alaposan ismerjük (Beke, 2011b).

Az egyik ipari alkalmazása a Rijke-féle jelenségnek 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 kb. $5\text{ }\mu\text{m}$ 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 megnő az effektív méretük, és ezeket a nagyobb részecskéket már könnyebb a hagyományos szűrési eljárásokkal eltávolítani a füstből. Ebben az esetben az akusztikai oszcilláció kívánatos jelenségnek számít, amelyet a Rijke csővel modellezhetnek a kutatók, hogy a lehető legkedvezőbb legyen a szűrés szempontjából a részecskék mozgása (Sarpotdar és mtsai, 2003).

Egy másik alkalmazás a TAPEC (Thermal Acoustic Piezo Energy Conversion)⁵ amerikai hadi projekt, melynek lényege, hogy egy rezonátor segítségével hőáramlással hanghullámokat keltenek, majd a hanghullámok által nyert akusztikus nyomás segítségével elektromos áramot gerjesztenek. Ezzel egy új típusú feszültségforrást kapnak, ami a hagyományos akkumulátorokkal kombinálva újfajta, nagyobb kapacitású mobil áramforrásokat eredményez.

⁵ https://www.fbo.gov/index?s=opportunity&mode=form&tab=core&id=0870962101063c96336ffb0d4d8e8066&_cview=0

A Stirling-féle akusztikus hőerőgép egy olyan „hajtómű”, ami hatásosan alakítja a hőt mechanikai (hang) energiává. Egyszerű eszköz, amely csak csövekből és hagyományos hőcserélőkből áll, nem tartalmaz olyan mozgó alkatrészeket, mint egy benzin vagy diesel motor (Backhaus és Swift, 1999, 2000). A Stirling motorban a levegő-tüzelőanyag keveréket pontosabban lehet szabályozni, mint a hagyományos belsőégésű motorokban, sőt az elégetlen füstgázok mennyisége szinte zéró. A motor üzemi nyomása viszonylag alacsony, ezért kisebb és könnyebb alkatrészekből elkészíthető; a hajtómű járása egyenletes, működése megbízható. A Stirling motor kenését egyszerűbb megoldani, mint egy hagyományos belsőégésű motor esetén. Hátránya viszont, hogy a berendezést csak lassan lehet beindítani és a motor teljesítményét is csak lassan lehet változtatni. (Ez persze nem gond olyan esetben, ha hosszútávon egyenletes teljesítményű motorra van szükségünk. A gépjárművek motorjai esetén viszont elvárható, hogy az erőforrások széles dinamikai tartományban működjenek, ezért egyelőre nem várható, hogy ezen a téren Stirling motorokat alkalmazzanak.) A berendezés segítségével a hangenergiát közvetlenül felhasználhatjuk akusztikus elvű hűtőberendezésekben, vagy impulzuscső hűtőkben, de elektromos áramot is előállíthatunk segítségével. Az eszköz hatásfoka eléri a 30%-ot, remélhetőleg gazdaságos lakossági felhasználása is lehetővé válik a közeljövőben. Fejlesztésében a Los Alamosi Nemzeti Labor⁶ és a NASA⁷ is részt vesz. (Alkalmazási területei lehetnek a műholdak és a radarberendezések hűtése, gázok cseppfolyósítása, a légkondicionáló berendezések hulladékhőjének hasznosítása, gázkeverékek szétválasztása, stb.).

A termoakusztikus elven működő eszközöket két nagyobb csoportra oszthatjuk: az egyikben állóhullámok alakulnak ki, a másik típusban haladó hullámok keletkeznek. Ceperley (1979) kitalált egy olyan termoakusztikus berendezést, melynek alapjául a Stirling motor szolgált, de az eredeti Stirling motort úgy alakította át, hogy a mozgó alkatrészeket elhagyta. Ceperley felfedezése után számos kutató kísérletezett az eszköz további fejlesztésével. Ennek során különböző méretű és számú csövekből álló kötegeket (stack) és hőcserélőket helyeztek el az eszközben, így növelni tudták a teljesítményt és a hatásfokot is. Wheatley és mtsai (1985) által kifejlesztett hőcserélőket használták Wollan és mtsai (2002); készítettek egy állóhullámokkal működő termoakusztikus motort, melynek teljesítménye 17 kW, a hatásfoka 18%. Yazaki és mtsai (1998), illetve de Blok (1998) haladóhullámokkal működő termoakusztikus berendezéseket terveztek. Ezek speciális termoakusztikus Stirling motorok, mozgó alkatrészek nélkül, de a Ceperley (1979) féle alapkoncepciót továbbfejlesztették. A berendezésekben speciális hőcserélő, stack, hő visszanyerő (regenerator), hő pufferező (thermal buffer), áramlás visszacsatoló cső található; a teljesítményük néhány kW, a hatásfokuk 30% körül van. Backhaus és Swift (2000, 2001), Backhaus (2002), illetve Gardner és Swift (2003) terveztek egy olyan termoakusztikus motort, melyben „kaszádkapcsolásban” egy darab állóhullámokkal működő és két darab haladóhullámokkal működő berendezést kapcsoltak össze. Ez az eszköz megbízható, a teljesítménye és a hatásfoka

⁶ Los Alamos National Laboratory web site: <http://www.lanl.gov/>

⁷ NASA Stirling Project: <http://search.nasa.gov/search/search.jsp?nasaInclude=Stirling>

meghaladhatja a korábbi termoakusztikus berendezések jellemzőit. A gyártási költségek alakulása dönti el, hogy a közeljövőben milyen mértékben terjednek el ezek az eszközök (Beke, 2011b).

A termoakusztikus energiaátalakítás lényege, hogy a hanghullámok tulajdonságait használja a közvetlen hő-villamos energia konverzióhoz. A jövőben kiválthatja a kondenzációs hűtőgépeket és hőszivattyúkat, illetve megoldást és versenytársat fog jelenteni a foto-voltatikus rendszereknek (napelemek). Napjainkban intenzív kutatás folyik egy különleges fűtő-hűtő-áramfejlesztő eszköz létrehozására. A SCORE⁸ nevű berendezést négy brit egyetem, számos afrikai és ázsiai egyetem kutatói, a Los Alamosi Nemzeti Labor, egy nemzetközi jótékonyági szervezettel karöltve, közösen fejleszti. 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. Az elején a tudományos kutatásokra fókuszálnak. Ide tartozik egy biomasszával fűtött termoakusztikus hajtómű tervezése, amely áramgenerátorként és hűtőgépként is funkcionál; illetve olcsó és robosztus váltakozó áramú generátor tervezése, amely alkalmas a tömegtermelésre. Ezt követően az érintett lakosság körében szeretnék a technológiát megismertetni és elterjeszteni. 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 (Beke, 2011b).

Végezetül bemutatok egy olyan példát, ahol a Rijke csövet egy közlekedésbiztonsági vizsgálathoz használták fel. 2003-ban Norvégiában egy 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 keletkezett és ennek következtében már nagyon sokan életüket veszítették. A tesztek során az alagútban különböző járműveket helyeztek el, majd az alagútban egy adott helyen tüzet gyújtottak és vizsgálták, hogy mi történik az alagút különböző pontjain. (Az alagútban még külön légáramlást is lehetett kelteni hatalmas teljesítményű ventilátorokkal.) A kutatókat is meglepte, hogy bizonyos esetekben (pl. 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. Az alagútban is kialakulhat gáz oszcilláció, hasonlóan a Rijke csövekhez, ennek az oszcillációnak a 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 ebből a szempontból az alagútban terjedő tüzek „termoakusztikus” modelljéül szolgált (Lönnermark, 2005). Remélhetőleg a vizsgálat hozzájárul ahhoz, hogy a jövőben biztonságosabb alagutakat tervezhessenek a mérnökök.

⁸ The SCORE thermoacoustics technology web site: <http://www.score.uk.com/research/default.aspx>

4. Célkitűzések

A technikai életben használt termodinamikai rendszereknek (pl. repülőgép motorok és rakétahajtóművek) vannak bizonyos akusztikai jellemzői. Ha az égetőműben (égőkamrában) a hő kibocsátása a nyomás és a sebesség fluktuációjától függ, akkor egy visszacsatolás keletkezik, ami instabillá teheti az egész rendszert. A nyomás és a hőátadás közötti fázisszög szabja meg, hogy a rendszer stabil, vagy instabil állapotban van-e (Rayleigh, 1878). Ha a nyomás oszcillációja és a hő kibocsátás fázisban vannak egymással, akkor kialakul egy akusztikus rezgés, a nyomás oszcillációja erősödik. A nemlineáris hatások miatt ez az erősödés csak véges mértékű, de így is elérheti azt a szintet, ami a berendezés károsodásához vezet.

Az akusztika és a termodinamika közötti kapcsolat még nem ismert teljes mértékben; a dolgozatomban ennek a kapcsolatnak néhány jellemzőjét mutatom be. A kísérleteinkhez Rijke csöveket használtunk. A Rijke cső egyszerű kísérleti eszköznek számít, amivel a rendszerben fellépő termoakusztikus instabilitásokat vizsgálhatjuk. Minél nagyobb arányú a hőátadás a csőben elhelyezett felforrósított rács és a rácson átáramló levegő között, annál nagyobb az esély arra, hogy a csőben valamilyen instabilitás lép fel.

- Céloom, hogy meghatározzam a Rijke cső paraméterei (cső hossza, cső helyzete, rácspozíció, rács áteresztő képessége, légáram intenzitás, hőteljesítmény, fűtés időtartama) hogyan befolyásolják az instabilitás kialakulását a rendszerben.
- A rendszer főbb paramétereit (rácspozíció, légáram intenzitás, hőteljesítmény, fűtés időtartama) tekintve mindig vannak olyan paraméter kombinációk, amelyben a korábban instabil rendszer stabilá válik, azaz ha a cső hangot bocsát ki, akkor akár egyetlen paraméter változtatásával elérhetjük azt, hogy ez az instabil csőállapot megszűnjék, azaz a hang elhal. A vizsgálatok kezdetén arra koncentráltam, hogy megkeressem azokat az állapotokat, ahol a hang keletkezik. A későbbiek folyamán rájöttem, hogy azt is vizsgálnom kell, hogy a hang kibocsátás mikor szűnik meg, ugyanis ebből a szempontból sem teljesen szimmetrikus a Rijke csőben lejárló folyamat. A szakirodalomban korábban nem fordítottak elég hangsúlyt arra, hogy pontosan meghatározzák, hogy mikor megy át a rendszer stabilból instabil állapotba, illetve milyen feltételek között zajlik le a fordított folyamat. Célul tűztem ki, hogy a vizsgálataimban erre is választ keressek és azt kísérleti adatokkal alátámasszam.
- A következő célom, hogy a kísérleti adatok birtokában megadjak egy olyan matematikai modellt, amely a Rijke csőben lejátszódó termoakusztikus folyamatokat jellemzi. A modell finomításával el kívánom érni, hogy a vizsgált paraméterek mellett megfelelő pontossággal jellemezhessem a Rijke cső viselkedését.
- A céljaim között szerepel egy számítógépes program kifejlesztése, amely a kezdő- és peremfeltételek megadása mellett meghatározza a Rijke cső stabil és instabil állapotai közötti határvonalat. A program készítéséhez az általam kifejlesztett matematikai modellt használom; a program segítségével azt is megvizsgálom, hogy milyen határfeltételek esetén fogadható el a modell.

- Ha a Rijke cső gerjeszthető az adott paraméterek mellett, akkor megvizsgálom, hogy milyen frekvenciájú alap és felharmonikusok szólalhatnak meg a cső gerjesztett állapotaiban. A mérések során azt tapasztaltam, hogy az elméletileg kiszámított frekvenciáktól kicsit eltérnek a mért frekvenciák. A célom, hogy perturbációs módszert alkalmazva választ kapjak, hogyan magyarázható a frekvenciák eltolódása. Ha a rács pozíciója vagy a rácsot fűtő teljesítmény kicsi megváltozik, akkor a hang frekvenciája is változik, ezt is vizsgálom a dolgozatban.
- A céljaim közé tartozik, hogy megvizsgáljam a termoakusztikus projekt munka diákokra gyakorolt hatásait. Vizsgálom, hogy a több tantárgyat integráló projekt munka hatására a tanulók több tantárgyból is jobb eredményt érnek-e el azoknál a tanulóknál, akik nem vettek részt a termoakusztikus projektben. Célom, hogy megmutassam, pedagógiai szempontból is van-e értelme és haszna a projektfeladatnak.
- Egy kérdőíves vizsgálatban arra keresek választ, hogy az iskolánk tanulói hogyan viszonyulnak a projektmunkához. A céljaim közé tartozik, hogy megmutassam, a projektfeladatok pozitívan befolyásolják a tanulók tantárgyakhoz fűződő attitűdjét; a projektek alkalmasak arra, hogy motiváljuk a tanulókat; a projektek hatására a diákok tudásszintje növekszik, ismereteik bővülnek és a képességeik, kompetenciáik is fejlődnek.

5. A termoakusztikus projekt első állomása: gázzal fűtött Rijke csövek vizsgálata

A hang az egyik legalapvetőbb, legtermészetesebb jelenség, amellyel nap, mint nap találkozunk. A múlt század óta a tudomány segítségével egyre több területen sikerült a hangot munkára fogni: az ultrahangos sebészet, a zajszűrő rendszerek és a szonár kiváló példák erre (Fahey és Timbie, 2006). A hűtés, az elektromosság és a mechanikai energia felhasználása terén is találhatunk példákat a hang felhasználására, amely kapcsolatot teremt az akusztika és a termodinamika között.

A Rijke cső az egyik legegyszerűbb termoakusztikus eszköz, amely a hőt akusztikus energiává alakítja. Egy mindkét végén nyitott csőben, mint amilyen a Rijke cső is, akusztikus állóhullámok alakulhatnak ki. Ennek az eredménye, hogy a gáz a cső minden részén váltakozva összenyomódik és kitágul, a gázcseppkék a csőben ezzel fázisban oszcillálnak. Álló hanghullámok könnyen kelthetők a csőben valamilyen energiaforrás segítségével, pl. a cső egyik végénél. Ha az energia beáramlása megszűnik a hanghullám amplitúdója csökken, mivel sűrűdés lép fel a cső falával és energia veszik el a cső nyitott végénél is. Ezek szerint az energiaforrásnak nem csak az a szerepe, hogy újabb hanghullámokat kelt, hanem a már meglévő hanghullámokat is fenntartja (Sarpotdar és mtsai, 2003).

5.1. Rayleigh feltétel

Ha a Rijke cső hangot ad, állóhullám keletkezik, a csőben lévő gáz felváltva összenyomódik (kondenzáció) és kitágul (ritkulás) minden egyes ciklusban. A hőforrás akusztikus hullámot hajt át az összenyomódás félperiódusában, a tágulási félperiódusban viszont gyengül a hullám. A csőben a levegő mozgása két részből tevődik össze. Az áram, vagy a gázláng hatására felforrósodott csőben a levegő felfelé kezd áramlani, de ehhez hozzájárul még a hang hatására kialakuló hullám (Beke, 2009c). Egy fél vibrációs ciklusban a levegő a cső mindkét végéből a belsejébe áramlik, amíg el nem éri a nyomás a maximumot. A következő fél ciklusban a levegő kifelé áramlik egészen addig, amíg a nyomás a minimumot el nem éri. A levegő áthalad a fűtött fémhálón és a hő következtében felforrósodott hálótól tovább nő a levegő nyomása a gáztörvénynek megfelelően (Sarpotdar és mtsai, 2003). A periódus első felében a levegő felfelé áramlásánál a háló már forró, de a körülötte lévő levegő még nem. Mielőtt elérné a nyomás a maximális értéket a hidegebb levegő egy része érintkezésbe kerül a hálótól és nyomása hirtelen megnövekszik, ez felerősíti a vibrációt. A következő félperiódusban, amikor a nyomás csökken, a felső részben lévő levegő lefelé áramlik, keresztül a hálón, amely még forró, ezért a nyomásban nem történik változás, gyakorlatilag szinte nincs hőátadás. A hanghullám így minden egyes periódusban erősödik és nagyon gyorsan megnövekszik a hullám amplitúdója. A hőátadás tehát a forró rács és a hanghullám között a ciklus egyik felében nem ugyanakkora, mint a ciklus másik felében (Sarpotdar és mtsai, 2003). A nettó hőteljesítményt ($\dot{Q}$) két részre oszthatjuk, egy átlagos részre ($\dot{Q}_0$) és egy időben változó részre ($\dot{Q}'$):

$$\dot{Q} = \frac{dQ}{dt}, \text{ és } \dot{Q}' = \frac{dQ'}{dt}, \quad (5.1)$$

illetve

$$\dot{Q} = \dot{Q}_0 + \dot{Q}'. \quad (5.2)$$

Hasonlóképpen a nettó nyomás (p) a csőben szintén két részre bontható:

$$p = p_0 + p', \quad (5.3)$$

ahol p_0 az átlagos nyomás, p' az időben változó komponens. Az oszcillációs nyomás (p') maximuma a cső középpontjában van, a cső nyitott végeinek közelében minimális az értéke. A csőben áramló részecskék sebessége (u) is két részből tevődik össze:

$$u = u_0 + u', \quad (5.4)$$

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

A $\dot{Q}_0$ hőteljesítmény a csőben u_0 sebességgel „halad”, a változó $\dot{Q}'$ komponens a hanghullám u' sebességével. A kettő kombinációja eredményezi az időben változó hőközlést. Az akusztikus ciklus egyik felében u_0 és u' egyirányúak, és a hőforrás kapcsolatba kerül a friss hidegebb levegővel, ilyenkor a hőközlés növekszik. A ciklus másik felében u_0 és u' ellentétes irányúak, így a légáramlás eredő sebessége csökken. Ez azt jelenti, hogy a hőforrást körülveszi egy „előmelegített” légréteg, amely csökkenti a hőátadást a ciklus ezen felében. A hőátadás változó része ($\dot{Q}'$) és a változó sebesség (u') nagyjából arányosak egymással, azaz $\dot{Q}' \sim u'$ a Rijke csőben (Sarpotdar és mtsai, 2003). Ha az átlagos áramlási sebesség (u_0) hiányzik, a levegő részecskéi az átlagos helyzetük körül oszcillálnak, amíg az akusztikus zavar jelen van. Ha a figyelmünket a fémháló körüli részre fordítjuk, láthatjuk, hogy néhány ciklus után a hőátadás csökken a háló és a levegő részecskéi között. Ez azért van, mert a „zavar” során a hálón ugyanazon „levegőrészek” áramlanak át és a háló hőmérséklete állandó értéket ér el. Ez a hőforrást hatástalanná teszi a hullám erősítése vagy gyengítése szempontjából. A valóságban $\dot{Q}'$ válasza nem azonnali u' változására, és egy kis idő eltelik, amíg u' megváltozása tükröződik $\dot{Q}'$ -ben, azaz van egy kis időbeli késedelem a mennyiségek között (Sarpotdar és mtsai, 2003):

$$\dot{Q}' \propto u'(t - \tau), \quad (5.5)$$

ahol τ jelenti a késést $\dot{Q}'$ és u' között.

Ezek után alkalmazhatjuk a Rayleigh feltételt a Rijke csőre (Beke, 2009c). E szerint, ha hőt közlünk ($\dot{Q}' > 0$) az összenyomási félperiódusban ($p' > 0$); vagy hőt vonunk el ($\dot{Q}' < 0$) a tágulási félperiódusban ($p' < 0$), akkor a hanghullám fenntartható. Matematikai formában a Rayleigh kritérium a Rayleigh integrállal (I) fejezhető ki:

$$I = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} p' \dot{Q}' dt, \quad (5.6)$$

ahol T a periódusidő, p' a hangnyomás, $\dot{Q}'$ a hőteljesítmény fluktuációja, t pedig az idő.

- Ha $I < 0$, akkor a hang gyengül;
- Ha $I > 0$, akkor a hang erősödik;
- Ha $I = 0$, akkor a hang nem erősödik és nem is gyengül.

5.2. A termoakusztikus projekt

5.2.1 Az iskolai projekt

A termoakusztikus projektünk 2007 szeptemberében indult, a projektben önkéntes alapon vehettek részt a Nagyasszonyunk Katolikus Általános Iskola és Gimnázium tanulói. A projekt „*főtémája*”: termoakusztikus jelenségek vizsgálata Rijke csövek segítségével; az „*altémák*”: gázzal fűtött Rijke csövek vizsgálata, elektromosan fűtött Rijke csövek vizsgálata és a csövek viselkedésének számítógépes modellezése. A méréseket délutánonként végeztük fizika szakkör-foglalkozásokon (Beke, 2009a-d, 2010c, 2011c). A kísérleteket csoportmunkában végeztük, a csoportokban 3–6 tanuló dolgozott együtt. A csoportokat a diákok alakították ki, de arra ügyeltem, hogy lehetőleg minden csoportban legyen legalább egy olyan tanuló, aki „jobb” fizikából, illetve egy olyan diák, aki „ért” a táblázatkezeléshez. A projekt időtervében eredetileg 1 tanévre terveztem a munkát, de ennyi idő nem volt elegendő, ezért a következő tanévben is folytatódott a projekt. A termoakusztikus projekt során a tanulók korábbi szaktárgyi tudására is szükség volt:

- fizika tantárgyi ismeretek (pl. hőtani és elektromosságtani ismeretek);
- alkalmazott informatikai ismeretek (pl. táblázatkezelés, prezentációkészítés);
- matematikai ismeretek (pl. többismeretlenes egyenletrendszerek, statisztikai alapfogalmak).

Egy-egy tanulói csoport vizsgálta az egyes csövek viselkedését, az eszközök egy részét közösen használtuk (pl. zajszintmérő, digitális hőmérő). Ez külön szervezést igényelt. Ezen kívül arra is ügyelnünk kellett, hogy az egyik team Rijke csövének hangja ne zavarja meg a másik csoport mérését. Ezért a munkánkat össze kellett hangolni, hiszen korlátos erőforrásokon osztozkodtunk, illetve egymás zavarása nélkül kellett dolgoznunk. Ezzel – mintegy mellékesen – a tanulók szervezőképességét is fejlesztettem, sőt a szociális kompetenciák (osztozkodás a közös eszközökön) is fejlődtek. (Amíg projekt elején előfordult, hogy nem tudtak megegyezni, hogy ki mit használjon; ez a későbbiek folyamán gördülékenyen ment.) Minden mérést legalább ötször megismételtünk és az átlagértékekkel számoltunk tovább; a kapott eredményeket számítógépen rögzítettük (Beke, 2009a-d). A projekt kivitelezésének részleteit a következő fejezetekben mutatom be. (Menet közben számos probléma felmerült, de ezeket sikerült megoldani.)

A tanulók projektmunkájának szerves részét képezte, hogy valamilyen érdekességet, újdonságot gyűjtsenek a termoakusztika témaköréből, majd azt röviden mutassák be a többiek számára. A csoportmunka során leginkább az interneten keresték a diákok. Mivel magyar nyelvű szakirodalmat nem találtunk, ezért „kénytelenek voltak” idegen nyelvű (főként angol) cikkeket fordítani. Ezzel nem csak a fizikai szakmai ismereteik bővültek, hanem egyben nyelvyakorlásnak is kitűnő lehetőség volt. Az internet használatának az az előnye is megvolt, hogy nem voltunk helyhez és időhöz kötve; azaz mivel mindenki rendelkezett internet kapcsolattal otthon is, ezért az iskolában megkezdett gyűjtőmunkát folytathatták odahaza.

A kiselőadások után lehetőséget biztosítottam arra, hogy a többiekben is „elmélyülhessen” a frissen szerzett információ. Minden alkalommal beszélgetés követte az előadást, melyben főként arra kerestük a választ, hogy mire lehet jó az a találmány, amiről éppen hallottunk, vagy mi

magunk mit profitálhatunk az új ismeretekből. Egyszóval az újdonságok nem csak érdekes híreknek számítottak, hanem beindult egy transzfer folyamat, amely az ismeretek megszerzése felől a „napi praktikum” irányába mutat. A mai „pénzszűke világban” ezt azért tartom hasznosnak, mert nagy valószínűséggel a jövőben főként olyan célokra, olyan kutatásokra lehet majd anyagi forrásokat szerezni, melyeknek valamilyen gyakorlatilag megvalósuló haszna, „végterméke” lesz. Mindenesetre úgy tapasztaltam, hogy ha látják a célt, amiért érdemes dolgozni, akkor szívesebben hajlandóak erőfeszítéseket tenni a diákok (is), mintha csak a feladat „szépségéért” kellene valamit elvégezni. Sajnos ez a probléma a mai magyar iskolarendszerben gyakran jelen van: gondoljunk csak arra, hogy mennyi olyan „felesleges” információt (memoritert) igyekeznek megtaníttatni, amit szinte biztos, hogy soha az életben nem tud majd sehol használni a diákok döntő többsége. Ezzel természetesen nem azt akarom mondani, hogy a memoriter, mint „tanulási módszer” teljesen felesleges, de a XXI. században mindenképpen csökken a használhatósága, illetve a hasznossága. (Véleményem szerint alkalmazható, de csak korlátozott formában.) Ha a tanulók látják azt, hogy a most befektetett munkájuknak a jövőben tényleges haszna lesz (lehet), akkor hajlandóak többet is megtenni az „ügy” érdekében.

5.2.2. A Rijke cső megépítése

A tipikus Rijke cső 3 komponensből épül fel:

- Mindkét végén nyitott hengeres cső (lehet fémből, vagy üvegből); a cső átmérője 3–15 cm között szokott lenni, a hossza 30–150 cm. A hossz és az átmérő aránya 10 körüli érték, így az akusztikus hullámot általában egydimenziósnek tekinthetjük.
- A hőforrás lehet gázégő, illetve használhatunk elektromos hőforrást is. A projektünk első szakaszában a kísérleteinkhez 3 különböző nagyságú (teljesítményű) gázégőt használtunk.
- Fémháló, amelyet a Rijke cső belsejébe helyezünk el. A fémrácsot gázláng segítségével melegítjük. Mivel a fémrács néhány felmelegítés után elveszítheti a ruganyosságát, ezért célszerű időközönként kicserélni. Felmerülhet a kérdés, hogy milyen szerepe van a rács rugalmasságának. Tulajdonképpen a rácsnak nem kell „rugalmasnak” lenni a hőátadás szempontjából, de a rács csőbeli helyzetét módosítani kívántuk a különböző mérésekben, a rácsot tehát időközönként új rácspozíciókba kellett tolnunk egy vékonyabb pálcá segítségével. Ha a rácsot többször felmelegítettük, akkor olyan anyagfizikai változások zajlottak, melyek hatására a rácsok egy része merevvé, rideggé vált és egyszerűen szétrepedt, eltöredezett. (Ez a jelenség nem egyformán jelentkezett a különböző anyagból készült rácsok esetén és a felmelegített rács hőmérséklete is befolyásolta a folyamatot.)

Ha összeállítottuk a kísérleti elrendezést, a következő kísérleteket végezhetjük el:

1. A dróthálót egy adott helyzetben rögzítjük a csőben, majd meggyújtjuk a lángot és egészen izzásig hevítjük a rácsot. A rács helyzetétől, a melegítés idejétől és teljesítményétől függően keletkezhet hang a csőben.
2. Ha a kísérlet során a hangot kibocsátó Rijke csövet felülről befedjük egy fémlappal, akkor a légáramlás megszűnik és vele együtt a hanghatás is abbamarad.

3. Különböző hosszúságú csöveket alkalmazva megfigyelhetjük, hogyan függ a cső hosszától a kialakuló hang frekvenciája.
4. A vízszintes helyzetű Rijke cső alapesetben nem bocsát ki hangot semmilyen rácshelyzet esetén sem. Ha viszont légáramlást keltünk a csőben, akkor keletkezhet hang.

A mérések során a következő összefüggésekre kerestünk választ:

- A cső hossza és a hőforrás helyzete hogyan befolyásolja a hang keletkezését?
- A hőtéljesítmény változtatása miképpen befolyásolja a hang hosszát és intenzitását?
- A cső belsejében mérhető hőmérséklettől és a rácshőmérsékletétől hogyan függ a hang hossza és intenzitása?
- Ha a csőben külön légáramoltatás is van, akkor ez befolyásolja-e a hangkibocsátást?

A mérésekhez a következő eszközökre van szükség:

- Rijke csövek állványzattal (3 db alumínium és 1 db réz csövet, illetve 3 db üvegből készült csövet is használtunk, mert azokon könnyű szemléltetni a drótakadály helyzetét).
- Gázégők (szabályozható teljesítményű).
- Drótakadályok (rácsok), melyek az adott átmérőjű csövekhez passzolnak (különböző rácshűrűségekkkel, hogy az is vizsgálható legyen).
- Hosszmérésre mérőszalag, vagy vonalzó.
- Hang rögzítésére és mérésére szolgáló eszköz (pl. egy mikrofon és számítógép hangkártyával).
- Hőmérők, amelyek több száz °C hőmérsékleten is használhatók (várhatóan 100–1000 °C tartományban lesznek a mérendő értékek). A mérésekhez IR-380 és IR-1000L típusú digitális infrás hőmérőket használtunk.
- A levegő áramoltatásához egy berendezés (pl. porszívó).
- Hangintenzitás-szint mérőműszer (A kvantitatív eredményekhez van szükség a műszerre, egyébként e nélkül is elvégezhetők a kísérletek.) A hangintenzitás a levegőben terjedő hanghullám teljesítményének jellemzésére szolgál: a terjedés irányára merőleges egységnyi felületen másodpercenként áthaladó hangenergia. A hangintenzitás-szint két hangintenzitás érték hányadosának tízes alapú logaritmusával. (Jele L_I , mértékegysége a dB.) A mérésekhez Voltcraft 322 Datalog típusú digitális zajszintmérőt használtunk. A 322 Datalog készülék általános hangszint mérésre szolgál. A beépített mikrofonjára ható hangszintet méri és digitálisan kijelzi, 130 dB intenzitás szintig; adatrögzítő funkcióval is rendelkezik, alkalmas laboratóriumi és tudományos célú felhasználásra. A készülék két értékelő szűrővel rendelkezik. Az A-görbe szerinti értékelés az emberi halláshoz illeszkedik, amely különböző frekvencia tartományokban eltérő; az A kiértékelés általános célokra, pl. munkahelyi zajszint vizsgálatára való. A C-görbe szerinti értékelés az egész frekvencia tartományban egyenletes (pl. gépek, motorok zajának méréséhez lehet használni), ezért ezt a szűrőt használtuk végig a méréseink során. A mikrofon fejet mindig pontosan a mérendő hangforrás felé irányítottuk és arra is ügyeltünk, hogy ne legyenek tárgyak a mikrofon fej és a hangforrás között. A műszert mindig úgy helyeztük el, hogy a fej 10 cm-re legyen a

Rijke cső tetejének középpontjától úgy, hogy a cső vonalától kifelé essen néhány cm-rel.

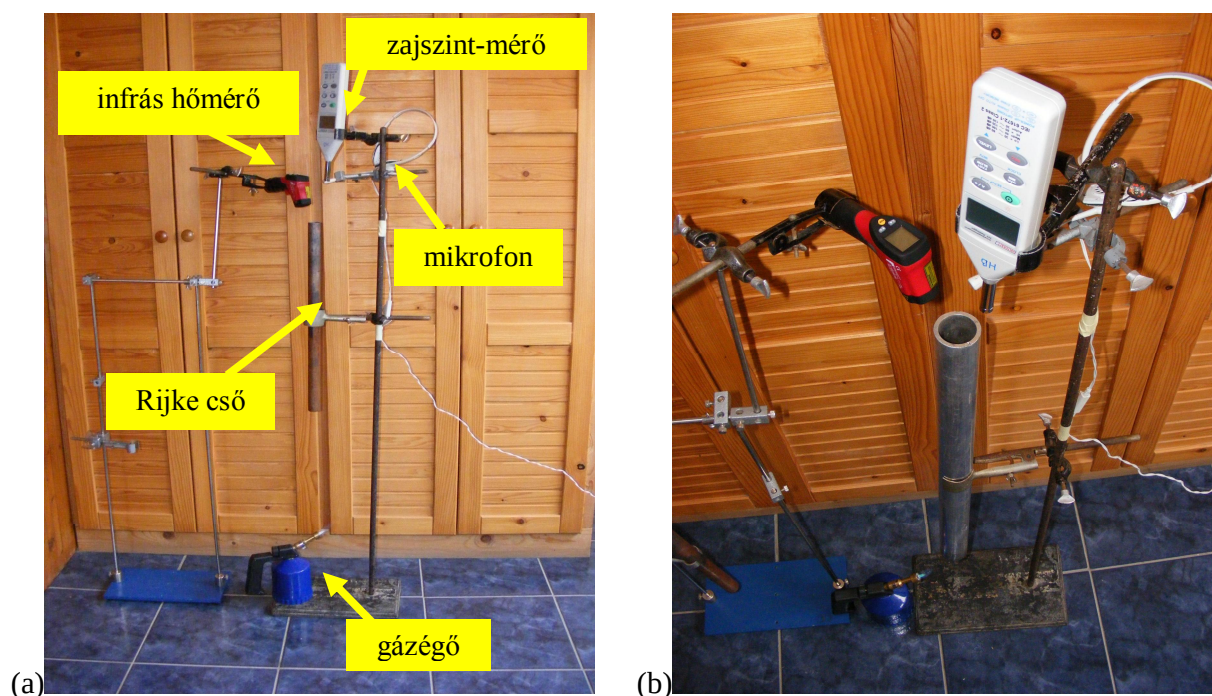
Erre azért volt szükség, hogy a csőben felfelé áramló hő ne károsítsa az eszközt.

A felsorolt eszközök egy része (állvány, cső, gázégő, drótrács) minden iskolai fizikaszertárban megtalálható, más részük (mikrofon, számítógép hangkártyával, illetve porszívó) szintén megtalálhatóak az oktatási intézményekben; ezek tehát nem kerülnek külön pénzbe. A hangintenzitás-szintmérőt kölcsönbe kaptuk a mérések idejére. Szerencsére nem feltétlenül van szükség az eszközre, tulajdonképpen a mikrofon és a számítógép elegendő ahhoz, hogy relatív hangosságokat megállapítsunk, persze ekkor számszerűsített értékekkel közvetlenül nem számolhatunk (Beke, 2009a-d). Ezt azért hangsúlyozom, hogy lássuk, a mérések elvégzése nem igényel plusz ráfordítást az iskolától, ez összhangban van a Rocard-jelentés megállapításaival (Rocard és mtsai, 2007). A mérések során 7 különböző Rijke csővel dolgoztunk. A kísérletekben használt csövek jellemzői az 5.1. táblázatban találhatók.

5.1. táblázat Az iskolai projektben használt Rijke csövek paraméterei.

Rijke csövek	Anyaga	Hossz L [mm]	Külső átmérő [mm]	Belső átmérő [mm]	Emisszió-fok (ε)
1.	üveg	200	30	28	0,94
2.	üveg	400	30	28	0,94
3.	réz	470	29	27	0,83
4.	alumínium	768	50	40	0,90
5.	üveg	800	30	28	0,94
6.	alumínium	1200	78	72	0,89
7.	alumínium	1502	100	94	0,89

Az 5.1. ábrán egy-egy adott mérési elrendezést látható.



5.1. ábra A termoakusztikai vizsgálatokhoz használt függőleges helyzetű Rijke csövek a mérőberendezésekkel együtt: (a) rézcső; (b) a legrövidebb alumínium cső.

5.2.3. A mérés menete

Első lépésként a gázégők teljesítményét kellett meghatároznunk (3 különböző típusú gázégőt használtunk). 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 ($c_{\text{víz}}$) ismeretében kiszámítható a belső energia változása; de a hatásfokot nem ismertük, hiszen melegedett a tárolóedény, a tartóállvány, a környező levegő is. Ezt úgy küszöböltük ki, hogy különbségi méréseket végeztünk. Jelölje P_i a gázégő teljesítményét az i -ik fokozatban. Ebben az égőfokozatban 2 db mérést végeztünk, az első t_{i1} , a második t_{i2} ideig tartott. Jelölje a víz tömegét az első esetben m_{i1} , a második esetben m_{i2} , a hőmérsékletváltozásuk ΔT_{i1} , illetve ΔT_{i2} . Az egész külső környezet (a vízen kívül minden) hőkapacitását jelölje C_{i1} , illetve C_{i2} az egyes mérésekben. Ezek elviekben különbözőek, hiszen a környező levegő melegedése függ a melegítés időtartamától, és a levegő mozgása miatt az edénnyel kölcsönható levegőmennyiség sem állandó, de ha a két mérés időtartama nem tér el jelentősen egymástól, akkor a vízen kívüli környezet hőkapacitását egyenlőnek tekinthetjük a két mérés során; azaz $C_{i1}=C_{i2}=C_i$, és ugyanilyen okokból a környezet hőmérsékletváltozásait is azonosnak tekinthetjük: $\Delta T_{i1}^* = \Delta T_{i2}^* = \Delta T_i^*$. Most már felírhatjuk a két mérés során bekövetkező energiaváltozást (Beke, 2009c):

1. mérés:

$$P_i \cdot t_{i1} = C_{i1} \cdot \Delta T_{i1}^* + c_{\text{víz}} \cdot m_{i1} \cdot \Delta T_{i1}, \quad (5.7)$$

2. mérés:

$$P_i \cdot t_{i2} = C_{i2} \cdot \Delta T_{i2}^* + c_{\text{víz}} \cdot m_{i2} \cdot \Delta T_{i2}. \quad (5.8)$$

Az (5.8) egyenletből az (5.7)-et kivonva, és az egyszerűsítések után kapjuk a gázégő i -ik fokozatának teljesítményét (Beke, 2009cd):

$$P_i = \frac{c_{\text{víz}} \cdot (m_{i2} \Delta T_{i2} - m_{i1} \Delta T_{i1})}{t_{i2} - t_{i1}}. \quad (5.9)$$

A kapott eredményeket ellenőrizni is tudtuk a hordozható palackos gázégő esetén úgy, hogy több azonos teljesítményfokozatú mérést követően megmértük a palackban lévő gáz tömegének megváltozását:

$$P_i = \frac{L_{pb} \cdot \Delta m_{ipb}}{\Sigma t_i}, \quad (5.10)$$

ahol L_{pb} jelöli a propán-bután gáz fűtőértékét. Ezek az eredmények közelítőleg megegyeztek egymással, hozzátevé azt, hogy a teljesítmények meghatározásában 10% körüli bizonytalanság adódott. Ennek legfőbb oka az volt, hogy egy gázégő esetén nagyon nehéz pontosan ugyanakkora teljesítményfokozatra kapcsolni több mérés során, főleg, ha a méréseket különböző napokon végezzük. Elvileg minden kísérlet előtt külön-külön megmérhettük és kiszámolhattuk volna az égő teljesítményét, de ez aránytalanul megnövelte volna a mérésre fordítandó időt (Beke, 2009c).

Második lépésként a Rijke csőbe helyezett fém akadályok (a gázzal melegített „hőforrások”) áteresztőképességét határoztuk meg. Az áteresztőképesség azért fontos, mert ha túl kicsi az értéke

(azaz nagy a rács „háló-sűrűsége”), akkor ez nagy felületet biztosít a hőátadásnak, viszont csökkenti a légáram intenzitás értékét. Ha viszont nagy a rács áteresztőképessége (azaz a rács ritka), akkor ezen a rácson könnyebben keresztüláramlik a levegő, tehát a légáram intenzitás értéke magas lehet, viszont mivel kicsi a rács felülete, ez csökkenti a hőátadás mértékét. Két különböző típusú „akadályt” használtunk. Az egyiket úgy kaptuk, hogy fémlemezeket fúróval több helyen kifúrtunk, de például egy régi kávéfőző szűrőt is használtunk „rács” gyanánt. A másik típusú akadályok fémből készült dróthálók voltak. Első ötletünk az volt, hogy a Rijke csőhöz egy porszívót kötünk, majd mérjük az adott idő alatt átáramlott levegő mennyiségét úgy, hogy a csőben benne van az akadály, illetve úgy, hogy a cső üres. A kettő mérés aránya megadja az akadály áteresztőképességét. Sajnos ez a módszer a gyakorlatban csak az alacsony áteresztőképességű akadályok (a perforált fémlemezek) esetén működött, a drótrácsok esetén ugyanis nem volt mérhető különbség a két eset között; ezért itt 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 megadta a rács áteresztőképességét (Beke, 2009cd). A mérésekhez használt tíz darab különböző fém akadálynak az áteresztőképessége rendre 12%, 21%, 35%, 51%, 61%, 72%, 80%, 85%, 90%, illetve 95%-nak adódott (5.2. ábra).



5.2. ábra Különböző akadályok. A drótrácsok áteresztőképességének meghatározása digitális fénykép alapján történt.

A két legkisebb áteresztőképességű akadály esetén nem tudtuk a csöveket megszólaltatni. Mindegyik „ráccsal” végeztünk méréseket. A legjobban a 80%-os áteresztőképességű rács vált be a kísérletekhez. Ez a rács akár 20 – 30 melegítést is kibírt károsodás nélkül; míg a többi rácst, melyek „ridegebb” acélból készültek sokkal sűrűbben kellett cserélni, ezek gyakrabban „szétégték”, elrepedeztek. Ha a gázláng teljesítménye túlzottan nagy volt, akkor természetesen bármelyik rács elolvadt, ezután már használhatatlan volt a kísérletekhez; ezért célszerű valamilyen magas olvadáspontú fémrácsot beszerezni.

A hőmérséklet meghatározása:

A hőmérséklet mérése IR-380 és IR-1000L típusú érintésmentes mérőműszerrel történt, mely a hőmérsékletet az objektum által az infravörös tartományban kisugárzott energia alapján határozza meg, az emisszió-fok figyelembe vételével. Az ilyen eszköz alkalmazható nehezen hozzáférhető

vagy mozgó objektumok hőmérsékletének mérésénél. A hőmérő az objektum felületi hőmérsékletét méri, mérési tartománya -50 °C-tól 1000 °C-ig terjed.

A hőmérő emisszió-fokának beállítása:

Az emisszió-fok (ε) több jellemzőtől (pl. az anyagtól és a felület minőségétől) is függ. A legtöbb szerves anyag, vagy oxidált felület emisszió-foka 0,95 körül van, a fémes felületek, vagy csillogó tárgyak emisszió-foka ennél kisebb. A műszernek emisszió-fok beállítási funkciója van, ami lehetővé teszi a pontosabb mérést. Ahhoz, hogy egy adott anyagból készült tárgy emissziós fokát meghatározzuk, ismerni kellene előre a hőmérsékletét, majd az infrás hőmérőn az ε értéket addig kell módosítani, amíg maga a hőmérő is ugyanezt a hőmérsékletet jelzi (Beke, 2009d). Ezért egy nagy fazékba vizet töltöttünk, majd az edénybe belehelyeztük a különböző csöveket, a rácsokat és egy hőmérőt úgy, hogy félig belemerüljenek a vízbe. A fazékba addig adagoltunk jeget, amíg az már nem olvadt tovább, azaz a jeges víz hőmérséklete a benne lévő testekkel együtt 0 °C-os volt. Ezután lassan elkezdjük melegíteni az edényt, egészen a víz forráspontjáig. Közben mindegyik testnek mértük az emissziós fokát a vízfelszín feletti részén. Ezután már egyszerűnek tűnt a hőmérséklet mérése. A csövek külső hőmérsékletét könnyedén mérni tudtuk, de a rács hőmérsékletének meghatározása problémát jelentett. Egyfelől néha túlléptük a műszer felső méréshatárát, azaz csak annyit tudtunk, hogy a rács hőmérséklete több mint 1000 °C, de a pontos értéket nem ismertük. Másfelől problémát okozott a mérőműszer célzólézerével pontosan ráfókuszálni a rácusra, hiszen nem helyezhettük közvetlenül a cső fölé a hőmérőt, mert a felfelé áramló forró levegő megolvasztotta volna, ezért kicsit ferdén, oldalról kellett mérni. Ekkor viszont a műszer nagyon kicsi elmozdulása is okozhatta azt, hogy a következő pillanatban már nem a rácson volt a fókus. Ez meg is látszott az eredményekben. A mérési sorozatban a rács hőmérsékletének mérése során adódott a legnagyobb fluktuáció az azonos paraméterű méréseket tekintve. Gyakran előfordult, hogy két ugyanolyan, egymást követő mérés során akár 20%-os különbség is adódott a rács hőmérsékletében. A többi mérendő mennyiség esetében nem találoztunk ilyen szintű bizonytalansággal (Beke, 2009cd).

Az átáramlott levegő intenzitásának meghatározása:

A kísérletek egy részénél külön levegőáramlást biztosítottunk egy porszívó segítségével, melynek szívási teljesítményét úgy számítottuk ki, hogy felfújtunk egy nagyobb (kb. 50 literes) műanyag zacskót, majd rövid ideig kiszívtuk belőle a levegő egy kisebb részét. A légáram intenzitást ($m_i = \Delta m_{gáz} / \Delta t$) a gáztörvényből kaptuk:

$$\Delta m_{gáz} = \frac{p \cdot M \cdot \Delta V}{R \cdot T} = \frac{p \cdot M \cdot \Delta(S_{cső} \cdot u_{gáz} \cdot t)}{R \cdot T}, \quad (5.11)$$

ahol M a levegő moláris tömege, R az egyetemes gázállandó, $S_{cső}$ a cső belső keresztmetszetét jelenti, $u_{gáz}$ pedig a csőben áramló gáz sebessége. Ha a cső keresztmetszetét és az áramlás sebességét állandónak tekintjük, kapjuk:

$$m_i = \frac{\Delta m_{gáz}}{\Delta t} = \frac{p \cdot M \cdot S_{cső} \cdot u_{gáz}}{R \cdot T}, \quad (5.12)$$

ahol T a gáz abszolút hőmérsékletét jelenti. Feltételeztük, hogy a nyomás közel állandó, mivel csak kevés levegőt szívunk ki; azaz elég volt a zacskó térfogatának megváltozását mérni. (A nyomást 10^5 Pa-nak, a hőmérsékletet 293 K-nek vettük.) Ebből a porszívó maximális szívási teljesítményére 0,9 g/s adódott (Beke, 2009c). (Néhány kísérletben megpróbálkoztunk azzal is, hogy nem szívjuk a levegőt, hanem hajszáritóval fújtuk.)

5.3. A rácsok visszahűtésének szerepe

Ha azonos égőtelijsítmény mellett egy határon túl növeljük a melegítés időtartamát (t_m) és nem hagyjuk kihűlni a rácsot a Rijke cső belsejében, akkor a kibocsátott hang intenzitás szintje (L_I) és időtartama (t_h) is csökken, mivel a cső belseje egyre forróbb lesz, ezért egyre kisebb a hőmérsékletkülönbség a rács és a csővég között (Beke, 2009c). Az 5.3. ábrán látható, hogy ha

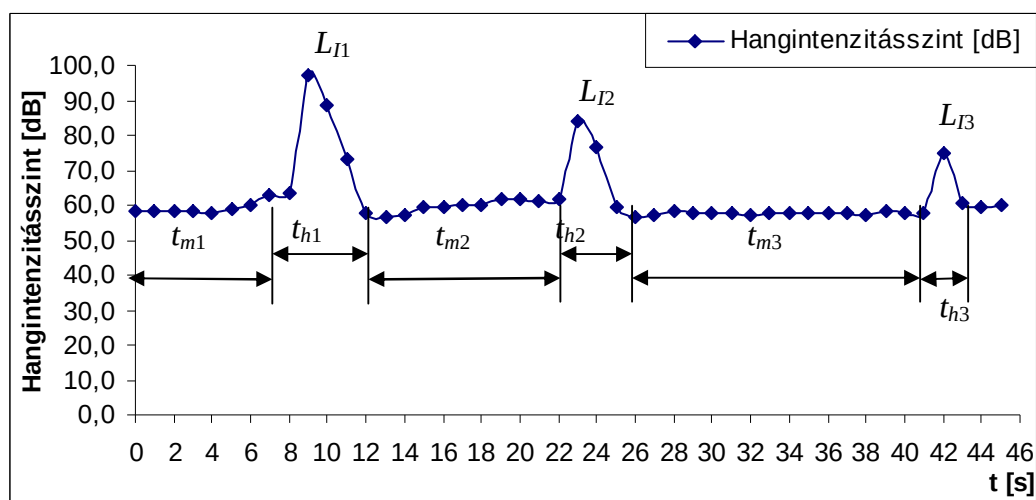
$$t_{m1} < t_{m2} < t_{m3}, \quad (5.13a)$$

akkor

$$L_{I1} > L_{I2} > L_{I3}, \quad (5.13b)$$

illetve

$$t_{h1} > t_{h2} > t_{h3}. \quad (5.13c)$$



5.3. ábra A kibocsátott hang intenzitása az idő függvényében. (A rács a 400 mm hosszúságú üvegcső negyed részénél helyezkedett el, az égőtelijsítmény kb. 270 W volt.)

A kísérletek során egyszerre csak egy paramétert változtattunk. Mivel a rács felforrósodása jelentősen befolyásolta a kapott hangintenzitás-szintet és hang hosszának értékét, ezért minden mérés után vártunk, hogy a rács és a cső visszahűljön nagyjából szobahőmérsékletre.

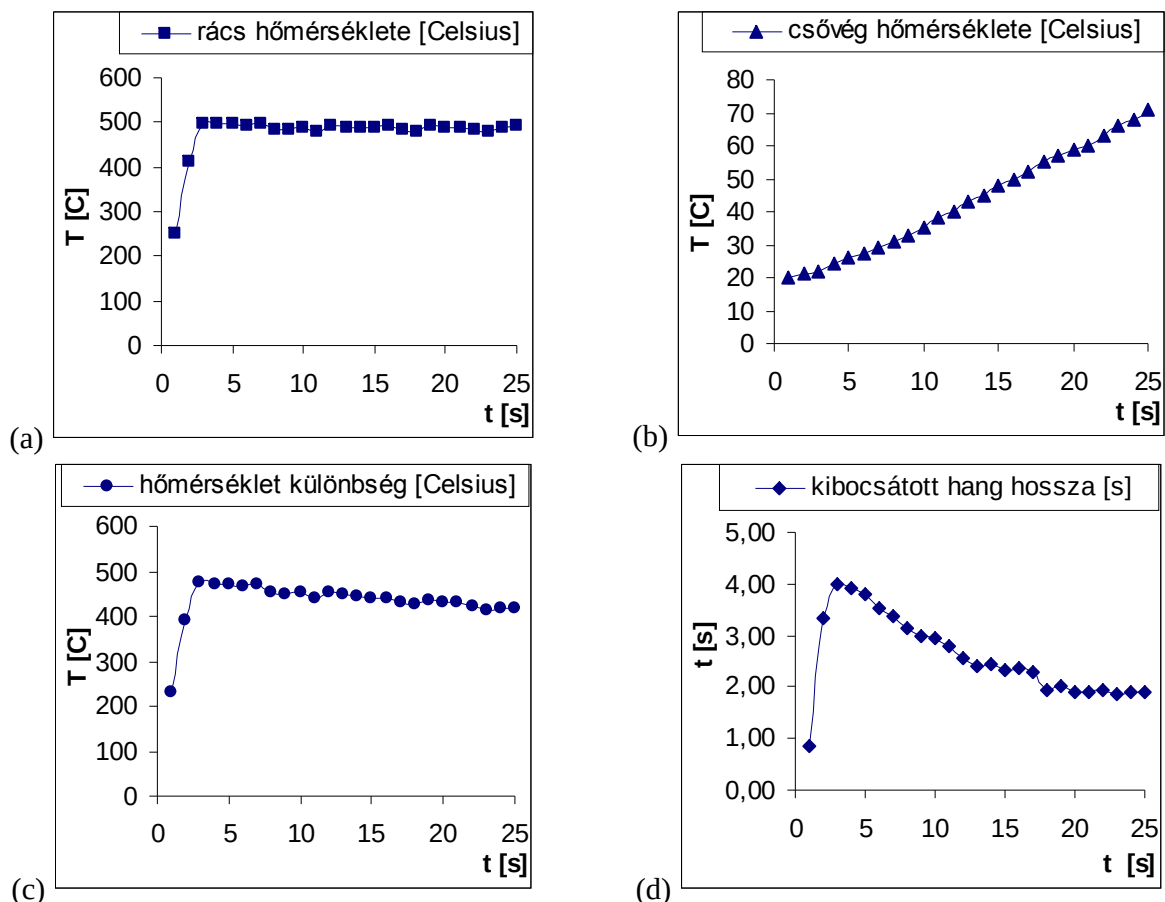
5.4. Küszöbhatás

Ha a függőleges helyzetű csőben lévő rácsot elkezdem gázlánggal melegíteni, akkor rövid időn belül felforrósodik a rács. Ha ezután is folytatom a melegítést (azonos teljesítménnyel), akkora 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 hosszának jól érzékelhető maximuma van, méghozzá közelítőleg akkor lesz a leghosszabb a kibocsátott hang, amikor a rács a melegítés során eléri a hőmérsékleti „plató”

kezdését. Tehát hiába melegítem tovább a rácst, a kibocsátott hang már nem lesz hosszabb, sőt e pont után csökkenni kezd; azaz van egy optimális időtartam, amíg célszerű melegíteni a rácst, ha az a célunk, hogy legtovább hallható legyen a Rijke csőben keletkezett hang. A kísérletek közben a csővég hőmérsékletét is mértük és megállapítottuk, hogy az fokozatosan növekszik egy darabig a cső anyagától, geometriai méretétől (közvetve a tömegétől), a melegítés intenzitásától, illetve a rácshelyzettől függően. Ezek után ábrázoltuk az idő függvényében a rác és a csővég hőmérsékletének különbségét, és azt kaptuk, hogy ennek a függvénynek is maximuma van, méghozzá nagyjából azon a helyen, ahol a kibocsátott hang hosszának is maximális az értéke (Beke, 2009c). Azt mondhatjuk tehát, hogy a hangkibocsátás időtartama függ a rác és a csővég hőmérsékletének különbségétől, azaz

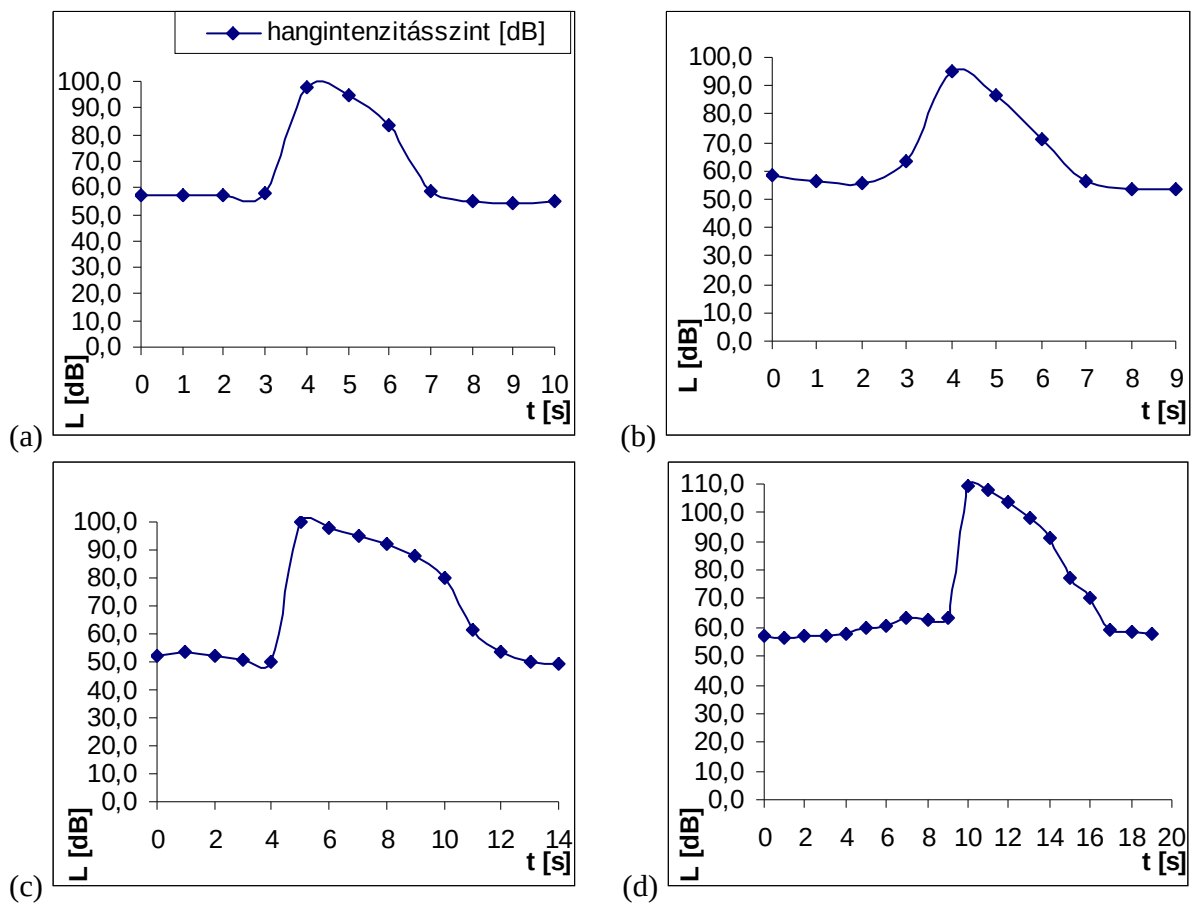
$$t_h \propto t_{h0}(T_{\text{rác}} - T_{\text{vég}}). \quad (5.14)$$

Mindezeket megfigyelhetjük az 5.4. ábrán, ahol a melegítés időtartamának függvényében ábrázoltam a rác hőmérsékletét, a csővég hőmérsékletét, a kettő közötti különbséget, illetve a kibocsátott hang hosszát. A méréseket úgy végeztük, hogy először 1 másodpercig melegítettük a rácst, mértük az említett értékeket, majd vártunk, hogy visszahűljön a cső és a rác szobahőmérsékletre; ezután 2 másodpercig melegítettük az adott teljesítménnyel és mértünk majd újra vártunk, és így folytattuk tovább (Beke, 2009c).



5.4. ábra (a) A rác hőmérséklete; (b) a csővég hőmérséklete; (c) a rác és a csővég hőmérsékletének különbsége; (d) a Rijke cső által kibocsátott hang hossza. A fűtőteliesség végig állandó értékű volt (kb. 360 W), a rác $x_r=L/4$ -nél helyezkedett el a rézcsőben.

Különböző égőtéljesítmények esetén is vizsgáltuk a cső hangkibocsátását. Ebben az esetben a rács helyzete és áteresztőképessége nem változott. Minden fűtőtéljesítmény és minden rácshelyzet esetén mértünk meghatározott időtartamú melegítés után. A keletkezett hang időfüggésében hasonlókat tapasztaltunk ahhoz, amit az előzőekben leírtam, azaz van egy optimális melegítési idő, ami után már nem nő tovább a kibocsátott hang időtartama és az intenzitása sem nő tovább. A rács helyzetét tekintve a cső alsó végétől indultunk és minden méréssorozat után fokozatosan egyre feljebb helyeztük el a rácsot (kb. 1–2 cm-es ugrásokkal). A kibocsátott hang hossza és intenzitása is fokozatosan nőtt, amíg el nem értünk a cső negyedrészének közelébe (Beke, 2009a-d, 2010c). Az $x_r=L/4$ hely körül található mind a hangintenzitásnak, mind a hang hosszának maximuma (5.5. ábra).



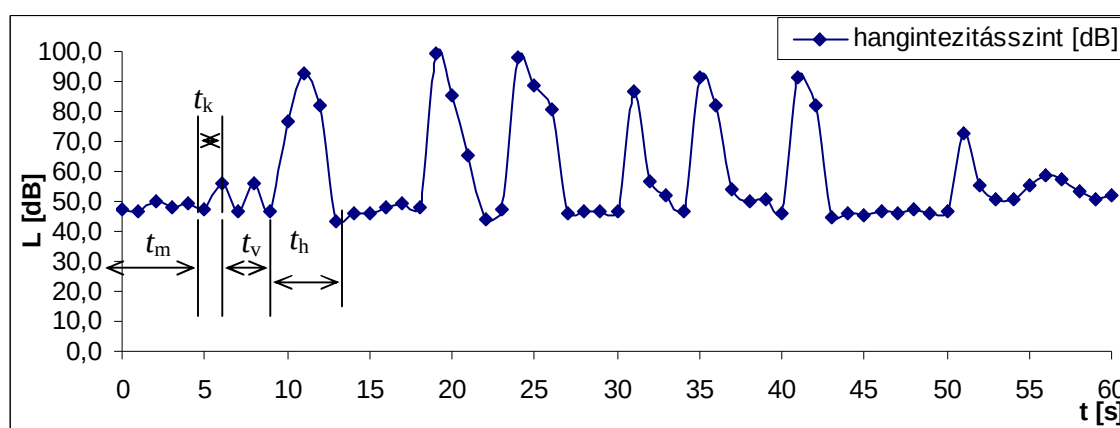
5.5. ábra Ha $x_r=L/4$ -nél helyezkedik el a rács, akkor lesz a hangintenzitásnak és a kibocsátott hang hosszának is maximuma: (a) 400 mm hosszú üvegcső, égőtéljesítmény kb. 300 W; (b) rézcső, égőtéljesítmény kb. 340 W; (c) legrövidebb alumínium cső, égőtéljesítmény kb. 430 W; (d) 1200 mm hosszúságú alumínium cső, égőtéljesítmény kb. 510 W.

Ha meg akarjuk találni a legideálisabb rácshelyet a cső alsó felében, akkor két tényezőt kell figyelembe vennünk. Egyfelől a hő nagyobb része átadódik a levegőnek ott, ahol a légáramlás sebességének maximuma van, azaz a cső végénél; másfelől a hatás annál nagyobb, minél nagyobb a nyomás, ez pedig a cső közepénél következik be. Láthatjuk, hogy a két tényező egymással ellentétes értelemben hat, ezért nincs pontosan meghatározott helye a fémhálónak, de jó kompromisszumnak tűnik, hogy helyezzük a hálót a két előbb említett hely közé a cső alsó felében a cső negyedéhez (Entezam és mtsai, 2002; Sarpotdar és mtsai, 2003). A kísérleteinkből is az derült ki, hogy ebben a rácspozícióban keletkezik a legnagyobb intenzitású és a leghosszabb ideig

hallható hang. Ha a rács pozícióját a cső negyedrésznél feljebb helyeztük, akkor fokozatosan csökkentek mind a kibocsátott hang hosszának, mind intenzitásának értékei (Beke, 2009cd).

Érdekes, hogy nem szimmetrikus a cső első és második negyedrésznél 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 (Beke, 2009b-d). „Ha a dróthálót a cső felső részében helyezzük el, akkor nem hallunk hangot.” (Entezam és mtsai, 2002; Sarpotdar és mtsai, 2003; Fahey és Timbie, 2006). Ha a hőforrás a cső alsó felében van akkor $\dot{Q}$ és p' közel azonos fázisban vannak, ezért $\dot{Q}$ egy része hanghullámot generál. Ellenkező esetben, ha a hőforrás a cső felső felében van, akkor $\dot{Q}$ és p' ellentétes fázisban vannak, ezért az akusztikus hullám csillapodik. Ha a hőforrást a cső közepéhez helyezzük el, akkor nem tapasztalunk sem erősítést, sem gyengítést a hullámban.” (Sarpotdar és mtsai, 2003).

Felső rácshelyzet esetén a kísérletezés során ennek ellentmondó tapasztalatokat is szereztünk (Beke, 2009c). Az üvegcsövek és a rézcső esetén tényleg nem keletkezett hang, ha a cső felső részében volt a rács. A legrövidebb alumínium cső esetén viszont néhány esetben mégis keletkezett hang, annak ellenére, hogy a rács a cső felső felében helyezkedett el (kb. $x_r=0,65L$). Leellenőriztük, hogy nem csúszott-e le a rács a cső alsó felébe, de az végig a felső részben volt. Előfordult olyan eset, amikor csak halkán lehetett hallani a kibocsátott hangot (kb. 75 dB volt az intenzitás szint). A legfurcsább viszont az volt, hogy ha a lángot a melegítés közben hirtelen elvettük a cső aljától, majd újra visszahelyeztük oda, akkor a cső egy nagyobb intenzitású (kb. 90 – 100 dB), rövid ideig tartó (kb. 1,5 – 2,5 s) hangot bocsátott ki. Sajnos a jelenség nem volt jól reprodukálható, azaz néhányszor sikerült megszólaltatni a csövet, de a legtöbb esetben nem. Szerencsére számítógéppel rögzítettük, ezért lehetőség volt a hang elemzésére, illetve az 5.6. ábrán is láthatjuk a hang intenzitás szintjének változását, amit az Datalog 322-es műszer tárolt (Beke, 2009c). Az ábrán bejelöltem a kezdeti melegítés (t_m), a kihúzás (t_k), a visszahelyezés (t_v) és a hangkibocsátás (t_h) idejét.



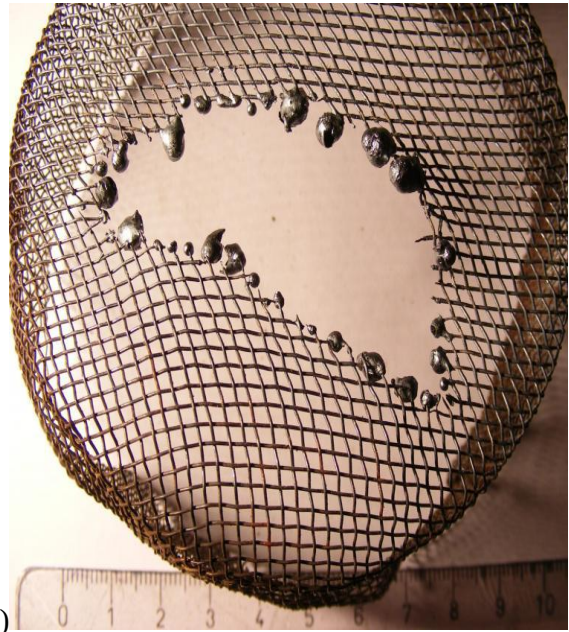
5.6. ábra Felső rácshelyzet esetén is keletkezhet hang, ha a gázlángot kiveszem a csőből, majd hirtelen visszateszem. (Ezt a furcsa jelenséget csak a legrövidebb alumínium cső esetén tapasztaltuk kb. $x_r=0,65L$ rácshelyzet esetén. A gázégő teljesítménye kb. 400 W volt.)

A jelenség oka a következő lehet: ha csak folyamatosan melegítem a csövet $x_r > L/2$ rácshelyzet esetén, akkor a hőátadás fluktuációja és a hangnyomás kedvezőtlen fázisban vannak egymással a

Rayleigh-kritérium szerint. Ha azonban megszűnik a hőátadás azáltal, hogy kihúzom a gázégőt a csőből, majd hirtelen újra visszahelyezem a csőbe, akkor ezzel a cső belsejében kialakul egy olyan hidegebb levegőből álló „légoszlop” amelyet alulról és felülről egy-egy forró „légbuborék” határol. Mivel a rács még elég magas hőmérsékletű, ezért a hidegebb levegőoszlopban elindulhat egy konvekciós áramlás, és ebbe a légoszlopba a még meleg rács energiát tud „pumpálni”, kialakul egy nyomásfluktuáció, majd ennek következtében a hanghatás; csakúgy, mint az alsó rácshelyzet esetén. A hatás viszont csak addig tart, amíg a kedvező feltételek fennállnak. A nyomásváltozás és a levegő-, illetve hőáramlás miatt ez a kedvező levegőzóna hamarosan megszűnik, ezért a hanghatás is abbamarad. Ha újra kihúzzuk a gázégőt, majd ismét gyorsan visszahelyezzük, akkor a folyamat kezdődik előlről. A Rijke csőnek ez a típusú gerjesztése viszont sokkal érzékenyebb a fizikai paraméterekre, azaz nehéz megtalálni azt a kedvező rácshelyzetet, „kihúzási és visszahelyezési frekvenciát”, illetve hőteljesítményt, hogy keletkezzen hang. Túl alacsony teljesítmény esetén a felül lévő rács nem melegszik fel kellőképpen, túl nagy égőteljesítmény esetén viszont olyan erőteljes áramlás indul be a csőben, hogy ez gátolja meg a hang keletkezését. Itt már erőteljes örvénylés is megfigyelhető a cső belsejében, illetve a csővégeknél. Az örvények következtében akár visszafelé (a függőleges csőből alul kifelé) is áramolhat a levegő. Ez olyan erőteljes volt, hogy néhány esetben a kb. 30 cm-es gázlángot egyszerűen elfújta a csőből visszaáramló levegő. Más esetben olyan örvények keletkeztek, hogy a cső középvonalában befelé haladó lángnyelv a cső szélénél visszafelé kezdett áramlani, majd a cső aljánál újra visszakanyarodott a csőbe, miközben egy hurkot írt le (Beke, 2009c). Az örvényes áramlással kapcsolatos jelenségek vizsgálata meghaladja a tanulmány kereteit, ezért a Rijke csőnek ezt az érdekes, de összetett viselkedését nem vizsgáltam részletesebben.

5.5. Hangkibocsátás a gázégő teljesítményének függvényében

Ha a hangkibocsátást a gázégő teljesítményének függvényében jellemezzük, akkor küszöbszerű viselkedést tapasztaltunk (Beke, 2009cd). Túlzottan kis teljesítmény esetén (közelítőleg $P < 100\text{ W}$) egyik cső sem szólalt meg. Próbálkoztunk gyertyalánggal, illetve borszesz-égő lángjával megszólaltatni a csöveket, de ez nem sikerült; valószínűleg azért, mert nem tudták kellőképpen felmelegíteni a rácsot. A kisebb gázégő esetén viszont az előzőtől nem sokkal nagyobb teljesítmény esetén ($P > 130\text{ W}$) már megszólalt a két rövidebb üveg cső. A legrövidebb alumínium cső kb. 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 (Beke, 2009a-d). Ez a csőtől és a rácshelyzettől függően 300 – 500 W közötti teljesítményt jelentett. Ha még tovább növeltük a teljesítményt, akkor egy idő után nemcsak hogy csökkent a hang hossza, hanem teljesen megszűnt a hangkibocsátás. Ennek az oka több dolog is lehet: egyfelől a nagy gázégő teljesítmény maga után vonja a csőben áramló levegő sebességének növekedését, ami akadályozza a hanghullámok kialakulását, illetve a „túl nagy” teljesítményű láng egyszerűen szétolvaszthatja a rácsot, ezáltal megszűnik a hangot keltő „energia-pumpa” (5.7.b ábra). Ebben az esetben a rács hőmérséklete valószínűleg meghaladta az 1500 °C -ot, mivel az acél olvadási hőmérséklete az ötvöző anyagoktól függően nagyjából e körül van.



5.7. ábra Ha a gázégő teljesítménye túl nagy volt, akkor szétolvadtak a rácsok: (a) disznópörzsölő; (b) szétolvadt acélrács.

Nagy várakozással tekintettünk a másfél méter hosszúságú alumíniumból készült Rijke cső megszólaltatására. Mivel az 1200 mm-es cső néha 120 dB hangintenzitás-szintet is produkált, ezért azt hittük, hogy a legnagyobb cső lesz majd a lehangosabb. Sajnos csalódnunk kellett, a csövet nem sikerült „rendesen megszólaltatnunk”. Egy viszonylag halk, 70 és 80 dB közötti hang keletkezett, de ez sem mindig. Pedig próbálkoztunk mindegyik gázégővel, még egy disznópörzsölőt is bevetettünk, de hiába. Valószínűleg azért nem keletkezett egyik esetben sem nagyobb intenzitású hang, mert kisebb teljesítménynél még nem értük el a szükséges alsó küszöböt, nagyobb teljesítmény esetén pedig már túlléptük a megfelelő teljesítménytartományt (tehát vagy túl nagy volt a légáramlás a csőben, vagy egyszerűen szétégett a rács); illetve a levegő abszorpciója is szerepet játszhatott a folyamatban. Sajnos a legnagyobb gázégő, a disznópörzsölő nem bizonyult megfelelőnek, mivel nem tudtuk finoman szabályozni a teljesítményét (5.7.a ábra). Bár nagyon látványos, hogy akár másfél méteres lángcsövát is képes kilövellni (ezt csak az iskola udvarán próbáltuk ki), melynek teljesítménye meghaladja a 4 kW-ot, de osztálytermi körülmények között ezt úgysem nagyon tudjuk kihasználni. Ezért döntöttem úgy, hogy rengeteg sikertelen próbálkozás után a legnagyobb csövet és a disznópörzsölőt nem használjuk a további mérésekhez, így csak a 6 kisebb csővel dolgoztunk a továbbiak folyamán. A küszöbjelenséget összefoglalóan az 5.2. táblázatban szemléltethetjük (Beke, 2009c).

5.2. táblázat Keletkezik-e hang a Rijke csőben az adott körülmények között? (A rács $x_r=L/4$ helyzetben volt a legrövidebb alumínium csőben. A táblázatban a „+” jelenti, ha keletkezett hang a Rijke csőben, a „-” jelenti, ha nem észleltünk hangot.)

Gázégő teljesítménye (W) (közelítő érték)	80	130	200	400	550	680	850
Nincs külön légáramoltatás	-	-	+	+	+	+	-
Van külön légáramoltatás	-	+	+	+	+	-	-

A függőleges helyzetű 768 mm hosszúságú alumínium csövet alulról melegítettük különböző teljesítményekkel, $x_r=L/4$ (optimális) rácshelyzet esetén. Először csak természetes légáramlás volt a csőben, de a második méréssorozatban külön légáramlást is biztosítottunk úgy, hogy felülről egy porszívóval szívtuk a Rijke csövet.

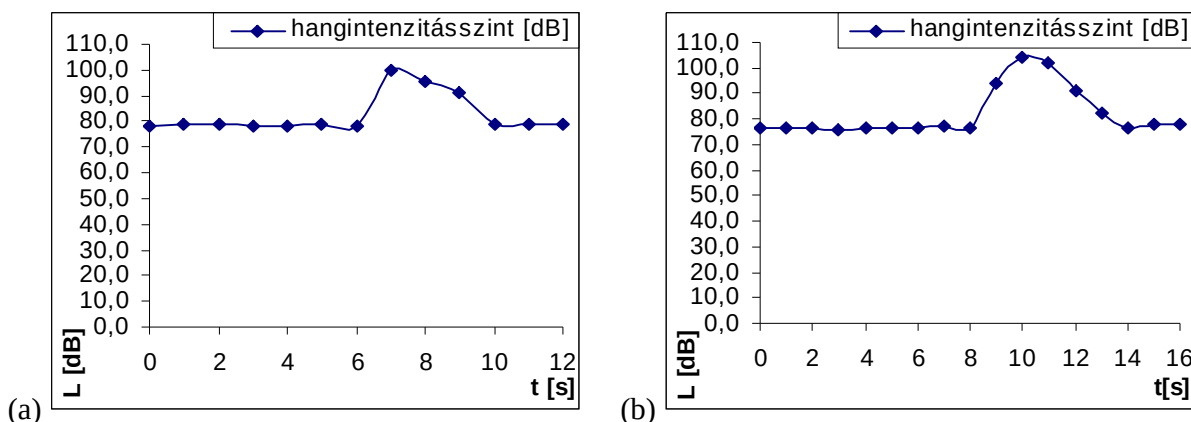
5.6. Vízszintes helyzetű Rijke cső

Ha a csövet vízszintes helyzetbe fordítjuk és megpróbáljuk a rácsot lánggal melegíteni, akkor alapesetben (külön légáramoltatás nélkül) nem keletkezik hang, hiszen nincs a levegőnek természetes konvekciós áramlása, úgy is mondhatjuk, hogy nem működik a „kéményhatás”, ezért nyomásfluktuáció sem alakul ki. Ekkor semmilyen rácshelyzet és semekkora égőteltjesítmény esetén sem bocsát ki hangot a cső. Más a helyzet, ha külön légáramlást biztosítunk a csőben, pl. egy porszívó segítségével. Ekkor már keletkezhet hang, még hozzá nagyjából hasonlóan ahhoz, ahogy a cső függőleges helyzetben viselkedik. Az $x_r=L/4$ helyzet közelében van a rács optimális helyzete és az $x_r>L/2$ rácshelyzet esetén nem tapasztaltunk hangot. Jól megfigyelhető, hogy itt is van küszöbhatás. Ezt úgy tudtuk demonstrálni, hogy állandó értékű égőteltjesítmény esetén a porszívó csövét távolabb vittük a Rijke cső szájától, majd fokozatosan közelítettünk a porszívóval a Rijke cső felé a kísérletek során, így a Rijke csőben áramló levegő intenzitása is fokozatosan növekedett. A cső kezdetben nem bocsátott ki hangot, de egy idő után már elegendő volt a légáram, és megszólalt a Rijke cső (5.8. ábra) (Beke, 2009c).



5.8. ábra Vízszintes helyzetű Rijke csőben is keletkezhet hang, ha megfelelő nagyságú légáram intenzitást biztosítunk pl. egy porszívó segítségével.

A porszívó meglehetősen hangos volt, ezért a hangintenzitás-szint mérésekben a porszívó hangja dominált, de azért észrevehetők a Rijke cső megszólalásakor a hangintenzitás-szint csúcsok. Jól látható, hogy a porszívó bekapcsolásával az alap hangintenzitás-szint kb. 80 dB-re növekedett, de a Rijke cső megszólalásakor közel ugyanakkora volt az intenzitásszint, mint a függőleges helyzetű csőben porszívó nélkül (kb. 100 dB)(5.9. ábra).

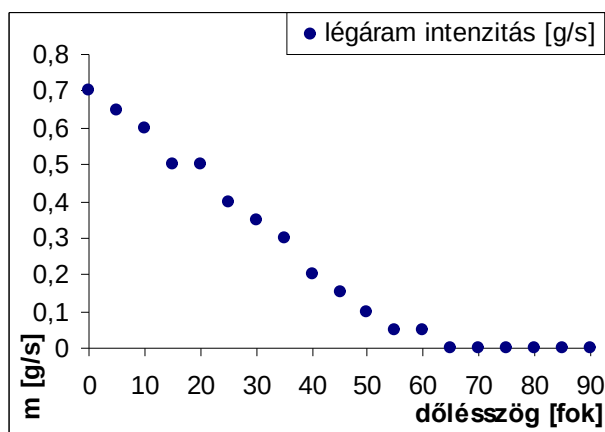


5.9. ábra A vízszintes helyzetű cső által kibocsátott hang és a porszívó hangjának intenzitása. A rács mindkét csőben $x_r=L/4$ helyzetben volt: (a) rézcső, a gázégő teljesítménye kb. 330 W; (b) legrövidebb alumínium cső, a gázégő teljesítménye kb. 400 W.

Vízszintes csőhelyzet esetén is tapasztaltuk, hogy még az optimális ($x_r=L/4$) rácshelyzet esetén is jelentkezik a felső küszöbhatás (Beke, 2009c). Ha a teljesítményt növeltük, miközben a légáram intenzitás maximális volt egy bizonyos érték felett már nem szólalt meg a cső. Ez a felső küszöbhatás teljesítmény függött attól, hogy melyik csővel kísérleteztünk. A legkisebb volt a felső teljesítményküszöb a 200 mm-es üvegcső esetén, a legnagyobb az 1200 mm hosszúságú alumínium cső esetén. (Ezt a lángcsóva méretéből, illetve a cső felmelegedésének mértékéből állapítottuk meg.) A pontos teljesítményértékeket nem tudtuk meghatározni, ugyanis azzal, hogy a gázláng vízszintes helyzetben volt, illetve egy porszívóval szívtuk a csőben lévő levegőt jelentősen megváltozott az adott gázégő-fokozat mellett is az égő teljesítménye. Hiába határoztuk meg, hogy függőleges lánghelyzet és extra légáram nélkül mekkora az égő teljesítménye az adott fokozatban, a körülmények megváltozása miatt ezek az értékek jelentősen módosultak. Ha még ezután is tovább növeltük a teljesítményt, akkor egyszerűen szétolvadtak a rácscsok, ezért nem meglepő, hogy ekkor már nem keletkezett hang. Összefoglalóan elmondható, hogy vízszintes csőhelyzet esetén is mind alsó, mind felső küszöb jelentkezik a hangkibocsátásban. Ez függ a gázégő teljesítményétől, a csövön átáramoltatott levegő intenzitástól, illetve a rácscs helyzetétől is (Beke, 2009c).

5.7. Ferde helyzetű cső

Ha a csövet ferdén helyezük el, akkor attól függően, hogy mekkora a vízszintessel bezárt dőlésszög, különböző légáram intenzitás esetén bocsát ki hangot a Rijke cső. (A 0°-os dőlésszög a vízszintes helyzetnek, a 90°-os dőlésszög a függőleges csőhelyzetnek felel meg.) Az 5.10. ábrából kitűnik, hogy ha növeljük a dőlésszöget, akkor csökken a hanghatás kiváltásához szükséges minimális légáram intenzitás értéke. Ha a vizsgált cső esetén a dőlésszög nagyobb, mint 65°, akkor már nincs szükség külön légáramoltatásra, a csőben a természetes konvekciós áramlás elegendő a hanghatás kiváltásához (Beke, 2011a).



5.10. ábra A ferde helyzetű rézcső esetén a hangkibocsátáshoz szükséges minimális légáram intenzitás értéke. (A gázláng teljesítménye kb. 320 W.)

5.8. Termoakusztikus oszcilláció

A Rijke csőben kialakuló hanghatás okainak elemzéséhez tekintsük át egy levegőoszlopban kialakuló állóhullámokkal kapcsolatos fontosabb tudnivalókat! A termoakusztika szerint a hanghullám a hőterjedés során alakul ki a „szonikusan indukált hőgradiens” következtében. Ezért rezonál a mindkét végén nyitott és az egyik végén zárt cső is (Fahey és Timbie, 2006). (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 gázláng által felforrósított rács körül a levegő hőmérséklete emelkedik, így növekszik a nyomás és a sebesség is; a felmelegedett gáz tágul, a sűrűsége csökken. A gázmolekulák a cső hidegebb vége felé gyorsulnak, ezáltal a cső fűtött végénél a relatív gáznyomás lecsökken. Ahogy a molekulák lehűltek, más gázrészecskék gyorsulnak a fűtött csővég felé, ahol feltöltik az alacsonyabb nyomású térfogatrészt. Itt a molekulák újra „felmelegszenek”, majd az egész folyamat kezdődik előlről. A gázmolekulák felgyorsulása és lelassulása az időben szinuszosan történik, végeredményül egy önfenntartó szinuszos longitudinális gáznyomás oszcilláció keletkezik. A hőforrás felülete körüli hőfluktuáció a legfőbb tényező a hangkeltésben. A Rijke cső egyfajta „*thermoakusztikus pumpa*”, amelyben a hőmérséklet oszcillációja „*pumpálja*” az akusztikus energiát a hallható hang szintjére (Entezam és mtsai, 2002). Ha a hőforrás hőmérséklete emelkedni kezd, kialakul valamekkora 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 hőforrás (rács) felszínének nagyságától (S_r), és az átlagos hőszállítási koefficienstől ($h_{\text{átl}}$) (Entezam és mtsai, 2002):

$$\dot{Q} = h_{\text{átl}} S_r (T_r - T_l). \quad (5.15)$$

Ha egy gázban mechanikus zavar (zaj) keletkezik, akkor ez a zavar a „rugalmas” közegben tovább terjed, közben a gázban p' akusztikai nyomás és ρ' sűrűség fluktuáció alakul ki. Ezt a jelenséget nevezzük hangnak. A hang (terjedési) sebessége (v_h) kifejezhető a gáz akusztikai nyomásának és a sűrűség fluktuációjának segítségével (Lajos, 1992):

$$v_h = \sqrt{\frac{dp'}{d\rho'}}. \quad (5.16)$$

Vizsgáljuk meg nyugvó (illetve lassan áramló) levegőben egy akusztikus egydimenziós síkhullám terjedését! Elsőként felírom a kontinuitási törvényt:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \cdot \underline{u}) = 0, \quad (5.17)$$

azaz

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial u}{\partial x} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} = 0, \quad (5.18)$$

átrendezés után kapom

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\rho \frac{\partial u}{\partial x} - u \frac{\partial \rho}{\partial x}. \quad (5.19)$$

A sűrűség pillanatnyi értéke (ρ) felírható az átlagérték (ρ_0) és a fluktuáció (ρ') segítségével:

$$\rho = \rho_0 + \rho'. \quad (5.20)$$

Ha ezt behelyettesítem az (5.19) egyenletbe, kapom

$$\frac{\partial(\rho_0 + \rho')}{\partial t} = -(\rho_0 + \rho') \frac{\partial(u_0 + u')}{\partial x} - (u_0 + u') \frac{\partial(\rho_0 + \rho')}{\partial x}, \quad (5.21)$$

azaz

$$\frac{\partial \rho'}{\partial t} = -\rho \frac{\partial u'}{\partial x} - u \frac{\partial \rho'}{\partial x}, \quad (5.22)$$

és az (5.16) alapján

$$\frac{\partial \rho'}{\partial t} = \frac{\partial \rho'}{\partial p'} \frac{\partial p'}{\partial t} = \frac{1}{v_h^2} \frac{\partial p'}{\partial t}. \quad (5.23)$$

Az (5.22) és az (5.23) egyenletekből következik, hogy

$$\frac{1}{v_h^2} \frac{\partial p'}{\partial t} = -\rho \frac{\partial u'}{\partial x} - u \frac{\partial \rho'}{\partial x}. \quad (5.24)$$

Mivel a sűrűség perturbációja kicsi a sűrűség átlagértékéhez képest, és a részecskék áramlási sebessége is kicsi, így az (5.24) egyenlet jobb oldalának utolsó tagját elhanyagolhatom

$$\frac{1}{v_h^2} \frac{\partial p'}{\partial t} \approx -\rho_0 \frac{\partial u'}{\partial x}. \quad (5.25)$$

Deriváljuk az (5.25) egyenlet mindkét oldalát az idő szerint!

$$\frac{1}{v_h^2} \frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} = -\rho_0 \frac{\partial^2 u'}{\partial t \partial x}. \quad (5.26)$$

Írjuk fel az Euler egyenletet is az áramlásra (Lajos, 1992):

$$\frac{du}{dt} = -\frac{1}{\rho} \cdot \text{grad}(p). \quad (5.27)$$

Szorozzuk meg az (5.27) egyenlet mindkét oldalát a sűrűséggel és végezzük el a parciális deriválást!

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} = -\text{grad}(p). \quad (5.28)$$

Ha az (5.28)-ba behelyettesítem az (5.20) egyenletet, kapom:

$$(\rho_0 + \rho') \frac{\partial u}{\partial t} + (\rho_0 + \rho') \cdot u \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{\partial p}{\partial x}. \quad (5.29)$$

Mivel a részecskék áramlási sebessége (u) kis érték és a hely függvényében is csak kicsit változik, ezért azt a tagot, amelyben ez szorzótényezőként szerepel, nyugodtan elhanyagolhatom:

$$(\rho_0 + \rho') \frac{\partial u}{\partial t} \cong -\frac{\partial p}{\partial x}. \quad (5.30)$$

A sűrűség perturbációjának mértéke szintén elhanyagolható a sűrűség átlagértéke mellett:

$$\rho_0 \frac{\partial u'}{\partial t} \cong -\frac{\partial p'}{\partial x}. \quad (5.31)$$

Deriváljuk az egyenlet mindkét oldalát x szerint!

$$\rho_0 \frac{\partial^2 u'}{\partial x \partial t} = -\frac{\partial^2 p'}{\partial x^2}. \quad (5.32)$$

Az (5.26) és az (5.32) egyenletek felhasználásával kapom az egydimenziós akusztikai hullámegyenletet:

$$\frac{1}{v_h^2} \frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 p'}{\partial x^2}. \quad (5.33)$$

A csőben a nyomáshullám közelítőleg egysíkú, a cső szájának környékén kisebb mértékű toroidális viselkedést mutat. A cső száján kívül a hullámforma többnyire gömb alakú. A legtöbb esetben hallható hang képződik a jelenség következtében. A termoakusztikus oszcilláció tulajdonképpen a hő hatására bekövetkező nyomásozcilláció keltette hanghatás. Amíg csak a longitudinális nyomáshullámokkal foglalkozunk a gázban a következő hullámegyenletet kell megoldanunk (Fahey és Timbie, 2006):

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = \frac{\rho}{\kappa} \cdot \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2}, \quad (5.34)$$

ahol

$$\kappa = -V \cdot \frac{d\rho}{dV}. \quad (5.35)$$

A megoldása:

$$\psi = A \cdot \cos(\omega \cdot t \pm k \cdot x) + B \cdot \sin(\omega \cdot t \pm k \cdot x). \quad (5.36)$$

Ahhoz, hogy állóhullámok alakuljanak ki a két hullámnak (ψ_1 és ψ_2) egymással szemben kell haladniuk azonos amplitúdóval (A):

$$\psi_1 = A \cdot \sin(\omega \cdot t + k \cdot x), \quad (5.37a)$$

és

$$\psi_2 = A \cdot \sin(\omega \cdot t - k \cdot x). \quad (5.37b)$$

A két hullám összege (Beke, 2009c):

$$\psi = \psi_1 + \psi_2 = A \cdot [\sin(\omega \cdot t + k \cdot x) + \sin(\omega \cdot t - k \cdot x)] = 2A \cdot \sin(\omega \cdot t) \cos(k \cdot x). \quad (5.38)$$

Ennek eredményeként a csomópontokban ψ 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, melynek mindkét vége nyitott (Rijke cső) a határfeltételek értelmében a cső mindkét végénél a kitérésnek duzzadóhelye van. Ebben az esetben:

$$L = \frac{\lambda}{2} \cdot n, \quad (5.39)$$

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

$$f = \frac{v_h}{\lambda} = \frac{v_h}{2 \cdot L} \cdot n, \quad (5.40)$$

ahol L jelöli a cső hosszát, v_h a hang sebességét, n pedig a harmonikusok számát; az első ($n=1$) alapharmonikusnak nevezzük (Beke, 2009cd).

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 csak páratlan számú harmonikus keletkezhet (Beke, 2009d):

$$L = \frac{\lambda}{4} \cdot (2 \cdot n - 1), \quad (5.41)$$

és n a harmonikusok száma.

A kialakuló hangrezgés frekvenciája (f):

$$f = \frac{v_h}{\lambda} = \frac{v_h}{4 \cdot L} \cdot (2 \cdot n - 1). \quad (5.42)$$

Láthatjuk, hogy a frekvencia függ a harmonikusok számától, 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:

$$v_h(T) = \sqrt{\left(\frac{c_p}{c_v} - 1\right) \cdot c_p \cdot T}, \quad (5.43)$$

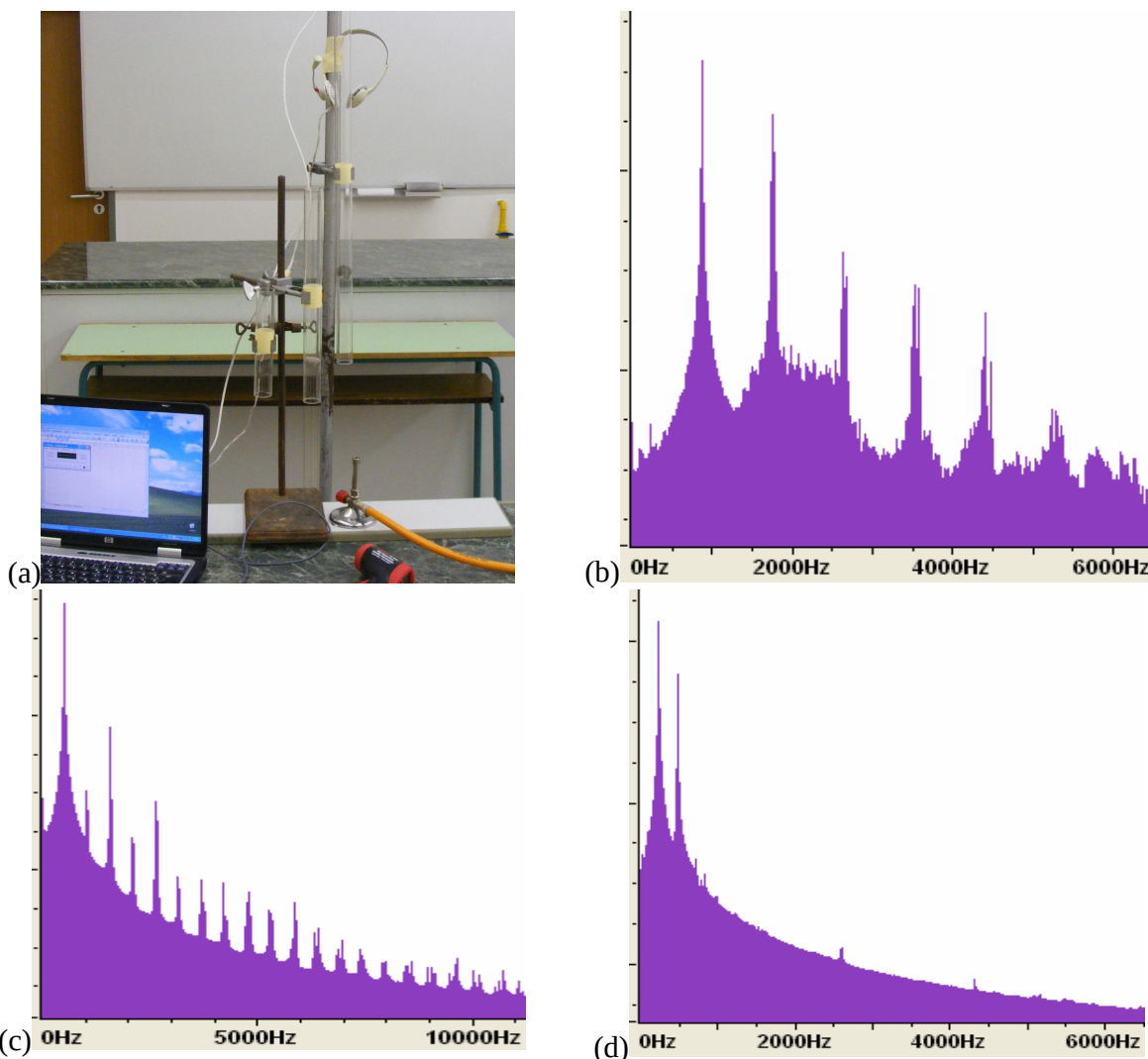
ahol c_p a levegő állandó nyomáshoz, c_v a levegő állandó térfogathoz tartozó fajhője, T pedig a levegő abszolút hőmérséklete. (Ezért is szükséges a rácsok és a cső belseje hőmérsékletének mérése.)

A cső hossza és a kialakuló hang frekvenciája közötti kapcsolat bemutatására kiválóan megfelelt a 3 üvegcső, mert hosszai aránya 1:2:4. A csövek által kibocsátott hang frekvencia spektrumát Audacity 1.3 Beta⁹ (freeware, azaz szabadon letölthető, tehát ingyenesen használható) programmal vizsgáltuk. A program grafikus formában jeleníti meg a felvett hang spektrumát.

A grafikonok elemzéséből kiderült, hogy a legrövidebb üvegcsőnek a legerőteljesebben megszólaló frekvenciája 902 Hz, a számított frekvenciája 998 Hz, ha $v_h(400 \text{ K})=399 \text{ m/s}$ hangsebességgel számolunk. A középső üvegcső esetén az alapharmonikus mért értéke 513 Hz, számított érték 487 Hz; ha $v_h(380 \text{ K})=389 \text{ m/s}$ hangsebességgel számolunk. A 800 mm hosszúságú cső esetén a mért frekvencia 233 Hz, a számított érték 237 Hz, ha $v_h(360 \text{ K})=379 \text{ m/s}$ -os hangsebességgel számolunk. (A hőmérséklet adatokat mérés és átlagolás után kaptuk.) Látható, hogy a leghosszabb cső esetén nagyon jól közelít egymáshoz a mért és a számított alapharmonikus értéke, a relatív hiba itt 1,7%. A legrövidebb cső esetén a relatív hiba 10,6%, a középső cső esetén a relatív hiba 5,3%; a nagyobb relatív hibákat valószínűleg az okozta, hogy ezek a csövek hamarabb felforrósodtak, ezért a hangsebesség jelentősen megváltozott.

Az 5.11. ábra elemzéséből az is kiderül, hogy az alapharmonikus mellett az első néhány felharmonikus szólal meg nagyobb intenzitással, a magasabb felharmonikusok ($n>4$) intenzitása kevésbé jelentős (Beke, 2009cd).

⁹ Audacity ingyenes hangszerkesztő: <http://audacity.sourceforge.net/>



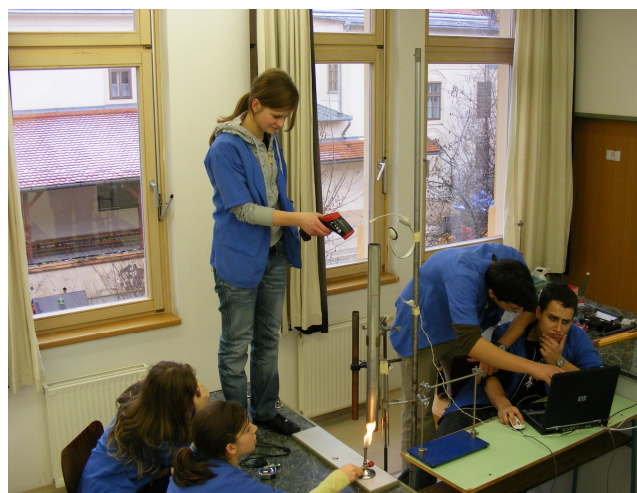
5.11. ábra A Rijke cső által kibocsátott hang spektruma (relatív egységekben): (a) 3 darab üvegcső; (b) 200 mm hosszúságú cső spektruma; (c) 400 mm hosszúságú cső spektruma; (d) 800 mm hosszúságú cső spektruma.

5.9. Összegzés

Ebben a fejezetben a gázfűtésű Rijke csövekkel végzett termoakusztikus vizsgálatok eredményeit mutattam be. A Rijke cső belsejében a hő fluktuációja akusztikus energiává alakulhat. A kísérleteink azt mutatták, hogy ha a nyomás és az akusztikus sebesség kedvezőtlenül alakul, akkor vagy nem alakul ki hanghatás, vagy a hang gyengülésére számíthatunk. Ha a nyomás fluktuációjának és a sebesség komponenseinek pumpálás-szerű mozgása kedvező fázisban vannak egymással, akkor viszont hang keletkezhet. A Rijke csővel kapcsolatos összes paraméter esetén (cső helyzete, rács pozíciója, rács áteresztőképessége, fűtőteljesítmény, melegítés időtartama) a hang keletkezése csak bizonyos paraméter tartományokban volt lehetséges. Az összes paraméter esetén van olyan minimális érték, amelynél kisebb érték nem elegendő a hanghatás kiváltásához, illetve van olyan maximális érték, amelyen túl már nem keletkezik hang. A mérésekből megállapítottam, hogy a jelenség küszöbszerű viselkedést mutat, azaz pl. csak meghatározott (csőre jellemző) hőteljesítmény-tartományban jelentkezik a hanghatás. A hőteljesítménynek el kell érni egy minimális alsó küszöbértéket ahhoz, hogy akusztikai oszcillációt hozhasson létre, illetve nem haladhat meg egy maximális felső küszöbteljesítményt. A melegítés teljesítményében és

időtartamában is van egy optimális pont (viszonylag szűkebb intervallum), ahol a leghosszabb ideig hallható a cső által kibocsátott hang. A rács helyzetének szintén van egy ideálisnak tekinthető pozíciója ($x_r=L/4$). Ebben a rács helyzetben alacsonyabb a rács hőmérséklete, mint tőle kissé arrébb elhelyezett rácsok esetén, de mégis itt keletkezik a leghosszabb hang. A vízszintes helyzetű Rijke csőben szintén keletkezhet hang, de csak akkor, ha a légáramlást külön biztosítjuk. Ennek a légáram intenzitásának is van optimális tartománya: sem túl kicsi, sem túl nagy légáram esetén sem észleltünk hanghatást. Vizsgáltuk a rácsok áteresztőképességének szerepét is, itt is megmutatkozott a küszöbhatás. A két legsűrűbb rács esetén túl kicsi volt a légáram intenzitás a csőben, ezért nem keletkezett hang. A legritkább rács esetén viszont a rács felülete volt annyira kicsi, hogy nem tudott elég energiát átadni a rajta keresztülaramló levegőnek. Azt tapasztaltuk, hogy 35% és 90% közötti áteresztőképességű rácsok esetén alakul ki hang a Rijke csőben. A kísérletek nagy részében a 80%-os áteresztőképességű rácsot használtuk, mert ennek volt a legmagasabb az olvadáspontja. Ha a csövet ferdén helyezük el, akkor is jelentkezik a küszöbhatás.

A csővel végzett kísérleteket csoportmunkában, projektszerűen oldottuk meg. Alapvetően olcsó, minden iskolában megtalálható eszközöket használtunk; amelyek nem voltak meg a mi iskolánkban, azokat pedig kölcsönkértük, így ez nem okozott extra kiadásokat számunkra. A Rocard-jelentés (2007) fontos megállapításai közé tartozik, hogy a kísérletek költségeit csökkenteni kell, a tanulók projektszemléletű munkavégzésének viszont nagyobb hangsúlyt kell biztosítani. Ez teljes mértékben megvalósult a mérésorozatunkban (Beke, 2009a-d, 2010c). Az 5.12. ábrán az iskolánk tanulói láthatók a projektfeladat végzése során.



5.12. ábra Iskolánk tanulói különböző méréseket végeznek a termoakusztikus projektfeladat során.

A tanulóknak nem csak a termoakusztikai ismereteik bővültek, hanem a természettudományos gondolkodásuk, problémalátó és problémamegoldó 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 csövek vizsgálatát a projektünk első lépcsőfokának tekintettük. A második lépésben építettünk egy elektromosan fűtött Rijke csövet, ennek részleteit a következő két fejezetben mutatom be.

6. Elektromosan fűtött Rijke cső vizsgálata

A gázlánggal melegített Rijke csövekkel számos kísérletet végeztünk, hasznos adatokat gyűjtöttünk és ezek között összefüggéseket is észrevettünk (pl. küszöbhatás). Sajnos azonban az adataink nem voltak kellően pontosak ahhoz, hogy mélyebb összefüggéseket is vizsgálhassunk. Bizonyos törvényszerűségeket sejtettünk a vizsgálatokból, de nem tudtuk ezeket az „összefüggéseket kimérni”; ezért úgy döntöttem, hogy elektromosan fűtött Rijke csövekkel folytatjuk a kísérleteinket, melyekben a hőforrás elektromos árammal fűtött drótrács lesz. Az áram teljesítményét könnyebben szabályozhatjuk, a fűtés során „csak” a rácsot melegítjük és egyszerűbb a hőteljesítmény mérése is, mint a gázláng esetén. Az elektromos fűtés előnye a gázzal szemben még az is, hogy az utóbbival való fűtés esetén óhatatlanul egy eléggé meghatározatlan légáramlást okozunk, mely befolyással lehet a termoakusztikus instabilitásra; ez az elektromos fűtés esetében nem jelenik meg. (A gázzal fűtött Rijke csövek a kísérletek többségében függőleges helyzetben voltak, ekkor mindig volt valamekkora légáramlás a csövekben a természetes konvekció következtében. A vízszintes cső esetén nincs természetes konvekciós áramlás, ezért ez csak akkor szólt meg, ha külön légáramlást hoztunk létre a csőben.)

6.1. A mérési elrendezés

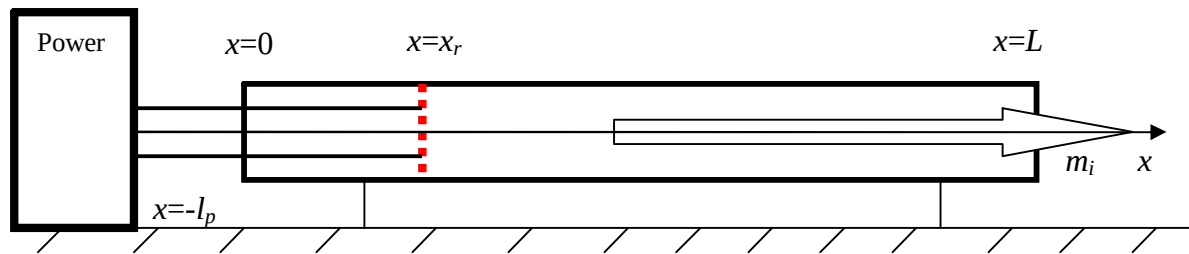
A korábbi mérések alapján megállapítottam, hogy a cső hangkibocsátását a cső geometriai paraméterein kívül a cső helyzete (a vízszintessel bezárt dőlésszöge), a rács helyzete (x_r), rácsra jutó hőteljesítmény (P), a rács abszolút hőmérséklete (T_r), a csövön átáramló légáram intenzitása (m_i), a fűtés időtartama (t_f) és a rács áteresztőképessége határozza meg (Beke, 2010a).

Az elektromos fűtésű csövek esetén sokkal több időbe telt egy adott kísérleti elrendezés beállítása, mint gázfűtés esetén, illetve maga a mérés is jóval több időt vett igénybe. (Egy adott mérés a beállításokkal együtt összességében átlagosan kb. 8 – 10 percig tartott). Egy projektfoglalkozás alkalmával tehát hozzávetőlegesen 10 – 12 mérést tudtunk elvégezni. A kísérletsorozat elején még úgy gondoltam, hogy mindegyik korábban használt cső viselkedését vizsgálni fogjuk. Néhány mérést végeztünk is velük, de rá kellett jönnöm, hogy ez túlzottan hosszú időt venne igénybe. Ezért úgy határoztam, hogy a projektünk további szakaszában csak egy csővel fogunk méréseket végezni. A választásom az 1200 mm hosszúságú alumíniumból készült Rijke csőre esett. A projekt további szakaszában a cső geometriai adatai tehát nem változtak. A termoakusztikus rendszer leírására összességében 6 paraméter szolgált (Beke, 2010a):

- A cső helyzete (a vízszintessel bezárt dőlésszöge);
- A rács helyzete a csőben (x_r);
- A rács áteresztőképessége;
- A rácsra adott fűtőteljesítmény (P), amelytől közvetve a rács hőmérséklete is függ (T_r);
- A melegítés (fűtés) időtartama (t_f);
- A csőben a légáram intenzitás nagysága ($m_i = \Delta m_{\text{levegő}} / \Delta t$).

A mérések során kiderült, hogy a vizsgálandó paraméterek számát csökkenteni lehet. Első gondolatom az volt, hogy függőleges és ferde helyzetű csővel is végzünk kísérleteket, de végül úgy döntöttem, hogy az elektromosan fűtött Rijke csövet vízszintesen helyezem el, mert ekkor nem kell

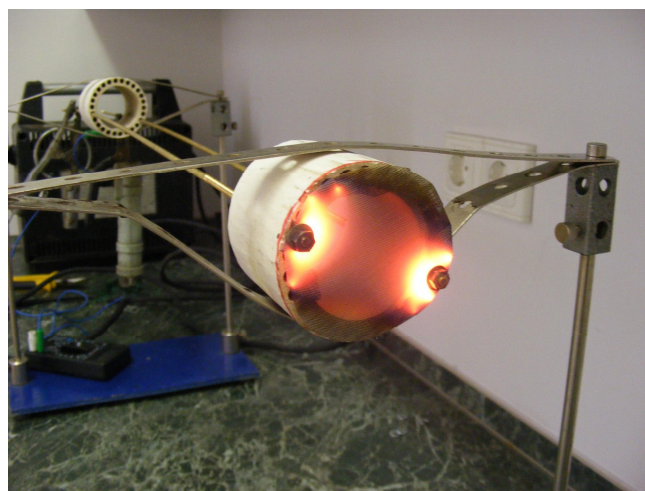
számolni a természetes légáramlással. A vízszintes helyzetű, elektromos árammal fűtött Rijke cső vázlatát a 6.1. ábrán láthatjuk. A rendszer modellje egy vízszintes cső, melybe egy lokálisan kis kiterjedésű, síknak tekintett hőforrás van elhelyezve az x_r pontnál; a csövön keresztül m_i intenzitású levegő áramlik át (Beke, 2010b).



6.1. ábra A vízszintes helyzetű Rijke cső egyszerű modellje.

Igaz ugyan, hogy a vízszintes elhelyezkedésű cső esetében egy külön szerkezettel (porszívóval) nekünk kell légáramlást biztosítani a Rijke csőben, de mégis ez tűnt az egyszerűbb megoldásnak; és így eggyel csökkent a vizsgálandó paraméterek száma is. A porszívó által keltett légáram intenzitást szabályozni tudtuk a porszívó teljesítményével, illetve a szívócsőbe helyezett „fojtószelep” segítségével; így viszonylag tág határok között „szabadon” tudtuk vizsgálni a légáram intenzitásnak a szerepét a rendszerben. A kísérleti berendezést úgy állítottuk össze, hogy maga a porszívó a szomszédos teremben (a fizika szertárban) volt, így a motor hangja kevésbé zavarta a kísérleteket.

A hő „forrása” egy elektromosan fűtött drótháló volt a kísérletekben. A drótháló viszonylag sűrű szövésű kb. 0,45 mm átmérőjű acéldrótokból állt, melyeknek az olvadáspontja meghaladta az 1000 °C-ot. Mint már a gázzal melegített Rijke cső esetén említettem, a drótháló áteresztőképessége nem befolyásolta jelentősen a kísérletek során kapott eredményeket, legalábbis a 60%–90%-os légáteresztési tartományban nem, ahol mi vizsgálódunk. Néhány kezdeti kísérlet után úgy döntöttem, hogy a továbbiakban csak a 80%-os áteresztőképességű dróthálósval dolgozunk tovább. Ennek a rács-anyagnak volt a legmagasabb olvadáspontja, főként ezért esett erre a választás. Mivel a drótháló „szövése” egyenletes volt, ezért feltételeztem, hogy a felületén egyenletesen tudja „leadni” a hőt. A 6.2. ábrán az elektromos árammal fűtött rács látható, ami a kísérletek során a Rijke cső belsejében volt elhelyezve (Beke, 2010b).



6.2. ábra Elektromos árammal fűtött drótháló.

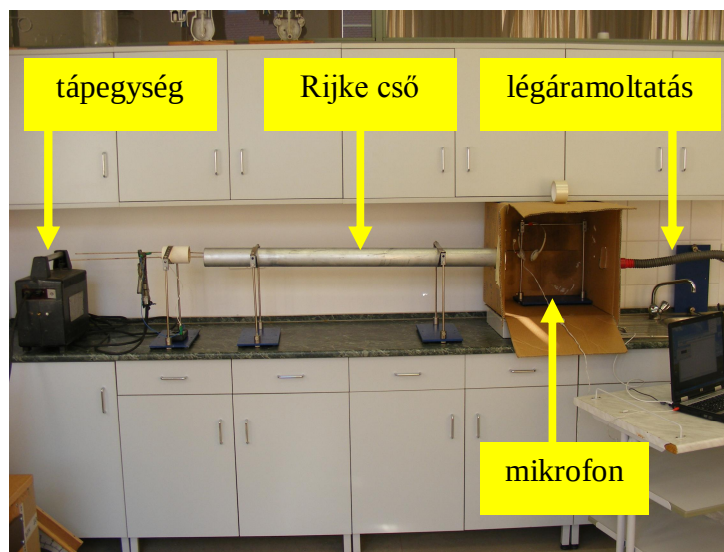
A hálót egy hengeres kerámia betét tartotta a Rijke cső belsejében a kívánt helyen. A kerámia betét hossza 65mm, belső átmérője 51 mm, külső átmérője 71,5 mm volt; pontosan belepasszolt az alumínium Rijke cső belsejébe. A kerámia betétben hosszirányban 5 mm átmérőjű furatok helyezkedtek el. A furatokat arra használtuk, hogy a bennük elhelyezett csavarokkal rögzítettük a dróthálót a kerámia betéten azért, hogy meggátoljuk a rács elmozdulását. Erre mindenképpen szükség volt, hiszen a rácsot elektromos szempontból el kellett szigetelni az alumínium csőtől. Ezen kívül a kerámia betét akadályozta a drótháló és a cső fala közötti termikus kölcsönhatást is, ez szintén hasznosnak bizonyult, hiszen a kísérletekben nem a cső felmelegítése volt a cél, hanem igazából a csőben áramló levegőt szerettük volna a rácsnál „lokálisan” felmelegíteni. A drótháló elektromos fűtéséhez szükséges áramot két sárgarézből készült pálcán keresztül vezettük a rácshoz a cső nyitott „alsó” vége felől. A rézpálcák hossza egyenként 1000 mm volt, az átmérőjük 4,5 mm. A rézpálcákat az előbb említett kerámia betét furatain keresztül vezettük, így elektromosan ezek is el voltak szigetelve a Rijke csőtől. A cső nyitott végénél – de a csövön kívül – még egy kerámia tubus volt, mely teljesen hasonló paraméterekkel rendelkezett, mint a másik kerámia betét. Ez a második betét csak arra szolgált, hogy megakadályozza, hogy a rézpálcák az alumínium csőhöz érjenek. Mivel ez a külső kerámia betét érdemben nem befolyásolta a kísérleteinket, ezért a későbbiekben ezzel nem foglakozok külön.

A kísérletekhez megfelelő feszültségforrást kellett találnunk, amely elegendően nagy áramerősséggel terhelhető ahhoz, hogy a dróthálót fel tudja izzítani. A hagyományos iskolai tápegységek nem bizonyultak megfelelőnek, ezért valami más megoldást kellett kitalálnunk. Eszünkbe jutott, hogy használhatnánk egy személygépkocsi akkumulátorát a kísérleteinkhez. Ez a megoldás működött is, de sajnos nem volt olyan „felesleges” akkumulátorunk, amit a projekt teljes időtartamában használhattunk volna; illetve az akkumulátor „túláram” elleni védelmére és a megfelelő feltöltöttségére is figyelniünk kellett. (Egy változtatható ellenállással tudtuk szabályozni az elektromos teljesítményt.)

A következő ötletünk az volt, hogy egy 230 V-os hálózati feszültségről működtethető, szabályozható teljesítményű hegesztő transzformátor lesz a tápegységünk, mivel ennél a berendezésnél nem jelent gondot, ha nagy a terhelő áramerősség és a rács fűtéséhez használt teljesítményt is kényelmesen szabályozhatjuk. Az iskolában volt egy Trakis Hetra 101 SM típusú hegesztő transzformátor, melynek névleges teljesítménye 4 kW, a maximálisan terhelhető áramerősség pedig 100 A, ez tökéletesen megfelelt a céljainknak. Az akkumulátor tehát visszakerült a gépkocsiba, és a hegesztőtranszformátor szolgált tápegységül a további kísérletekhez, melyek során mértük a rácson keresztül folyó áram erősségét és a rácson eső feszültséget. Valójában a rácson és a két rézpálcán eső feszültséget mértük, de a pálcák elektromos ellenállása kicsi a rács elektromos ellenállásához képest, ezért első közelítésben a pálcákon eső feszültséget elhanyagoltuk (Beke, 2010a). (A pontosabb számításoknál ezt is figyelembe vettük.)

A csőben a levegő áramoltatására egy ETA 3404 típusú ipari porszívót használtunk, ennek névleges teljesítménye 1,2 kW. A porszívó által keltett légáram intenzitást a gázlángos kísérlethez hasonlóan számítottuk ki, annyi módosítással, hogy ez egy elektromosan szabályozható

teljesítményű készülék, ráadásul a szívócsőbe egy fojtószelepet is elhelyeztünk, így a légáram intenzitást a zéró és egy maximális érték között a rendszer többi paraméterétől függetlenül tudtuk beállítani. Ennek a porszívónak a legnagyobb szívási teljesítménye $0,0026 \text{ m}^3/\text{s}$ (azaz kb. 3 g/s) volt a normál körülmények esetén. A szívócső nem közvetlenül kapcsolódott a Rijke cső „felső” végéhez. Az alumínium cső vége egy $450 \times 450 \times 500 \text{ mm}$ élhosszúságú, vastag falú kartondobozba nyílt. A doboz ezzel szemkötti oldalában is volt egy kisebb átmérőjű nyílás, ide csatlakozott a szívócső. (A csatlakozási pontokat ragasztóval tömítettük.) A kartondobozra két okból volt szükség. Egyfelől a dobozba tettük a mikrofont, így csökkentettük a külső környezet zajhatását, azaz a mikrofon tényleg a rendszerünk akusztikai jeleit érzékelte. (Még így is elég zajosak voltak a méréseink.) Másfelől a kartondoboz egy csillapító kamraként funkcionált. Ha ugyanis közvetlenül hozzákapcsoltuk volna a porszívót a Rijke csőhöz, akkor ezzel a cső geometriai adatai módosultak volna. A csillapító kamrával viszont elértük, hogy a porszívó légáramlást tudott kelteni a Rijke csőben, viszont Rijke cső és a porszívó cső termoakusztikai szempontból jó közelítéssel függetlennek tekinthető (Beke, 2010ab). A vízszintes helyzetű, elektromos árammal fűtött Rijke cső és a hozzá kapcsolódó mérőeszközök a 6.3. ábrán láthatók.



6.3. ábra Az elektromos árammal fűtött Rijke cső.

A rács és a cső különböző pontjai hőmérsékletének mérésére IR-380 és IR-1000L típusú infrás hőmérőket alkalmaztunk. A melegítés időtartama bizonyos szempontból lényeges, más szempontból viszont kevésbé fontos. Ha elegendő időt hagyok a rács felfűtésére és a rácsra jutó hőtéljesítményt csak lassan növelem, akkor a Rijke cső nagyjából kvázi-stacionárius állapotokon keresztül jut el a gerjesztett állapotba, feltéve, hogy ez lehetséges. Ha azonban hirtelen növelem a teljesítményt, akkor a rendszerünk sokkal kiszámíthatatlanabban viselkedik. Ebből azt a tanulságot vontam le, hogy mindig csak lassan szabad az elektromos fűtőtéljesítményt növelni; ezért magát a mérést mindig megelőzte egy „felfűtési procedúra”. Ez a „bemelegítési” folyamat a kísérletek során általában 1–5 percig tartott. A melegítéshez szükséges időt empirikusan határoztuk meg; ha nem volt elegendő az egyik kísérletben, akkor egyszerűen tovább vártunk a következő mérés során. Ilyen szempontból tehát nem annyira fontos a rács felmelegítésének ideje, inkább csak az számít, hogy elegendően lassan melegítsük fel. Tehát ezt a paramétert nem kell mérni, csak megfelelő időt

kell biztosítani a rács felfűtésére (Beke, 2010a). (Természetesen az is igaz, hogy csak véges idő áll a rendelkezésünkre, ezért az sem jó, ha túlzottan lassan növeljük a fűtőtéljesítményt. A kísérletek során előbb-utóbb kitapasztaltuk, hogy milyen ütemben célszerű növelni a fűtőtéljesítményt.)

A kezdetben tervezett 6 vizsgálandó paraméterből tehát kiesett a cső vízszintessel bezárt dőlésszöge, a rács áteresztőképessége és a melegítés időtartama. A rendszerünk stabilitását meghatározó 3 „maradék” paraméter, (vagy célszerűbb lenne 3 „fontos” paraméternek nevezni): a rács helyzete (x_r), a csövön átáramló légáram intenzitás (m_i) és a rácsra jutó hőteljesítmény (P). Ezeket a jellemzőket viszonylag pontosan meg tudtuk mérni, illetve ki tudtuk számítani. A fő célunk tehát annak meghatározása, hogy ez a 3 paraméter hogyan befolyásolja a rendszerünk termoakusztikai állapotát a stabilitás-instabilitás szempontjából (Beke, 2010a).

6.2. A mérés menete

A mérések menete hasonló volt a gázlánggal fűtött vízszintes helyzetű Rijke csővel végzett kísérleteinkhez. Az első lépés a rács pozíciójának beállítása a vízszintes csőben: a rácsot tartó kerámia betétet a cső „alsó” végéhez helyeztük – a 6.3. ábra alapján ez a cső bal végét jelentette – majd lépésenként toltuk előre a kerámia betétet a cső jobb oldali vége felé haladva. (Az egyértelműség kedvéért ezt neveztük a cső „felső” részének.) Négy olyan rácspozíciót jelöltem ki, ahol alaposabb vizsgálatokat végeztünk. Ezek rendre az $x_r=L/8$, $x_r=L/4$, $x_r=3L/8$ és az $x_r=5L/8$ rácshelyek voltak (Beke, 2010a).

Minden rácspozíció esetén nullától a maximális értékig változtattuk a csőben áramló légáram intenzitását. A rácspozíció és a légáram intenzitás rögzítése után következett az elektromos fűtőtéljesítmény beállítása. Röviden tehát azt mondhatom, hogy a fenti paraméter-hármasok függvényében vizsgáltuk, hogy stabil-e a rendszerünk, vagy instabil állapotban van. Mindeközben persze figyeltük a rács hőmérsékletét, és ha megszólalt a hang, akkor mértük a hang intenzitását is. Mint már említettem, a dróthálóra jutó teljesítményt csak fokozatosan lehetett a rácsra juttatni, ugyanis a rendszer még arra is „érzékeny” volt, hogy mennyi idő alatt fűtöttük fel a rácsot. Egy adott paraméterekkel jellemzett mérés után általában 3–4 percig vártunk, hogy a cső visszahűljön nagyjából szobahőmérsékletre és az előzőhöz hasonló kezdőfeltételekkel végezhesük a következő mérést is.

A kísérletek során felfigyeltem arra, hogy a rendszer néha aszimmetrikusan viselkedik a paraméterek változásának előjelére. Ez azt jelenti, hogy ha a rendszer egy adott paraméter-beállítás mellett instabillá vált, miközben valamelyik paraméterét éppen növeltük, akkor ugyanazon paraméter ugyanakkora csökkentése nem biztos, hogy megszüntette a rendszer instabilitását. Ez a jelenség mindhárom fő paraméter esetén megfigyelhető, de a számszerű jellemzése nagyon nehéz, ugyanis sokszor a mérési hibahatáron belül volt; ráadásul nem mindig jelentkezett ez a jelenség. Könnyebben megérthető, hogy mire gondolok egy példán keresztül. Ha egy adott rácshelyzet, légáram intenzitás és hőteljesítmény esetén a rendszer stabil állapotban volt, majd egy kicsit megnöveltük a rácsra jutó hőteljesítményt, akkor megszólalt a cső, de ha ezután „pont ugyanennyivel” csökkentettük a teljesítményt, akkor nem biztos, hogy elhalt a hang. (Sajnos itt fellép az a bizonytalanság, hogy mit is jelent a „pont ugyanannyi”. A mi esetünkben ez azt jelenti,

hogya a mi mérési pontosságunkon belül még ugyanakkora a két érték.) Egyébként nem csak a stabil→instabil rendszerátmenetnél figyeltünk meg hasonló jelenséget, hanem fordított irányú instabil→stabil átmenetnél is észleltük. A furcsaság az volt, hogy ez sem egy állandó jelenség volt, azaz néha észleltük, néha nem, tehát egyfajta sztochasztikus viselkedést mutatott a rendszerünk. Mivel pontosabb méréseket nem tudtunk végezni, ezért nem tudtuk megmondani, hogy ez a jelenség csak a mérési bizonytalanságnak köszönhető; esetleg a jelenséget valami olyan paraméter, vagy paraméterek válthatják ki, amiket mi nem vizsgáltunk.

Ha a drótháló a cső felső részében helyezkedett el, akkor sokkal nehezebb volt a rendszert instabil állapotba hozni, mint ha a rács a Rijke cső alsó felében lett volna. A Rijke csővel foglalkozó cikkek többsége szerint ezen rácspozíció tartományban a rendszer nem gerjeszthető úgy, hogy hang is keletkezzen (pl. Entezam és mtsai, 2002; Sarpotdar és mtsai, 2003). A cső közepének tájékán nem is találtunk olyan paraméter kombinációt, ahol a rendszer instabillá vált volna. Az $x_r=L/2$ rácspozíciót elhagyva azonban a rendszert mégis sikerült a stabil állapotából kimozdítanunk. Ezt azonban csak a $6L/10 < x_r < 3L/4$ tartományban figyeltük meg. Ha a cső $3/4$ -ét is elhagytuk, akkor egyetlen esetben sem észleltünk hangot, azaz ekkor a hőteljesítménytől, a melegítés időtartamától és a légáram intenzitástól függetlenül a rendszerünk mindig stabil állapotban volt. A cső által kibocsátott hang spektrumát FFT algoritmussal vizsgáltuk az Audacity program segítségével. A cső által kibocsátott „alapharmonikus” nem egyezett meg azzal, mint amit az alsó rácshelyzet esetén kaptunk. Igaz ugyan, hogy még a $0 < x_r < L/2$ rácspozíció tartományban sem mindig pontosan ugyanazt az alapharmonikus hangot kaptuk, de a felső rácshelyzet esetén olyan nagy volt az eltérés az előzőektől, hogy ezt a rendszer más típusú gerjesztésének kellett tekintenünk. Néhány szerző beszámolt már a Rijke csőnek ez az ún. 2. típusú gerjesztéséről (pl. Marone és Tarakanovskii, 1967; Collyer és Ayres, 1972; Matveev, 2003; Matveev és Culick, 2003a). Matveev (2003) szerint az $x_r=5L/8$ rácshelyzetnél van a cső 2. típusú gerjesztésében egy olyan pont, ahol a legintenzívebben gerjesztődik a rendszer. Nekünk ezt nem sikerült egyértelműen mérésekkel is igazolni. A méréseink alapján azt tudjuk mondani, hogy a $6L/10 < x_r < 2L/3$ rácspozíció tartományban figyeltük meg a Rijke cső 2. típusú gerjesztésében egy intenzívebb instabil tartományt, azaz itt bocsátotta ki a cső a legnagyobb intenzitású hangot; de ebben a tartományban nem igazán tudtunk különbséget tenni az egyes rácspozíciókhoz tartozó hangintenzitás értékek között. Ha a cső $2/3$ részét elhagytuk, de még a $3/4$ részén belül voltunk, akkor viszont mérhető volt a kibocsátott hang intenzitásában csökkenés, sőt a cső $3/4$ -nek tájékán meg is szűnt a hanghatás (Beke, 2010a).

6.3. A rendszer stabilitásának vizsgálata

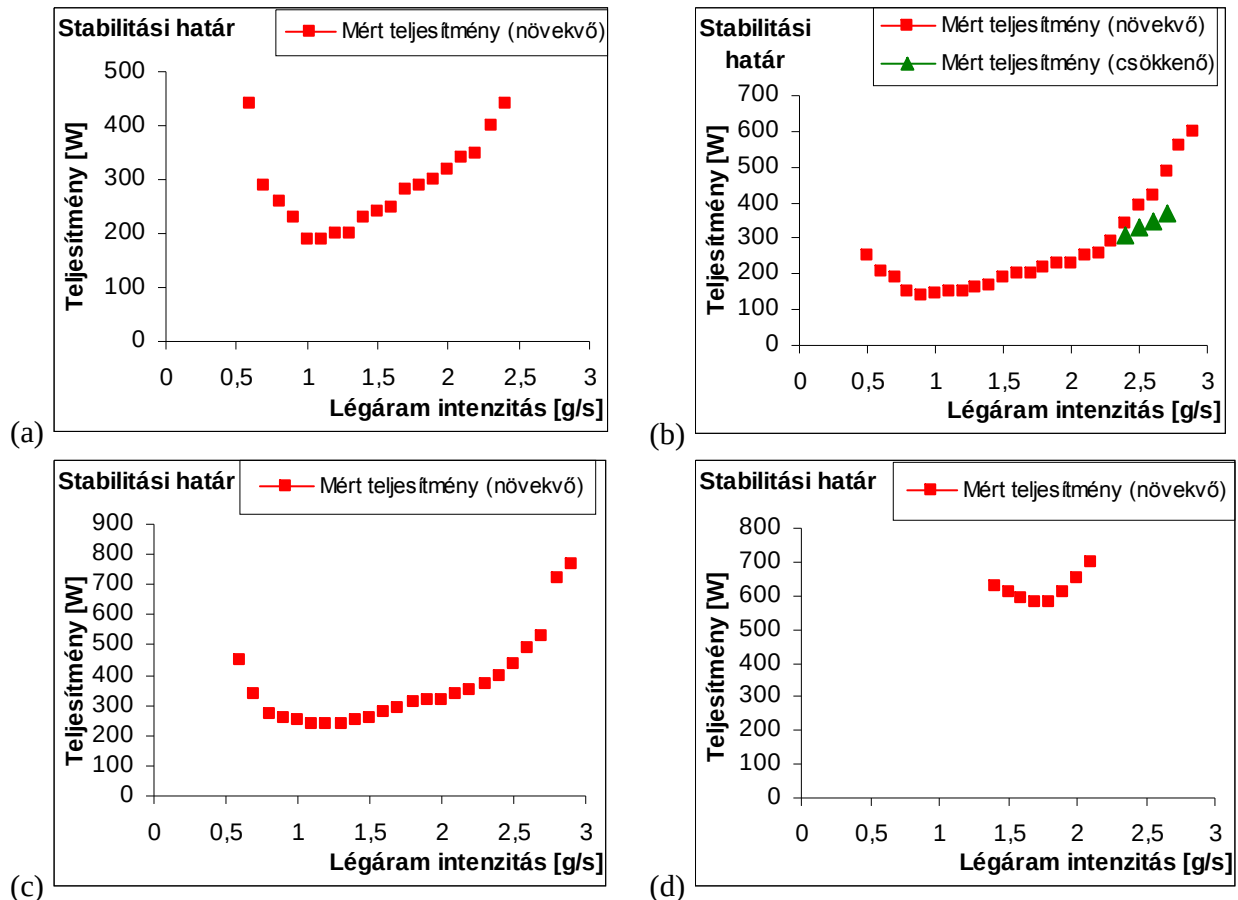
Az elsődleges célom az volt, hogy meghatározzam azokat a körülményeket, amelyek a termodinamikai rendszert a stabilból az instabil állapotba viszi, illetve fordítva. A csőben a 3 fő rendszerparamétert (rácspozíció, légáram intenzitás, hőteljesítmény) változtatva végeztük méréseinket. A tanulók a méréseket a vezetésem mellett hajtották végre: elsőként a rácspozíciót fixáltuk, majd beállítottuk a csőben áramló levegő intenzitását és ezután állítottuk be a dróthálót fűtő teljesítményt (Beke, 2010a).

Ha a rácsot a cső alsó felében a cső negyedrészéhez helyezzük és alacsony légáram intenzitás esetén a hőteljesítményt fokozatosan növeljük, akkor eljutunk egy olyan ponthoz, ahol a rendszer a stabilitás-instabilitás határához ér. Itt néha megszólal valamilyen hang, néha nem. Ha kicsit növeljük a hőteljesítményt, akkor „átbillen” a rendszerünk ezen az átmeneti zónán és instabillá válik, azaz folyamatos hangot bocsát ki. Fordított irányú kísérleteket is végeztünk, azaz az instabil rendszerünket tekintettük kiinduló állapotnak, majd elkezdtuk a hőteljesítményt csökkenteni. Ekkor is – hasonlóan az előző esethez – elérkeztünk egy viszonylag keskeny átmeneti zónához, ahol a rendszerünk néha még instabil, de néha már stabil állapotban volt, majd a fűtőáram erősségét tovább csökkentve a rendszer teljesen stabil állapotába jutott. Mint már korábban is említettem ez a két átmeneti pont, vagy helyesebb lenne úgy fogalmazni, hogy keskeny átmeneti tartomány nem volt pontosan ugyanaz a hőteljesítmény növelése, illetve csökkentése esetén. A kísérletek többségénél olyan kicsi volt az eltérés, hogy nem tudjuk egyértelműen kijelenteni, hogy a két tranziens tartomány nem esik egybe, de voltak olyan méréseink, ahol ezt a jelenséget jól megfigyelhettük.

Közepes légáram intenzitás esetén a helyzet változik annyiban, hogy ez a korábban jelentkező stabilitást és instabilitást „elválasztó” átmeneti zóna szűkebb, mint az alacsony légáram intenzitás mellett jelentkező tartomány. Ha még tovább növeltük a légáram intenzitást, akkor az átmeneti zóna keskenyedése folytatódott, legalább is a mérési pontosságon belül szinte egy pontra szűkült. Valójában itt sem tudtunk egyértelműen egy pontot megjelölni, de a rendszerünk sokkal jobban meghatározott, szűk tartományban ment át stabilból instabil állapotba, ha a rácsra adott hőteljesítményt növeltük. A fordított irányú kísérleteknél – amikor a korábban instabillá vált rendszerben csökkentettük a dróthálót fűtő teljesítményt – a rendszerünk szintén nagyon rövid intervallumon ment át az instabilból a stabil állapotába. A stabilitást és az instabilitást elválasztó igen szűk tartomány („átmeneti pont”) azonban különböző értéknek adódott. A rendszerünket tehát nem csak a 3 fő paraméter (rácspozíció, légáram intenzitás, hőteljesítmény) határozza meg, hanem a paraméterek változásának iránya is számít (Beke, 2011a). Néhány szerző (pl. Heckl, 1985; Matveev, 2003; Matveev és Culick, 2003a) említést tesz hasonló jelenségről, amit hiszterézisnek neveznek.

A Rijke cső legkönnyebben akkor hozható instabil állapotba, ha a rács a cső negyedrésznél helyezkedik el. Ekkor kell relatíve a legkisebb fűtőteljesítményt a drótrácsra adni és viszonylag kis légáram intenzitás esetén is hangot bocsát ki a cső. Ha megvizsgáljuk, hogy az egyes légáram intenzitás értékek mellett mekkora az a legkisebb hőteljesítmény, amivel éppen gerjeszteni lehet a rendszerünket és ezeket az összetartozó értékpárokat ábrázoljuk egy koordináta rendszerben, akkor a pontokat összekötve megkapjuk azt a határvonalat, ami a rendszerünk stabil állapotát az instabil állapotától elválasztja. A görbe alakja nagyjából parabolához hasonlít, bár a „parabola” bal szára meredekebben esik, mint amennyire a jobb szára emelkedik (Beke, 2010a). A mérésekből tehát az derült ki, hogy alacsony légáram intenzitás értékeknél meglehetősen magas hőteljesítménnyel lehet csak a rendszerünket gerjeszteni; ha viszont növelni kezdem a porszívóval a légáram intenzitását, akkor csökken a gerjesztéshez szükséges minimális fűtőteljesítmény. Tovább növelve a légáram

intenzitását, eljutunk egy olyan ponthoz, ahol a legkisebb a gerjesztéshez szükséges hőteljesítmény. Ha még ezután is folytatom a légáram intenzitásának növelését, akkor fokozatosan egyre nagyobb hőteljesítménnyel lehet csak a rendszerünket instabil állapotba hozni (6.4.b ábra).



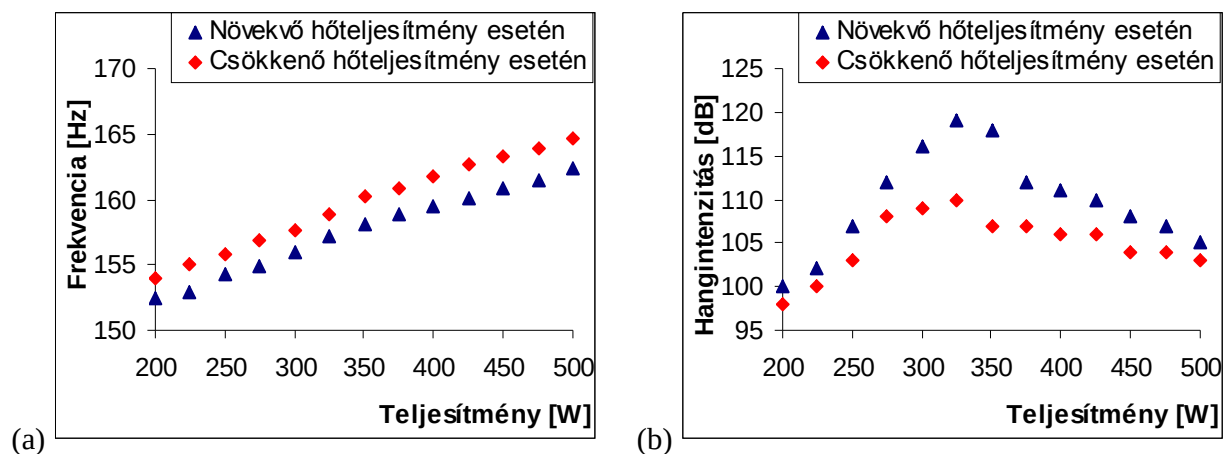
6.4. ábra A cső gerjeszthetőségének határvonalai a mérések alapján: (a) $x_r=L/8$; (b) $x_r=L/4$; (c) $x_r=3L/8$; (d) $x_r=5L/8$.

Hasonló vizsgálatokat végeztünk az $x_r=L/8$ és az $x_r=3L/8$ rácspozíciók esetén is. A kapott eredményekből az derült ki, hogy a rendszerünket jellegében hasonló parabolyszerű határ választja el a stabil és instabil állapotától; azaz itt is a bal „parabola szár” volt a meredekebb, a jobb a kevésbé meredek. A gerjesztéshez nagyobb hőteljesítmények kellettek, mint az $x_r=L/4$ rácspozíció esetén, azonos légáram intenzitás értékek mellett. Az $x_r=L/8$ helynél kisebb fűtőteljesítménnyel lehetett a rendszerünket gerjeszteni, mint az $x_r=3L/8$ rácspozíciónál (6.4.a és 6.4.c ábra). A méréseink alapján kijelenthetjük, hogy az $x_r<L/2$ rácspozíció tartományban a rendszerünk úgy viselkedik, hogy van egy olyan légáram intenzitás érték, amelynél a legkisebb hőteljesítménnyel gerjeszthető a rendszerünk. Ha ettől az előbbi légáram intenzitástól eltérünk akár pozitív, akár negatív irányba, akkor már csak nagyobb hőteljesítmény mellett lehet a Rijke csövet instabil állapotba hozni (Beke, 2010a).

Megpróbálkoztunk azzal is, hogy a $6L/10<x_r<3L/4$ tartományban is felvegyünk valami hasonló stabilitást az instabilitástól elválasztó görbét. Sajnos a méréseink nagyfokú szórást mutattak; ezért itt nem tudtunk ilyen „jól definiált” határvonalat adni. Több szerző (pl. Matveev, 2003; Matveev és Culick, 2003a) szerint az $x_r=5L/8$ rácspozíció a legkedvezőbb a cső második típusú gerjesztéséhez, ezért ebben a rácspozícióban végeztük a méréseink zömét (6.4.d ábra). Az $x_r=L/4$ rácspozícióhoz

képest jóval nagyobb a gerjesztéshez szükséges minimális hőteljesítmény és a kapott hang sem olyan jól definiált, mint az alsó rácshelyzetek esetén. Ez alatt azt értem, hogy a hang gyakran elhalkul, majd újra erősödik, néha eltűnik, néha meg sem szólal a cső. A vizsgálataink alapján kijelenthetjük, hogy a rendszer a második típusú gerjesztése esetén is úgy viselkedik, hogy van egy olyan közepes tartomány mind a hőteljesítményben, mind a légáram intenzitásában, ahol leginkább számíthatunk arra, hogy instabillá válik a rendszerünk; tehát sem túl alacsony, sem túl magas fűtőtéljesítmény esetén sem szólal meg a cső és ugyanez igaz a légáram intenzitással kapcsolatban is (Beke, 2010a). Azt már a gázlánggal fűtött Rijke cső esetén is láttuk, hogy a rendszernek ez a második típusú gerjesztése sokkal nehezebb és sokkal több „véletlenszerűséget” mutat, mint a rendszer első típusú gerjesztése.

Miután meghatároztuk a rendszerünk gerjeszthetőségének „határvonalait” a következő vizsgálataink során arra kerestünk választ, hogy az instabil rendszer milyen hangot bocsát ki. A 6.5.a ábrán azt láthatjuk, hogy az $x_r=L/4$ rácspozíció esetén különböző – de egy-egy méréssorozatban állandó – értékű légáram intenzitás mellett a rácsra adott hőteljesítmény hatására mekkora frekvenciájú alapharmonikus hangrezgések alakultak ki a Rijke csőben. Az alapharmonikus mellett megjelentek a magasabb harmonikus rezgések is. Ennek oka az, hogy a rácson a hőleadás nem egyenletesen történik, mivel a rácson keresztül áramló légáram sem egyenletes. Mivel e rácspozíció esetén volt a legkönnyebben gerjeszthető a rendszerünk, nem csoda, hogy itt mértük a legnagyobb hangintenzitást is: 119 dB értéket (6.5.b ábra).



6.5. ábra A cső által kibocsátott hang alapharmonikusának jellemzői $x_r=L/4$ és $m_i=1,5$ g/s esetén: (a) frekvencia; (b) hangintenzitás szint.

Azoknál a kísérleteknél, amikor a rácst fűtő teljesítményt csökkentettük az előzőekhez hasonló grafikont kaptunk, ám kicsit kisebb hangintenzitás értékek adódtak, mint a teljesítmény növelésekor. Ennek oka a következő lehet: amikor növeljük a hőteljesítményt, akkor az előző pillanatban még kisebb volt a teljesítmény, mint a mostani pillanatban, ezért a rács hőmérséklete növekszik (egy bizonyos határig); a rács körüli környezet hőmérséklete szintén növekszik, de csak egy kis késedelemmel, és nem is olyan mértékben, mint a drótháló hőmérséklete; azaz a rács és a környezet közötti hőmérséklet különbség növekszik (egy darabig). Az ellenkező irányú vizsgálatainknál, azaz a hőteljesítmény csökkentésekor a helyzet pont fordított: a rács és a környezete közötti hőmérséklet különbség folyamatosan csökken, hiszen a rácsra egyre kisebb fűtőtéljesítményt adunk, azaz a rács hőmérséklete csökken. Igaz, hogy a cső hőmérséklete is

csökken, de itt is van egy kis időkéselem és ráadásul a cső nagyobb hőkapacitása miatt nyilvánvalóan a hőmérséklete nem olyan ütemben csökken, mint a drótháló hőmérséklete. Azt már a korábbi gázlánggal melegített Rijke csöves kísérleteinknél láttuk, hogy a kibocsátott hang intenzitása függ a rács és a cső hőmérsékletének különbségétől, ezért nem meglepő, hogy a hőteljesítmény növelése mellett nagyobb intenzitású hangot bocsát ki a Rijke cső, mint a hőteljesítmény csökkentésekor, egyébként azonos többi paraméter mellett. Ezt természetesen úgy kell érteni, hogy ha mindkét esetben instabil a rendszer; hiszen ha éppen egy olyan átmeneti tartományban vizsgálódunk, ahol csak egyik irányban gerjesztődik a rendszer, akkor az egész fenti gondolatmenet érvénytelen. A hőteljesítmény növelésével a rács hőmérséklete is növekedett egy határig. A csőben a hangsebesség is növekedett:

$$v_h(T_g) = \sqrt{(\gamma - 1) \cdot c_p \cdot T_g}, \quad (6.1)$$

ahol T_g a csőben lévő gáz abszolút hőmérséklete. Valójában a gáz hőmérséklete az eltelt idő és a hely függvényében is változik, azaz $T_g(x,t)$ -t kellene írni a képletbe, de az egyszerűség kedvéért úgy vettük, hogy a csőben a gáz hőmérséklete az akusztikus ciklus alatt nem változik meg. Természetesen, ha növelem a fűtőteljesítményt, akkor a csőben lévő gáz hőmérséklete is növekszik egy határig, ennek figyelembe vételével számítottuk a hangsebességet.

A kialakuló akusztikus hullám hullámhossza viszont nem (vagy csak kis mértékben) változik, így a cső által kibocsátott hang frekvenciája is növekszik:

$$f(T_g) = \frac{v_h(T_g)}{\lambda}. \quad (6.2)$$

A hőteljesítmény csökkentésekor csökken a drótháló hőmérséklete, csökken a csőben a hangsebesség és ezért a kibocsátott hang frekvenciája is csökken. Az alapharmonikus hang mellett megszólaló felharmonikusok frekvenciája közelítőleg egész számú többszöröse az alapharmonikus frekvenciájának. A hőteljesítmény növelése, illetve csökkentése mellett végzett kísérleteink során a kapott frekvenciák nem estek pontosan egybe: tehát nem csak a hang intenzitására, de a frekvenciájára is hatással van, hogy milyen a hőteljesítmény változásának előjele (Beke, 2011a).

A kísérleti eredmények összefoglalása

Az elektromosan fűtött Rijke csövet vízszintesen helyeztük el, a csőben egy porszívó segítségével biztosítottuk a levegő áramlását. A cső „alsó” végétől indulva lépésenként toltuk előre a rácsot tartó kerámia betétet a cső „felső” fele irányába és az egyes rácspozícióknál változtattuk a légáram intenzitást, illetve ettől függetlenül a hőteljesítményt. Először a cső 1. típusú gerjesztését vizsgáltuk az irányításom alatt, ekkor a rács a cső alsó felében volt. Legkönnyebben az $x_r=L/4$ rácspozíciónál lehet gerjesztetni a Rijke csövet. Megfigyeltük, hogy a rendszer néha különbözőképpen viselkedik akkor, ha növeljük, illetve ha csökkentjük a fűtőteljesítményt vagy a légáram intenzitást. Ha a cső hangot bocsátott ki, akkor mértük a hang intenzitását, illetve vizsgáltuk a kibocsátott hang frekvencia spektrumát is. Ha a rács a cső felénél – illetve ahhoz nagyon közel – volt, akkor a rendszert nem tudtuk instabil állapotba hozni. A cső 2/3 része közelében van egy olyan viszonylag szűk rácspozíció tartomány, ahol a Rijke cső szintén hangot bocsát ki, ezt nevezzük a rendszer 2. típusú gerjesztésének; ez sokkal kaotikusabb, mint az 1. típusú gerjesztés. A ráccsal a cső 3/4 részét elhagyva a rendszer mindvégig stabil állapotban maradt, tehát itt már semmilyen hőteljesítmény és légáram intenzitás értékek kombinációjával sem tudtuk instabillá tenni a rendszerünket (Beke, 2010a).

6.4. A Rijke cső egyszerűsített modellje

Ebben a részfejezetben kidolgozok egy viszonylag egyszerű matematikai modellt, amely a Rijke csőben lezajló folyamatokat jellemzi. A modell megalkotásának „fázisait” a termoakusztikus projektben résztvevő diákoknak is bemutattam. Először áttekintettük a tanulókkal a modellezés folyamatának általános alaplépéseit, mivel eddig a többségük még nem készített „tudományos” modellt.

A modell valamely bonyolult valóságos rendszer egyszerűsített mása, melyben az eredeti rendszer fontos tulajdonságai megmaradnak: *„a modell olyan gondolati struktúra, amellyel a természeti jelenségek egy jól körülhatárolt csoportját a tapasztalat segítségével úgy írjuk le, sokszor matematikailag, hogy minden a vizsgált probléma szempontjából lényegtelen hatást elhanyagolunk”* (Radnóti és mtsai, 2002).

A modell segít abban, hogy jellemezzük a valós rendszer egy részét, kiemeljük annak bizonyos elemeit, a valós rendszerben lezajló jelenségeket leegyszerűsítsük. A modellben a vizsgált jelenségekkel kapcsolatos ismereteinket adjuk meg valamilyen formában; a modell megalkotásának folyamatát nevezzük modellezésnek. Egy tudományos modellben általában az a célunk, hogy a modell a lehető legpontosabban tükrözze vissza az eredeti jelenséget, amely az alapjául szolgált. A modell megalkotásakor ezért elengedhetetlen, hogy a modellünket kísérleti adatokkal is összehasonlítsuk. Ez alapján tudunk dönteni arról, hogy milyen jó a modell a vizsgálat szempontjából. *„A modellek finomításával, amely a matematika egyre erősebb bevonását is jelenti a legtöbb esetben, a természetleírás egyre pontosabb lesz. A kvantitatív magyarázat azonban egyúttal "jóslási" lehetőséget is ad. Ez azt jelenti, hogy a jelenséget nemcsak hogy megmagyarázzuk, hanem adott fizikai helyzetben az eredményt előre ki is tudjuk számítani”* (Radnóti és mtsai, 2002). Szabó Gábor professzor úr a Mindentudás Egyeteme előadás-sorozatban így fogalmazott: *„a modellalkotásban az igazi művészet az, hogy el tudjuk választani a lényegest a lényegtelenről, és hogy a dolgok felszínén nyilvánvalóan megjelenő észlelések mögött meglássuk a valódi okokat. A modellnek ugyanis egyrészt a lehető legegyszerűbbnek kell lennie, mert különben kezelhetetlenné válik, másrészt ha valamilyen lényeges tényezőt elhanyagolunk vagy lényegtelennek fontosnak vélünk, akkor hibás eredményre jutunk.”*

A modellek segítségével általában új, vagy részletesebb ismereteket szerezhethetünk egy jelenséggel kapcsolatban, előrejelzéseket tehetünk bizonyos folyamatok lezajlását illetően, szabályozhatjuk a rendszerünket, illetve korábbi feltevéseinket igazolhatjuk, vagy megcáfolhatjuk.

A modellek főbb típusai:

- funkcionális, koncepcionális modellek;
- fizikai modellek, melyeket hasonlósági törvények és analógiák alapján készítünk;
- matematikai modellek, melyekben a rendszer objektumai közötti kapcsolatokat matematikai formalizmussal adjuk meg (pl. differenciál-, integrálegyenletek, logikai függvények, stb.). A tudományos kutatások és a mérnöki gyakorlat számára a matematikai modellek használata nélkülözhetetlen.

A modellek megalkotásakor a következő elveket kell figyelembe vennünk:

- Szeparáció: a modellezendő rendszert valamilyen szinten el kell különítenünk a környezetétől; meg kell határoznunk, hogy mi tartozik a rendszerhez, és mi tartozik a környezethez.
- Szelekció: a rendszer és környezete között, illetve a rendszeren belül is számos kölcsönhatás léphet fel. Ezek közül ki kell választanunk azokat, amelyek számunkra fontosak lehetnek a modell felállításakor.
- Gazdaságosság: a való világ objektumainak viselkedése nagyon bonyolult lehet, ezért a modellezés során egyszerűsítésekkel élünk, hogy maga a modell (matematikailag) kezelhető legyen.

A modellezés során az ismereteinket két csoportra oszthatjuk:

- a priori ismeretek: a vizsgálatok megkezdése előtti ismeretek összessége;
- a posteriori ismeretek: a modellezési eljárás utáni ismeretek összessége. (Az a posteriori és az a priori ismeretek „különbségét” nyertük a modellezés során.)

A modellezés a célok meghatározásával kezdődik, ezek után a modell típusának és a kívánt „pontosságának” megadása következik. Az a priori ismeretek összegyűjtését a törvények felírása és a paraméterek megadása követi. Ha a modell szolgáltat valamilyen „eredményt”, akkor a kapott eredményeket összehasonlítjuk az eredeti jelenség megfigyelt értékeivel. Ezek alapján megállapítható, hogy mennyire „jó” a megadott modell. Ha elégedetlenek vagyunk a modell pontosságával, akkor további megfigyelésekkel, kísérletekkel még több információt „szerzünk” a rendszerről és ezek alapján a modellünk jellemzőit, paramétereit finomítjuk. Ha ez nem javít a modell pontosságán, akkor vagy elfogadjuk, hogy az adott modell csak a kapott pontossággal képes leírni a rendszerünket, vagy a modellünket át kell dolgozni. Ez azt jelenti, hogy újabb és újabb kapcsolatokat próbálunk felírni az objektumok között, majd „előlről” kezdjük a modell „tesztelését”. Láthatjuk, hogy a modellezés összetett folyamat, melyben bizonyos lépések ismétlődnek annak érdekében, hogy a „végső” modellünk a lehető legpontosabban írja le a kiindulási rendszert a vizsgált jelenségek szempontjából.

A Rijke csőben lejátszódó folyamatok modellezésekor az elsődleges célom az, hogy a fő rendszerparaméterek függvényében meg tudjam mondani, hogy a termoakusztikus rendszer stabil vagy instabil állapotban van-e. A modell elkészítése után összehasonlítom az elméletileg kapott eredményeket a kísérleti adatokkal, hogy megmutassam a modell milyen pontossággal írja le a valódi fizikai rendszert. A kiindulási modellben az alábbi egyszerűsítésekkel élek (Beke, 2010a):

- A csőben áramló levegő intenzitását állandó értékűnek tekintem. A csőben a légáramot egydimenziósnak veszem, csak lamináris áramlással számolok.
- A csőben a rácsnál van egy hőmérséklet-ugrás, a cső hőmérsékletét egyébként állandó értékűnek tekintem.
- A rács által kisugárzott hővel nem számolok, a cső által a ráctól elvezetett hőt elhanyagolom, a levegő közvetlen hőelnyelését is elhanyagolom; csak a rács és a környező levegő közötti hőkonvekciót veszem figyelembe.

- Feltételezem, hogy a csőben csak lineáris folyamatok zajlódhatnak le.
- A csőben lévő levegő szinuszos rezgéseket végez, az ettől való eltérések kicsik, ezért azokat elhanyagolom.
- A gravitáció hatásával nem számolok.
- A csőben áramló levegő (átlagos) sebessége kicsi a hangsebességhez képest, azaz kicsi a rendszert jellemző Mach szám.¹⁰

6.4.1. A rendszer elemzése

A rendszerben ébredő zavarokat kis értékűnek feltételezve a csőben lévő gáz nyomásának fluktuációjára (p') felírhatjuk az egydimenziós hullám egyenletet:

$$\frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} \approx v_h^2 \frac{\partial^2 p'}{\partial x^2}, \quad (6.3)$$

ahol v_h a hangsebességet jelenti. A cső mindkét vége nyitott, ezért a nyomás fluktuációjának zéró az értéke a cső végeinél (Beke, 2010a):

$$p'(0, t) = p'(L, t) = 0, \quad (6.4)$$

pontosabban nem a cső végénél, hanem attól egy kis távolságra; ezt egy korrekciós taggal (l_e) vehetjük figyelembe. E szerint a csővön kívül, az „alsó” csővégtől balra, illetve a „felső” csővégtől jobbra l_e távolságra lesz a nyomás fluktuációja nulla értékű:

$$p'(-l_e, t) = p'(L + l_e, t) = 0. \quad (6.5)$$

Az l_e korrekciós tag értéke közelítőleg egyenlő $0,61R_c$, ahol R_c a cső sugarát jelenti (Levine és Schwinger, 1948). A hullámegyenlet megoldásai a cső sajátrezgései. Az akusztikus nyomás perturbációja az n -ik akusztikus mód esetén:

$$p'_n = \dot{p}'_n e^{i\omega_n t} \sin(k_n x), \quad (6.6)$$

ahol $\dot{p}'_n$ a perturbációs akusztikus nyomás amplitúdója az n -ik mód esetén. A nyomás perturbációja (Beke, 2010a):

$$p' = \sum p'_n = \sum \dot{p}'_n e^{i\omega_n t} \sin(k_n x). \quad (6.7)$$

Az akusztikus sebességre (u') is felírhatjuk az egyszerűsített hullámegyenletet (Entezam és mtsai, 2002):

$$\frac{\partial^2 u'}{\partial t^2} \approx v_h^2 \frac{\partial^2 u'}{\partial x^2}. \quad (6.8)$$

Az akusztikus sebesség perturbációja az n -ik mód esetén (Matveev, 2003):

$$u'_n = \dot{u}'_n e^{i(\omega_n t + \pi/2)} \cos(k_n x) = \frac{\dot{p}'_n}{\rho_0 v_h} e^{i(\omega_n t + \pi/2)} \cos(k_n x), \quad (6.9)$$

ahol $\dot{u}'_n$ a perturbációs akusztikus sebesség amplitúdója az n -ik mód esetén.

Az akusztikus sebesség:

¹⁰ A csőben áramló gáz sebessége és a közeg rugalmassága által megszabott hangsebesség hányadosát Mach számnak (M_a) nevezzük, E. Mach osztrák fizikus nevééről. Ha ez a szám jóval kisebb egynél, akkor a csőben a légáramlást szubszonikusnak nevezzük; ennek azért van jelentősége, mert kis M_a értékek mellett sokkal egyszerűbbek a gáz áramlását leíró törvényszerűségek.

$$u' = \sum u'_n = \sum \frac{\dot{P}'_n}{\rho_0 v_h} e^{i(\omega_n t + \pi/2)} \cos(k_n x). \quad (6.10)$$

Az n -ik módban a körfrekvencia (ω_n) az alapharmonikus körfrekvenciájának n -szerese (Beke, 2010a):

$$\omega_n = \omega \cdot n = \frac{\pi \cdot v_h}{L} n, \quad (6.11)$$

és k_n a (kör)hullámszám:

$$k_n = \frac{\omega_n}{v_h} = \frac{\pi}{L} n. \quad (6.12)$$

A modellben azt feltételeztem, hogy a hőmérséklet állandó a csőben, kivéve a rács környezetében. Ha ezt az egyszerűsítést továbbra is feltesszük, de figyelembe vesszük, hogy a nyomás fluktuációjában a hőközlés is szerepet játszik, kapjuk a következő hullámegyenletet:

$$\frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} + \zeta \frac{\partial p'}{\partial t} - (\gamma - 1) \frac{\partial q}{\partial t} = v_h^2 \frac{\partial^2 p'}{\partial x^2}, \quad (6.13)$$

ahol ζ az általános csillapítás, ami a cső falánál lévő határreteg és a cső végeinél a hangsugárzás miatt lép fel (ζ mértékegysége 1/s) (Culick, 1976). A q mennyiség a rendszerbe jutó hőteljesítmény sűrűség (mértékegysége W/m³). Az akusztikus sebesség fluktuációjára vonatkozó hullámegyenlet (Entezam és mtsai, 2002):

$$\frac{\partial^2 u'}{\partial t^2} = v_h^2 \frac{\partial^2 u'}{\partial x^2} + \frac{1 - \gamma}{\rho_0} \frac{\partial q'}{\partial x}, \quad (6.14)$$

ahol q' mennyiség a rendszerbe jutó hőteljesítmény sűrűség fluktuációja:

$$q' = \frac{\partial^2 Q'}{\partial V \partial t} = \frac{\partial \dot{Q}'}{\partial V}, \quad (6.15)$$

a q' -t szokták az egységnyi térfogatra számított hőintenzitás fluktuációjának is nevezni; az egyszerűség kedvéért néha ezt röviden csak hőátadás fluktuációjának nevezem.

Ha a rendszer energetikailag stabil állapotban van, akkor a rendszerbe beáramló és az onnan távozó energia előjeles összege zérus (Beke, 2010a). A rendszerbe 1 termoakusztikai ciklus (azaz T idő) alatt beáramló energiát Culick (1976) szerint a következőképpen számíthatjuk ki:

$$\Delta E_{be} = \frac{\gamma - 1}{\gamma \cdot p_0} T \cdot I = \frac{\gamma - 1}{\gamma \cdot p_0} \cdot \int_V dV \int_t^{t+T} p' q' dt, \quad (6.16)$$

ahol T az akusztikus ciklus periódusideje, I a Rayleigh integrál, V a termikus rendszer (a Rijke cső) térfogata, p_0 az átlagos nyomás a csőben, γ pedig a gáz konstans. Láthatjuk, hogy ez az egyenlet magában foglalja a Rayleigh feltételt is. A Rijke cső keresztmetszete állandónak tekinthető, ha elhanyagoljuk a rácsot tartó kerámia tubus által okozott szűkületet. Így az egy ciklus alatt beáramló energiára kapjuk a következő kifejezést:

$$\Delta E_{be} = \frac{\gamma - 1}{\gamma p_0} S \int_{-l_e}^{L+l_e} dx \int_0^T p' q' dt, \quad (6.17)$$

ahol S a cső belső keresztmetszete.

6.4.2. A rácshoz tartozó feltételek

A rendszerünkben az instabil állapot kialakulása a felfűtött rácstól származik, ezért alapvető fontosságú a rács és közvetlen környezetének alapos vizsgálata. Először vizsgáljuk meg azt az egyszerű esetet, amikor egy forró izotermikus test hőt ad át a mellette, vagy rajta keresztül (lyukacsos test esetén) áramló levegőnek, amely átlagos és akusztikus sebességkomponenssel rendelkezik. Ha a test jellemző geometriai mérete sokkal kisebb, mint a kialakuló akusztikus hullám hullámhossza és a Mach szám értéke is kicsi, akkor az áramlást úgy tekinthetjük, hogy nem nyomható össze (Stuart, 1966). Egyenletes áramlásban a konvekciós hőátadás arányára felírhatjuk:

$$q_0 = k' \sqrt{u_0}, \quad (6.18)$$

ahol a k' arányossági tényező a forró test és az áramló levegő közötti hőmérséklet-különbségtől függ. A hőátadás aránya nem függ a sebesség irányától. Torczynski és O'Hern (1995) alapján a hőátadás aránya kvázi-stacionárius esetben:

$$q^{ks} = k' \sqrt{|u|}, \quad (6.19)$$

és

$$q^{ks}(t) = q_0^{ks} + q^{ks}(t), \quad (6.20)$$

illetve

$$u(t) = u_0 + u'(t). \quad (6.21)$$

A Rijke csőben a hőátadás a rács és a rajta keresztüláramló levegő között sokkal jelentősebb, mint a cső fala és az áramló levegő közötti hőtranszfer, ezért a csőfal és az áramló levegő közti hőcsere viszonylatában „elegendő” a kvázi-stacionárius leírás. A rács vastagsága (kb. 0,45 mm) elhanyagolható a cső hosszához képest, ezért a dróthálót a matematikai modellünkben úgy vesszük figyelembe, hogy az akusztikai mennyiségeknek ezen a helyen ugrása van. A nyomás perturbációjának megváltozása közvetlenül a rács előtt és után arányos a Z_r rács impedanciával (Matveev, 2003):

$$p'_{r-} - p'_{r+} = Z_r u'_{r0}, \quad (6.22)$$

ahol az u'_{r0} a rácson keresztüláramló átlagos akusztikus sebesség, p'_{r-} a rács előtti, p'_{r+} a rács utáni nyomás fluktuációja. A Z_r rács impedancia értéke Dickey és mtsai (2000) szerint olyan kicsi, hogy gyakorlatilag nem különbözik a nyomás perturbációja a rács két oldalán. Ha a nyomás perturbációjának néhány tized %-os megváltozását figyelmen kívül hagyjuk, írhatjuk:

$$p'_{r+} \cong p'_{r-}. \quad (6.23)$$

Az akusztikus sebesség fluktuációját viszont nem hanyagoljuk el a rács két oldalán, a rácsot érő hőteljesítmény miatt. Ha egy pillanatra azt feltételezzük, hogy csak a hőmérséklet változik, akkor a közölt hő (kicsiny változását) felírhatjuk a következő alakban:

$$dQ = c_p \cdot m \cdot dT = c_p \cdot \rho \cdot V \cdot dT = c_p \cdot \rho \cdot S \cdot u \cdot t \cdot dT. \quad (6.24)$$

Ennek idő szerinti deriváltja:

$$\frac{dQ}{dt} = \dot{Q} = c_p \cdot \rho \cdot S \cdot u \cdot dT, \quad (6.25)$$

azaz

$$\frac{\dot{Q}}{S} = c_p \rho \cdot u \cdot dT. \quad (6.26)$$

Ha feltételezzük, hogy az egyenlet jobb oldalán nem csak a hőmérséklet változhat:

$$\frac{\dot{Q}}{S} = d(c_p \rho \cdot u \cdot T) \quad (6.27)$$

A levegőbeli hővezetés nem jelentős (Merk, 1957), így a rács környezetének energia-változására felírhatjuk:

$$\frac{\dot{Q}}{S} = (c_p \rho \cdot u \cdot T)_{r+} - (c_p \rho \cdot u \cdot T)_{r-}. \quad (6.28)$$

Az ideális gáz sűrűsége kifejezhető az állapotegyenletből:

$$\rho = \frac{M}{R} \frac{p}{T}, \quad (6.29)$$

ahol M a gáz moláris tömege (levegő esetén $M=0,029$ kg/mol), R pedig az egyetemes gázállandó ($R=8,314$ J*K⁻¹*mol⁻¹). A (6.28) egyenletet a (6.29) alapján átírhatjuk a következő formába:

$$\frac{\dot{Q}}{S} = \frac{M}{R} \left(c_p \frac{p}{T} \cdot u \cdot T \right)_{r+} - \frac{M}{R} \left(c_p \frac{p}{T} \cdot u \cdot T \right)_{r-}, \quad (6.30)$$

átrendezve kapjuk:

$$\frac{R}{M} \frac{\dot{Q}}{S} = (c_p p \cdot u)_{r+} - (c_p p \cdot u)_{r-}. \quad (6.31)$$

A Robert Mayer egyenlet szerint:

$$\frac{R}{M} = c_p - c_v. \quad (6.32)$$

Ezt beírtam a (6.31) egyenletbe:

$$(c_p - c_v) \frac{\dot{Q}}{S} = (c_p p \cdot u)_{r+} - (c_p p \cdot u)_{r-}. \quad (6.33)$$

Az (5.7) egyenlet szerint a változókat úgy tekintem, mint egy átlagos és egy oszcilláló érték összegét. Mivel $p=p'+p_0$ és $u=u'+u_0$ ezért írhatjuk:

$$(c_p - c_v) \frac{\dot{Q}}{S} = (c_p (p'+p_0)(u'+u_0))_{r+} - (c_p (p'+p_0) \cdot (u'+u_0))_{r-}, \quad (6.34)$$

ahol a „0” alsó indexek az átlagértéket jelölik. Részletesebben kifejtve:

$$\begin{aligned} (c_{p_{r-}} - c_{v_{r-}}) \frac{\dot{Q}}{S} &\cong (c_p - c_v) \frac{\dot{Q}}{S} = \\ &= (c_{p_{r+}} p'_{r+} u_{0r+} + c_{p_{r+}} p_{0r+} u'_{r+}) - (c_{p_{r-}} p'_{r-} u_{0r-} + c_{p_{r-}} p_{0r-} u'_{r-}) + \\ &+ (c_{p_{r+}} p'_{r+} u'_{r+} - c_{p_{r-}} p'_{r-} u'_{r-}) + (c_{p_{r+}} p_{0r+} u_{0r+} - c_{p_{r-}} p_{0r-} u_{0r-}) \end{aligned} \quad (6.35)$$

Mivel a nyomás és a sebesség fluktuációja kicsi, ezért az egyenlet jobb oldalán azok a tagok elhanyagolhatók, amelyekben mindkettő szorzatának különbsége szerepel. A hőteljesítményt is felírhatom egy átlagos és a fluktuáló komponens összegeként:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_0 + \dot{Q}', \quad (6.36)$$

azaz

$$\left(c_{p_{r-}} - c_{v_{r-}}\right) \frac{\dot{Q}'}{S} = \left(c_{p_{r-}} - c_{v_{r-}}\right) \left(\frac{\dot{Q}}{S} - \frac{\dot{Q}_0}{S}\right), \quad (6.37)$$

és a hőtéljesítmény átlagos részéhez írhatjuk:

$$\left(c_p - c_v\right) \frac{\dot{Q}_0}{S} = c_{p_{r+}} p_{0_{r+}} u_{0_{r+}} - c_{p_{r-}} p_{0_{r-}} u_{0_{r-}}. \quad (6.38)$$

A (6.35), a (6.37) és a (6.38) egyenletekből az egyszerűsítések után kaptam:

$$\left(c_{p_{r-}} - c_{v_{r-}}\right) \frac{\dot{Q}'}{S} = \left(c_{p_{r+}} p'_{r+} u_{0_{r+}} + c_{p_{r+}} p_{0_{r+}} u'_{r+}\right) - \left(c_{p_{r-}} p'_{r-} u_{0_{r-}} + c_{p_{r-}} p_{0_{r-}} u'_{r-}\right) \quad (6.39)$$

Osszuk el a (6.39) egyenletet a (6.38) egyenlettel:

$$\frac{\left(c_{p_{r-}} - c_{v_{r-}}\right) \frac{\dot{Q}'}{S}}{\left(c_{p_{r-}} - c_{v_{r-}}\right) \frac{\dot{Q}_0}{S}} = \frac{\left(c_{p_{r+}} p'_{r+} u_{0_{r+}} + c_{p_{r+}} p_{0_{r+}} u'_{r+}\right) - \left(c_{p_{r-}} p'_{r-} u_{0_{r-}} + c_{p_{r-}} p_{0_{r-}} u'_{r-}\right)}{c_{p_{r+}} p_{0_{r+}} u_{0_{r+}} - c_{p_{r-}} p_{0_{r-}} u_{0_{r-}}}, \quad (6.40)$$

azaz

$$\frac{\dot{Q}'}{\dot{Q}_0} = \frac{\left(c_{p_{r+}} p'_{r+} u_{0_{r+}} + c_{p_{r+}} p_{0_{r+}} u'_{r+}\right) - \left(c_{p_{r-}} p'_{r-} u_{0_{r-}} + c_{p_{r-}} p_{0_{r-}} u'_{r-}\right)}{c_{p_{r+}} p_{0_{r+}} u_{0_{r+}} - c_{p_{r-}} p_{0_{r-}} u_{0_{r-}}}. \quad (6.41)$$

Kihasználom, hogy a nyomás perturbációja majdnem egyenlő a rács két oldalán, illetve az átlagos nyomás is közelítőleg megegyezik a két oldalon. A könnyebb olvashatóság miatt az „r” jelölést elhagyom az alsó indexekből:

$$\frac{\dot{Q}'}{\dot{Q}_0} \cong \frac{p' c_{p+} u_{0+} - c_{p-} u_{0-}}{p_0 c_{p+} u_{0+} - c_{p-} u_{0-}} + \frac{c_{p+} p_{0+} u'_{+} - c_{p-} p_{0-} u'_{-}}{c_{p+} p_{0+} u_{0+} - c_{p-} p_{0-} u_{0-}}, \quad (6.42)$$

átrendezés után kapom:

$$\frac{\dot{Q}'}{\dot{Q}_0} - \frac{p'}{p_0} \cong \frac{c_{p+} p_{0+} u'_{+} - c_{p-} p_{0-} u'_{-}}{c_{p+} p_{0+} u_{0+} - c_{p-} p_{0-} u_{0-}}. \quad (6.43)$$

Ha ide behelyettesítem a (6.29) egyenletet:

$$\frac{\dot{Q}'}{\dot{Q}_0} - \frac{p'}{p_0} = \frac{c_{p+} \rho_{0+} \frac{R}{M} T_{+} u'_{+} - c_{p-} \rho_{0-} \frac{R}{M} T_{-} u'_{-}}{c_{p+} \rho_{0+} \frac{R}{M} T_{+} u_{0+} - c_{p-} \rho_{0-} \frac{R}{M} T_{-} u_{0-}}, \quad (6.44)$$

azaz

$$\frac{\dot{Q}'}{\dot{Q}_0} - \frac{p'}{p_0} = \frac{c_{p+} \rho_{0+} T_{+} u'_{+} - c_{p-} \rho_{0-} T_{-} u'_{-}}{c_{p+} \rho_{0+} T_{+} u_{0+} - c_{p-} \rho_{0-} T_{-} u_{0-}}. \quad (6.45)$$

Ezt átírtam a következő alakra:

$$\frac{\dot{Q}'}{\dot{Q}_0} - \frac{p'}{p_0} = \frac{c_{p+} T_{+} u'_{+} - c_{p-} \frac{\rho_{0-}}{\rho_{0+}} T_{-} u'_{-}}{c_{p+} T_{+} u_{0+} - c_{p-} \frac{\rho_{0-}}{\rho_{0+}} T_{-} u_{0-}}. \quad (6.46)$$

Mivel $\rho_{0-} \cong \rho_{0+}$, és $u_{0-} \approx u_{0+}$, illetve $p' \cong p'_{-} \cong p'_{+}$, ezért írhatjuk:

$$\frac{\dot{Q}'}{\dot{Q}_0} - \frac{p'_{-}}{p_0} \cong \frac{c_{p+}T_{+}u'_{+}}{u_{0+}(c_{p+}T_{+} - c_{p-}T_{-})} - \frac{c_{p-}T_{-}u'_{-}}{u_{0-}(c_{p+}T_{+} - c_{p-}T_{-})}, \quad (6.47)$$

átrendezve kaptam:

$$\frac{\dot{Q}'}{\dot{Q}_0} - \frac{p'_{-}}{p_0} = \left(\frac{c_{p+}T_{+}}{c_{p-}T_{-}} \frac{u'_{+}}{u_{0+}} - \frac{u'_{-}}{u_{0-}} \right) \frac{c_{p-}T_{-}}{c_{p+}T_{+} - c_{p-}T_{-}}, \quad (6.48)$$

tovább rendezve kaptam:

$$\left(\frac{c_{p+}T_{+} - c_{p-}T_{-}}{c_{p-}T_{-}} \right) \left(\frac{\dot{Q}'}{\dot{Q}_0} - \frac{p'_{-}}{p_0} \right) = \frac{c_{p+}T_{+}}{c_{p-}T_{-}} \frac{u'_{+}}{u_{0+}} - \frac{u'_{-}}{u_{0-}}. \quad (6.49)$$

Merk (1957) bevezetett egy a frekvenciától függő komplex átviteli függvényt, amely a hőforrás viselkedését írja le a sebesség és a nyomás fluktuációjának függvényében. Alacsony Mach számok esetén (a mi rendszerünk ilyen) viszont a nem egyenletes hőtranszfer nincs jelentős hatással a nyomás perturbációjára, ezért ezt a kicsiny hatást elhanyagolhatjuk és a hőátadás arányát az átviteli (transzfer) függvény (Tr) segítségével a következőképpen írhatjuk (Matveev és Culick, 2003a):

$$\frac{\dot{Q}'}{\dot{Q}_0} = Tr \frac{u'_{-}}{u_{0-}}. \quad (6.50)$$

A nyomás fluktuációja a rács előtt (és utána is) nagyságrendekkel kisebb, mint a nyomás átlagértéke:

$$\frac{p'_{-}}{p_0} \ll 1. \quad (6.51)$$

A (6.49), a (6.50) és a (6.51) egyenletek alapján megadhatjuk a rácsnál a sebesség fluktuációját a transzfer függvény segítségével:

$$\left(\frac{c_{p+}T_{+} - c_{p-}T_{-}}{c_{p-}T_{-}} \right) Tr \frac{u'_{-}}{u_{0-}} = \frac{c_{p+}T_{+}}{c_{p-}T_{-}} \frac{u'_{+}}{u_{0+}} - \frac{u'_{-}}{u_{0-}}, \quad (6.52)$$

átrendezve

$$\frac{u'_{+}}{u_{0+}} = \frac{c_{p-}T_{-}}{c_{p+}T_{+}} \left[1 + \left(\frac{c_{p+}T_{+} - c_{p-}T_{-}}{c_{p-}T_{-}} \right) Tr \right] \frac{u'_{-}}{u_{0-}}, \quad (6.53)$$

és $u_{0-} \approx u_{0+}$, illetve a rács két oldalának hőmérséklete majdnem megegyezik, ezért ezzel egyszerűsíthetünk:

$$u'_{+} \cong \frac{c_{p-}}{c_{p+}} \left[1 + \left(\frac{c_{p+}T_{+} - c_{p-}T_{-}}{c_{p-}T_{-}} \right) Tr \right] u'_{-}. \quad (6.54)$$

A (6.50) egyenlet szerint a hőátadás aránya fluktuációjának az n -ik akusztikus módban megfeleltethetünk egy Tr_n transzfer függvényt Merk (1957) alapján:

$$\frac{q_n'(t)}{q_0} = Tr_n \frac{u_{n-}'(t)}{u_0}, \quad (6.55)$$

ahol q_0 jelenti a hőátadás arányának átlagértékét, u_0 jelenti a sebesség átlagértékét, u' a sebesség fluktuációja közvetlenül a rács előtt. Feltételezésünk szerint a hőátadás a rácsnál történik, ezért írhatjuk:

$$q_n'(t) = q_0 Tr_n \frac{u_n'(t)}{u_0} \delta(x - x_r), \quad (6.56)$$

ahol δ a delta függvényt jelöli, ami kifejezi, hogy a hőátadás lokálisan csak az x_r pontnál zajlik le.

A csőben áramló levegő és a cső fala közötti hőkonvekció elhanyagolható a fűtött rács és a rácsra áramló levegő közötti konvekcióhoz képest, ezért csak ezt veszem figyelembe. Vizsgáljuk meg a rács előtti sebesség fluktuációja és a nem egyenletes hőátadás közötti átviteli függvényt! Ez a függvény fontos szerepet játszik a rendszerben megjelenő instabilitás szempontjából. Az átviteli függvény (Tr_n) egy adott időpillanatban nagyon komplex lehet; több dologtól is függ: a rács helyzetétől, az áramlás jellemzőitől, a rendszer korábbi paramétereitől. Egy valós összetett termodinamikai rendszer esetén az átviteli függvényt nem lehet teljesen megadni, ezért szigorú értelemben véve tetszőleges pontossággal nem is oldható meg a feladat; közelítő megoldást azonban találhatunk. Kwon és Lee (1985) alapján egy forró izolált hengerre vonatkozóan „ki lehet számítani” a transzfer függvényt. A rács párhuzamos és merőleges drótdarabokból áll, melyeket vékony hengereknek tekinthetünk; Zukauskas (1987) megadta erre az esetre a közelítő transzfer függvényt, melyben egy ún. Θ akadály-faktort vehetjük figyelembe a rácsra áramló levegő sebességének megváltozását. Az akadály-faktor több paramétertől (pl. a rács áteresztő képessége, a rácsot alkotó drótdarabok átmérője, a rácsot tartó foglalat geometriája) is függ. Kwon és Lee (1985), illetve Zukauskas (1987) eredményeinek felhasználásával Matveev (2003) megadott egy eljárást, melynek segítségével „közelíthetjük” az átviteli függvényt. Az általam használt átviteli függvényt ezen eljárás alapján kaptam. (Léteznek olyan CFD analízis programok is, amelyek „közelítőleg” meg tudják határozni az átviteli függvényt, de ezek általában drága szoftverek, ezért én ilyen programot nem használtam.)

Az átviteli függvény (Tr_n) teljes megadása nem lehetséges, azaz nem létezik olyan függvénykapcsolat, amely a rendszer összes paraméterét figyelembe véve pontosan leírná a hőtranszferet. Meg kell elégednünk azzal, hogy bizonyos tartományban meghatározzuk az átviteli függvényt és a többi pontban a függvény extrapolált értékeivel számolunk.

Ha elfogadjuk, hogy a rendszer Galerkin-féle módjai jó közelítéssel egymástól függetlennek tekinthetők (Culick, 1976), akkor az átviteli függvényt is külön-külön vizsgálhatjuk a rendszer különböző módjai esetén. A hőtranszfer függvény komplex alakú:

$$Tr_n = |Tr_n| \cdot e^{-i\varphi_n}, \quad (6.57)$$

ahol $|Tr_n|$ az n -ik módhoz tartozó átviteli függvény nagyságát jelenti, ami rendszerint 0 és 1 közötti érték; a φ_n pedig a fázis-késés, amit a rendszerünk termikus tehetetlensége okoz. A fázis-késés nem haladja meg a teljes periódus negyedét, azaz $\varphi_n < \pi/2$.

Általános esetben a hőfluktuációs arány a sebesség fluktuációja mellett a nyomás fluktuációjától is függ, de ha a csőben az áramláshoz tartozó Mach szám kicsi és ha csak a hőkonvekcióval számolunk, akkor a nyomás fluktuációjától való függést első közelítésben elhanyagolhatjuk. A transzfer függvény meghatározásához (Kwon és Lee, 1985) bevezetjük az áramlási sebesség

redukált (normalizált) átlagértékének (u_{0n}^*) fogalmát. Az áramlási sebesség normalizált átlagértéke egy dimenzió nélküli mennyiség:

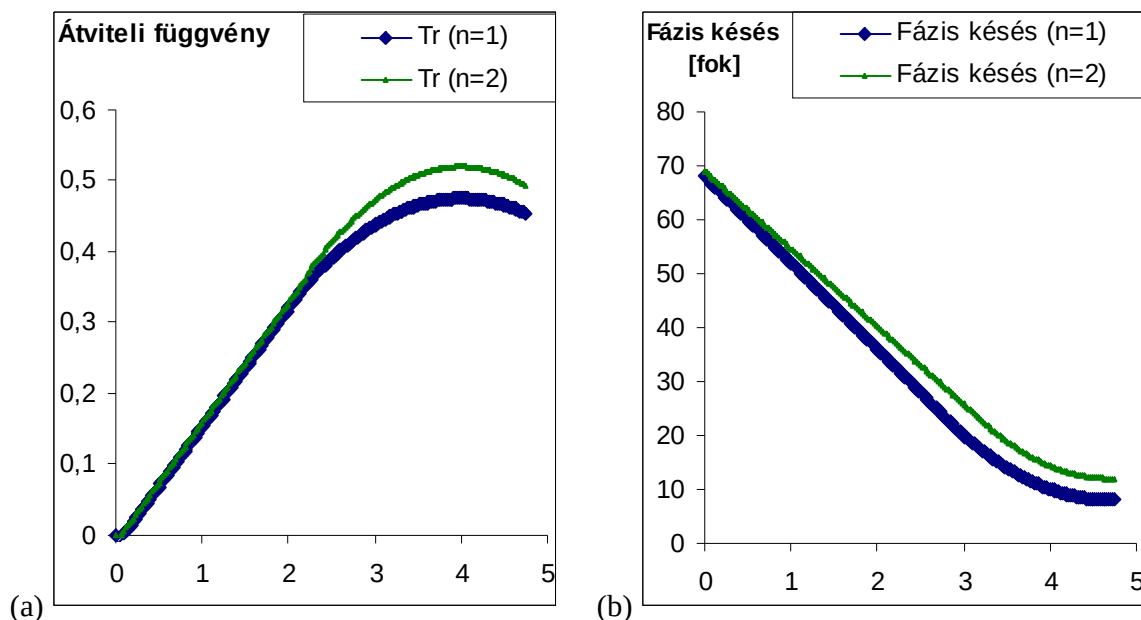
$$u_{0n}^* = \frac{u_{0n}}{\sqrt{\omega_n \chi}}, \quad (6.58)$$

ahol χ a termikus diffuzivitás. (A levegő diffuzivitása 300 K hőmérsékleten, 10^5 Pa nyomáson $\chi = 2,216 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$.) A normalizált sugár (r_n^*) szintén dimenzió nélküli mennyiség (Kwon és Lee, 1985):

$$r_n^* = r_{\text{drót}} \sqrt{\frac{\omega_n}{\chi}}, \quad (6.59)$$

ahol $r_{\text{drót}}$ a hálót alkotó drót sugara (kb. 0,225 mm).

Mivel a transzfer függvény függ a körfrekvenciától, ezért a cső rezgéseinek különböző harmonikusaihoz különböző transzfer függvények tartoznak. Ha nincs átlagos normalizált sebesség, akkor nincs energiaátalakulás sem, azaz ha egy kartonlappal vagy egy fémlappal letakarom a cső száját – és ezáltal megszűnik a légáramlás – akkor nem keletkezhet hang a Rijke csőben, mert nem „alakul át” a közölt hő hang-energiává. (Ha a csőben nincs átlagos gázáramlás (azaz $u_0 = 0 \text{ m/s}$), akkor a transzfer függvény értéke zéró.) A fáziseltolódás szintén u_0^* függvénye. Ha a légáram intenzitás értéke nullához tart, akkor az átviteli függvény nagysága is nullához tart; azaz kis légáram intenzitás értékek esetén a termikus energiának csak kis hányada „alakul át” akusztikus energiává. Hasonlóképpen kedvezőtlen az energiatranszfer magas légáram intenzitás értékek esetén is. Tehát sem túlzottan gyenge, sem túlzottan erős légáramlás esetén sem számíthatunk hang kialakulására. A közepes légáram intenzitás viszont kedvez annak, hogy a hő egy része akusztikus energiává alakuljon. A stabilitási görbe ezek alapján parabolászerű, amit a kísérleti adatok is igazolnak. Ha az átlagos redukált sebesség növekszik, akkor az átviteli függvény vele együtt monoton módon növekszik egy bizonyos pontig, ez a pont után viszont csökkenni kezd az értéke. Az átviteli függvény fázis-késedelmé viszont monoton módon csökken az átlagos normalizált sebesség növelése esetén egy darabig szinte egyenletesen (6.6. ábra) (Beke, 2010a).



6.6. ábra Az átviteli függvény: (a) átviteli függvény nagysága; (b) a fázis-késés a redukált átlagos sebesség függvényében.

6.4.3. A rendszer gerjeszthetőségének határa

Az akusztikus nyomás amplitúdójának közelítésére a következő egyenletet használhatjuk (Matveev, 2003):

$$i\xi_n \omega_n \dot{p}'_n e^{i\omega_n t} \frac{L}{2} = (\gamma - 1) \int_0^L \frac{\partial q_{\omega_n}}{\partial t} \sin(k_n x) dx, \quad (6.60)$$

ahol $\omega_n = \omega n$, és q_{ω_n} a nem egyenletes hőátadási arány, melynek körfrekvenciája ω_n ; és q_{ω_n} :

$$q_{\omega_n} = \frac{1}{S} \left(q_0 Tr_n \frac{u'_{\omega_n}}{u_0} + q_n e^{i\omega_n t} \right) \delta(x - x_r), \quad (6.61)$$

ahol $\delta(x)$ a delta függvény, S a cső keresztmetszete, x_r a rács helyzete. Az akusztikus sebesség a nyomás perturbációjától függ:

$$u' = \frac{i p'_x}{\rho_0 \omega}. \quad (6.62)$$

A (6.61) egyenletet átalakíthatjuk a következő alakra (Matveev, 2003 alapján):

$$q_{\omega_n} = \Theta_n \frac{\partial p'_{\omega_n}}{\partial x} \delta(x - x_r) + \frac{q_n}{S} e^{i\omega_n t} \delta(x - x_r), \quad (6.63)$$

és

$$\Theta_n = i \frac{q_0}{m_i \omega_n} Tr_n(\omega_n, \alpha_n), \quad (6.64)$$

ahol m_i a tömegáram intenzitás, α_n az n -ik harmonikus amplitúdójával kapcsolatos paraméter. A (6.63) egyenletet a (6.60) egyenletbe helyettesítve kapjuk (Matveev, 2003 alapján):

$$i\xi_n \omega_n \dot{p}'_n e^{i\omega_n t} \frac{L}{2} = (\gamma - 1) \left(\Theta_n \left. \frac{\partial^2 p'_{\omega_n}}{\partial t \partial x} \right|_{x=x_r} \sin(k_n x_r) + i \omega_n \frac{q'_n}{S} e^{i\omega_n t} \sin(k_n x_r) \right). \quad (6.65)$$

Howe (1998) szerint a cső nyitott végeinél a hangszórázás miatt fellépő veszteségeket kifejező ξ_n csillapítási tényező a következő kifejezés alapján becsülhető:

$$\xi_n = \frac{1}{\pi} \frac{\omega_n^2 S}{Lv_h} + \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\Pi \sqrt{\omega_n}}{S} (\sqrt{\nu} + (\gamma - 1) \sqrt{\chi}) \quad (6.66)$$

ahol Π a cső kerülete ($\Pi = 2\pi R_c$), ν a kinematikai viszkozitás (mértékegysége m^2/s), χ a termikus diffuzivitás (mértékegysége m^2/s). A (6.7) és a (6.65) egyenletekből következik, hogy az n -ik harmonikus amplitúdója (Matveev, 2003 alapján):

$$\dot{p}'_n = \frac{2(\gamma - 1) q_n \sin(k_n x_r)}{S [\xi_n L - (\gamma - 1) \Theta_n (\dot{p}'_n) k_n \sin(2k_n x_r)]} \quad (6.67)$$

A (6.17) egyenletbe helyettesítés és az integrálás elvégzése után kapjuk, hogy az n -ik akusztikus módban a rendszerbe jutó energia:

$$\begin{aligned}\Delta E_{be_n} &= \frac{(\gamma-1)\pi|Tr_n|PS \cdot \dot{p}_n^2}{2v_h^3\rho_0 m_i \omega_n} \sin(\varphi_n) \sin(2k_n x_r) = \\ &= \frac{(\gamma-1)\pi|Tr_n|PS \cdot \dot{p}_n^2}{2v_h^3\rho_0 m_i \omega_n} \sin(\varphi_n) \sin(n2\pi \frac{x_r}{L}).\end{aligned}\quad (6.68)$$

ahol P a rácsra jutó hőteljesítmény, m_i a légáram intenzitása. Mivel $0 < \varphi_n < \pi/2$, ezért $\sin(\varphi_n) > 0$. A rendszerbe jutó energia előjelét a szorzat utolsó tényezőjének előjele határozza meg. Ha ez pozitív, akkor a rendszerbe pozitív nagyságú energia „áramlik” be kívülről (Beke, 2010a).

Az első akusztikus mód esetén $n=1$; a rendszer gerjeszthetőségének feltétele (Beke, 2010a):

$$\sin(2\pi \frac{x_r}{L}) > 0, \quad (6.69)$$

azaz

$$0 < x_r < \frac{L}{2}. \quad (6.70)$$

Ebből világosan látszik, hogy a rendszerünk első gerjesztett módja csak úgy lehetséges, ha a rács a cső alsó felében van.

A második akusztikus mód esetén $n=2$; a rendszer gerjesztésének feltétele (Beke, 2010a):

$$\sin(4\pi \frac{x_r}{L}) > 0, \quad (6.71)$$

azaz

$$0 < x_r < \frac{L}{4}, \text{ vagy } \frac{L}{2} < x_r < \frac{3L}{4}. \quad (6.72)$$

A rendszer második típusú gerjesztése akkor lehetséges, ha a rács a cső „alsó” negyedében, vagy a cső fele és a 3/4 része között helyezkedik el (Beke, 2010a). A harmadik akusztikus mód esetén $n=3$; a rendszer gerjesztésének feltétele:

$$\sin(6\pi \frac{x_r}{L}) > 0, \quad (6.73)$$

azaz

$$0 < x_r < \frac{L}{6}, \text{ vagy } \frac{L}{3} < x_r < \frac{L}{2}, \text{ vagy } \frac{2L}{3} < x_r < \frac{5L}{6}. \quad (6.74)$$

A még magasabb gerjesztett módok esetén a számítás hasonlóképpen történik. Látható, hogy a cső felső felében csak valamelyik elsőnél magasabb gerjesztett mód fordulhat elő. Mivel ezeket sokkal nehezebb gerjeszteni, mint az első akusztikus módot, ezért érthető, hogy a felső rácspozíció esetén miért csak ritkán megy át a rendszerünk instabil állapotba.

A rendszerben fellépő energiavesztés két részből tevődik össze. Egyfelől a cső belsejében lévő akusztikai határrétegen (ΔE_{hr}) veszik el energia (Howe, 1998), melynek értéke az n -ik akusztikus módban:

$$\Delta E_{hrn} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \frac{\Pi L \cdot \dot{p}_n^2}{v_h^2 \rho_0 \sqrt{\omega_n}} (\sqrt{v} + (\gamma-1)\sqrt{\chi}) \quad (6.75)$$

Másfelől a cső végeinél fellépő hangsugárzás (ΔE_{hs}) miatt is energiaveszteség lép fel az n -ik akusztikus módban (Howe, 1998):

$$\Delta E_{hsn} = \frac{1}{2} \frac{\omega_n S^2 \cdot \dot{p}_n^2}{v_h^3 \rho_0}. \quad (6.76)$$

Ha a rendszerbe kívülről betáplált energia nagysága meghaladja az energiaveszteségek összegének nagyságát, akkor a rendszerünk instabil állapotba kerül. Ilyenkor a rendszer energia „inputja” nagyobb, mint az energia „output” ($E_{input} > E_{output}$) (Beke, 2010a):

$$\Delta E_{be} > \Delta E_{hr} + \Delta E_{hs}. \quad (6.77)$$

A rendszer gerjesztéséhez szükséges kritikus teljesítmény (P_{kr}) az a minimális teljesítmény, amit ha túllépünk, akkor már gerjeszthető az adott körülmények között a termoakusztikus rendszer. A kritikus teljesítmény esetén a rendszerbe bevitt energia éppen egyensúlyban van a veszteségek miatt kiáramló energiával (Beke, 2010a):

$$\Delta E_{be} = \Delta E_{ki} = \Delta E_{hr} + \Delta E_{hs}. \quad (6.78)$$

Culick (1976, 1997) szerint a termoakusztikai rendszer Galerkin-féle (akusztikus) állapotai jó közelítéssel függetlennek tekinthetők (azaz a köztük lévő csatolás gyakorlatilag elhanyagolható), ezért az akusztikus módokat külön-külön vizsgálhatjuk. Egyensúly esetén az n -ik akusztikus módra felírhatjuk (Beke, 2010a):

$$\Delta E_{ben} = \Delta E_{kin} = \Delta E_{hrn} + \Delta E_{hsn}. \quad (6.79)$$

A (6.79) egyenletbe behelyettesítettem a (6.68), a (6.75) és a (6.76) egyenleteket, így kaptam:

$$\begin{aligned} & \frac{(\gamma - 1)\pi |Tr_n| P_{krn} S \cdot \dot{p}_n^2}{2v_h^3 \rho_0 m_i \omega_n} \sin(\varphi_n) \sin(n2\pi \frac{x_r}{L}) = \\ & = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \frac{\Pi L \cdot \dot{p}_n^2}{v_h^2 \rho_0 \sqrt{\omega_n}} (\sqrt{v} + (\gamma - 1)\sqrt{\chi}) + \frac{1}{2} \frac{\omega_n S^2 \cdot \dot{p}_n^2}{v_h^3 \rho_0}. \end{aligned} \quad (6.80)$$

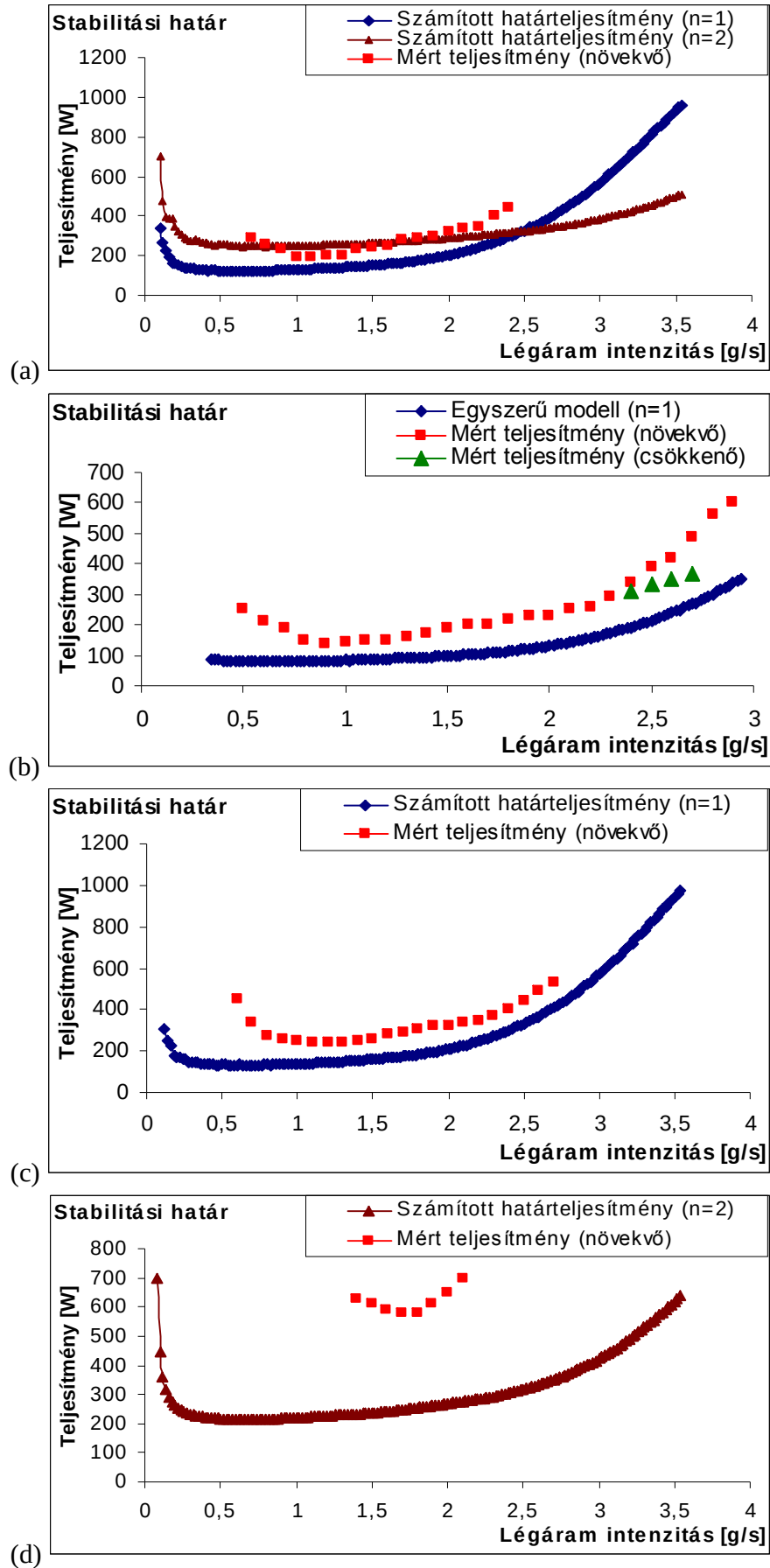
Végezzük el a lehetséges egyszerűsítéseket:

$$\frac{(\gamma - 1)\pi |Tr_n| P_{krn} S}{v_h m_i \omega_n} \sin(\varphi_n) \sin(n2\pi \frac{x_r}{L}) = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \frac{\Pi L}{\sqrt{\omega_n}} (\sqrt{v} + (\gamma - 1)\sqrt{\chi}) + \frac{\omega_n S^2}{v_h}. \quad (6.81)$$

Az egyenlet rendezése után kaptam az n -ik módhoz tartozó kritikus teljesítményt (Beke, 2010a):

$$P_{krn} = m_i \frac{\pi \cdot v_h \Pi L \sqrt{\omega_n} \cdot (\sqrt{v} + (\gamma - 1)\sqrt{\chi}) + \sqrt{2} \omega_n^2 S^2}{\sqrt{2} (\gamma - 1) \pi |Tr_n| S \sin(\varphi_n) \sin(n2\pi \frac{x_r}{L})}. \quad (6.82)$$

A (6.82) egyenlet felhasználásával kapott eredmények láthatók a 6.7. ábrán (Beke, 2010a):



6.7. ábra A rendszer stabil és instabil állapotát elválasztó határvonal az egyszerű modell, illetve a mérések alapján: (a) $x_r = L/8$; (b) $x_r = L/4$; (c) $x_r = 3L/8$; (d) $x_r = 5L/8$.

A rendszer stabil és instabil állapotát elválasztó határvonalak parabola-szerű görbék. A „parabola” bal szára meredekebb, mint a jobb szára. Az akusztikai veszteségek növekszenek a frekvencia növekedésével ezért a rendszer első típusú gerjesztésekor kisebb energia is elegendő a gerjesztéshez, mint a második típus esetén, mivel ekkor kisebb az energia veszteség (Beke, 2010a).

Az eredményeket elemezve megállapítottam, hogy az „egyszerűsített” modell által kapott értékek általában a tesztek során kapott értékek alatt helyezkednek el (Beke, 2010a). A modell nem ad számot a fizikai rendszernek arról a jellemzőjéről, hogy a paraméterek növelése, illetve csökkentése esetén különböznek a rendszer gerjeszthetőségi feltételei. Az „egyszerűsített” modell hibaforrása az lehet, hogy az eredeti feltételezéseim pontatlanok. Egyrésről a rendszeren belül állandó hőmérsékletet feltételeztem, ami biztosan nem igaz; másrésről elhanyagoltam a rács hőszigeteléséből és a rácsot körülvevő csőréssz hővezetéséből származó energia-veszteségeket. Látszik, hogy ezeket a tényezőket figyelembe kellene venni.

Habár már ez az „egyszerűsített” modell is jellegét tekintve leírja a rendszer viselkedését, de sajnos az eredmények pontossága nem elegendő (Beke, 2010b). Ezért a következő fejezetben kidolgozok egy újabb modellt, amelyben már figyelembe veszem a rendszerben fellépő egyéb energia-áramlásokat is.

7. A Rijke cső továbbfejlesztett modellje

Ebben a fejezetben egy olyan modellt szeretnék kidolgozni, amely jobban jellemzi a rendszer átmenetét a stabil és az instabil állapotok között, mint az előző fejezetben leírt „egyszerű” modell. A pontosság javítása érdekében a 6.4. részfejezetben leírt feltételezéseket a következőképpen módosítom: a hőtranszfer folyamán meghatározom a rácstről az áramló levegőbe jutó, a csőfalba jutó és a környezetbe jutó hőteljesítményt; az áramvezető pálcá által leadott hőteljesítményt, illetve figyelembe veszem, hogy a cső belsejében nem egyenletes a hőmérséklet eloszlása (Beke, 2010b). A rendszerben fellépő zavarok kis mértékűnek tekinthetők, ezért az „egyszerű” modell többi feltételezését továbbra is igaznak fogadom el.

7.1. A hullámegyenlet megadása

A nyomás, a sűrűség, a levegőbeli sebesség és a hőteljesítmény sűrűség pillanatnyi értékét is úgy írhatjuk fel, hogy vesszük az adott mennyiség csőbeli átlagértékét, és ehhez hozzáadunk egy időben és helykoordinátában is fluktuáló komponenst:

$$p(x,t) = p_0(x) + p'(x,t) = p_0 + p'(x,t), \quad (7.1a)$$

és

$$\rho(x,t) = \rho_0(x) + \rho'(x,t), \quad (7.1b)$$

és

$$u(x,t) = u_0(x) + u'(x,t), \quad (7.1c)$$

és

$$q(x,t) = q_0(x) + q'(x,t), \quad (7.1d)$$

és

$$\Omega(x,t) = \Omega_0(x) + \Omega'(x,t) = \Omega'(x,t), \quad (7.1e)$$

ahol Ω az egységnyi térfogatra vett forrás-intenzitás; és a térfogati forrás-intenzitás átlagértéke zéró, azaz $\Omega_0(x)=0$. A nyomás egyenletes részét állandónak feltételezem a cső mentén, a cső falánál a sűrűlódás miatt csökken az áramlás sebessége, de ezt elhanyagolom. Akusztikus fluktuáció akkor léphet fel a rendszerben, ha az átlagos légáram intenzitás nem nulla. A rendszerünkben a Mach szám nagyon kicsi ($M_a < 1,8 \cdot 10^{-3}$), mivel u_0 és u' is nagyon kicsi értékek. Mivel csak a longitudinális akusztikus módok fontosak a rendszerünkben, ezért az egyenletek egydimenziós alakját használhatjuk, ahol x a cső közepén a cső falával párhuzamos tengely, iránya az átlagos áramlás irányával egyezik meg. A csőben áramló „ideálisnak” feltételezett gázra írjuk fel a tömeg megmaradásának általános egyenletét:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \underline{u}) = \rho \Omega, \quad (7.2)$$

az egydimenziós áramlás esetén:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u) = \rho \Omega, \quad (7.3)$$

azaz

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial u}{\partial x} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} = \rho \Omega. \quad (7.4)$$

Ha ide behelyettesítem a (7.1b), a (7.1c) és a (7.1d) egyenleteket és kihasználom, hogy a sűrűség közel állandó, akkor kapom:

$$\frac{\partial \rho'}{\partial t} + \rho_0 \frac{\partial u'}{\partial x} \cong \rho_0 \Omega'. \quad (7.5)$$

Most írjuk fel a lendület megmaradásának általános egyenletét is (Matveev, 2003):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \underline{u}) + \nabla \cdot (\rho \underline{u} \underline{u}) = -\nabla p + \rho \underline{B} + \nabla \cdot \tau, \quad (7.6)$$

ahol B a specifikus térfogati erő, τ a viszkozitási feszültség tenzor. A viszkozitási feszültséget és a specifikus térfogati erőt szintén elhanyagolhatjuk. Egydimenziós áramlás estén kapom:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u^2) \cong -\frac{\partial p}{\partial x}, \quad (7.7)$$

azaz

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial u^2}{\partial x} + u^2 \frac{\partial \rho}{\partial x} = -\frac{\partial p}{\partial x}. \quad (7.8)$$

A (7.1a), a (7.1b) és a (7.1c) egyenletek behelyettesítése után kaptam:

$$\rho \frac{\partial u'}{\partial t} + u \frac{\partial \rho'}{\partial t} + \rho \frac{\partial u^2}{\partial x} + u^2 \frac{\partial \rho}{\partial x} = -\frac{\partial p}{\partial x}. \quad (7.9)$$

Felhasználom, hogy a sebesség és a sűrűség fluktuációja is kicsi, ezért az egyenlet bal oldalának második, harmadik és negyedik tagja elhanyagolható a mi esetünkben:

$$\rho \frac{\partial u'}{\partial t} \cong -\frac{\partial p}{\partial x}. \quad (7.10)$$

Mivel a sűrűség pillanatnyi értéke (ρ) csak kis mértékben különbözik a sűrűség átlagértékétől (ρ_0), és a nyomás csőbeli átlagértékének a helykoordináta szerinti változása szintén kicsi, ezért az egyszerűsítés után kaptam:

$$\rho_0 \frac{\partial u'}{\partial t} \cong -\frac{\partial p'}{\partial x}, \quad (7.11)$$

átrendezve

$$\frac{\partial u'}{\partial t} = \frac{-1}{\rho_0} \frac{\partial p'}{\partial x}. \quad (7.12)$$

Deriváljuk az (7.11) egyenlet mindkét oldalát x szerint!

$$\frac{\partial \rho_0}{\partial x} \frac{\partial u'}{\partial t} + \rho_0 \frac{\partial^2 u'}{\partial x \partial t} = -\frac{\partial^2 p'}{\partial x^2}, \quad (7.13)$$

átrendezés után kaptam:

$$\frac{\partial^2 u'}{\partial x \partial t} = \frac{-1}{\rho_0} \left(\frac{\partial^2 p'}{\partial x^2} + \frac{\partial \rho_0}{\partial x} \frac{\partial u'}{\partial t} \right). \quad (7.14)$$

Végezetül a csőben áramló gázra írjuk fel az energia megmaradásának általános egyenletét is! Nem vétek nagy hibát, ha a gázbeli hővezetést elhanyagolom; Culick (1988) alapján felírható:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \underline{u} \cdot \nabla p + \gamma \cdot p \nabla \cdot \underline{u} = (\gamma - 1)q + \rho \cdot v_h^2 \Omega. \quad (7.15)$$

Az egydimenziós áramlás estén kaptam:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + u \frac{\partial p}{\partial x} + \gamma p \frac{\partial u}{\partial x} = (\gamma - 1)q + \rho v_h^2 \Omega. \quad (7.16)$$

A mi esetünkben az áramlás sebessége a hangsebességhez viszonyítva kis értékű, a nyomás térbeli deriváltja szintén kicsi érték, a pillanatnyi nyomás majdnem megegyezik az átlagos nyomással, ezért „közelítőleg” írhatom:

$$\frac{\partial p'}{\partial t} + \gamma p_0 \frac{\partial u'}{\partial x} \cong (\gamma - 1)q + \rho \cdot v_h^2 \Omega. \quad (7.17)$$

A (7.17) egyenletet deriváljuk az idő szerint:

$$\frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} + \gamma p_0 \frac{\partial^2 u'}{\partial t \partial x} \cong (\gamma - 1) \frac{\partial q}{\partial t} + \rho \cdot v_h^2 \frac{\partial \Omega}{\partial t} + v_h^2 \Omega \frac{\partial \rho}{\partial t}. \quad (7.18)$$

A sűrűséget az egyszerűség kedvéért (közel) állandónak tekinthető, ezért a (7.18) egyenlet jobb oldalának utolsó tagját elhanyagolhatom:

$$\frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} + \gamma p_0 \frac{\partial^2 u'}{\partial t \partial x} \cong (\gamma - 1) \frac{\partial q}{\partial t} + \rho_0 \cdot v_h^2 \frac{\partial \Omega'}{\partial t} = (\gamma - 1) \frac{\partial q'}{\partial t} + \rho_0 \cdot v_h^2 \frac{\partial \Omega'}{\partial t}. \quad (7.19)$$

A (7.14) egyenletet a (7.19) egyenletbe helyettesítve megkaptam a Rijke csőben a gáznyomás perturbációjára vonatkozó hullámegyenletet:

$$\frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} + \gamma p_0 \left[\frac{-1}{\rho_0} \left(\frac{\partial^2 p'}{\partial x^2} + \frac{\partial \rho_0}{\partial x} \frac{\partial u'}{\partial t} \right) \right] = (\gamma - 1) \frac{\partial q'}{\partial t} + \rho_0 v_h^2 \frac{\partial \Omega'}{\partial t}. \quad (7.20)$$

Átalakítás után kaptam:

$$\frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} - \frac{\gamma p_0}{\rho_0} \frac{\partial^2 p'}{\partial x^2} - \frac{\gamma p_0}{\rho_0} \frac{\partial \rho_0}{\partial x} \frac{\partial u'}{\partial t} = (\gamma - 1) \frac{\partial q'}{\partial t} + \rho_0 v_h^2 \frac{\partial \Omega'}{\partial t}. \quad (7.21)$$

A sebesség fluktuációjának idő szerinti deriváltját már kifejeztem az (7.12) egyenletben, ezt beírtam a (7.21) egyenletbe:

$$\frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} - \frac{\gamma p_0}{\rho_0} \frac{\partial^2 p'}{\partial x^2} - \frac{\gamma p_0}{\rho_0} \frac{\partial \rho_0}{\partial x} \left(\frac{-1}{\rho_0} \right) \frac{\partial p'}{\partial x} = (\gamma - 1) \frac{\partial q'}{\partial t} + \rho_0 v_h^2 \frac{\partial \Omega'}{\partial t}, \quad (7.22)$$

azaz

$$\frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} - \frac{\gamma p_0}{\rho_0} \frac{\partial^2 p'}{\partial x^2} + \frac{\gamma p_0}{\rho_0} \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \rho_0}{\partial x} \frac{\partial p'}{\partial x} = (\gamma - 1) \frac{\partial q'}{\partial t} + \rho_0 v_h^2 \frac{\partial \Omega'}{\partial t}. \quad (7.23)$$

A hangsebesség kifejezése után

$$v_h^2 = \frac{\gamma p_0}{\rho_0}, \quad (7.24)$$

kapom a hullámegyenletet:

$$\frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} - v_h^2 \frac{\partial^2 p'}{\partial x^2} + \frac{v_h^2}{\rho_0} \frac{\partial \rho_0}{\partial x} \frac{\partial p'}{\partial x} = (\gamma - 1) \frac{\partial q'}{\partial t} + \rho_0 v_h^2 \frac{\partial \Omega'}{\partial t}. \quad (7.25)$$

Ez abban különbözik a hagyományos hullámeqyenlettől, hogy a bal oldalon megjelenik benne egy olyan tag, ami a sűrűség térbeli változásával arányos. A rendszer termoakusztikus instabilitásáért felelős tag arányos a hőteljesítmény sűrűség fluktuációjának idő szerinti deriváltjával. A hullám csillapodását okozza a hővezetés, a viszkozitás az akusztikai határrétegen és a cső végeinél kisugárzott hang. Ezek a csillapító tényezők az utolsó tagba vannak belefoglalva, amely arányos az egységnyi térfogati forrás-intenzitás időbeli deriváltjával.

7.2. A rendszer csillapítási mechanizmusának vizsgálata

A Rijke csőben fellépő csillapodásnak 3 fő oka van. Először is az akusztikai határrétegen a cső falánál, melyet a (7.25) egyenlet jobb oldalán szereplő térfogati forrás-intenzitás segítségével fejezhetünk ki. Másodsorban a cső végeinél kisugárzott hang következtében is csökken a rendszer energiája, tehát ez is csillapító tényezőként hat. Harmadsorban a hang konvekciója okoz csillapodást az átlagos áramlás esetén. Az áramló részecskék akusztikus sebességének normális komponense (v_n) a határréteg külső részénél a cső fala mellett arányos a nyomás perturbációjával:

$$v_n = -Y \cdot p', \quad (7.26)$$

ahol Y az akusztikus admittancia, amely magában foglalja a termikus és a nyírási feszültséghez kapcsolódó admittanciát (Howe, 1998):

$$Y = e^{-i\frac{\pi}{4}} \frac{\sqrt{\omega}}{v_h^2 \rho} \left(\sqrt{\nu} + (\gamma - 1) \sqrt{\chi} \right) \quad (7.27)$$

ahol ν a kinematikai viszkozitás, $\chi = \lambda / (c_p \rho)$ a termikus diffuzivitás, és λ a hővezetési tényező. Az akusztikai határrétegen az egységnyi térfogatra jutó veszteséget okozó térfogati forrás-intenzitás:

$$\Omega(x, t) = \frac{\Pi v_n(x, t)}{S} = \frac{D_c \pi \cdot v_n(x, t)}{\frac{D_c^2 \pi}{4}} = -\frac{4Y(x)p'(x, t)}{D_c}, \quad (7.28)$$

ahol Π a cső kerülete, S a cső keresztmetszete és D_c pedig a cső átmérője.

A (7.25) egyenlet peremfeltételei szerint az $x=0$ és az $x=L$ helyek esetén (a cső két végénél) az akusztikus nyomás arányos a sebesség fluktuációjával (Matveev, 2003):

$$p' = Z \cdot u', \quad (7.29)$$

ahol Z az impedancia. A cső „alsó” végénél ($x=0$) és a „felső” végénél ($x=L$) az impedancia Levine és Schwinger (1948) szerint:

$$Z \approx -\frac{\rho \omega^2 R_c^2}{4v_h} - i\rho \omega l_e, \quad (7.30)$$

ahol R_c a cső sugara, $l_e \approx 0,61R_c$, pedig a cső nyitott vége miatti korrekciós tényező.

Csillapodás léphet fel az átlagos áramlás és az oszcilláló áramlás kölcsönhatása miatt a cső nyitott végeinél. Ingard és Singhal (1975) szerint az áramló levegőben a konvekció következtében fellépő akusztikai teljesítményvesztés:

$$P_{akusztikus}^{(konv)} \cong \frac{2}{3} M_a S v_h \bar{u}^2 \rho, \quad (7.31)$$

ahol M_a a Mach szám, u a cső nyitott végeinél az akusztikus sebesség amplitúdója. (A Mach szám nagyon kicsi a rendszerünk esetén, $M_a < 1,8 \cdot 10^{-3}$, ezzel egyenesen arányos a konvekciós veszteség.) A rendszerünkben a konvekciós veszteség hatása elhanyagolható a másik két veszteséghez képest, amelyek a csillapodást okozzák.

7.3. A rendszerben fellépő hőátadási folyamatok elemzése

A Rijke csőben kialakuló instabilitás függ attól, hogyan adja át a felhevült rács az energiáját a környezetének. Ebben a részfejezetben a folyamatot részletesebben elemzem. A cső belsejében a gáz áramlása 3 dimenziós folyamat, miközben örvények is keletkezhetnek, mint azt a gázzal fűtött csövekkel végzett kísérletek során láthattuk is. A hőátadási folyamat 3 részre bontható: hőkonvekció, hővezetés és hősugárzás. Ha a rendszer instabil állapotban van, akkor a csőben áramló légáram intenzitás is fluktuál és a hő konvekciójában is fluktuáció mutatkozik (Beke, 2010bd). A rendszer precíz 3 dimenziós modellezése nagyon bonyolult lenne; ezért csak arra vállalkoztam, hogy kifejlesszek egy olyan egydimenziós modellt, amelyben a hőátadás minden fontos aspektusát figyelembe veszem és ezáltal az ún. „egyszerű” modellnél pontosabban leírhatom a termodinamikai rendszer viselkedését. A modell alapjául az energia megmaradásának elve szolgál, melyre egy kvázi-stacionárius egydimenziós egyenlet-rendszert írok fel. A hőátadás folyamán a következő komponenseket kell figyelembe venni (Beke, 2010bd):

Kényszerített konvekció:

- A rács és az áramló levegő között;
- Az áramvezető pálcá és az áramló levegő között;
- A cső fala és az áramló levegő között.

Természetes konvekció:

- A cső és a körülötte lévő külső levegő között;
- Az áramvezető pálcá csövön kívüli része és a külső levegő között,
- A pálcá csövön belüli része és az áramló levegő között.

Hővezetés:

- A cső falában;
- Az áramvezető pálcában.

Hősugárzás:

- A rács és az áramló levegő, illetve a cső fala között;
- Az áramvezető pálcá csövön kívüli része és a környezet, illetve az áramvezető pálcá csövön belüli része és az áramló levegő között;
- A cső és a környezete között.

A következő egyenletekben a T az adott csőkeresztmetszetenél az átlagos hőmérsékletet jelenti. Az alsó indexek közül r a rácsot, l a csőben áramló levegőt, c a csövet, p az áramvezető pálcát, k pedig a csövet körülfogó környezetet jelenti. A felső indexek közül k_{kon} a kényszerített konvekciót, t_{kon} a természetes konvekciót, h_v a hővezetést, h_s a hősugárzást jelenti. Az energiamegmaradás törvényének értelmében a rácsra jutó elektromos hőteljesítmény (P_r) egyensúlyi állapotban egyenlő a rácsot elhagyó teljesítménnyel. A rácsról hő távozik a rajta

keresztül áramló levegőbe kényszerített konvekcióval (Q_{rl}^{kkon}), az áramvezető pálcá is elvezet valamennyi hőt a rácstól (Q_{rp}^{hv}) és a rács hőszugárzással is lead energiát a környezetének (Q_r^{hs}). A Rijke cső fala és a rács közötti hővezetést elhanyagoltam, mert a rács és a csőfal közötti kerámia tubus majdnem teljesen megakadályozza a hővezetést. Az energiamegmaradás elvét felírtam a rács esetén a teljesítményekkel kifejezve (Beke, 2010bd):

$$P_r = \dot{Q}_{rl}^{kkon} + \dot{Q}_{rp}^{hv} + \dot{Q}_r^{hs}. \quad (7.32)$$

A hővezetés általános egydimenziós (x irányú) alapegyenlete (Budo, 1997):

$$\lambda \frac{d^2 T}{dx^2} \cdot \Delta x = \frac{1}{S} \dot{Q}^{hv}, \quad (7.33)$$

ahol λ a hővezetési tényező, S a hővezetésben résztvevő felület, Δx az x irányú „lépésköz” (távolság), $\dot{Q}^{hv}$ a hővezetési teljesítmény (hőáram). (A hőáram és a felület hányadosát hőáram-sűrűségnek nevezzük, a mértékegysége W/m^2 .) A cső falában a hővezetési hőáram nagysága egyenlő a cső belsejében áramló levegőbe kényszerített konvekciós hőáramnak, a környező levegőbe történő természetes konvekciós hőáramnak és a cső hőszugárzási hőáramának összegével (Beke, 2010bd):

$$\lambda_c S_c \frac{d^2 T_c}{dx^2} \Delta x_c = \dot{Q}_{cl}^{kkon} + \dot{Q}_{ck}^{tkon} + \dot{Q}_{cl}^{hs} + \dot{Q}_{ck}^{hs}, \quad (7.34a)$$

ahol S_c a csőfal keresztmetszete, λ_c a cső anyagának hővezetési tényezője (alumínium esetén $\lambda_c=221$ W/mK). Az egyenlet jobb oldalán szereplő hőáramok kiszámítását a következő részben ismertetem.

A rácstra két áramvezető pálcá segítségével jut az elektromos energia. Mivel a két pálcá szimmetrikusan helyezkedik el, ezért a hőtranszport kiszámításánál elegendő az egyiket vizsgálni, a másikra is hasonló kifejezés érvényes. A pálcára is felírtam az energiamegmaradást kifejező egyenletet a teljesítmények segítségével (Beke, 2010d):

$$\lambda_p S_p \frac{d^2 T_p}{dx^2} \Delta x_p = \dot{Q}_{pl}^{kon} + \dot{Q}_{pk}^{tkon} + \dot{Q}_p^{hs} - P_p, \quad (7.34b)$$

ahol λ_p jelenti az áramvezető pálcá anyagának hővezetési tényezőjét (sárgaréz esetén $\lambda_p=117$ W/mK), S_p a pálcá keresztmetszete, P_p pedig az egyik áramvezető pálcára jutó elektromos hőteljesítmény. (Itt már figyelembe vettem, hogy magának az áramvezető pálcának is van ohmikus ellenállása. Az egyszerűség kedvéért feltételeztem, hogy az elektromos ellenállás miatti hőteljesítmény egyenletesen oszlik el az egész áramvezető pálcán.) A pálcá által hőszugárzás formájában kisugárzott energia két tagból áll, egyfelől a pálcá csövön kívüli része a környezetbe, másfelől a pálcá csövön belüli része főként az áramló levegőbe sugároz ki hőt (Beke, 2010bd). A részletesebb számításokat a hőszugárzási résznél ismertetem.

A csőben áramló levegő által konvekcióval szállított hőáram egyenlő a pálcá, a cső fala és a rács közötti kényszerített konvekciós hőárammal. Az energiamegmaradás elvének kifejezése (Beke, 2010d):

$$m_i c_p \frac{dT_l}{dx} \Delta x_l = \dot{Q}_{cl}^{kon} + \dot{Q}_{pl}^{kon} + \dot{Q}_{rl}^{kon} \delta(x - x_r), \quad (7.35)$$

ahol m_i a légáram intenzitása, c_p a levegő izobár fajhője ($T=300$ K hőmérsékleten $c_p=1004$ J/kgK). A δ függvénnyel való szorzás jelentése, hogy a rács a levegőnek lokálisan „szinte egy pontban” (a rácspozícióban) adja át a hőt.

A rács és az áramló levegő közötti természetes konvekció hatását nem vettem figyelembe Mills (1992) javaslata alapján; mivel:

$$\frac{Gr}{Re_{Dr}^2} \ll 1, \quad (7.36)$$

a rendszerünkben, ahol Gr jelenti a Grashof számot:

$$Gr = \frac{g D_r^3 \Delta T}{T \nu^2}, \quad (7.37)$$

ahol g a gravitációs gyorsulás, D_r a rács átmérője, ΔT pedig a rács és az áramló levegő közötti hőmérséklet különbség; Re a Reynolds szám:

$$Re = \frac{D_r u}{\nu}, \quad (7.38)$$

ahol u jelenti a levegő lokális áramlási sebességét, ν pedig a kinematikai viszkozitás ($\nu=\mu/\rho$). A csőben áramló levegőben a hővezetés elhanyagolható a hőkonvekcióhoz képest. Feltételezhetjük, hogy ha elég hosszú ideig várunk és kialakul az egyensúlyi állapot, akkor a cső végeinek hőmérséklete állandó; és sem a cső bal végén ($x=0$), sem a cső jobb végén ($x=L$) nincs hőátadás (Matveev, 2003):

$$\left. \frac{dT_c}{dx} \right|_{x=0} = \left. \frac{dT_c}{dx} \right|_{x=L} = 0. \quad (7.39)$$

Az áramvezető pálcá bal szélén ($x=-l_p$) ugyanígy feltételezhetően nincs hőtranszfer:

$$\left. \frac{dT_p}{dx} \right|_{x=-l_p} = 0. \quad (7.40)$$

A pálcá jobb széle ($x=x_r$) érintkezik a ráccsal, ezért a hőmérsékletüket azonosnak vettem:

$$T_p \Big|_{x=x_r} = T_r. \quad (7.41)$$

Az egyszerűség kedvéért feltételeztem, hogy a csőbe beáramló levegő hőmérséklete közelítőleg megegyezik a csövet körülvevő levegő (környezet) hőmérsékletével (Beke, 2010b):

$$T_l \Big|_{x=0} = T_k. \quad (7.42)$$

7.3.1. A hőteljesítmények kiszámítása

A következőkben felírom a hőátadás egyes komponenseinek arányait (Beke, 2010b). Az elektromosan fűtött rács és a rajta keresztuláramló levegő közötti hőátadás (Torczynski és O’Hern, 1995 alapján):

$$\dot{Q}_{rl}^{kon} = \frac{T_r - T_l}{T_l} \frac{\nu_h^2}{\gamma - 1} \cdot \frac{S_r}{1,01} \frac{\mu}{D_r} \frac{Re_{Dr}^{0,5}}{Pr^{0,6}}, \quad (7.43a)$$

ahol S_r a rács („drót darabkái”) által lefedett tényleges terület, μ a levegő dinamikai viszkozitása, Pr a Prandtl szám, Re_{Dr} a rácsátmérő szerinti Reynolds szám. A Prandtl szám:

$$Pr = \frac{\nu}{\chi} = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda}, \quad (7.43b)$$

ahol ν a kinematikai viszkozitás, χ a termikus diffuzivitás, μ a dinamikai viszkozitás, λ a hővezetési tényező, c_p az állandó nyomáshoz tartozó fajhő.

A Nusselt szám (Nu) a konvektív és a konduktív hőátadás arányát jellemzi:

$$Nu_h = \frac{\alpha \cdot h}{\lambda}, \quad (7.43c)$$

ahol α a hőátadási tényező, h pedig a „karakterisztikus hossz”, ami az adott test „hossza” a hővezetés „szempontjából”. A „karakterisztikus hossz” értéke a Nusselt szám kiszámításakor valamilyen konkrét test esetén konkrét geometriai hossz méretek formájában van megadva (pl. a cső átmérője). Az S' felületről a hőkonvekciót kifejezhetjük a Nusselt szám segítségével:

$$\dot{Q} = \frac{Nu_h \lambda_l S' (T' - T)}{h}, \quad (7.43d)$$

ahol T' a felület hőmérséklete, T a környező levegő hőmérséklete, h a „karakterisztikus hossz”, λ_l a levegő hővezetési tényezője ($\lambda_l = 0,024$ W/mK).

A Rayleigh-féle számot a Grashof szám és a Prandtl szám szorzataként kapjuk:

$$Ra = Gr \cdot Pr. \quad (7.43e)$$

A természetes konvekció során az áramvezető pálca csőből „kilógó” része által leadott hő kiszámításhoz felírhatjuk a természetes konvekciós Nusselt számot (Nu^{kon}) (Churchill és Chu, 1975):

$$Nu_{Dp}^{kon} = 0,68 + \frac{0,67(Ra_{Dp})^{1/4}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr}\right)^{9/16}\right]^{4/9}}. \quad (7.44a)$$

Ezt a kifejezést akkor használhatjuk, ha $Ra < 10^9$.

Lienhard (1973) szerint a természetes konvekcióhoz tartozó Nusselt számot a következőképpen számíthatjuk ki:

$$Nu_{Dp}^{kon} = 0,36 + \frac{0,518(Ra_{Dp})^{1/4}}{\left[1 + \left(\frac{0,559}{Pr}\right)^{9/16}\right]^{4/9}}. \quad (7.44b)$$

Lienhard és Lienhard (2003) szerint akkor használható az előző (7.44b) képlet, ha $10^{-6} < Ra < 10^9$, tehát nagyon széles tartományban alkalmazhatjuk ezt a formulát. Ha még ettől is szélesebb Ra tartományban vizsgálódunk, akkor Lienhard és Lienhard (2003) szerint a természetes konvekcióhoz tartozó Nusselt szám általános esetben a következő összetettebb kifejezéssel számítható:

$$Nu_{Dp}^{tkon} = \left\{ 0,60 + 0,387 \left[\frac{Ra_{Dp}}{\left[1 + \left(\frac{0,559}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{16/9}} \right]^{1/6} \right\}^2. \quad (7.45)$$

Először nem tudtam, hogy melyik kifejezést válasszam a számításokhoz, mivel különböző szerzők különböző képleteket adtak meg. A három kifejezés nem pontosan ugyanazt a Nusselt számot adja, de ez végül mégsem okozott problémát, ugyanis a későbbi számításokhoz nem „tisztán” a természetes konvekciós Nu számra, hanem az eredő (kevert) konvekciós áramláshoz tartozó Nusselt számra van szükségünk. (A kevert áramláshoz tartozó Nu számot a természetes és a kényszerített konvekcióhoz tartozó Nu szám segítségével lehet meghatározni.)

Mivel a kényszerített konvekcióhoz tartozó Nusselt szám jóval nagyobb a mi esetünkben, mint a természetes konvekcióhoz tartozó Nusselt szám, ezért az eredő érték kiszámításánál ez fog dominálni. A számításoknál kipróbáltam mindegyik természetes konvekcióhoz tartozó Nu képletet, de a kevert konvekcióhoz tartozó Nusselt számra kapott eredményekben alig volt néhány tized százalék különbség közöttük, ezért gyakorlatilag majdnem mindegy, hogy melyiket használjuk. Ha mindenképpen választanunk kellene, akkor talán a (7.45) képlet az, amelyik a szakirodalom alapján (Lienhard és Lienhard, 2003) a legáltalánosabban használható a természetes konvekcióhoz tartozó Nusselt szám meghatározására.

A későbbi számításokhoz az eredő (kevert) konvekciós áramláshoz tartozó Nusselt számra van szükségünk (Beke, 2010b). A két párhuzamos pálca esetén a kényszerített konvekcióhoz tartozó Nusselt szám (Nu^{kkon}) (Hatton és munkatársai, 1970):

$$Nu_{Dp}^{kkon} = (0,293 + 0,568 Re_{Dp}^{0,409}) \left(\frac{T_l + T_p}{2T_l} \right)^{0,154}. \quad (7.46)$$

A természetes és a kényszerített konvekciót is figyelembe véve az eredő konvekciós Nusselt számot (Nu^{kon}) a következőképpen határozhatjuk meg (Churchill, 1990 alapján):

$$Nu_{Dp}^{kon} = 0,3 + \sqrt[4]{(Nu_{Dp}^{tkon} - 0,3)^4 + (Nu_{Dp}^{kkon} - 0,3)^4}. \quad (7.47)$$

A Rijke cső által természetes konvekcióval leadott hő kiszámításához tartozó Nusselt szám Lienhard (1973), illetve Lienhard és Lienhard (2003) javaslata szerint:

$$Nu_{Dc} \approx 0,52 \cdot (Re_{Dc} Pr)^{1/4}. \quad (7.48)$$

7.3.2. Hősugárzás

A cső belsejében a hőmérséklet a rács közelében jóval magasabb, mint a cső többi helyén. A cső nagyobbik része viszonylag alacsony hőmérsékletű a rácshoz képest. A cső falában a hővezetés miatt változik a hőmérséklet, de ezt most egy kis időre elhanyagolom. A „fekete test” (black body) sugárzás útján kibocsátott hőtéljesítménye a Stefan-Boltzmann törvényből számítható ki:

$$\dot{Q}^{hs} = S\sigma T^4, \quad (7.49)$$

ahol σ a Stefan-Boltzmann állandó ($\sigma=5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$). A „szürke test” sugárzás útján kibocsátott hőtéljesítménye a „fekete test” hőtéljesítményének ε -szerese:

$$\dot{Q}^{hs} = \varepsilon S\sigma T^4, \quad (7.50)$$

ahol ε az emissziós együtthatót jelenti. A rács esetén meg kell különböztetnünk a rács középső részét, ahol a levegő „szabadon” áramolhat rajta keresztül, illetve a drótháló szélső perem-gyűrűjét, ahol a levegő áramlása akadályba ütközik, hiszen itt van a rács a kerámia betéthez rögzítve. Mivel a rács nem fedi le a cső teljes belső keresztmetszetét, ezért az effektív hőtéljesítmény kiszámításához azt feltételeztem, hogy a rács középső „szabad” felülete (S'_r) az áramló levegőbe sugározza ki az energiáját, a rács külső pereme pedig a csőfalba sugározza ki a hőt. A rácsot tartó kerámia tubus szerepét az egyszerűség kedvéért elhanyagoltam. A rács által kisugárzott teljesítmény (Beke, 2010bd):

$$\dot{Q}_r^{hs} = \varepsilon_r \sigma [S'_r (T_r^4 - T_l^4) + (S_r - S'_r)(T_r^4 - T_c^4)] \quad (7.51)$$

ahol ε_r a rács emissziós együtthatója ($\varepsilon_r=0,85$). A cső fala által a környezetbe kisugárzott hőtéljesítményt a következő kifejezéssel becsülhetjük:

$$\dot{Q}_c^{hs} = \varepsilon_c S'_c \cdot \sigma (T_c^4 - T_k^4). \quad (7.52)$$

ahol ε_c a cső anyagának emissziós együtthatója ($\varepsilon_c=0,89$), S'_c a cső felülete.

Az áramvezető pálcza hősugárzási teljesítményének kiszámításához a következő modellt használtam (Beke, 2010bd): a pálcza l_p hosszúságú része „lóg ki” a Rijke csőből, a pálcza teljes hossza L_p . A (7.40) és a (7.41) egyenletek szerint az egyszerűség kedvéért úgy vettem, hogy a pálcza bal szélének hőmérséklete megegyezik a környezet hőmérsékletével (T_k), a pálcza jobb vége viszont a rácshoz csatlakozik, ezért a hőmérsékletet itt a rács hőmérsékletével (T_r) megegyezőnek vettem. Azt feltételeztem, hogy a pálcza bal szélétől a jobb széléig haladva a hőmérséklet egyenletesen növekszik. Ez alapján a pálcza hősugárzási teljesítményét két részre bontottam: egyfelől a Rijke csővön kívüli pálczaszakasz a környező levegőbe sugároz ki energiát, másrésről a csővön belüli pálczaszakasz a csőben áramló levegőbe és azon keresztül a csőfalba sugároz ki energiát. Az egyszerűség kedvéért a csőfal hőmérsékletét (T_c) állandónak tekintettem, ez a T_c érték a csőfal átlaghőmérsékletét jelenti; és úgy vettem, hogy a pálcza csőben lévő része körül az áramló levegő átlaghőmérsékletének (T_l) és a csőfal átlaghőmérsékletének átlaga a hőmérséklet. Ezek alapján felírtam a pálcza által kisugárzott hőtéljesítményt (Beke, 2010b):

$$\begin{aligned}\dot{Q}_p^{hs} &= \varepsilon_p \sigma \pi \cdot D_p \left\{ \int_0^{l_p} \left[T_k + (T_r - T_k) \frac{x'}{L_p} \right]^4 - T_k^4 \right] dx' + \\ &\quad + \int_{l_p}^{L_p} \left[T_k + (T_r - T_k) \frac{x'}{L_p} \right]^4 - \left(\frac{T_c + T_l}{2} \right)^4 \right] dx' \Bigg\} = \\ &= \varepsilon_p \sigma \pi \cdot D_p \left\{ \int_0^{L_p} T_k + (T_r - T_k) \frac{x'}{L_p} \right]^4 dx' - \int_{l_p}^{L_p} \left(\frac{T_c + T_l}{2} \right)^4 dx' - \int_0^{l_p} T_k^4 dx' \Bigg\},\end{aligned}\quad (7.53)$$

ahol $x' = l_p + x$. Az integrálás elvégzése után kaptam (Beke, 2010bd):

$$\dot{Q}_p^{hs} = \varepsilon_p \sigma \pi \cdot D_p \left\{ \left(T_r^4 + T_k^4 + T_r^3 T_k + T_r T_k^3 + T_r^2 T_k^2 \right) \frac{L_p}{5} + \right. \\ \left. + \left(\frac{T_c + T_l}{2} \right)^4 (l_p - L_p) - T_k^4 l_p \right\}, \quad (7.54)$$

ahol ε_p a pálca emissziós együtthatója ($\varepsilon_p = 0,86$), D_p az áramvezető pálca átmérője ($D_p = 4,5 \text{ mm}$). Mivel két szimmetrikus elhelyezésű áramvezető pálca van, ezért a teljes sugárzási teljesítményük ennek a duplája.

7.4. A számítási modell

Az előbbieken meghatároztam a hőátadás különböző komponensei közötti kapcsolatokat. A kezdő- és peremfeltételek alkalmazásával az egyenleteket numerikusan megoldva megkaptam az áramló levegő, a csőfal és az áramvezető pálcák hőmérsékletét a rács helyzetének függvényében (Beke, 2010b). A cső hossza (L) mentén N_{db} darab kis Δx tartományokra bontottam a rendszerünket. Az áramlási hőmérséklet térbeli deriváltját az x_i koordinátájú pontban közelítésből kaptam (Beke, 2010bd):

$$\frac{dT(x_i)}{dx} \approx \frac{T(x_i) - T(x_{i-1})}{x_i - x_{i-1}} = \frac{T(x_i) - T(x_{i-1})}{\Delta x}, \quad (7.55)$$

ahol $T(x_i)$ jelenti az x_i koordinátájú pont abszolút hőmérsékletét és $\Delta x = x_i - x_{i-1} = L/N_{db}$, mert végig egyenletes felosztást használtam. A rendszer pontjai hőmérsékletének másodrendű deriváltjait a másodrendű differenciálokból kaptam (Beke, 2010bd):

$$\frac{d^2 T(x_i)}{dx^2} \approx \frac{\frac{T(x_{i+1}) - T(x_i)}{\Delta x} - \frac{T(x_i) - T(x_{i-1})}{\Delta x}}{\Delta x} = \frac{T(x_{i+1}) + T(x_{i-1}) - 2T(x_i)}{(\Delta x)^2}. \quad (7.56)$$

A (7.32) – (7.35) egyenletek jobb oldala nem lineáris, mivel a sugárzástól és a hőátadási koefficiens-től függ, ami viszont a hőmérséklettől függ. A hőmérsékleteket tartalmazó egyenletrendszerek megoldásához egy iteratív eljárást használtam. Minden egyes lépés során a helyi jellemzők határozzák meg a helyi hőmérsékletet (Beke, 2010bd). Abból indultam ki, hogy az adott x_i koordinátájú pontban a hőmérsékletnek megadom a kezdőértékét (Ez általában a szobahőmérsékletet jelenti.) Ezután a ráccsal közölt hő hatására az egyenletekben szereplő hőmérsékletek kezdenek kicsit növekedni. Az előbbi hőmérsékletekkel megadott egyenletrendszert

megoldhatjuk valamilyen hagyományos módszerrel, amiből újabb hőmérsékleteket kapunk, majd újra megoldjuk az egyenletrendszert. Ezt az eljárást addig ismételjük, amíg a hőmérséklet függvény már nem változik tovább, tehát addig, amíg az eredmény nem konvergál egy adott értékhez; azaz minden i -re ($0 \leq i \leq N_{db}$) létezik egy olyan j' pozitív egész szám, amelyre igaz, hogy minden tőle nagyobb pozitív egész j szám esetén (azaz $j > j'$) (Beke, 2010bd):

$$\left| T(x_i)^{(j)} - T(x_i)^{(j')} \right| \leq \varepsilon^*, \quad (7.57)$$

ahol a $T(x_i)^{(j)}$ azt jelöli, hogy az x_i koordinátájú pontban a j -ik iterációs lépésben mekkora a hőmérséklet, ε^* pedig tetszőlegesen kicsi pozitív szám, melynek értékét mi határozhatjuk meg. Minél kisebb ε^* , annál pontosabban kapjuk meg a hőmérsékletet az adott koordinátájú pontban. Ha a (7.57) egyenlőtlenség teljesül, akkor a $T(x_i)^{(j')}$ hőmérsékletet tekintjük az x_i koordinátájú pont „egyensúlyi” hőmérsékletének (Beke, 2010bd).

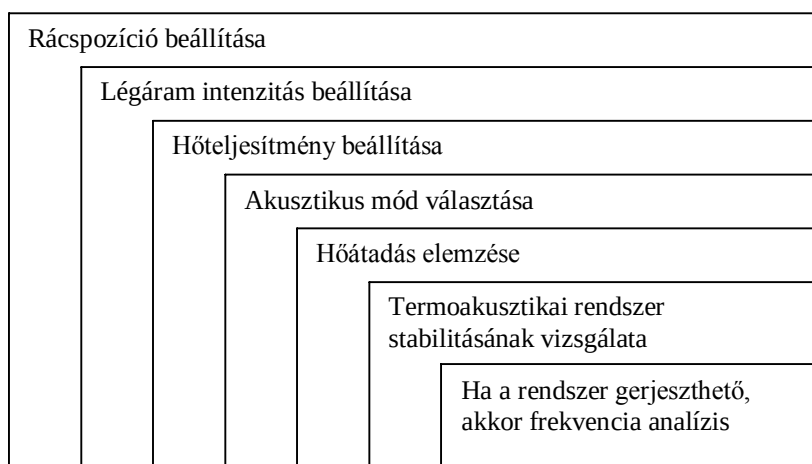
Az iteratív módszer alkalmazásának vannak korlátai. Ha a rács hőmérséklete túlzottan magas, ami akkor fordulhat elő, ha nagy a rácsot fűtő hőteljesítmény, miközben kicsi a rácson átáramló levegő intenzitása, akkor az iterációs módszer nem konvergál egy adott megoldáshoz, mivel a rendszer „nagyon nemlineáris” viselkedésű (Beke, 2010bd). (A sugárzással kibocsátott energia a hőmérséklet negyedik hatványával arányos).

Magas légáram intenzitás esetén a cső középvezetékében mérhető hőmérséklet jelentősen eltérhet az átlagos keresztmetszeti hőmérséklettől. A cső középvezetékében sokkal magasabb lehet a hőmérséklet, mivel a rács szélénél van kapcsolatba a drótháló a kerámia tubussal és a cső falával is, tehát itt kisebb a légáramlás, viszont a rács hő ad le ezeknek az elemeknek is. Magas légáram intenzitás értékek esetén a cső egy adott keresztmetszetében tehát nem egyenletes a hőmérséklet. A pontosabb számításokhoz ezek alapján 3 dimenziós modellre lenne szükség, én azonban csak egydimenziós modellt alkalmaztam, ezért nem meglepő, hogy magas légáram intenzitás esetén a modell alapján kapott és a mért értékek eltérnek egymástól.

7.5. A rendszer stabilitásának ellenőrzése

A rendszer stabil állapotát az (7.25) hullámgörbéről kaptam meg az egyes akusztikus módok stabilitásán keresztül. Ha minden akusztikus mód stabil, akkor maga a termodinamikai rendszer is stabil, de ha akár egyetlen mód is instabil, akkor a rendszer is instabil állapotban van. Habár elméletileg végtelen sok mód lehet, elég volt csak az alacsony módokat ellenőrizni az instabilitás szempontjából, mert a magasabb módok esetén a csillapítás gyorsan nő a frekvenciával. Elsőként kiválasztottam a rácspozíciót, majd a légáram intenzitást. Ezután meghatároztam azt a kritikus hőteljesítményt, ami már elegendő ahhoz, hogy a rendszerünk instabil állapotba kerüljön; úgy, hogy a leírtaknak megfelelően iteratív eljárással meghatároztam a cső belsejében a hőmérséklet térbeli eloszlását és a rácstről a rajta átáramló levegőbe konvekcióval átadott hőteljesítményt, illetve a hőszugárzás és a hővezetés hatását is figyelembe vettem (Beke, 2010bd). A legalacsonyabb módtól kezdve teszteltem a rendszer stabilitását; ha találtam instabil módot, akkora rendszer maga is instabil, ellenben ha minden vizsgált mód stabil, akkor maga a termodinamikai rendszer is stabil állapotban van az adott paraméterek (x_r , m_i , P) mellett. Ha a rendszer stabilnak mutatkozott, akkor

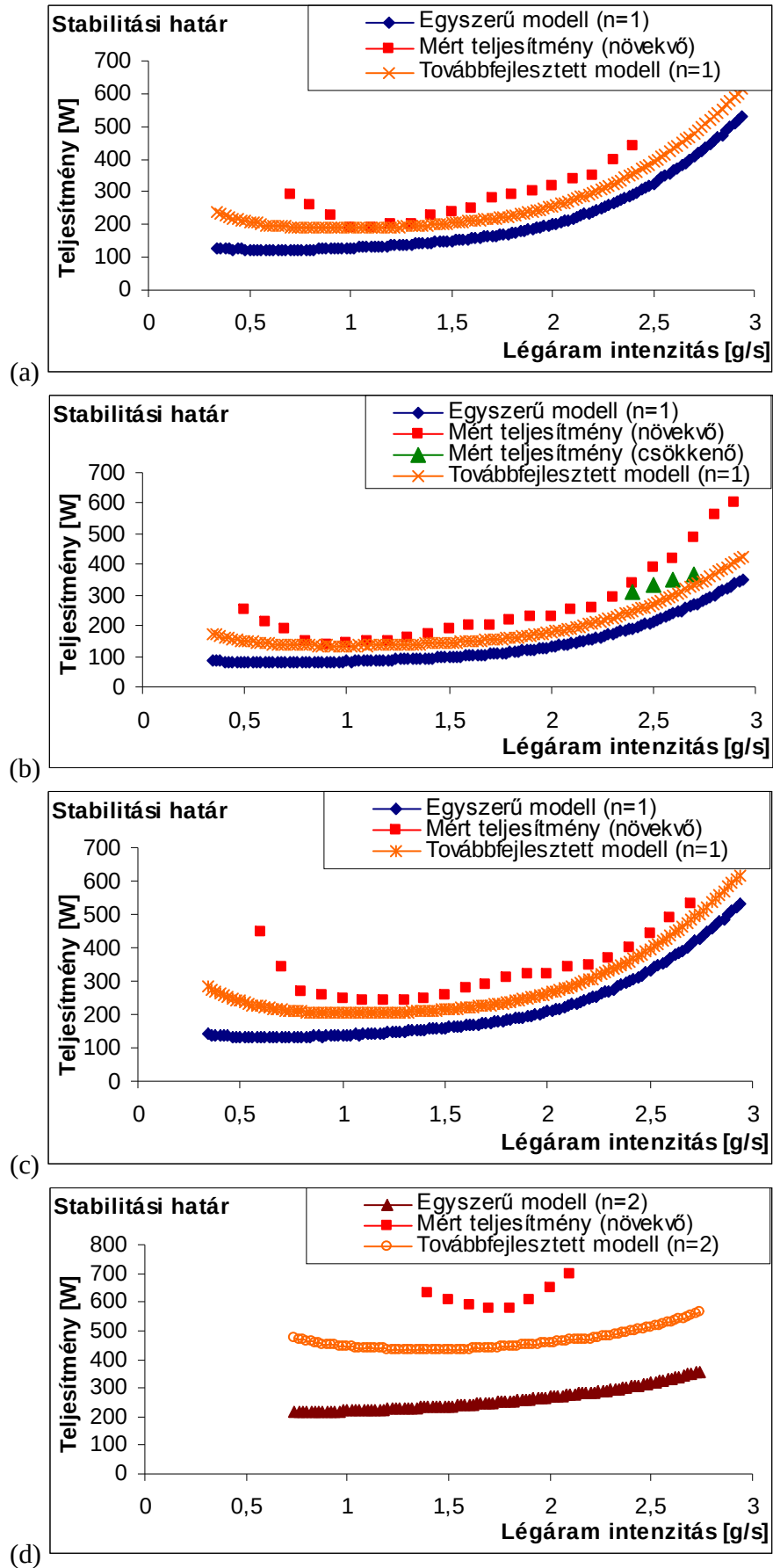
nagyobb fűtőteljesítménnyel folytattam a rendszer tesztelését. Ha az adott hőteljesítmény esetén a rendszer instabil, akkor csökkentettem a hőteljesítményt és megvizsgáltam, hogy vajon a rendszer a kisebb teljesítmény esetén stabil állapotba kerül-e. Így megkaptam, hogy mi az a legkisebb teljesítmény, ahol a rendszer instabil állapotba kerül, illetve mi az a legnagyobb teljesítmény, ahol a rendszer még stabil állapotban van. Ezután a légáram intenzitást megváltoztattam és az egész tesztelési eljárást kezdtem előlről, majd a rácspozíciót is változtattam és így ismételtam meg az eljárást; a végén megkaptam a rendszer stabil és instabil állapotait elválasztó határgörbét. Az algoritmus implementálása C++ nyelven történt. A stabilitási határértékek kiszámítására szolgáló algoritmus vázlata a 7.1. ábrán látható (Beke, 2010bd). Ha a modell alapján a termoakusztikus rendszer gerjeszhetőnek mutatkozott, akkor a pontosabb számítások érdekében még frekvencia analízist is végeztem (Beke, 2011a). Ennek a leírására a 7.7. részfejezetben térek ki.



7.1. ábra A rendszer stabilitásának ellenőrzése.

A fenti egyenletek közelítő megoldását úgy lehet megkapni, hogy a rendszer pillanatnyi jellemzőit a paraméterek korábbi értékeiből számítjuk ki numerikus úton lépésről-lépésre (Beke, 2010b). A termoakusztikus folyamatok modellezése során annyi paramétert kell figyelembe venni, amely a cső belsejében lévő áramlást és a hanghatást jól jellemzi. A Δx felosztás finomításával (N_{db} növelésével) eljuthatunk egy ponthoz, amelyen túl már nem érdemes tovább növelni a felosztást, mert a kapott eredmények között nincs jelentős eltérés. A határfeltételek figyelembe vétele mellett akkor nevezhetjük sikeresnek a modellünket, ha a számítógépes modell úgy viselkedik, mint azt a kísérletek során tapasztaljuk. Ha a modell és a kísérleti eredmények között szignifikáns az eltérés, akkor a modellt értelemszerűen addig kell finomítanunk, amíg az eltérés egy elfogadható szint alá csökken. Ha sikerül a számítógépes programot a kísérleti berendezéshez „hangolni”, akkor a modell által előre megjósolt értékeket a valós körülmények közötti kísérletek elvégzésével teszteljük. Ez újabb visszacsatolás a rendszer és a modellje között, egy idő után, ha jó a modell, akkor a számított, és a mért értékek egymáshoz konvergálnak. Ha ez nem következik be, akkor a modellt át kell dolgozni, lehet, hogy a komplett számítógépes programot meg kell változtatni. A stabilitási határértékeket 4 különböző rácspozíció esetén teszteltem a leírt eljárás segítségével.

A számítási eredményeket összehasonlítottam a kísérleti eredményekkel (7.2. ábra) (Beke, 2010b).



7.2. ábra Az egyszerű modell és a továbbfejlesztett modell alapján számított kritikus teljesítmények összehasonlítása a kísérleti adatokkal: (a) $x_r = L/8$; (b) $x_r = L/4$; (c) $x_r = 3L/8$; (d) $x_r = 5L/8$.

A kapott eredmények diszkussziója

Ha a rács $x_r=L/4$ helyen van és a légáram intenzitás 0,9 g/s-t meghaladja, akkor a „továbbfejlesztett” modell alapján kapott értékek jól egyeznek a kísérletileg mért értékekkel (7.2.b ábra). Alacsonyabb légáram intenzitás (0,5 – 0,8 g/s) esetén az elméleti modell által adott értékek és a valós mérési eredmények között eltérés adódik. Ennek oka az lehet egyrészt, hogy ebben a tartományban nem lineáris az átmenet az instabil állapotba; másrészt alacsony légáram intenzitás és magas hőteljesítmény esetén a természetes konvekció és a hőszugárzás szerepe nagyobb. Ha a rácsot az $x_r=L/8$ vagy $x_r=3L/8$ pozícióba helyezzük, akkor az $x_r=L/4$ rácspozícióhoz hasonló stabilitási görbéket kapunk (7.2.a és 7.2.c ábrák). Ezek a rácshelyzetek kedvezőtlenebbek a hőátadás szempontjából, ezért nem meglepő, hogy a stabilitási görbék az $x_r=L/4$ rácspozícióhoz képest felfelé mozdultak el (Beke, 2010b). A modellből kapott eredmények jól egyeznek a tapasztalati értékekkel 0,9 – 2,4 g/s légáram intenzitás tartományban. A 7.2.d ábra az $x_r=5L/8$ rácspozíció esetén ábrázolja a stabilitási görbét; közepes légáram intenzitás mellett a stabilitási határértékek hasonlóak az előző esetekhez, de ez a tartomány jóval szűkebb: 1,4 – 2,2 g/s. Alacsonyabb légáram esetén az eltérés fokozatosan növekszik. Ebben a rács helyzetben nagyobb hőteljesítmény szükséges ahhoz, hogy a rendszerünket instabil állapotba hozzuk, mint amikor a rács a cső „alsó” felében volt (Beke, 2010bd). A nagyobb hőteljesítmény miatt a rács hőmérséklete is, és így a rendszer összes elemének a hőmérséklete is magasabb, ezért a hőátadási mechanizmusban egyre több a bizonytalanság, tehát a modell is egyre kevésbé pontos. Az $x_r=5L/8$ rácspozícióban a termodinamikai rendszerünk gerjesztett állapotáért a második akusztikus mód a felelős, ellentétben az alsó rácspozíciók eseteivel, amikor is az első akusztikus mód okozta a rendszerünk instabilitását (Beke, 2010b). A 2. akusztikai módban a rendszer alapfrekvenciája nagyjából duplája az 1. akusztikus módbeli alapfrekvenciának.

A 7.2. ábrát a 6.7. ábrával összehasonlítva megállapíthatjuk, hogy a „továbbfejlesztett” modellből elméletileg kapott adatok jóval pontosabbak. Az „egyszerű” modell alapján a stabilitási görbe értékei „néha” csak „feleakkorák” voltak, mint a kísérletileg kapott értékek. A „továbbfejlesztett” modell alapján sokkal jobb egyezést kaptam; közepes hőteljesítmény és légáram intenzitás mellett a kísérletekből kapott és a modell alapján számított értékek között jóval kisebbek az eltérések, mint az „egyszerű” modell esetén, ezért ez a „továbbfejlesztett” modell jobban alkalmas a valós fizikai rendszer leírására. Túlzottan magas, illetve túlzottan alacsony hőteljesítmény és légáram intenzitás esetén mindkét modell torzít, hiszen itt már olyan fizikai effektusok is felléphetnek (pl. örvényképződés), amellyel egyik modellben sem számoltam (Beke, 2010b).

Röviden összefoglalva elmondható, hogy ebben a részfejezetben egy továbbfejlesztett modellt mutattam be, amely alkalmas arra, hogy segítségével a Rijke csőben lezajló folyamatok esetén a stabilitást az instabilitástól elválasztó határgörbét pontosabban meghatározzuk. A modell alapján kiszámított stabilitási görbéket a kísérletekből kapott stabilitási görbékkel összehasonlítva azt mondhatjuk, hogy a rendszer paramétereinek középső tartományában elfogadható pontossággal írja

le a modell a valós rendszert a stabilitás szempontjából; alacsony és magas légáram intenzitások és hőteljesítmények esetén viszont a modell már kevésbé pontos (Beke, 2010b).

7.6. Hiszterézis

A lineáris átviteli függvény megfelelő módosításával elérhető, hogy a nemlineáris effektusok is „megjelenjenek” a modellben. A hiszterézis jelenségének vizsgálatára legideálisabb hely az $x_r=L/4$ rácspozíció, mivel itt „alakul át” a hő legkönnyebben akusztikus rezgési energiává. A rendszert stabil állapotból könnyen instabil állapotba gerjeszthetjük (pl. növeljük a fűtőteljesítményt), illetve ha instabil a rendszerünk, akkor könnyen stabil állapotba hozhatjuk (pl. csökkentjük a fűtőteljesítményt.)

Hiszterézisnek nevezzük a termodinamikai rendszerünk azon tulajdonságát, hogy a rendszer tranziens állapota nem ugyanazon paramétereknél következik be attól függően, hogy stabilból instabil, illetve instabilból stabil állapotba megy át a rendszerünk. Kritikus teljesítménynek nevezzük azt a teljesítményt, amelynél a rendszer átmegy a másik állapotába. Nagy légáram intenzitás esetén jelentős a különbség a kritikus teljesítmények között az átmenet irányától függően.

Matveev és Culick (2003a) szerint a hiszterézis jelenségére magyarázatot ad az, hogy az átviteli függvény nem monoton függ az akusztikus sebesség fluktuációjától. Az átviteli függvény nagysága mutatja meg, hogy a hő mekkora mértékben alakul át akusztikus energiává: minél nagyobb az átviteli függvény, annál jelentősebb a nem egyenletes hőátadási arány. Mivel a Matveev és Culick (2003a) által kidolgozott módosított átviteli függvény alakja nem monoton, egynél több akusztikus oszcillációs amplitúdó tartozhat ugyanazon energia inputhoz, ami az akusztikus mód kialakulásához szükséges.

A módosított átviteli függvény az elején az akusztikus sebesség fluktuációjának amplitúdójával együtt növekszik, de később már nem monoton a két érték közötti kapcsolat, ezért annak a rendszernek, amelyik lineárisan stabil két egyensúlyi gerjesztett állapota is lehet: egyik az átviteli függvény emelkedő szakaszán, a másik a görbe süllyedő szakaszán (Matveev és Culick, 2003a). Az átviteli függvény növekvő ágához tartozó „egyensúlyi limitált” ciklus nem stabil, mert ha ebben a pontban egy kis eltérés adódik a termoakusztikus energia átalakulás olyan irányú, hogy nem az egyensúlyi helyzetbe viszi vissza a rendszert. (Ezt felfoghatjuk egyfajta pozitív visszacsatolásként.) A módosított átviteli függvény csökkenő ágához tartozó „egyensúlyi limitált” ciklus viszont stabil, mert ha a rendszer kitér az egyensúlyi helyzetből, akkor a rács hőkibocsátása most úgy változik, hogy visszaviszi a rendszert az egyensúlyba (Matveev és Culick, 2003a). (Ezt felfoghatjuk egyfajta negatív visszacsatolásként.)

Alacsony légáram intenzitás értékek mellett nem állíthatjuk egyértelműen, hogy létezik hiszterézis, mivel a kísérletek során a mérési pontosság nem volt elegendő ahhoz, hogy ezt megállapítsuk. A stabil és instabil állapot között van egy keskeny átmeneti tartomány, ami sem nem egyértelműen stabil, sem nem egyértelműen instabil: itt a hang néha megjelenik, néha eltűnik. Magát ezt az átmeneti tartományt is nehéz megtalálni, csak nagyon finom, kis lépésekben történő fűtőteljesítmény növelés, vagy csökkentés esetén találkozhatunk vele.

7.7. A rendszerben kialakuló hang frekvenciáinak eltolódása

Az „egyszerűbb” modellből megkaptam, hogy milyen frekvenciájú alap és felharmonikusok szólhatnak meg a cső gerjesztett állapotaiban. A mérések során azonban azt tapasztaltam, hogy az elméletileg kiszámított frekvenciáktól kicsit eltérnek a mért frekvenciák. Ebben a részfejezetben a modellt tovább finomítom és megpróbálok választ kapni arra, hogy mi lehet az oka a frekvenciák eltolódásának (Beke, 2011a).

A termoakusztikus rendszerünkben az áramlás sebessége sokkal kisebb, mint a csőben kialakuló hang sebessége, azaz a Mach szám (M_a) igen kicsi. (A kísérleteink során mindig $M_a < 1,8 \cdot 10^{-3}$ érték adódott.) Ha a Mach szám sokkal kisebb, mint 1 ($M_a \ll 1$), azaz az áramlás erősen szubszonikus, akkor kihasználhatjuk, hogy a jellemző fizikai mennyiségek fluktuációs komponensei általában jóval kisebbek, mint az adott mennyiség átlagértékei. Az áramlást leírhatjuk dimenzió nélküli differenciálegyenletekkel is (Nicoud és mtsai, 2007; Balasubramanian és Sujith, 2008b). Induljunk ki olyan egyenletekből, amit már előzőleg ismertünk (Beke, 2011a):

$$\rho_0 \frac{\partial u'}{\partial t} + \frac{\partial p'}{\partial x} = 0, \quad (7.58)$$

és

$$\frac{\partial p'}{\partial t} + \gamma p_0 \frac{\partial u'}{\partial x} = (\gamma - 1)q'. \quad (7.59)$$

A differenciálegyenlet-rendszer megoldásához alakítsuk át ezeket az egyenleteket dimenzió nélküli alakra (Beke, 2011a). Ehhez vezessük be a következő dimenzió nélküli mennyiségeket:

Mach szám (a szokásos módon számíthatjuk ki):

$$M_a = \frac{u_0}{v_h}, \quad (7.60a)$$

gáz konstans (a szokásos módon számíthatjuk ki):

$$\gamma = \frac{\rho_0 v_h^2}{p_0}, \quad (7.60b)$$

dimenzió nélküli helykoordináta:

$$\tilde{x} = \frac{1}{L} x, \quad (7.60c)$$

dimenzió nélküli idő:

$$\tilde{t} = \frac{v_h}{L} t, \quad (7.60d)$$

dimenzió nélküli (kör)hullámszám:

$$\tilde{k} = Lk, \quad (7.60e)$$

dimenzió nélküli akusztikus (perturbációs) sebesség:

$$\tilde{u}' = \frac{1}{u_0} u', \quad (7.60f)$$

dimenzió nélküli akusztikus (perturbációs) nyomás:

$$\tilde{p}' = \frac{1}{p_0} p', \quad (7.60g)$$

dimenzió nélküli akusztikus (perturbációs) hőtéljesítmény-sűrűség:

$$\tilde{q}' = \frac{L}{\rho_0 v_h^3} q'. \quad (7.60h)$$

Ha a (7.58) egyenletbe behelyettesítjük a (7.60d) és a (7.60f) egyenletet (Beke, 2011a):

$$\rho_0 \frac{u_0 \partial \tilde{u}'}{\frac{L}{v_h} \partial \tilde{t}} + \frac{p_0 \partial \tilde{p}'}{L \partial \tilde{x}} = 0. \quad (7.61)$$

Szorozzuk mindkét oldalt L -lel, és osszunk p_0 -lal (Beke, 2011a):

$$\frac{\rho_0 u_0 v_h}{p_0} \frac{\partial \tilde{u}'}{\partial \tilde{t}} + \frac{\partial \tilde{p}'}{\partial \tilde{x}} = 0, \quad (7.62)$$

azaz

$$\frac{\rho_0 v_h^2}{p_0} \frac{u_0}{v_h} \frac{\partial \tilde{u}'}{\partial \tilde{t}} + \frac{\partial \tilde{p}'}{\partial \tilde{x}} = 0, \quad (7.63)$$

és a (7.60b) egyenlet behelyettesítése után kapom (Beke, 2011a):

$$\frac{\rho_0 \frac{\gamma p_0}{\rho_0} \frac{u_0}{v_h} \frac{\partial \tilde{u}'}{\partial \tilde{t}} + \frac{\partial \tilde{p}'}{\partial \tilde{x}} = 0, \quad (7.64)$$

az egyszerűsítések elvégzése és (7.60a) behelyettesítése után kapom a dimenzió nélküli differenciálegyenletet (Beke, 2011a):

$$\gamma \cdot M_a \frac{\partial \tilde{u}'}{\partial \tilde{t}} + \frac{\partial \tilde{p}'}{\partial \tilde{x}} = 0. \quad (7.65)$$

Ha a (7.59) egyenletbe behelyettesítjük a (7.60c-h) egyenleteket (Beke, 2011a):

$$\frac{p_0 \partial \tilde{p}'}{\frac{L}{v_h} \partial \tilde{t}} + \gamma p_0 \frac{u_0 \partial \tilde{u}'}{L \partial \tilde{x}} = (\gamma - 1) \frac{\rho_0 v_h^3}{L} \tilde{q}'. \quad (7.66)$$

Szorozzuk mindkét oldalt L -lel, osszunk p_0 -lal, és osszunk v_h -val (Beke, 2011a):

$$\frac{\partial \tilde{p}'}{\partial \tilde{t}} + \gamma \frac{u_0}{v_h} \frac{\partial \tilde{u}'}{\partial \tilde{x}} = (\gamma - 1) \frac{\rho_0 v_h^2}{p_0} \tilde{q}'. \quad (7.67)$$

A (7.60a) és (7.60b) behelyettesítése után kapom a dimenzió nélküli differenciálegyenletet (Beke, 2011a):

$$\frac{\partial \tilde{p}'}{\partial \tilde{t}} + \gamma \cdot M_a \frac{\partial \tilde{u}'}{\partial \tilde{x}} = (\gamma - 1) \gamma \cdot \tilde{q}'. \quad (7.68)$$

Az akusztikus sebesség felírható az N dimenziós Galerkin modellben (Dowling, 1995; Dowling és Stow, 2003):

$$\tilde{u}'(\tilde{x}, \tilde{t}) = \varepsilon' \left(\sum_{n=1}^N \hat{u}_n(\tilde{t}) \cdot \cos(\tilde{k}_n \tilde{x}) \right). \quad (7.69)$$

Deriváljuk ezt a dimenzió nélküli idő szerint:

$$\frac{\partial \tilde{u}'(\tilde{x}, \tilde{t})}{\partial \tilde{t}} = \varepsilon' \left(\sum_{n=1}^N \dot{\tilde{u}}_n(\tilde{t}) \cdot \cos(\tilde{k}_n \tilde{x}) \right), \quad (7.70a)$$

rövidebben:

$$\frac{\partial \tilde{u}'}{\partial \tilde{t}} = \varepsilon' \left(\sum_{n=1}^N \cos(\tilde{k}_n \tilde{x}) \cdot \dot{\tilde{u}}_n \right). \quad (7.70b)$$

Deriváljuk a (7.69) egyenletet a dimenzió nélküli helykoordináta szerint:

$$\frac{\partial \tilde{u}'(\tilde{x}, \tilde{t})}{\partial \tilde{x}} = -\varepsilon' \left(\sum_{n=1}^N \tilde{k}_n \cdot \sin(\tilde{k}_n \tilde{x}) \cdot \dot{\tilde{u}}_n(\tilde{t}) \right), \quad (7.71a)$$

rövidebben:

$$\frac{\partial \tilde{u}'}{\partial \tilde{x}} = -\varepsilon' \left(\sum_{n=1}^N \tilde{k}_n \cdot \sin(\tilde{k}_n \tilde{x}) \cdot \dot{\tilde{u}}_n \right). \quad (7.71b)$$

Az akusztikus nyomás felírható az N dimenziós Galerkin modellben (Dowling, 1995; Dowling és Stow, 2003):

$$\tilde{p}'(\tilde{x}, \tilde{t}) = -\varepsilon' \left(\sum_{n=1}^N \frac{\gamma \cdot M_a}{\tilde{k}_n} \dot{\tilde{u}}_n(\tilde{t}) \cdot \sin(\tilde{k}_n \tilde{x}) \right). \quad (7.72)$$

Deriváljuk ezt a dimenzió nélküli idő szerint:

$$\frac{\partial \tilde{p}'(\tilde{x}, \tilde{t})}{\partial \tilde{t}} = -\varepsilon' \left(\sum_{n=1}^N \frac{\gamma \cdot M_a}{\tilde{k}_n} \frac{\partial^2 \dot{\tilde{u}}_n(\tilde{t})}{\partial \tilde{t}^2} \cdot \sin(\tilde{k}_n \tilde{x}) \right), \quad (7.73a)$$

rövidebben

$$\frac{\partial \tilde{p}'}{\partial \tilde{t}} = -\varepsilon' \cdot \gamma \cdot M_a \cdot \left(\sum_{n=1}^N \frac{1}{\tilde{k}_n} \cdot \sin(\tilde{k}_n \tilde{x}) \frac{\partial^2 \dot{\tilde{u}}_n}{\partial \tilde{t}^2} \right). \quad (7.73b)$$

Deriváljuk a (7.72) egyenletet a dimenzió nélküli helykoordináta szerint:

$$\frac{\partial \tilde{p}'(\tilde{x}, \tilde{t})}{\partial \tilde{x}} = -\varepsilon' \left(\sum_{n=1}^N \frac{\gamma \cdot M_a}{\tilde{k}_n} \dot{\tilde{u}}_n(\tilde{t}) \cdot \tilde{k}_n \cdot \cos(\tilde{k}_n \tilde{x}) \right), \quad (7.74a)$$

rövidebben

$$\frac{\partial \tilde{p}'}{\partial \tilde{x}} = -\varepsilon' \cdot \gamma \cdot M_a \cdot \left(\sum_{n=1}^N \dot{\tilde{u}}_n \cos(\tilde{k}_n \tilde{x}) \right), \quad (7.74b)$$

ahol $\tilde{k}_n = n\pi$, a dimenzió nélküli hullámszám, ε' a sebesség perturbációjának rendje, $\dot{\tilde{u}}_n$ a dimenzió nélküli sebesség amplitúdója az n -ik Galerkin módban.

Ha a (7.65) egyenletbe behelyettesítünk a (7.70b) és a (7.74b) egyenleteket:

$$\varepsilon' \cdot \gamma \cdot M_a \left(\sum_{n=1}^N \cos(\tilde{k}_n \tilde{x}) \cdot \dot{\tilde{u}}_n \right) - \varepsilon' \cdot \gamma \cdot M_a \cdot \left(\sum_{n=1}^N \dot{\tilde{u}}_n \cos(\tilde{k}_n \tilde{x}) \right) = 0, \quad (7.75)$$

azaz látható, hogy a (7.69) és a (7.72) egyenletek kielégítik a (7.65) egyenletet.

A (7.68) egyenletbe behelyettesítünk a (7.71b) és a (7.73b) egyenleteket (Beke, 2011a):

$$-\varepsilon' \cdot \gamma \cdot M_a \cdot \left(\sum_{n=1}^N \frac{1}{\tilde{k}_n} \cdot \sin(\tilde{k}_n \tilde{x}) \frac{\partial^2 \dot{\tilde{u}}_n}{\partial \tilde{t}^2} \right) - \gamma \cdot M_a \cdot \varepsilon' \left(\sum_{n=1}^N \tilde{k}_n \cdot \sin(\tilde{k}_n \tilde{x}) \cdot \dot{\tilde{u}}_n \right) = \gamma(\gamma - 1) \tilde{q}'. \quad (7.76)$$

A sebesség és a hőátadás oszcillációja közötti kölcsönhatást vizsgálta Heckl (1990), illetve Yoon és mtsai (1998, 2001); javaslatuk alapján írhatjuk:

$$q' = \mu \left\{ \frac{2L_r(T_r - T_0)}{S\sqrt{3}} \sqrt{\pi\lambda_l c_V \rho_0 u_0 r_{drót}} \left[\sqrt{\frac{1}{3} + \tilde{u}'(\tilde{t} - \tilde{\tau})} - \sqrt{\frac{1}{3}} \right] \frac{1}{L} \delta(\tilde{x} - \tilde{x}_r) \right\}, \quad (7.77)$$

ahol μ az áramlás rendje (Culick, 1997; Kedia, 2008), L_r a rácsot alkotó drótdarabok hossza, T_r a rács abszolút hőmérséklete, T_0 a csőben lévő levegő átlaghőmérséklete, S a cső belső keresztmetszete, λ_l a levegő hővezető képessége, c_V a levegő izochor fajhője (718 J/kgK), ρ_0 a levegő átlagos sűrűsége a csőben, u_0 az áramlás átlagos sebessége a csőben, $r_{drót}$ a rácsot alkotó drót sugara, $\tilde{\tau}$ pedig egy dimenzió nélküli idő késedelem.

A (7.77) egyenletet a (7.68)-ba helyettesítve kapjuk (Beke, 2011a):

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tilde{p}'}{\partial \tilde{t}} + \gamma \cdot M_a \frac{\partial \tilde{u}'}{\partial \tilde{x}} &= (\gamma - 1) \gamma \cdot \tilde{q}' = \\ &= (\gamma - 1) \gamma \frac{L}{\rho_0 v_h^3} \mu \left\{ \frac{2L_r(T_r - T_0)}{S\sqrt{3}} \sqrt{\pi\lambda_l c_V \rho_0 u_0 r_{drót}} \left[\sqrt{\frac{1}{3} + \tilde{u}'(\tilde{t} - \tilde{\tau})} - \sqrt{\frac{1}{3}} \right] \frac{1}{L} \delta(\tilde{x} - \tilde{x}_r) \right\} = \\ &= \mu \left\{ \frac{(\gamma - 1) \gamma}{\rho_0 v_h^3} \frac{2L_r(T_r - T_0)}{S\sqrt{3}} \sqrt{\pi\lambda_l c_V \rho_0 u_0 r_{drót}} \left[\sqrt{\frac{1}{3} + \tilde{u}'(\tilde{t} - \tilde{\tau})} - \sqrt{\frac{1}{3}} \right] \delta(\tilde{x} - \tilde{x}_r) \right\} = \\ &= \mu \left\{ a \left[\sqrt{\frac{1}{3} + \tilde{u}'(\tilde{t} - \tilde{\tau})} - \sqrt{\frac{1}{3}} \right] \delta(\tilde{x} - \tilde{x}_r) \right\}, \end{aligned} \quad (7.78)$$

ahol az a konstans (ha feltesszük, hogy a rács hőmérséklete és a csőben lévő levegő átlaghőmérséklete közötti hőmérséklet különbség előbb-utóbb állandóvá válik):

$$a = \frac{\gamma(\gamma - 1)2L_r(T_r - T_0)}{\rho_0 v_h^3 S\sqrt{3}} \sqrt{\pi\lambda_l c_V \rho_0 u_0 r_{drót}}. \quad (7.79)$$

A (7.76), a (7.78) és a (7.79) egyenletekből kapjuk az egyszerűsítések után:

$$\frac{d^2 \tilde{u}_n}{d\tilde{t}^2} + \tilde{k}_n^2 \tilde{u}_n = -\frac{\mu}{\varepsilon'} \left\{ \frac{2a\tilde{k}_n}{\gamma M_a} \left[\sqrt{\frac{1}{3} + \tilde{u}'(\tilde{t} - \tilde{\tau})} - \sqrt{\frac{1}{3}} \right] \sin(\tilde{k}_n \tilde{x}_r) \right\}, \quad (7.80)$$

és n jelenti a n -ik Galerkin módot ($n=1, 2, \dots, N$). Ha a csillapítást is figyelembe vesszük:

$$\frac{d^2 \tilde{u}_n}{d\tilde{t}^2} + 2\tilde{\xi}_n \tilde{k}_n \dot{\tilde{u}}_n + \tilde{k}_n^2 \tilde{u}_n = -\frac{\mu}{\varepsilon'} \left\{ \frac{2a\tilde{k}_n}{\gamma M_a} \left[\sqrt{\frac{1}{3} + \tilde{u}'(\tilde{t} - \tilde{\tau})} - \sqrt{\frac{1}{3}} \right] \sin(\tilde{k}_n \tilde{x}_r) \right\}, \quad (7.81)$$

ahol a csillapítási konstansot ($\tilde{\xi}_n$) megadhatjuk Kedia (2008) szerint:

$$\tilde{\xi}_n = \frac{1}{2\pi} \left(b_1 \frac{\tilde{k}_n}{\tilde{k}_1} + b_2 \sqrt{\frac{\tilde{k}_1}{\tilde{k}_n}} \right), \quad (7.82)$$

és $\tilde{k}_n$ az n -ik Galerkin módhoz tartozó dimenzió nélküli hullámszámot jelenti. A b_1 és b_2 értéke a mi Rijke csövünkhöz hasonló csövek esetén tipikusan 0 és 0,2 közötti érték szokott lenni. (Numerikus szimulációval lehet megkeresni, hogy milyen értékek esetén felel meg legjobban a kísérleti eredményeknek. Egy lehetséges egyszerű megoldás, ha 0-tól indulva 0,01-os ugrásokkal „végig-próbáljuk” mindkét változót 0,2-ig, majd kiválasztjuk a nekünk legjobban megfelelőt. Ezt

persze lehet „automatizálni”, és a vizsgálati határt is növelhetjük, illetve a „lépésközt” is finomíthatjuk, ha pontosabb megoldást szeretnénk; de az előbbi adatok általában elfogadhatóak.) Mivel a (7.81) egyenletben szereplő dimenzió nélküli sebesség perturbációja ($\tilde{u}'$) kis érték, ezért sorba fejthetjük (Beke, 2011a):

$$\begin{aligned} \sqrt{\left| \frac{1}{3} + \tilde{u}'(\tilde{t} - \tilde{\tau}) \right|} &= \left| \frac{1}{3} + \tilde{u}'(\tilde{t} - \tilde{\tau}) \right|^{1/2} \approx \\ &\approx \left(\frac{1}{3} \right)^{1/2} + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{3} \right)^{-1/2} \cdot \tilde{u}'(\tilde{t} - \tilde{\tau}) = \sqrt{\frac{1}{3}} + \frac{\sqrt{3}}{2} \tilde{u}'(\tilde{t} - \tilde{\tau}). \end{aligned} \quad (7.83)$$

Helyettesítsük ezt be a (7.81) egyenletbe (Beke, 2011a):

$$\frac{d^2 \tilde{u}_n}{d\tilde{t}^2} + 2\tilde{\xi}_n \tilde{k}_n \dot{\tilde{u}}_n + \tilde{k}_n^2 \tilde{u}_n = -\frac{\mu}{\varepsilon'} \left\{ \frac{2a\tilde{k}_n}{\gamma M_a} \frac{\sqrt{3}}{2} \tilde{u}'(\tilde{t} - \tilde{\tau}) \sin(\tilde{k}_n \tilde{x}_r) \right\}, \quad (7.84)$$

így a (7.81) egyenletet felírhatjuk a következő alakban (Beke, 2011a):

$$\frac{d^2 \tilde{u}_n}{d\tilde{t}^2} + 2\tilde{\xi}_n \tilde{k}_n \dot{\tilde{u}}_n + \tilde{k}_n^2 \tilde{u}_n = -\frac{\mu}{\varepsilon'} \left\{ \tilde{k}_n \tilde{u}'_r(\tilde{t} - \tilde{\tau}) \sin(\tilde{k}_n \tilde{x}_r) \right\} \quad (7.85)$$

ahol

$$c = \frac{a\sqrt{3}}{\gamma M_a}. \quad (7.86)$$

Ha a (7.85) egyenletbe behelyettesítjük (7.69)-et, és a (kis értékű) $\tilde{\tau}$ dimenzió nélküli idő-késedelmet elhanyagoljuk, akkor az első N Galerkin módra kapjuk:

$$\frac{d^2 \tilde{u}_n}{d\tilde{t}^2} + 2\tilde{\xi}_n \tilde{k}_n \dot{\tilde{u}}_n + \tilde{k}_n^2 \tilde{u}_n = -\frac{\mu}{\varepsilon'} \left\{ c \tilde{k}_n \sin(\tilde{k}_n \tilde{x}_r) \sum_{j=1}^N \tilde{u}_j \cos(\tilde{k}_j \tilde{x}_r) \right\}. \quad (7.87)$$

Ha a csillapítástól eltekintünk egy időre, akkor írhatjuk:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \tilde{u}_1}{d\tilde{t}^2} + \tilde{k}_1^2 \tilde{u}_1 &= -\mu \left\{ \tilde{k}_1 \sin(\tilde{k}_1 \tilde{x}_r) \left[\tilde{u}_1 \cos(\tilde{k}_1 \tilde{x}_r) + \tilde{u}_2 \cos(\tilde{k}_2 \tilde{x}_r) + \dots + \tilde{u}_N \cos(\tilde{k}_N \tilde{x}_r) \right] \right\} \\ \frac{d^2 \tilde{u}_2}{d\tilde{t}^2} + \tilde{k}_2^2 \tilde{u}_2 &= -\mu \left\{ \tilde{k}_2 \sin(\tilde{k}_2 \tilde{x}_r) \left[\tilde{u}_1 \cos(\tilde{k}_1 \tilde{x}_r) + \tilde{u}_2 \cos(\tilde{k}_2 \tilde{x}_r) + \dots + \tilde{u}_N \cos(\tilde{k}_N \tilde{x}_r) \right] \right\} \\ &\dots \\ \frac{d^2 \tilde{u}_N}{d\tilde{t}^2} + \tilde{k}_N^2 \tilde{u}_N &= -\mu \left\{ \tilde{k}_N \sin(\tilde{k}_N \tilde{x}_r) \left[\tilde{u}_1 \cos(\tilde{k}_1 \tilde{x}_r) + \tilde{u}_2 \cos(\tilde{k}_2 \tilde{x}_r) + \dots + \tilde{u}_N \cos(\tilde{k}_N \tilde{x}_r) \right] \right\} \end{aligned} \quad (7.88)$$

Ezt felírhatjuk a következő alakban:

$$\begin{pmatrix} \frac{d^2}{d\tilde{t}^2} + (\tilde{k}_1^2 + \mu\tilde{A}_{11}) & \mu\tilde{A}_{12} & \mu\tilde{A}_{13} & \dots & \mu\tilde{A}_{1N} \\ \mu\tilde{A}_{21} & \frac{d^2}{d\tilde{t}^2} + (\tilde{k}_2^2 + \mu\tilde{A}_{22}) & \mu\tilde{A}_{23} & \dots & \mu\tilde{A}_{2N} \\ \mu\tilde{A}_{31} & \mu\tilde{A}_{32} & \frac{d^2}{d\tilde{t}^2} + (\tilde{k}_3^2 + \mu\tilde{A}_{33}) & \dots & \mu\tilde{A}_{3N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mu\tilde{A}_{N1} & \mu\tilde{A}_{N2} & \mu\tilde{A}_{N3} & \dots & \frac{d^2}{d\tilde{t}^2} + (\tilde{k}_N^2 + \mu\tilde{A}_{NN}) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \hat{u}_1 \\ \hat{u}_2 \\ \hat{u}_3 \\ \dots \\ \hat{u}_N \end{pmatrix} = 0, \quad (7.89)$$

ahol

$$\tilde{A}_{ij} = c\tilde{k}_i \sin(\tilde{k}_i \tilde{x}_r) \cos(\tilde{k}_j \tilde{x}_r), \quad (7.90)$$

és az indexek végigfutnak az összes Galerkin módon, azaz $i=1, 2, \dots, N$, illetve $j=1, 2, \dots, N$. Az egyszerűség kedvéért Culick (1997) és Kedia (2008) alapján feltételeztem, hogy a különböző Galerkin módok sebesség amplitúdójai egyforma módon függenek az időtől:

$$\hat{u}_n = \hat{\hat{u}}_n e^{\lambda \tilde{t}}, \quad (7.91)$$

ahol $\hat{\hat{u}}_n$ az n -ik mód dimenzió nélküli sebesség amplitúdójának kiindulási értéke a számítási modellben, a λ arányossági tényező, és $n=1, 2, \dots, N$. Ezek alapján (Beke, 2011a):

$$\frac{d^2 \hat{u}_n}{d\tilde{t}^2} = \lambda^2 \hat{\hat{u}}_n e^{\lambda \tilde{t}} = \lambda^2 \hat{u}_n. \quad (7.92)$$

A következő lépés, hogy megkeressük a (7.89) egyenlet (közelítő) megoldásait valamilyen numerikus módszerrel. Ha ez sikerül, akkor λ^2 -re kapunk valamilyen (közelítő) értéket. Ez általában a következő alakban is felírható:

$$\lambda^2 \approx -k^2(1 + \alpha), \quad (7.93)$$

ahol α általában sokkal kisebb, mint 1, ezért felfoghatjuk akár perturbációs tagként is:

$$\lambda^2 \cong -\tilde{k}_p^2, \quad (7.94)$$

ahol a p alsó index a perturbációra utal. A (7.93) és a (7.94) alapján írhatjuk:

$$\tilde{k}_p = \tilde{k} \sqrt{1 + \alpha}. \quad (7.95)$$

Vizsgáljuk meg az (7.89) egyenletrendszer részletesebben az első három Galerkin módra!

$$\begin{pmatrix} \frac{d^2}{d\tilde{t}^2} + (\tilde{k}_1^2 + \mu\tilde{A}_{11}) & \mu\tilde{A}_{12} & \mu\tilde{A}_{13} \\ \mu\tilde{A}_{21} & \frac{d^2}{d\tilde{t}^2} + (\tilde{k}_2^2 + \mu\tilde{A}_{22}) & \mu\tilde{A}_{23} \\ \mu\tilde{A}_{31} & \mu\tilde{A}_{32} & \frac{d^2}{d\tilde{t}^2} + (\tilde{k}_3^2 + \mu\tilde{A}_{33}) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \hat{u}_1 \\ \hat{u}_2 \\ \hat{u}_3 \end{pmatrix} = 0, \quad (7.96)$$

és

$$\begin{aligned}
\tilde{A}_{11} &= c\tilde{k}_1 \sin(\tilde{k}_1 \tilde{x}_r) \cos(\tilde{k}_1 \tilde{x}_r), \\
\tilde{A}_{12} &= c\tilde{k}_1 \sin(\tilde{k}_1 \tilde{x}_r) \cos(\tilde{k}_2 \tilde{x}_r), \\
\tilde{A}_{13} &= c\tilde{k}_1 \sin(\tilde{k}_1 \tilde{x}_r) \cos(\tilde{k}_3 \tilde{x}_r), \\
\tilde{A}_{21} &= c\tilde{k}_2 \sin(\tilde{k}_2 \tilde{x}_r) \cos(\tilde{k}_1 \tilde{x}_r), \\
\tilde{A}_{22} &= c\tilde{k}_2 \sin(\tilde{k}_2 \tilde{x}_r) \cos(\tilde{k}_2 \tilde{x}_r), \\
\tilde{A}_{23} &= c\tilde{k}_2 \sin(\tilde{k}_2 \tilde{x}_r) \cos(\tilde{k}_3 \tilde{x}_r), \\
\tilde{A}_{31} &= c\tilde{k}_3 \sin(\tilde{k}_3 \tilde{x}_r) \cos(\tilde{k}_1 \tilde{x}_r), \\
\tilde{A}_{32} &= c\tilde{k}_3 \sin(\tilde{k}_3 \tilde{x}_r) \cos(\tilde{k}_2 \tilde{x}_r), \\
\tilde{A}_{33} &= c\tilde{k}_3 \sin(\tilde{k}_3 \tilde{x}_r) \cos(\tilde{k}_3 \tilde{x}_r).
\end{aligned} \tag{7.97}$$

A (7.89) és a (7.92) egyenletek alapján írhatjuk:

$$\begin{pmatrix} \lambda^2 + (\tilde{k}_1^2 + \mu\tilde{A}_{11}) & \mu\tilde{A}_{12} & \mu\tilde{A}_{13} \\ \mu\tilde{A}_{21} & \lambda^2 + (\tilde{k}_2^2 + \mu\tilde{A}_{22}) & \mu\tilde{A}_{23} \\ \mu\tilde{A}_{31} & \mu\tilde{A}_{32} & \lambda^2 + (\tilde{k}_3^2 + \mu\tilde{A}_{33}) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \hat{u}_1 \\ \hat{u}_2 \\ \hat{u}_3 \end{pmatrix} = 0. \tag{7.98}$$

Ez λ^2 szerint harmadfokú egyenletre vezet, amit megoldhatunk pl. a Cardano képlet segítségével. A (közelítő) megoldást akár számítógéppel is megkereshetjük (pl. Excelben).

Egyszerűbb a helyzetünk, ha csak az első két Galerkin módot vizsgáljuk (Beke, 2011a):

$$\begin{pmatrix} \frac{d^2}{d\tilde{t}^2} + (\tilde{k}_1^2 + \mu\tilde{A}_{11}) & \mu\tilde{A}_{12} \\ \mu\tilde{A}_{21} & \frac{d^2}{d\tilde{t}^2} + (\tilde{k}_2^2 + \mu\tilde{A}_{22}) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \hat{u}_1 \\ \hat{u}_2 \end{pmatrix} = 0, \tag{7.99}$$

azaz

$$\begin{pmatrix} \lambda^2 + (\tilde{k}_1^2 + \mu\tilde{A}_{11}) & \mu\tilde{A}_{12} \\ \mu\tilde{A}_{21} & \lambda^2 + (\tilde{k}_2^2 + \mu\tilde{A}_{22}) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \hat{u}_1 \\ \hat{u}_2 \end{pmatrix} = 0, \tag{7.100}$$

és λ a sajátértéket jelenti. A (7.100) λ^2 szerint másodfokú egyenlet (Beke, 2011a):

$$\lambda^4 + [(\tilde{k}_1^2 + \mu\tilde{A}_{11}) + (\tilde{k}_2^2 + \mu\tilde{A}_{22})]\lambda^2 + (\tilde{k}_1^2 + \mu\tilde{A}_{11}) \cdot (\tilde{k}_2^2 + \mu\tilde{A}_{22}) - \mu^2 \tilde{A}_{12} \tilde{A}_{21} = 0. \tag{7.101}$$

A megoldásai:

$$\lambda_1^2 = \frac{1}{2} \left[-(\tilde{k}_1^2 + \tilde{k}_2^2 + \mu\tilde{A}_{11} + \mu\tilde{A}_{22}) - \tilde{D}^* \right] \tag{7.102a}$$

és

$$\lambda_2^2 = \frac{1}{2} \left[-(\tilde{k}_1^2 + \tilde{k}_2^2 + \mu\tilde{A}_{11} + \mu\tilde{A}_{22}) + \tilde{D}^* \right] \tag{7.102b}$$

ahol

$$\begin{aligned}
\tilde{D}^* &= \\
&= \sqrt{(\tilde{k}_1^2 + \tilde{k}_2^2 + \mu\tilde{A}_{11} + \mu\tilde{A}_{22})^2 - 4(\tilde{k}_1^2 \tilde{k}_2^2 + \tilde{k}_1^2 \mu\tilde{A}_{22} + \tilde{k}_2^2 \mu\tilde{A}_{11} + \mu^2 \tilde{A}_{11} \tilde{A}_{22} - \mu^2 \tilde{A}_{21} \tilde{A}_{12})}
\end{aligned} \tag{7.102c}$$

Másik módszer az lehet, ha a (7.100) egyenlet megoldására perturbációs eljárást alkalmazunk (Beke, 2011a):

$$\begin{aligned}\lambda_{1,2p}^2 &= \frac{(\tilde{k}_1^2 + \mu\tilde{A}_{11}) + (\tilde{k}_2^2 + \mu\tilde{A}_{22})}{-2} \pm \\ &\pm \frac{1}{2} \sqrt{(\tilde{k}_1^2 + \mu\tilde{A}_{11}) + (\tilde{k}_2^2 + \mu\tilde{A}_{22})^2 - 4(\tilde{k}_1^2 + \mu\tilde{A}_{11})(\tilde{k}_2^2 + \mu\tilde{A}_{22}) - \mu^2 \tilde{A}_{12} \tilde{A}_{21}} = \\ &= \frac{(\tilde{k}_1^2 + \mu\tilde{A}_{11}) + (\tilde{k}_2^2 + \mu\tilde{A}_{22})}{-2} \pm \frac{(\tilde{k}_1^2 + \mu\tilde{A}_{11}) - (\tilde{k}_2^2 + \mu\tilde{A}_{22})}{2} \sqrt{1 + \frac{4\mu^2 \tilde{A}_{12} \tilde{A}_{21}}{(\tilde{k}_1^2 + \mu\tilde{A}_{11}) - (\tilde{k}_2^2 + \mu\tilde{A}_{22})^2}},\end{aligned}\quad (7.103)$$

ahol a p alsó index a perturbációra utal. Mivel a gyökös kifejezésben szereplő tört értéke jóval kisebb, mint 1, azaz a gyökjel alatti kifejezés értéke közel van 1-hez, ezért sorba fejthetjük a gyökös kifejezést (Beke, 2011a):

$$\begin{aligned}&\sqrt{1 + \frac{4\mu^2 \tilde{A}_{12} \tilde{A}_{21}}{(\tilde{k}_1^2 + \mu\tilde{A}_{11}) - (\tilde{k}_2^2 + \mu\tilde{A}_{22})^2}} \cong \\ &\cong 1 + \frac{2\mu^2 \tilde{A}_{12} \tilde{A}_{21}}{(\tilde{k}_1^2 + \mu\tilde{A}_{11}) - (\tilde{k}_2^2 + \mu\tilde{A}_{22})^2} - \frac{2(\mu^2 \tilde{A}_{12} \tilde{A}_{21})^2}{(\tilde{k}_1^2 + \mu\tilde{A}_{11}) - (\tilde{k}_2^2 + \mu\tilde{A}_{22})^4}.\end{aligned}\quad (7.104)$$

A (7.104)-et behelyettesítettem a (7.103) egyenletbe, így kaptam az egyik gyököt (Beke, 2011a):

$$\begin{aligned}\lambda_{1p}^2 &\cong \frac{(\tilde{k}_1^2 + \mu\tilde{A}_{11}) + (\tilde{k}_2^2 + \mu\tilde{A}_{22})}{-2} + \\ &- \frac{(\tilde{k}_1^2 + \mu\tilde{A}_{11}) - (\tilde{k}_2^2 + \mu\tilde{A}_{22})}{2} \left(1 + \frac{2\mu^2 \tilde{A}_{12} \tilde{A}_{21}}{(\tilde{k}_1^2 + \mu\tilde{A}_{11}) - (\tilde{k}_2^2 + \mu\tilde{A}_{22})^2} \right) + \\ &+ \frac{(\tilde{k}_1^2 + \mu\tilde{A}_{11}) - (\tilde{k}_2^2 + \mu\tilde{A}_{22})}{2} \frac{2(\mu^2 \tilde{A}_{12} \tilde{A}_{21})^2}{(\tilde{k}_1^2 + \mu\tilde{A}_{11}) - (\tilde{k}_2^2 + \mu\tilde{A}_{22})^4} = \\ &= -(\tilde{k}_1^2 + \mu\tilde{A}_{11}) - \frac{\mu^2 \tilde{A}_{12} \tilde{A}_{21}}{(\tilde{k}_1^2 + \mu\tilde{A}_{11}) - (\tilde{k}_2^2 + \mu\tilde{A}_{22})} + \frac{(\mu^2 \tilde{A}_{12} \tilde{A}_{21})^2}{(\tilde{k}_1^2 + \mu\tilde{A}_{11}) - (\tilde{k}_2^2 + \mu\tilde{A}_{22})^3},\end{aligned}\quad (7.105)$$

mivel az utolsó tag már nagyon kicsi, ezért elhagyhatjuk (Beke, 2011a):

$$\begin{aligned}\lambda_{1p}^2 &\approx -\tilde{k}_1^2 \left[1 + \frac{\mu\tilde{A}_{11}}{\tilde{k}_1^2} + \frac{\mu^2 \tilde{A}_{12} \tilde{A}_{21}}{\tilde{k}_1^4 \left(1 + \frac{\mu\tilde{A}_{11}}{\tilde{k}_1^2} \right) - \tilde{k}_2^2 \tilde{k}_1^2 \left(1 + \frac{\mu\tilde{A}_{22}}{\tilde{k}_2^2} \right)} \right] \approx \\ &\approx -\tilde{k}_1^2 \left[1 + \frac{\mu\tilde{A}_{11}}{\tilde{k}_1^2} + \frac{\mu^2 \tilde{A}_{12} \tilde{A}_{21}}{\tilde{k}_1^2 (\tilde{k}_1^2 - \tilde{k}_2^2)} \right].\end{aligned}\quad (7.106)$$

A (7.93) és (7.94) egyenlet szerint ezt felírhatjuk a normalizált hullámszám perturbációjaként (Beke, 2011a):

$$\lambda_{1p}^2 \cong -\tilde{k}_1^2_p = -\tilde{k}_1^2 \left[1 + \frac{\mu\tilde{A}_{11}}{\tilde{k}_1^2} + \frac{\mu^2 \tilde{A}_{12} \tilde{A}_{21}}{\tilde{k}_1^2 (\tilde{k}_1^2 - \tilde{k}_2^2)} \right],\quad (7.107)$$

azaz a (7.95) alapján kaptam (Beke, 2011a):

$$\tilde{k}_{1p} \cong \tilde{k}_1 \sqrt{1 + \frac{\mu \tilde{A}_{11}}{\tilde{k}_1^2} + \frac{\mu^2 \tilde{A}_{12} \tilde{A}_{21}}{\tilde{k}_1^2 (\tilde{k}_1^2 - \tilde{k}_2^2)}}} \quad (7.108)$$

Ezt sorba fejthetjük, mivel a négyzetgyök alatti kifejezés alig különbözik 1-től (Beke, 2011a):

$$\tilde{k}_{1p} \cong \tilde{k}_1 \left[1 + \frac{\mu \tilde{A}_{11}}{2\tilde{k}_1^2} + \frac{\mu^2 \tilde{A}_{12} \tilde{A}_{21}}{2\tilde{k}_1^2 (\tilde{k}_1^2 - \tilde{k}_2^2)} - \frac{1}{8} \left(\frac{\mu \tilde{A}_{11}}{\tilde{k}_1^2} + \frac{\mu^2 \tilde{A}_{12} \tilde{A}_{21}}{\tilde{k}_1^2 (\tilde{k}_1^2 - \tilde{k}_2^2)} \right)^2 \right], \quad (7.109)$$

a nagyon kicsi tagokat elhanyagoltam, így kaptam (Beke, 2011a):

$$\tilde{k}_{1p} \approx \tilde{k}_1 \left[1 + \frac{\mu \tilde{A}_{11}}{2\tilde{k}_1^2} + \frac{\mu^2 \tilde{A}_{12} \tilde{A}_{21}}{2\tilde{k}_1^2 (\tilde{k}_1^2 - \tilde{k}_2^2)} - \frac{(\mu \tilde{A}_{11})^2}{8\tilde{k}_1^4} \right]. \quad (7.110)$$

A (7.104)-et behelyettesítettem a (7.103) egyenletbe, így megkaptam a másik gyököt is (Beke, 2011a):

$$\begin{aligned} \lambda_{2p}^2 &\cong \frac{(\tilde{k}_1^2 + \mu \tilde{A}_{11}) + (\tilde{k}_2^2 + \mu \tilde{A}_{22})}{-2} + \\ &+ \frac{(\tilde{k}_1^2 + \mu \tilde{A}_{11}) - (\tilde{k}_2^2 + \mu \tilde{A}_{22})}{2} \left(1 + \frac{2\mu^2 \tilde{A}_{12} \tilde{A}_{21}}{(\tilde{k}_1^2 + \mu \tilde{A}_{11}) - (\tilde{k}_2^2 + \mu \tilde{A}_{22})} \right) + \\ &- \frac{(\tilde{k}_1^2 + \mu \tilde{A}_{11}) - (\tilde{k}_2^2 + \mu \tilde{A}_{22})}{2} \frac{2(\mu^2 \tilde{A}_{12} \tilde{A}_{21})}{((\tilde{k}_1^2 + \mu \tilde{A}_{11}) - (\tilde{k}_2^2 + \mu \tilde{A}_{22}))^3} = \\ &= -(\tilde{k}_2^2 + \mu \tilde{A}_{22}) + \frac{\mu^2 \tilde{A}_{12} \tilde{A}_{21}}{(\tilde{k}_1^2 + \mu \tilde{A}_{11}) - (\tilde{k}_2^2 + \mu \tilde{A}_{22})} - \frac{(\mu^2 \tilde{A}_{12} \tilde{A}_{21})^2}{((\tilde{k}_1^2 + \mu \tilde{A}_{11}) - (\tilde{k}_2^2 + \mu \tilde{A}_{22}))^3} = \\ &= -(\tilde{k}_2^2 + \mu \tilde{A}_{22}) - \frac{\mu^2 \tilde{A}_{12} \tilde{A}_{21}}{(\tilde{k}_2^2 + \mu \tilde{A}_{22}) - (\tilde{k}_1^2 + \mu \tilde{A}_{11})} + \frac{(\mu^2 \tilde{A}_{12} \tilde{A}_{21})^2}{((\tilde{k}_2^2 + \mu \tilde{A}_{22}) - (\tilde{k}_1^2 + \mu \tilde{A}_{11}))^3}. \end{aligned} \quad (7.111)$$

Mivel az utolsó tag már nagyon kicsi, ezért elhagyhatjuk (Beke, 2011a):

$$\begin{aligned} \lambda_{2p}^2 &\cong -\tilde{k}_2^2 \left[1 + \frac{\mu \tilde{A}_{22}}{\tilde{k}_2^2} + \frac{\mu^2 \tilde{A}_{12} \tilde{A}_{21}}{\tilde{k}_2^4 \left(1 + \frac{\mu \tilde{A}_{22}}{\tilde{k}_2^2} \right) - \tilde{k}_2^2 \tilde{k}_1^2 \left(1 + \frac{\mu \tilde{A}_{11}}{\tilde{k}_1^2} \right)} \right] \approx \\ &\approx -\tilde{k}_2^2 \left[1 + \frac{\mu \tilde{A}_{22}}{\tilde{k}_2^2} + \frac{\mu^2 \tilde{A}_{12} \tilde{A}_{21}}{\tilde{k}_2^2 (\tilde{k}_2^2 - \tilde{k}_1^2)} \right]. \end{aligned} \quad (7.112)$$

A (7.93) és (7.94) egyenlet szerint ezt felírhatjuk a normalizált hullámszám perturbációjaként (Beke, 2011a):

$$\lambda_{2p}^2 \cong -\tilde{k}_{2p}^2 = -\tilde{k}_2^2 \left[1 + \frac{\mu \tilde{A}_{22}}{\tilde{k}_2^2} + \frac{\mu^2 \tilde{A}_{12} \tilde{A}_{21}}{\tilde{k}_2^2 (\tilde{k}_2^2 - \tilde{k}_1^2)} \right], \quad (7.113)$$

azaz a (7.95) alapján kaptam (Beke, 2011a):

$$\tilde{k}_{2p} \cong \tilde{k}_2 \sqrt{1 + \frac{\mu \tilde{A}_{22}}{\tilde{k}_2^2} + \frac{\mu^2 \tilde{A}_{12} \tilde{A}_{21}}{\tilde{k}_2^2 (\tilde{k}_2^2 - \tilde{k}_1^2)}}} \quad (7.114)$$

Ezt sorba fejtettem, mivel a négyzetgyök alatti kifejezés alig különbözik 1-től (Beke, 2011a):

$$\tilde{k}_{2p} \cong \tilde{k}_2 \left[1 + \frac{\mu \tilde{A}_{22}}{2\tilde{k}_2^2} + \frac{\mu^2 \tilde{A}_{12} \tilde{A}_{21}}{2\tilde{k}_2^2 (\tilde{k}_2^2 - \tilde{k}_1^2)} - \frac{1}{8} \left(\frac{\mu \tilde{A}_{22}}{\tilde{k}_2^2} + \frac{\mu^2 \tilde{A}_{12} \tilde{A}_{21}}{\tilde{k}_2^2 (\tilde{k}_2^2 - \tilde{k}_1^2)} \right)^2 \right], \quad (7.115)$$

a nagyon kicsi tagokat elhanyagoltam (Beke, 2011a):

$$\tilde{k}_{2p} \approx \tilde{k}_2 \left[1 + \frac{\mu \tilde{A}_{22}}{2\tilde{k}_2^2} + \frac{\mu^2 \tilde{A}_{12} \tilde{A}_{21}}{2\tilde{k}_2^2 (\tilde{k}_2^2 - \tilde{k}_1^2)} - \frac{(\mu \tilde{A}_{22})^2}{8\tilde{k}_2^4} \right]. \quad (7.116)$$

Ha a (7.100) egyenletre perturbációs eljárást alkalmazunk, akkor megkapjuk az egyenlet közelítő megoldásait. A (7.110) és (7.116) egyenletek felhasználásával megkaptam a dimenzió nélküli hullámszámok perturbációját. Ezek után meghatároztam a tényleges perturbált hullámszámokat, majd ebből a perturbált frekvenciákat (Beke, 2011a):

$$f_{1p} = \frac{v_h(T)}{2\pi} k_{1p} \cong \frac{v_h(T)}{2\pi} \frac{\tilde{k}_1}{L} \left[1 + \frac{\mu \tilde{A}_{11}}{2\tilde{k}_1^2} + \frac{\mu^2 \tilde{A}_{12} \tilde{A}_{21}}{2\tilde{k}_1^2 (\tilde{k}_1^2 - \tilde{k}_2^2)} - \frac{(\mu \tilde{A}_{11})^2}{8\tilde{k}_1^4} \right], \quad (7.117)$$

illetve

$$f_{2p} = \frac{v_h(T)}{2\pi} k_{2p} \cong \frac{v_h(T)}{2\pi} \frac{\tilde{k}_2}{L} \left[1 + \frac{\mu \tilde{A}_{22}}{2\tilde{k}_2^2} + \frac{\mu^2 \tilde{A}_{12} \tilde{A}_{21}}{2\tilde{k}_2^2 (\tilde{k}_2^2 - \tilde{k}_1^2)} - \frac{(\mu \tilde{A}_{22})^2}{8\tilde{k}_2^4} \right]. \quad (7.118)$$

Ehhez hasonló eljárást gyakran alkalmaznak nemlineáris rendszerek modellezésekor is, nevezetesen kiindulnak egy hasonló lineáris modellből és a nemlineáris viselkedést úgy veszik figyelembe, mint a lineáris rendszerre szuperponálódó perturbációs hatást.

A kapott eredmények diszkussziója

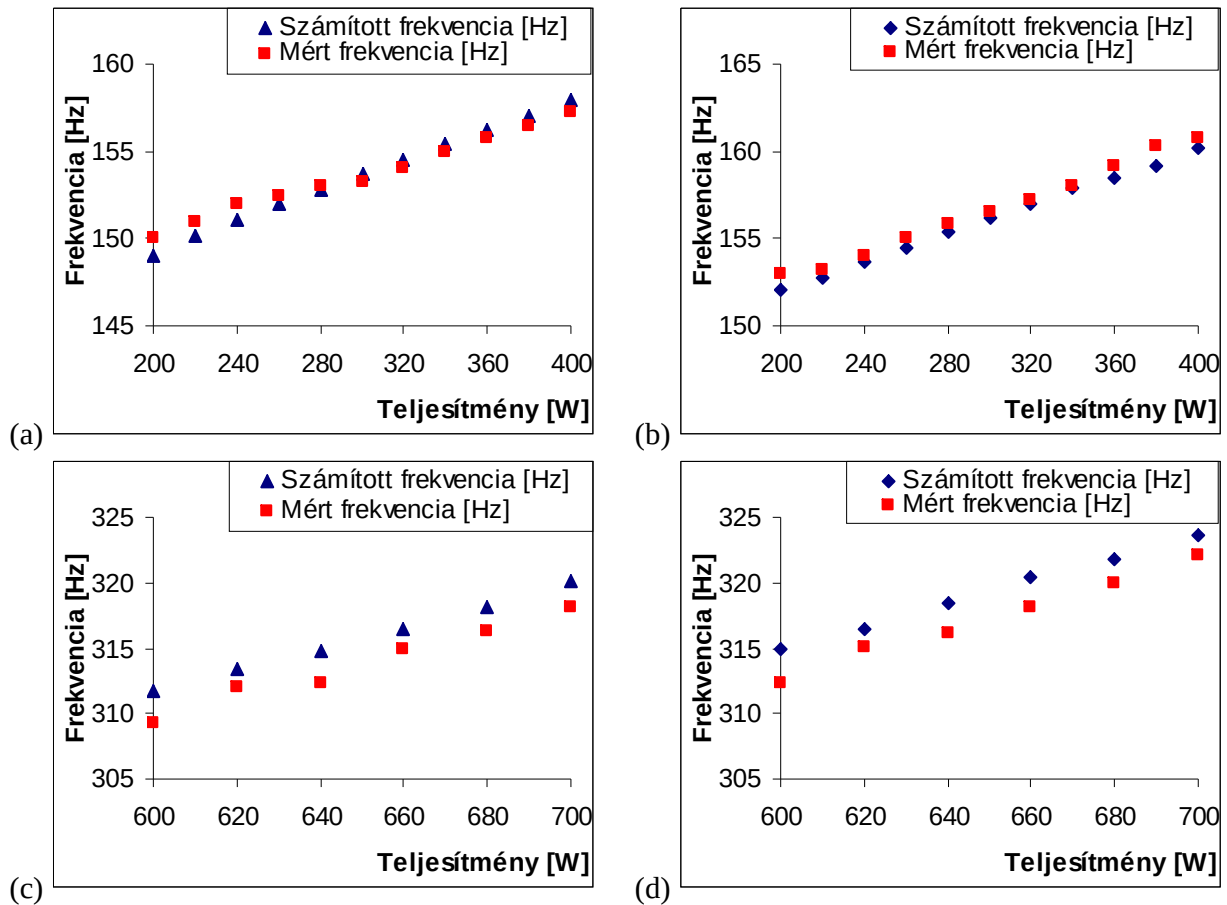
A kapott eredményeket összehasonlítottam a mért értékekkel. A 7.1. táblázatban néhány különböző rácspozíció és különböző csőbeli átlaghőmérséklet esetén kiszámítottam a modellek alapján kibocsátott alapharmonikus frekvenciákat. A frekvenciák közül az 1. oszlopban azok az értékek szerepelnek, amelyeket az „egyszerű” modell szerint a Rijke cső mint rezonátor üreg kibocsát; a 2. oszlopban az „összetett” modellből számított frekvenciák; végül az utolsó oszlopban a kísérletek során mért frekvenciák láthatók.

7.1. táblázat A modell alapján számított és a mért frekvenciák összehasonlítása.

Rács- pozíció (x_r/L)	A csőben áramló levegő átlag- hőmérséklete (K)	Frekvencia (Hz)		
		Egyszerű modell alapján számított érték	Összetett modell alapján számított érték	Kísérlet során mért átlagérték
1/8=0,125	355	152,6	154,1	155,3
1/4=0,25	345	150,5	152,7	153,0
3/8=0,375	356	153,3	154,8	155,8
5/8=0,625	361	308,6	307,5	306,8

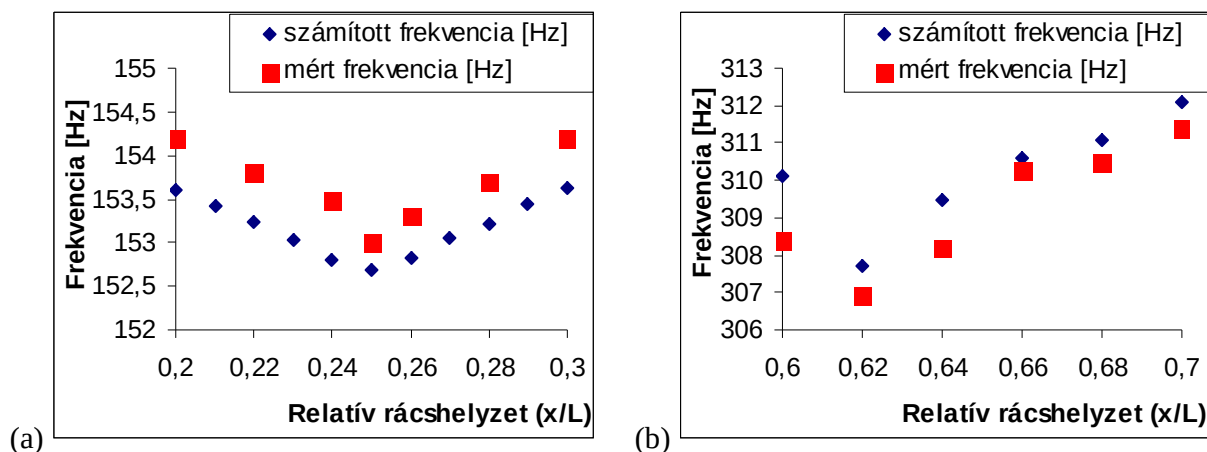
Megállapítottam, hogy az „összetett” modell alapján kapott frekvenciák közelebb esnek a valóságban mért frekvenciákhoz. Habár az „egyszerű” modell is nagyjából megfelelő frekvenciákat ad, de az „összetett” modell perturbált frekvenciái pontosabban írják le a valódi termoakusztikus rendszer frekvenciáit (Beke, 2011a).

A 7.3. ábrán a cső által kibocsátott hang frekvenciáit ábrázoltam a fűtőtéljesítmény függvényében. A frekvenciákat tekintve nincs jelentős különbség a két modell között: mindkettő hasonló frekvenciaértékeket szolgáltat, de a „továbbfejlesztett” modell eredményei jobban egyeznek a kísérleti adatokkal (Beke, 2011a).



7.3. ábra Az összetett modell alapján számított és a kísérletek során mért alapharmonikus frekvenciák összehasonlítása: (a) $x_r=L/4$, $m_i=1,3$ g/s, a fűtőtéljesítményt növeltük; (b) $x_r=L/4$, $m_i=1,3$ g/s, a fűtőtéljesítményt csökkentettük; (c) $x_r=5L/8$, $m_i=2$ g/s, a fűtőtéljesítményt növeltük; (d) $x_r=5L/8$, $m_i=2$ g/s, a fűtőtéljesítményt csökkentettük.

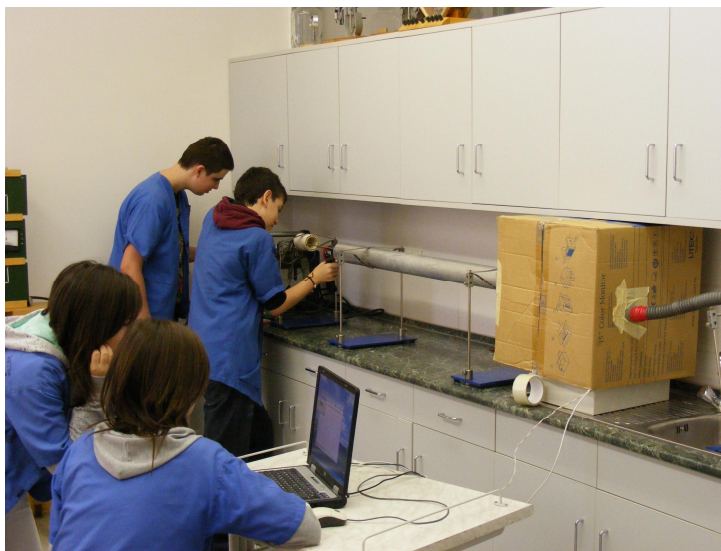
A kísérletek során megfigyeltük, hogy ha a rácspozíciót kicsit megváltoztattuk, akkor a frekvencia is kicsit változott. Az „egyszerű” modell alapján ezt nem tudtuk kiszámítani. Az „összetett” modell számot ad a Rijke cső előbb említett viselkedéséről. Ezt láthatjuk a 7.4. ábrán, ahol $x_r=L/4$ és $x_r=5L/8$ rácspozíciók környékén ábrázoltam, hogyan változik az alapharmonikus frekvencia, ha kicsit kimozdítjuk a rácst a megadott helyzetből (Beke, 2011a).



7.4. ábra Az összetett modell alapján számított és a kísérletekben mért alapharmonikus frekvenciák a relatív rácshelyzet függvényében: (a) fűtőtelijsítmény 300 W ; (b) fűtőtelijsítmény 590 W .

7.8. Összegző megjegyzések

A termoakusztikus projekt során a célkitűzésem az volt, hogy kísérleti adatokat gyűjtsünk a Rijke csőben kialakuló termoakusztikus jelenségekkel kapcsolatban, illetve felállítsak két különböző elméleti modellt, amely ezeket a jelenségeket jól leírja és magyarázattal szolgál a termodinamikai rendszer közelítőleg lineáris viselkedésére. A nemlineáris effektusokkal (pl. örvények képződése) nem foglalkoztam. A kísérletek során egy vízszintesen elhelyezett Rijke csövet használtunk, melynek belsejében egy szigetelő kerámia tubushoz egy drótrácsot rögzítettünk, amit elektromosan fűtöttünk. Feszültségforrásként egy 230 V hálózati feszültségű hegesztő transzformátort használtunk, a rácsot két rézpálcával kapcsoltuk a tápegységünkhöz. A rács helyzetét, a csőben áramló levegő intenzitását és a dróthálót fűtő teljesítményt egymástól függetlenül tudtuk szabályozni, így lehetőségünk volt széles paramétertartományban adatokat gyűjteni (7.5. ábra).



7.5. ábra Iskolánk tanulói méréseket végeznek az elektromosan fűtött Rijke csővel.

A rendszer stabil és instabil állapota közötti átmenet vizsgálatára úgy került sor, hogy elsőként rögzítettük a rács helyzetét, majd a légáram intenzitás értékét állítottuk be, ezután pedig a fűtőtelijsítményt változtatva meghatároztuk, hogy hol következik be az átmenet a stabil és a

gerjesztett állapot között. A mérések során növekvő és csökkenő légáram intenzitás értékek, illetve fűtőteljesítmény esetén is vizsgáltuk, hogy a rendszer stabil vagy instabil állapotban volt-e. Megállapítottam, hogy a rendszer stabilitása bizonyos rácshelyzeteknél függ a paraméterek változtatásának irányától: $x_r=L/4$ rácspozíciónál magasabb légáram intenzitás esetén, $x_r=5L/8$ rácspozíciónál „szinte minden” légáram intenzitás mellett fellépett ez a hiszterézisnek nevezett jelenség.

A komplex termoakusztikus jelenségek lineáris modellezésére két különböző modellt állítottam fel, amelyek közepes légáram intenzitás esetén viszonylag jól leírják a rendszer viselkedését (Beke, 2010a, 2010b, 2010d, 2011a). A fűtött rácsnál a paraméterek ugrását egy átviteli függvény segítségével jellemeztem. Az „egyszerű” modellben a hőmérsékletet egyenletesnek feltételeztem a cső belsejében, ami később hibaforrásnak bizonyult, ezért továbbfejlesztettem az eredeti modellt. Nagy hőteljesítmény és alacsony légáram intenzitás esetén a „továbbfejlesztett” modellben sem kaptam konvergáló megoldást. Az esetek többségében azonban elmondhatom, hogy a továbbfejlesztett elméleti modellből kapott eredmények jól közelítették a mérésekből kapott értékeket, ezért kijelenthetem, hogy ez a matematikai modell megfelelően írja le a fizika rendszert a vizsgált paraméterek szempontjából (Beke, 2010bd, 2011a).

Az „egyszerű” és a „továbbfejlesztett” modell jóságát megítélhetjük a modellekből kiszámított kritikus teljesítmények és a mérésekből meghatározott kritikus teljesítmények közötti relatív hiba segítségével. A vizsgálataim végén ezért kiszámítottam a relatív hibák nagyságát különböző rácspozíciók és különböző légáram intenzitás értékek mellett. Az általam megadott modelleket összehasonlítottam más szerzők modelljeivel a relatív hibák nagyságai alapján. Az összehasonlítást nehezítette, hogy gyakorlatilag szinte minden szerző különböző méretű és anyagú Rijke csöveket használt a kísérleteihez, sőt voltak olyan kutatók is, akik csak a modellt adták meg, de nem számoltak be az eredmények kísérleti alátámasztásáról. Az „egyszerű” és a „továbbfejlesztett” modellt 3 másik Rijke cső modellel hasonlítottam össze. Azért ezt a 3 modellt választottam, mert ezekben hasonló méretű Rijke csöveket használtak a kutatók és rácst is elektromos árammal fűtötték. Az „egyszerű” (Beke, 2010a), a „továbbfejlesztett” (Beke, 2010bd, 2011a), illetve a vizsgált 3 másik modellből is azt állapítottam meg, hogy van egy „*nagyon alacsony*” légáram intenzitás tartomány, ahol a rendszer nem gerjeszthető. Ebben a tartományban egyik modell sem szolgáltat „megoldást”. Ez után következik egy „*alacsony*” légáram intenzitás tartomány, ahol a rendszer gerjeszthető és a modellek is adnak megoldást, de ebben a tartományban a relatív hiba még „elég nagy”. A következő „*közepes*” légáram intenzitás tartományban a modellek kisebb relatív hibával jellemzik a rendszer viselkedését; majd „*magas*” légáram intenzitások esetén a relatív hiba újra növekszik. Végezetül a „*nagyon magas*” légáram intenzitások esetén a modellek vagy nem szolgáltatnak megoldást, vagy a relatív hiba több száz százalékos, esetleg a rendszer nem is gerjeszthető, vagy nincsenek megbízható mérési adatok; ezért ebben a tartományban már nincs értelme a modellek további összehasonlításának. Ezek alapján az összehasonlítást leszűkítettem az „*alacsony*” ($0,5 \text{ gs}^{-1} \leq m_i < 1 \text{ gs}^{-1}$), a „*közepes*” ($1 \text{ gs}^{-1} \leq m_i < 2,5 \text{ gs}^{-1}$) és a „*magas*” ($2,5 \text{ gs}^{-1} \leq m_i < 3 \text{ gs}^{-1}$) légáram intenzitások tartományaira. A különböző Rijke csövek és a különböző modellek

esetén még az „*alacsony*”, a „*közepes*” és a „*magas*” légáram intenzitások is „viszonylagos” fogalmak; ezeket nem könnyű pontosan meghatározni, de kompromisszumokkal sikerült úgy kiválasztani az említett tartományokat, hogy azok nagyjából mindegyik modell esetén elfogadhatónak tekinthetők. A kritikus teljesítményekhez tartozó relatív hibák a 7.2. táblázatban találhatók.

7.2. táblázat A kritikus teljesítmények relatív hibái a különböző modellekben (n.a.=nincs adat).

Rácspozíció	Légáram intenzitás	Entezam és mtsai (2002)	Matveev (2003)	Matveev és Culick (2003a)	Beke (2010a)	Beke (2010bd)
$x_r=L/8$	alacsony	68%	40%	n.a.	43%	22%
	közepes	57%	27%	n.a.	32%	14%
	magas	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
$x_r=L/4$	alacsony	75%	37%	20%	43%	24%
	közepes	59%	30%	13%	34%	19%
	magas	83%	43%	18%	40%	27%
$x_r=3L/8$	alacsony	n.a.	n.a.	n.a.	44%	30%
	közepes	n.a.	n.a.	n.a.	34%	16%
	magas	n.a.	n.a.	n.a.	28%	17%
$x_r=5L/8$	alacsony	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
	közepes	71%	37%	21%	42%	24%
	magas	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

Entezam és mtsai (2002) által kifejlesztett modell a legkevésbé pontos. (Entezam és mtsai a számítás lépéseit írják le a modelljükben, illetve megadják, hogy pontosan milyen Rijke csőre vonatkoznak a számításaik, de a modellből kapott értékeket nem hasonlították össze valódi mérésekből kapott eredményekkel; ezért egy ugyanolyan Rijke csővel elvégeztem a méréseket és ezeket hasonlítottam össze a szerzők eredményeivel.) Az „egyszerű” modell (Beke, 2010a) esetén ettől kisebbek a relatív hibák értékei. Matveev (2003) modellje alapján számított relatív hibák általában néhány százalékkal kisebbek, mint az „egyszerű” modell (Beke, 2010a) alapján kapott relatív hibák. A „továbbfejlesztett” modell (Beke, 2010b, 2010d) relatív hibái ettől minden esetben kisebbek. A kísérleti adatokkal a legjobb egyezést Matveev és Culick (2003a) által megadott „nemlineáris” modell nyújtja $x_r=L/4$ és $x_r=5L/8$ rácspozíciók esetén; a másik két rácspozícióra nincsenek adatok megadva. A vizsgálatok alapján megállapítottam, hogy „alsó” rácspozíciók esetén a „*közepes*” légáram intenzitás tartományon belül van egy még szűkebb zóna, ahol a „továbbfejlesztett” modell (Beke, 2010bd) meglehetősen pontos: ha $1\text{ gs}^{-1} \leq m_i \leq 1,3\text{ gs}^{-1}$, akkor a relatív hiba 4,8% ($x_r=L/8$), 9,9% ($x_r=L/4$), illetve 13,1% ($x_r=3L/8$). Fontos megjegyezni, hogy az „egyszerű” modell (Beke, 2010a) és a „továbbfejlesztett” modell (Beke, 2010bd, 2011a) esetén is csak „ingyenes” szoftvereket használtam fel; a másik három modellben viszont mindegyik esetben alkalmaztak a szerzők „fizetős” szoftvereket a modelljük elkészítéséhez.

Kis Mach számok esetén az „egyszerű” (Beke, 2010a) és a „továbbfejlesztett” (Beke, 2010bd) modellből kapott értékek is relatíve jó egyezést mutattak a kísérleti eredményekkel. A stabilitási határfeltételek meghatározásakor két számottevő hatással kell számolni: egyfelől a cső belsejében a hőmérséklet eloszlás, másfelől a fűtött rács és a rajta keresztül áramló levegő közötti hőtranszfer befolyásolja a rendszer stabilitását. A kísérleteink során azt tapasztaltuk, hogy bizonyos esetekben

örvények is keletkeznek a cső belsejében, illetve a cső szájánál. A turbulens, illetve kevert áramlások vizsgálata meglehetősen bonyolult feladat. Az örvények keletkezésének pontos mechanizmusa és az örvényes égés részletei még nem ismertek teljes részletességgel, ezért úgy döntöttem, hogy az örvények keletkezését nem vizsgálom sem az „egyszerűbb”, sem a „továbbfejlesztett” modellben.

Véleményem szerint az „egyszerű” modell (Beke, 2010a) „becslésre” alkalmazható a valós technikai életben; a „továbbfejlesztett” modell (Beke, 2010bd, 2011a) pontossága sokkal jobb, ez közepes légáram intenzitások mellett használható lenne a gyakorlatban is a kritikus teljesítmények kiszámítására. A modellek „értelmezése” különböző szinteken történik, a modelleket esetleg hasznosítani lehetne főiskolai vagy egyetemi hallgatók termodinamikai képzésében is.

A „továbbfejlesztett” modell pontosságát valószínűleg még fokozni lehetne. Egyfelől több szerző is alkalmazza azt a technikát, hogy az egyenletekben szereplő paraméterekben valamilyen „eltolást” (transzformációt) hajt végre, mert így pontosabb eredményeket szolgáltat az általuk megadott modell (pl. Annaswamy és mtsai, 2000). A jelenségre nem találtam kielégítő magyarázatot, ezért én nem alkalmaztam ezt a technikát, de kipróbáltam néhány „paraméter eltolást”, ami valóban kis mértékben javított a modellek pontosságán, bizonyos esetekben. Másfelől bizonyosan keletkezhetnek örvények a Rijke csőben, ezért a „továbbfejlesztett” modellt a későbbiekben ki lehetne bővíteni ilyen irányban is. A továbblépés lehetőségei tehát adóttak, melyekhez véleményem szerint jó kiindulási alap lehet a „továbbfejlesztett” (Beke, 2010bd, 2011a) modell.

8. A projektmunka hatásainak vizsgálata

8.1. A termoakusztikus projekt eredményei és hatásai

A termoakusztikus projektünkben több alkalommal is sor került a munka szóbeli értékelésére, mely során egyrészt a tanulók értékelték a saját munkájukat és a társaik teljesítményét is, másrészt én is összegeztem az adott időszak alatt elért eredményeket. Az együttműködés színvonalának javulását, illetve a munkavégzés fejlődését külön is kiemeltem. Mivel a tanulók önkéntesen vettek részt a feladatban, ezért ha valaki csak kis mértékben segített, annak is megköszöntem a munkáját.

Minden projektfeladatnak van valamilyen produktuma. A termoakusztikus projektben résztvevő tanulók esetén a következő produktumok születtek:

- a Rijke csövekkel végzett kísérleteket bemutató honlap;
- egy prezentáció, melyet a diákok arra használtak, hogy egy iskolai előadásban diáktársaiknak is bemutassák a végzett munkájukat.

Részemről a következő produktumok készültek:

- a termoakusztikus projekt eredményeit bemutató prezentációk, melyeket különböző konferenciákon használtam;
- a diákok különböző projektfeladatait bemutató prezentációk, melyek segítségével a projektmunkát népszerűsítettem tanári továbbképzéseken, konferenciákon;
- a termoakusztikus projektben elért eredményeket 6 magyar nyelvű cikkben mutattam be (Beke, 2009a, 2009b, 2010c, 2010d, 2011b, 2011c);
- a Rijke csövekkel végzett termoakusztikus vizsgálatokat és modelleket 5 angol nyelvű cikkben mutattam be (Beke, 2009c, 2009d, 2010a, 2010b, 2011a);
- a Rijke csőben lezajló termoakusztikus folyamatok modellezésére készítettem egy C++ nyelvű számítógépes programot;
- a Ph.D. dolgozatot is tekinthetjük a projekt egyik produktumának.

A termoakusztikus projekt fontos eredményei közé tartozik, hogy a résztvevő diákoknak egy konkrét kutatási példán keresztül sikerült bemutatnom a modellek szerepét a megismerés folyamatában. Az empirikus eredmények értelmezéséhez bemutattam nekik a Rijke csőben lejátszódó fizikai folyamatokra egy „egyszerűbb” modellt (Beke, 2010a), melyet később finomítottam; ez a „továbbfejlesztett” modell a tapasztalatokat jobban írja le (Beke, 2010bd, 2011a). Kiemeltem azt is, hogy még ez a modell sem teljes, ebben is vannak elhanyagolások, de a Rijke csőben lejátszódó termoakusztikus folyamatokat jobban jellemzi, mint a korábbi modell. Ez azért lényeges elem, mert a tanulók megértették, hogy nem baj, ha nem tökéletes egy modell, a hibák korrigálásával és új ötletek felhasználásával a modellek általában tovább finomíthatók (kivéve, ha teljesen hibás a kiindulási modell). Ez bátorítást adott a tanulóknak arra, hogy ők is próbálkozzanak modellek felállításával különböző természettudományos (nem csak fizikai) folyamatok jellemzésére.

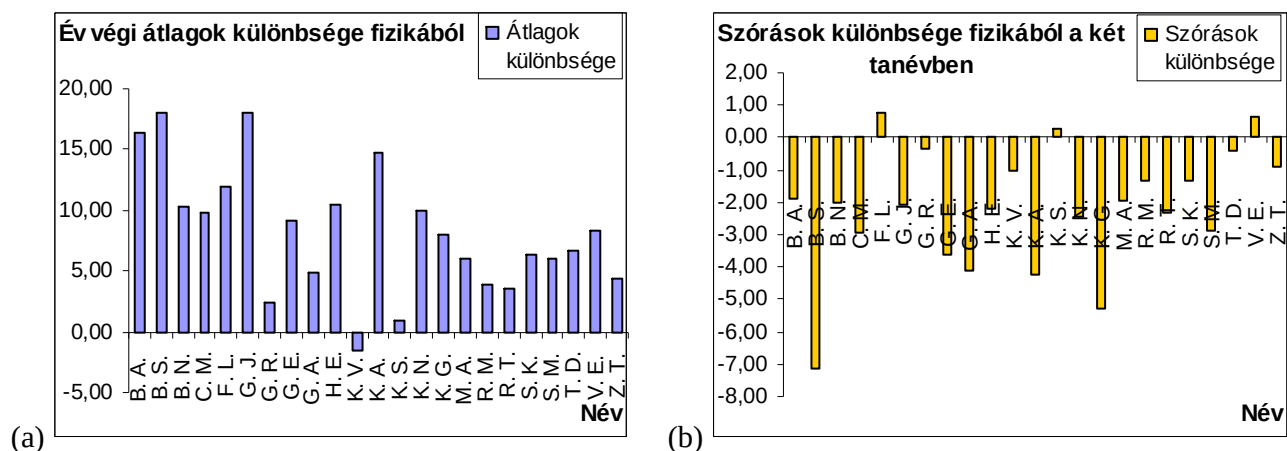
A termoakusztikus projektünk végén megvizsgáltam, hogy a diákjaink tanulmányi munkájában, „tanulási teljesítményében” mennyire „mérhető” a projektben való részvétel hatása (Beke, 2011c). Mivel a projekt időben 2 és fél tanévet ölelt át, ezért arra gondoltam, hogy az évközben írt fizika témazáró dolgozatokkal fogom a teljesítményük változását mérni. Nyilvánvaló, hogy a projektmunka során nem csak a fizikai ismereteik bővültek, sőt mondhatnám, hogy a Rijke

csövekkel végzett termoakusztikai vizsgálatok nem tartoznak bele a középiskolás tananyagba, de azt feltételeztem, hogy azoknak, akik hosszabb távon részt vesznek a projektünkben javulni fog fizika tanórai teljesítménye is. Természetesen nem a témazáró dolgozat az egyetlen mércéje a teljesítménynek, de bizonyos szempontból megfelelő indikátornak tekinthetjük (Beke, 2011c).

A teljesítmények értékeléséhez tudnunk kell, hogy fizikából minden félévben 3 db témazáró dolgozatot szoktunk írni, ezek kb. másfél havonta követik egymást, a dolgozatok időpontját már jó előre tisztázzuk. Ha valaki hiányzik a témazáró dolgozatról, akkor annak egy későbbi időpontban pót témazárót kell írnia, ez hasonlít az eredeti dolgozatra, de nem teljesen ugyanaz. A teljes tanévben tehát minden diák 6 db témazáró dolgozatot ír, amiket százalékos formában értékelünk, és ez alapján kap rá osztályzatot az adott illető. (A témazáró dolgozatok osztályzatai mellett még számos másféle értékelési módszert is alkalmazunk.)

A termoakusztikus projektünk teljes időtartamát tekintve összességében 35 gimnazista tanuló vett részt a munkánkban, ki rövidebb ki hosszabb ideig. Ha egy tanévet tekintek, akkor azt mondhatom, hogy az, aki legalább a délutáni projektfoglalkozások felén részt vett, annak a tanulónak külön is megvizsgáltam a témazáró dolgozatokban bekövetkező változását. Mivel volt néhány tanuló, aki csak egy-két foglalkozáson vett részt, illetve voltak olyanok is, akik 12. osztályosként úgy vettek részt a munkában, hogy közben már nem is szerepelt a fizika tantárgy a kötelező tantárgyaik között; ezért összességében 23 olyan tanulót tudtam kiválasztani, akik a projektet megelőző évben és a projekt évében is tanultak fizikát. (Ez általában a 10. és a 11. évfolyamot jelenti.) Összehasonlítottam ezeknek a diákoknak a két tanévben a fizika témazáró dolgozatokban mérhető teljesítményét (Beke, 2011c).

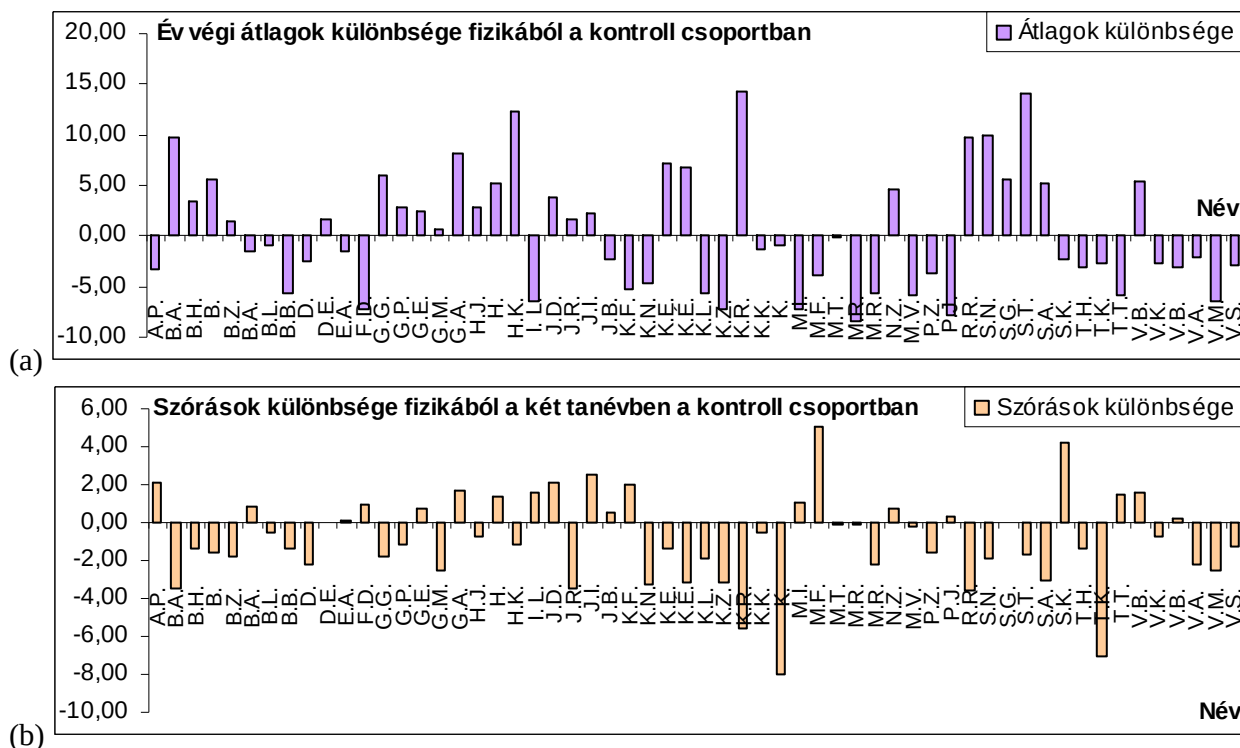
A projektben résztvevő tanulók teljesítménye nagyon vegyes képet mutatott. Voltak közöttük gyengébb képességű, közepes és nagyon jó tanulmányi eredményű diákok is. (Külön öröm volt számomra, hogy olyan tanulók is részt vettek a munkában, akik egyébként nem túl jól teljesítettek fizika alapórán.) Megállapítottam, hogy a diákok átlagteljesítménye 1 kivétellel növekedett, tehát a projekt tanévében általában jobb eredményeket értek el a tanulók a fizika témazáró dolgozatokban. A 8.1.1.a ábrán a témazáró dolgozatokban elért átlagteljesítmények különbségeit ábrázoltam a két tanévben százalékpontokban (Beke, 2011c).



8.1.1. ábra A két tanévben a fizika témazáró dolgozatok alapján számított teljesítmények összehasonlítása a termoakusztikus projektben résztvevő diákok esetén: (a) év végi átlagok különbsége; (b) dolgozatok szórásainak különbsége.

A témazárók eredményeinek szórásával is jellemezhetjük a teljesítményt. Minél kisebb a szórás, annál egyenletesebb a tanuló évközi teljesítménye. A 8.1.1.b ábrán a két tanévben a fizika témazáró dolgozatok alapján számított szórások különbségeit láthatjuk. Azt állapítottam meg, hogy 20 tanulónál csökkent, 3 tanulónál kis mértékben növekedett a fizika témazáró dolgozatok százalékpontjainak szórása. Ebből arra következtettem, hogy a projektmunka hatására a tanulók egyenletesebben teljesítettek a témazáró dolgozatokban. Összességében elmondható, hogy a projektben résztvevő diákok átlagos összteljesítménye 8,20%-kal javult (63,62%-ról 71,82%-ra), a szórása 2,12%-kal csökkent fizikából (8,17%-ról 6,05%-ra), ezért ebből a szempontból is sikeresnek értékelhető a termoakusztikus projektünk (Beke, 2011c).

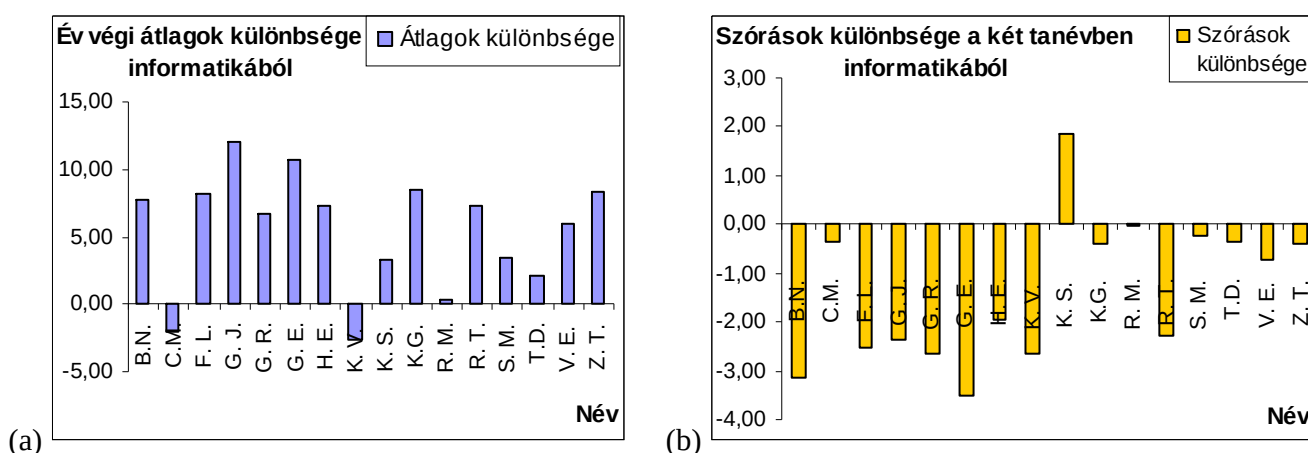
Megvizsgáltam azoknak a tanulóknak is a fizika témazáró dolgozatokban elért teljesítmény változását, akik nem vettek részt a termoakusztikus projektfeladatban. Ezek a tanulók osztálytársaik voltak a termoakusztikus projektben résztvevő diákoknak, tehát egyfajta kontroll csoportként „szolgáltak” a vizsgálataimban. Összesen 58 tanuló (33 lány és 25 fiú) eredményeit követtem nyomon. Megállapítottam, hogy 26 diák átlagteljesítménye növekedett, 32 diák átlagteljesítménye csökkent a kontroll mintában. Az összteljesítmény tekintetében 0,39%-os javulást tapasztaltam (63,19%-ról 63,58%-ra). Ezek után megvizsgáltam, hogy a termoakusztikus projektben résztvevő diákok teljesítmény javulása hogyan viszonyul a kontroll mintához tartozó tanulók teljesítményének változásához. A statisztikai t-próba alapján azt állapítottam meg, hogy a termoakusztikus projektfeladatban résztvevő diákok teljesítmény növekedése szignifikáns a kontroll csoporthoz képest $\alpha=0,05$ szignifikancia szint mellett. A 8.1.2. ábrán a kontrollcsoportban tartozó tanulók témazáró dolgozatokban elért átlagteljesítményeinek különbségeit és a szórások különbségeit ábrázoltam a két tanévben százalékpontokban (Beke, 2011c).



8.1.2. ábra A két tanévben a fizika témazáró dolgozatok alapján számított teljesítmények összehasonlítása a kontroll csoportban: (a) év végi átlagok különbsége százalékpontokban; (b) dolgozatok szórásainak különbsége százalékpontokban.

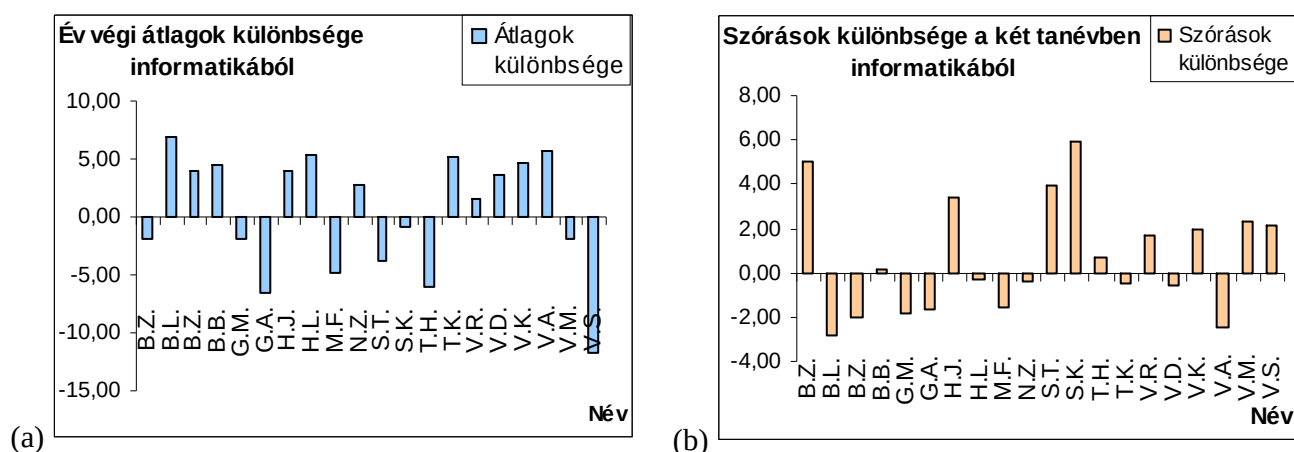
A kontroll csoportban a fizika témazáró dolgozatokban elért teljesítmények szórása 0,83%-kal csökkent: 9,44%-ról 8,61%-ra. (20 tanulónál növekedett, 38 tanulónál csökkent a szórás.) A dolgozatok szórásainak változását is összehasonlítottam a két mintában. Láthatjuk, hogy mindkét mintában csökkentek a szórások különbségei, de a t-próba alapján a fizika témazáró dolgozatok pontszámaiban $\alpha=0,05$ szignifikancia szint mellett a szórások különbségeinek csökkenése szignifikáns a projektben résztvevő tanulók javára. Röviden összegezve kijelenthetem, hogy a termoakusztikus projektfeladat hatására a fizika tantárgy esetén szignifikánsan jobb teljesítményt nyújtottak a diákjaink és a témazáró dolgozatok pontjainak szórása is szignifikáns módon csökkent $\alpha=0,05$ szignifikancia szint mellett. A kapott eredmények alátámasztják azt a korábbi feltevésemet, mely szerint egy adott tantárgy esetén a projektfeladatok alkalmasak a tanulók szaktárgyi teljesítményének javítására. Ez azért lényeges, mert sok pedagógus azért nem valósít meg egyetlen projektet sem, mert fél attól, hogy csak „elfecsérlik” az időt és nem gyarapodik közben a tanulók tudása. Láthatjuk, hogy a jól kivitelezett projektfeladatoknak pozitív hatása van a diákok tanulási teljesítményére is (Beke, 2011c).

A termoakusztikus projektben résztvevő 23 vizsgált tanuló közül 16 informatika fakultációra is járt. (Iskolánkban a 9. évfolyam után nincs kötelező informatika óra, tehát informatikát csak azok tanulnak 10. évfolyamtól, akik fakultációs tantárgyként választják a szaktárgyat.) Ezeknek a tanulóknak megvizsgáltam az informatika tantárgyban bekövetkező teljesítmény változását a témazáró dolgozatok százalékpontjai alapján. Feltételeztem, hogy a projekt hatására a tanulók informatikai tudása is gyarapszik, mivel a projektmunka során szükség volt alkalmazott informatikai ismeretekre. (Az informatika fakultáción is évente 6 db témazárót írnak a diákok a fizikához hasonló rendszerben; tehát itt is vannak gyakorlati feladatok, vannak rövidebb elméleti kérdések és vannak kifejtendő, hosszabb, elméleti esszéyszerű feladatok is.) Megállapítottam, hogy a 16 tanuló közül csak két személynél csökkent a témazáró dolgozatok alapján a teljesítményük és egy tanulónál nőtt a dolgozatok százalékpontjai alapján számított szórás (8.1.3. ábra). A 16 diák összteljesítménye 5,46%-kal növekedett a projekt tanévében az előző tanévhez képest (69,84%-ról 75,30%-ra), a szórások átlagértéke viszont 1,36%-kal csökkent (7,21%-ról 5,85%-ra).



8.1.3. ábra A két tanévben az informatika témazáró dolgozatok alapján számított teljesítmények összehasonlítása a termoakusztikus projektben résztvevő diákok esetén: (a) év végi átlagok különbsége; (b) dolgozatok szórásainak különbsége.

Megvizsgáltam azoknak a tanulóknak is az informatika fakultáción írt témazáró dolgozatokban elért teljesítmény változását, akik nem vettek részt a termoakusztikus projektfeladatban. Ezek a tanulók osztálytársaik voltak a termoakusztikus projektben résztvevő diákoknak, tehát ők egy másik kontroll csoportként „szolgáltak” a vizsgálataimban. Összesen 20 tanuló (5 lány és 15 fiú) eredményeit vizsgáltam. Megállapítottam, hogy 11 diák átlagteljesítménye növekedett, 9 diák átlagteljesítménye csökkent ebben a kontroll mintában. Az összteljesítmény tekintetében 0,45%-os javulást tapasztaltam (64,57%-ról 65,02%-ra). A dolgozatok szórásainak különbsége 10 tanulónál növekedett és 10 tanulónál csökkent. Összességében 0,65%-kal nőtt a szórások különbsége (8,16%-ról 8,81%-ra). A 8.1.4. ábrán a kontroll csoporthoz tartozó tanulók témazáró dolgozatokban elért átlagteljesítményeinek különbségeit és a szórások különbségeit ábrázoltam a két tanévben százalékpontokban (Beke, 2011c).



8.1.4. ábra A két tanévben az informatika témazáró dolgozatok alapján számított teljesítmények összehasonlítása a kontroll csoportban: (a) év végi átlagok különbsége; (b) dolgozatok szórásainak különbsége.

Ezek után megvizsgáltam, hogy a termoakusztikus projektben résztvevő diákok informatika fakultáción elért teljesítmény javulása hogyan viszonyul a kontroll mintához tartozó tanulók teljesítményének változásához. A statisztikai t-próba alapján megállapítottam a két minta alapján, hogy a termoakusztikus projektfeladatban résztvevő tanulók teljesítmény növekedése szignifikáns a kontroll csoporthoz képest $\alpha=0,05$ szignifikancia szint mellett. Az informatika témazáró dolgozatok szórásainak változását is összehasonlítottam a két mintában. A t-próba alapján a különbség itt is szignifikánsnak mutatkozott $\alpha=0,05$ szignifikancia szint mellett, a fizika témazáró dolgozatokhoz hasonlóan. Röviden összegezve megállapítottam, hogy a termoakusztikus projektfeladat hatására a fizika tantárgy mellett az informatika tantárgyban is szignifikánsan jobb teljesítményt nyújtottak a diákjaink és a témazáró dolgozatok pontjainak szórása is szignifikáns módon csökkent $\alpha=0,05$ szignifikancia szint mellett. A kapott eredmények alátámasztják azt a korábbi feltevésemet, mely szerint az integrált projektfeladatok alkalmasak a tanulók több különböző tantárgybeli teljesítményének javítására is. Láthatjuk, hogy a jól megtervezett és kivitelezett projektfeladatoknak pozitív hatása van a diákok tanulási teljesítményére akár több tantárgyból is, ezért célszerű multi- (inter-)diszciplináris projekteket megvalósítani (Beke, 2011c).

A tapasztalatok alapján a termoakusztikus projektünket összességében sikeresnek tekinthetjük. A tanulók természettudományos (fizikai, informatikai, stb.) ismereteinek bővítése mellett a projektmunka hatásainak többsége (pl. kommunikációs képességek javulása, csoportmunkában való részvétel) valószínűleg hosszabb távon is érvényesül (Beke, 2011c).

8.2. A projektmunka hatásainak kérdőíves vizsgálata

Egy kérdőíves vizsgálatban arra kerestem választ, hogy a projektfeladatokban való részvétel hogyan befolyásolta a tanulók projektekkel kapcsolatos attitűdjét. Elsősorban a természettudományos tantárgyakkal kapcsolatosan szerettem volna megtudni, vajon milyen hatást gyakoroltak a természettudományos jellegű projektek a diákok tantárgyakhoz fűződő „beállítódására”; ezért megkértem a diákokat, hogy az elmúlt néhány tanév során az iskolánkban megvalósított kisebb-nagyobb projektekkel kapcsolatosan töltsenek ki egy rövid kérdőívet. (A kérdőív a dolgozat mellékletében található.)

A projektek között voltak kötelező projektfeladatok (pl. *„Pizza-történet, pizza-készítés, egészséges és egészségtelen táplálkozás, élettani-fizikai hatások”,* vagy *„Gyümölcs projekt”*) és voltak választható projektek (pl. *„Modern lakóház tervezése és építése”,* vagy *„Termoakusztikai jelenségek vizsgálata Rijke-cső segítségével”*). A kérdőíveket a tanulók önkéntes alapon töltötték ki, a nevüket nem kellett felírni. A kérdések többségében 5 fokú Likert skálán helyeztem el a válaszokat úgy, hogy a -2-es válasz felelt meg annak, hogy a válaszoló nem ért egyet az állítással, vagy nem tetszik neki a kérdésben szereplő „tartalmi elem”; a +2-es válasz felelt meg annak, hogy a válaszoló egyetért az állítással, illetve tetszik neki a kérdéssel kapcsolatos „fogalom”. Láthatjuk, hogy a „0” felelt meg a neutrális pontnak, tehát a negatív értékek egyértelműen az „elutasítást”, a pozitív értékek az „elfogadást” jelentik (Beke, 2011c).

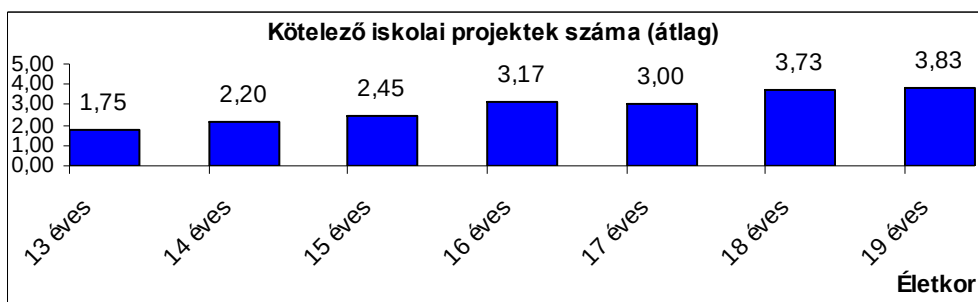
A kérdőíveket összességében 74 tanuló töltötte ki teljesen (41 lány és 33 fiú). A válaszadó tanulókat két csoportra osztottam: összesen 23 diák (13 lány és 10 fiú) vett részt a *„Termoakusztikai jelenségek vizsgálata Rijke-cső segítségével”* projektben, illetve összesen 51 tanuló (28 lány és 23 fiú) olyan diák volt, akik nem vettek részt ebben a szabadon választható projektfeladatban. A termoakusztikus projektben résztvevő tanulók átlagéletkora 18,04 év, szórása 0,83 év; a másik csoport átlagéletkora 15,73 év, szórása 1,73 év; a válaszadók teljes csoportjának átlagéletkora 16,45 év, szórása 1,85 év.

Az 1. kérdésben azt kérdeztem, hogy hány kötelező projektben vett részt a tanuló eddig az iskolánkban (8.2.1. táblázat).

8.2.1. táblázat Kötelező iskolai projektek száma (átlag).

1.	Átlagérték	Szórás	Minimális érték	Maximális érték
A termoakusztikus projektben résztvevő tanulók	3,57	0,59	3	5
A termoakusztikus projektben részt nem vevő tanulók	2,82	0,84	1	5
Összes tanuló	3,05	0,84	1	5

Átlagosan 3 kötelező iskolai projektfeladatban vettek részt a diákok, természetesen ez a szám korcsoportonként erősen eltér egymástól. A tanulók válaszai alapján számított átlagértékeket láthatjuk életkorok szerint a 8.2.1. ábrán.



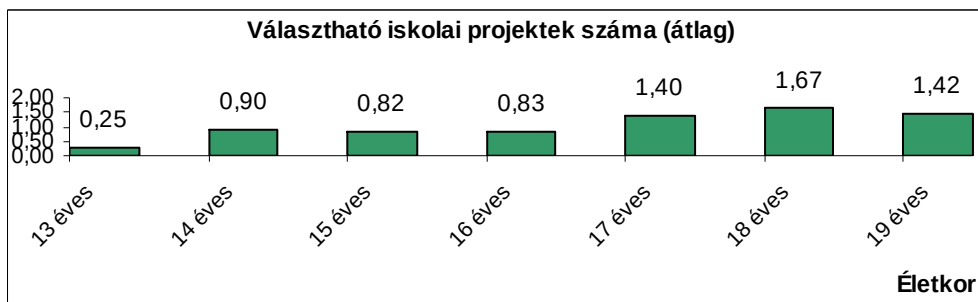
8.2.1. ábra A tanulók átlagosan hány kötelező iskolai projektfeladatban vettek részt korcsoportonként.

A 2. kérdésben azt kérdeztem, hogy hány szabadon választható projektben vett részt a tanuló eddig az iskolánkban (8.2.2. táblázat).

8.2.2. táblázat Szabadon választható iskolai projektek száma (átlag).

2.	Átlagérték	Szórás	Minimális érték	Maximális érték
A termokusztikus projektben résztvevő tanulók	1,91	0,67	1	3
A termokusztikus projektben részt nem vevő tanulók	0,80	0,69	0	2
Összes tanuló	1,15	0,86	0	3

Láthatjuk, hogy átlagosan legalább egy szabadon választható iskolai projektfeladatban szerepet vállaltak a tanulók, sőt voltak olyanok is, akik 3 szabadon választható projektben is részt vettek. A tanulók válaszai alapján számított átlagértékeket láthatjuk életkorok szerint a 8.2.2. ábrán.



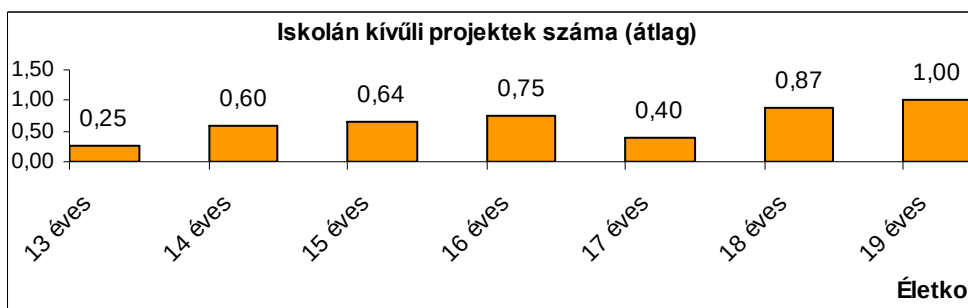
8.2.2. ábra A tanulók átlagosan hány szabadon választható iskolai projektfeladatban vettek részt korcsoportonként.

A 3. kérdésben arra voltam kíváncsi, hány szabadon választható projektben vett részt a tanuló eddig az iskolánkon kívül (8.2.3. táblázat).

8.2.3. táblázat Szabadon választható iskolán kívüli projektek száma (átlag).

3.	Átlagérték	Szórás	Minimális érték	Maximális érték
A termokusztikus projektben résztvevő tanulók	0,96	0,77	0	2
A termokusztikus projektben részt nem vevő tanulók	0,59	0,67	0	3
Összes tanuló	0,70	0,72	0	3

Átlagosan kevesebb szabadon választható iskolán kívüli projektfeladatban vettek részt a diákok, mint amennyi iskolai kereteken belüli szabadon választható projektben tevékenykedtek. A tanulók válaszai alapján számított átlagértékeket láthatjuk életkorok szerinti bontásban a 8.2.3. ábrán.



8.2.3. ábra A tanulók átlagosan hány szabadon választható iskolán kívüli projektfeladatban vettek részt korcsoportonként.

A 4. kérdésben arra voltam kíváncsi, hogy általában szívesen vesz-e részt a projektmunkában a tanuló? (Válaszként egy egész számot kellett beírni -2 és 2 között.)

8.2.4. táblázat Mennyire szívesen vesz részt a tanuló a projektekben (átlag). (A maximális érték 2.)

4.	Átlagérték	Szórás	Minimális érték	Maximális érték
A termoakusztikus projektben résztvevő tanulók	1,83	0,39	1	2
A termoakusztikus projektben részt nem vevő tanulók	1,59	0,50	1	2
Összes tanuló	1,65	0,48	1	2

A válaszokból kiderült, hogy egyértelműen kedvelik a tanulók a projektformájú munkavégzést, szívesen vesznek részt a különböző projektekben (8.2.4. táblázat). A statisztikai t-próba alapján megállapítottam a két mintából, hogy a termoakusztikus projektfeladatban résztvevő tanulók és a kontroll csoporthoz tartozó tanulók által megadott értékek között szignifikáns a különbség $\alpha=0,05$ szignifikancia szint mellett (Beke, 2011c).

Az 5. kérdésben arra voltam kíváncsi, hogy általában látja-e értelmét a projektmunkának a tanuló? (Válaszként egy egész számot kellett beírni -2 és 2 között.)

8.2.5. táblázat Mennyi értelmét látja a tanuló a projekteknek (átlagértékek). (A maximális érték 2.)

5.	Átlagérték	Szórás	Minimális érték	Maximális érték
A termoakusztikus projektben résztvevő tanulók	1,57	0,51	1	2
A termoakusztikus projektben részt nem vevő tanulók	1,41	0,57	0	2
Összes tanuló	1,46	0,55	0	2

A válaszokból az derült ki, hogy a diákok szerint a projektmunkának általában van értelme (8.2.5. táblázat). Észrevehetjük azonban, hogy ebben a kérdésben 0,19 értékkel alacsonyabb átlagok jöttek ki összesítésben, mint az előző kérdés válaszainak átlaga; tehát a tanulók „érzelmileg” kicsit jobban kedvelik a projektfeladatokat, mint amennyire hasznosnak találják őket. A statisztikai t-próba alapján megállapítottam a két mintából, hogy a termoakusztikus projektfeladatban résztvevő tanulók és a kontroll csoporthoz tartozó tanulók által megadott értékek között nem mutatható ki szignifikáns különbség $\alpha=0,05$ szignifikancia szint mellett (Beke, 2011c).

A projektmunka során néha egyedül, máskor párosan, esetleg csoportban kell tevékenykedni. A 6. kérdésben arra kerestem választ, hogy melyik fajta munkavégzést mennyire kedvelik a tanulók? (Válaszként egy-egy egész számot kellett beírni -2 és 2 között.)

8.2.6. táblázat Mennyire kedvelik a tanulók az egyéni, a páros, illetve a csoportos munkavégzést (átlagértékek). (A maximális érték 2.)

Munkavégzés típusa	Vizsgált tanulók	Átlagérték	Szórás	Minimális érték	Maximális érték
Egyéni	A termoakusztikus projektben résztvevő tanulók	0,43	0,66	-1	1
	A termoakusztikus projektben részt nem vevő tanulók	0,59	0,67	-1	2
	Összes tanuló	0,54	0,67	-1	2
Páros	A termoakusztikus projektben résztvevő tanulók	1,39	0,50	1	2
	A termoakusztikus projektben részt nem vevő tanulók	1,29	0,58	0	2
	Összes tanuló	1,32	0,55	0	2
Csoportos	A termoakusztikus projektben résztvevő tanulók	1,52	0,51	1	2
	A termoakusztikus projektben részt nem vevő tanulók	1,49	0,58	0	2
	Összes tanuló	1,50	0,56	0	2

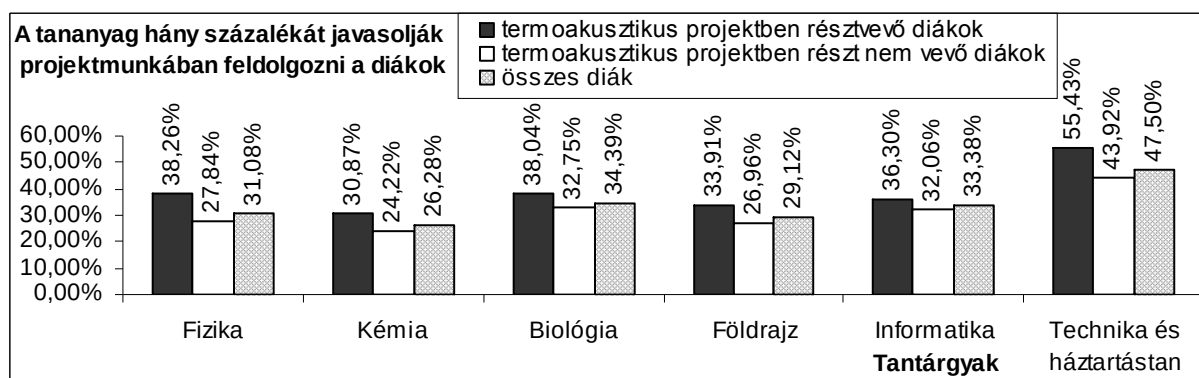
Láthatjuk, hogy a projektfeladatok során az egyéni munkavégzést inkább csak elfogadja (eltűri) a tanulók többsége. Sokkal jobban kedvelik a diákok, ha a projekt folyamán valakivel párban oldhatnak meg valamilyen feladatot, és egyértelműen a csoportos munkavégzést preferálják leginkább a projektekben (8.2.6. táblázat). Ehhez persze az is szükséges, hogy a projektmunka során olyan csoportok jöjjenek létre, melyekben a tagok jól tudnak együtt dolgozni. (Egy rosszul összeállított csoporton belül valószínűleg a tagok nem szívesen dolgoznak együtt, tehát itt nem is valósul meg „valódi” kooperatív munkavégzés.) A statisztikai t-próba alapján megállapítottam a két mintából, hogy a termoakusztikus projektfeladatban résztvevő tanulók és a kontroll csoporthoz tartozó tanulók által megadott értékek között nem mutatatható ki szignifikáns a különbség $\alpha=0,05$ szignifikancia szint mellett, sem az egyéni, sem a páros, sem a csoportos munkavégzés tekintetében (Beke, 2011c).

A 7. kérdésben arra kerestem választ, hogy a tanulók szerint a tananyag hány százalékát lehetne (kellene) projektmunkával feldolgozni a megadott tantárgyakból? (Válaszként egy-egy százalék értéket kellett beírni 0% és 100% között.)

8.2.7. táblázat A vizsgált tantárgyakból a tananyag hány százalékát lenne érdemes projekt-módszerrel feldolgozni a tanulók szerint (átlagértékek).

Tantárgy	Vizsgált tanulók	Átlagérték	Szórás	Minimális érték	Maximális érték
Fizika	A termoakusztikus projektben résztvevő tanulók	38,26%	9,96%	25%	60%
	A termoakusztikus projektben részt nem vevő tanulók	27,84%	10,87%	10%	60%
	Összes tanuló	31,08%	11,59%	10%	60%
Kémia	A termoakusztikus projektben résztvevő tanulók	30,87%	10,41%	20%	60%
	A termoakusztikus projektben részt nem vevő tanulók	24,22%	10,36%	10%	50%
	Összes tanuló	26,28%	10,76%	10%	60%
Biológia	A termoakusztikus projektben résztvevő tanulók	38,04%	13,80%	20%	70%
	A termoakusztikus projektben részt nem vevő tanulók	32,75%	13,58%	15%	65%
	Összes tanuló	34,39%	13,77%	15%	70%
Földrajz	A termoakusztikus projektben résztvevő tanulók	33,91%	12,52%	10,00%	60,00%
	A termoakusztikus projektben részt nem vevő tanulók	26,96%	12,13%	10,00%	50,00%
	Összes tanuló	29,12%	12,59%	10,00%	60,00%
Informatika	A termoakusztikus projektben résztvevő tanulók	36,30%	11,89%	25,00%	65,00%
	A termoakusztikus projektben részt nem vevő tanulók	32,06%	13,31%	15,00%	65,00%
	Összes tanuló	33,38%	12,96%	15,00%	65,00%
Technika	A termoakusztikus projektben résztvevő tanulók	55,43%	13,31%	40,00%	90,00%
	A termoakusztikus projektben részt nem vevő tanulók	43,92%	17,73%	25,00%	100,00%
	Összes tanuló	47,50%	17,25%	25,00%	100,00%

A tanulók válaszaiból kiderült, hogy szerintük a természettudományos tantárgyaknak hozzávetőlegesen 30%-át érdemes lenne projektelvűen feldolgozni (8.2.7. táblázat). Egyetlen tanuló sem jelölt meg 10%-nál kisebb értéket, tehát a felsorolt tantárgyak tananyagának minimum egy tizedét „szeretnék” a diákok projektmódszerrel „megismerni” (8.2.7. ábra) (Beke, 2011c).

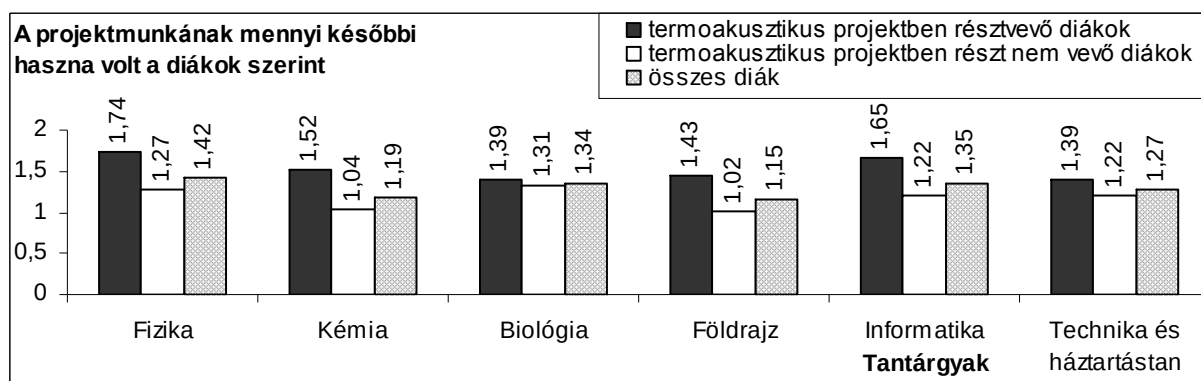


8.2.7. ábra A tanulók szerint a tananyag hány százalékát lehetne (kellene) projektmunkával feldolgozni a megadott tantárgyakból.

A legmagasabb átlagértékek technika, illetve háztartástan tantárgyak esetén adódtak. (Ezeket a tantárgyakat csak az általános iskolai évfolyamokon tanulják a diákjaink, de mindenki válaszolt erre az alkérdésre is, tehát valószínűleg a korábbi emlékek és élmények hatását fogalmazták meg azok, akik már nem tanulják ezeket a szaktárgyakat. Általában a fiúk technikát, a lányok háztartástant tanulnak.) Ez a két tantárgy az úgynevezett „képesség-tárgyak” közé tartozik, de gyakorlatilag mindegyik projektünkben szükség volt ilyen jellegű ismeretekre is. Láthatjuk, hogy ennél a két tantárgynál a tananyagnak majdnem felét javasolják a tanulók projektelvű feldolgozásra, sőt volt olyan diák is, aki szerint ezeknél a tantárgyaknál a teljes tananyagot projekt módszerrel „kellene” feldolgozni. Azt is megfigyelhetjük, hogy a termoakusztikus projektben résztvevő tanulók magasabb értékeket adtak meg, mint azok a diákok, akik nem vettek részt ebben a projektfeladatban, tehát a termoakusztikus projekt hatására „projekt-tudatosabbá” váltak a résztvevő tanulók. Valószínű, hogy ezek a tanulók a későbbi projekt munkához pozitívabban állnak hozzá, azaz a projektekkel kapcsolatos attitűdjük javult. A statisztikai t-próba alapján megállapítottam a két mintából, hogy a termoakusztikus projektfeladatban résztvevő tanulók és a kontroll csoporthoz tartozó tanulók által megadott értékek között szignifikáns a különbség fizika, kémia, földrajz és technika (háztartástan) tantárgyakból $\alpha=0,05$ szignifikancia szint mellett (Beke, 2011c).

A 8. kérdésben arra voltam kíváncsi, hogy a megadott tantárgyak esetén a projekt munkának volt-e későbbi haszna, eredménye a tanulók szerint? (Válaszként egy-egy egész számot kellett beírni -2 és 2 között.)

A válaszok alapján megállapítottam, hogy a tanulók mindegyik tantárgy esetén hasznosnak értékelték a projekt munkát, minden esetben 1 feletti tantárgyi „átlagok” jöttek ki a részminták és az összesítések alapján is (8.2.8. ábra) (Beke, 2011c).



8.2.8. ábra A tanulók szerint a megadott tantárgyakból mennyi későbbi haszna volt a projekt munkának. (A maximális érték 2.)

8.2.8. táblázat A vizsgált tantárgyakból a projektfeladatoknak mennyi későbbi haszna volt a tanulók szerint (átlagértékek). (A maximális érték 2.)

Tantárgy	Vizsgált tanulók	Átlagérték	Szórás	Minimális érték	Maximális érték
Fizika	A termoakusztikus projektben résztvevő tanulók	1,74	0,45	1	2
	A termoakusztikus projektben részt nem vevő tanulók	1,27	0,72	0	2
	Összes tanuló	1,42	0,68	0	2
Kémia	A termoakusztikus projektben résztvevő tanulók	1,52	0,51	1	2
	A termoakusztikus projektben részt nem vevő tanulók	1,04	0,69	0	2
	Összes tanuló	1,19	0,68	0	2
Biológia	A termoakusztikus projektben résztvevő tanulók	1,39	0,50	1	2
	A termoakusztikus projektben részt nem vevő tanulók	1,31	0,62	0	2
	Összes tanuló	1,34	0,58	0	2
Földrajz	A termoakusztikus projektben résztvevő tanulók	1,43	0,59	0	2
	A termoakusztikus projektben részt nem vevő tanulók	1,02	0,65	0	2
	Összes tanuló	1,15	0,66	0	2
Informatika	A termoakusztikus projektben résztvevő tanulók	1,65	0,49	1	2
	A termoakusztikus projektben részt nem vevő tanulók	1,22	0,58	0	2
	Összes tanuló	1,35	0,58	0	2
Technika	A termoakusztikus projektben résztvevő tanulók	1,39	0,50	1	2
	A termoakusztikus projektben részt nem vevő tanulók	1,22	0,64	0	2
	Összes tanuló	1,27	0,60	0	2

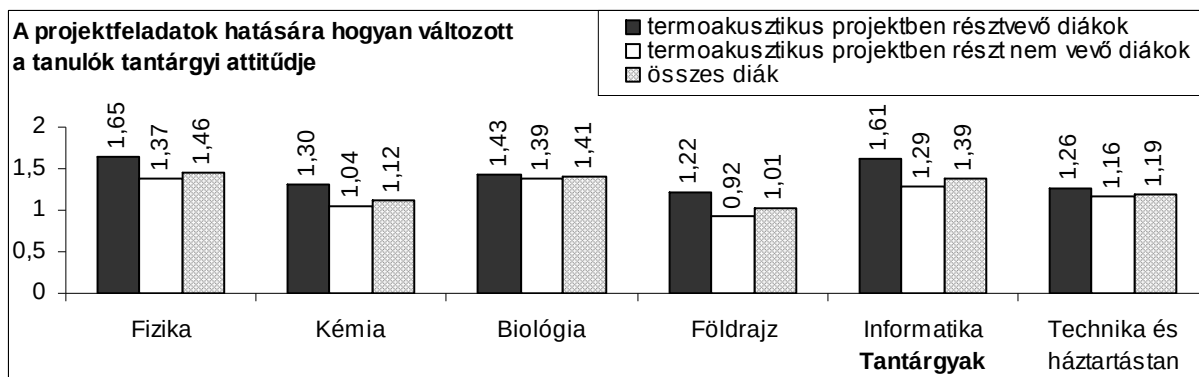
A projektmunka legkevesebb későbbi hasznát földrajz tantárgyból látták a diákok. Külön öröm volt számomra, hogy a legjobb átlagértékek fizika és informatika tantárgyak esetén adódtak; tehát e tantárgyak esetén a tanulók egyértelműen úgy ítélik meg, hogy a munkájuk eredményeit, tapasztalatait a projektek után is hasznosíthatják (8.2.8. táblázat). A statisztikai t-próba alapján megállapítottam a két mintából, hogy a termoakusztikus projektfeladatban résztvevő tanulók és a kontroll csoporthoz tartozó tanulók által megadott értékek között szignifikáns a különbség fizika, kémia, földrajz és informatika tantárgyakból $\alpha=0,05$ szignifikancia szint mellett (Beke, 2011c).

A 9. kérdésben arra kerestem választ, hogy a megadott tantárgyak esetén a projektekben való részvétel hatására tanulóknak változott-e pozitív vagy negatív irányba az adott szaktárgyakhoz fűződő viszonyuk; másként fogalmazva a szaktárgyakhoz kapcsolódó tanulói attitűd változását vizsgáltam. (Válaszként egy-egy egész számot kellett beírni -2 és 2 között.)

9. táblázat A vizsgált tantárgyakból a projektfeladatok hatására hogyan változott a tanulók tantárgyi attitűdje (átlagértékek). (A maximális érték 2.)

Tantárgy	Vizsgált tanulók	Átlagérték	Szórás	Minimális érték	Maximális érték
Fizika	A termoakusztikus projektben résztvevő tanulók	1,65	0,49	1	2
	A termoakusztikus projektben részt nem vevő tanulók	1,37	0,63	0	2
	Összes tanuló	1,46	0,60	0	2
Kémia	A termoakusztikus projektben résztvevő tanulók	1,30	0,63	0	2
	A termoakusztikus projektben részt nem vevő tanulók	1,04	0,69	0	2
	Összes tanuló	1,12	0,68	0	2
Biológia	A termoakusztikus projektben résztvevő tanulók	1,43	0,51	1	2
	A termoakusztikus projektben részt nem vevő tanulók	1,39	0,67	0	2
	Összes tanuló	1,41	0,62	0	2
Földrajz	A termoakusztikus projektben résztvevő tanulók	1,22	0,67	0	2
	A termoakusztikus projektben részt nem vevő tanulók	0,92	0,69	0	2
	Összes tanuló	1,01	0,69	0	2
Informatika	A termoakusztikus projektben résztvevő tanulók	1,61	0,58	0	2
	A termoakusztikus projektben részt nem vevő tanulók	1,29	0,70	0	2
	Összes tanuló	1,39	0,68	0	2
Technika	A termoakusztikus projektben résztvevő tanulók	1,26	0,62	0	2
	A termoakusztikus projektben részt nem vevő tanulók	1,16	0,61	0	2
	Összes tanuló	1,19	0,61	0	2

A tanulók válaszaiból kiderült, hogy a projektfeladatok hatására minden tantárgy esetén javult az adott szaktárgy tanulói megítélése, azaz javult a tantárgyi attitűd. Egyetlen tanuló sem jelölt meg negatív értéket semelyik tantárgy esetén sem, tehát a megkérdezettek között nincs olyan diák, aki a projektmunka hatására kevésbé „szeretné” az adott tantárgyat, mint azt a projektet megelőzően tette (8.2.9. táblázat). A legalacsonyabb átlagérték földrajzból adódott (1,01), de még ez is jónak mondható. A legmagasabb átlagérték fizika tantárgyból jött ki (1,46), ami egyértelműen azt jelzi, hogy ehhez a tantárgyhoz sokkal pozitívabban állnak hozzá a tanulók a projektmunkát követően (8.2.9. ábra). A fizikát tanító pedagógusok valószínűleg megtapasztalták, hogy milyen nehéz a tanulók egy jelentős hányadát motiválni a szaktárgy tanulására. Maga a fizika tananyag nem lett „könnyebb” a projektek hatására, de a tanulók „beállítódását” mégis sikerült pozitív irányba elmozdítani; a motiváltabb tanulók a későbbiek folyamán hatékonyabban dolgoznak a tanórákon is. Ez meggyőzheti a kételkedő pedagógusokat arról, hogy érdemes a leggyakrabban alkalmazott frontális osztálymunka mellett (helyett) csoportos projektmunkát szervezni (Beke, 2011c).



8.2.9. ábra Hogyan változott a tanulók tantárgyi attitűdje a projektfeladatok hatására. (A maximális érték 2.)

A statisztikai t-próba alapján megállapítottam a két minta alapján, hogy a thermoakusztikus projektfeladatban résztvevő tanulók és a kontroll csoporthoz tartozó tanulók által megadott értékek között szignifikánsnak mondható a különbség fizika és informatika tantárgyakból $\alpha=0,05$ szignifikancia szint mellett. Láthatjuk, hogy fizika tantárgyból szignifikáns a különbség a 7-ik, a 8-ik és a 9-ik kérdésre adott tanulói válaszok esetén a két mintában; biológiából viszont sem a 7-ik, sem a 8-ik, sem a 9-ik kérdés válasza alapján nem mutatkozott szignifikáns különbség az adott szignifikancia szinten.

A projektfeladatok közül volt olyan, ami csak egyetlen tantárgyat érintett, de voltak olyan projektek is, amelyekben több tantárgy is összekapcsolódott. Melyik típus mennyire tetszett? Erre kerestem választ a 10. kérdésben. (Válaszként egy-egy egész számot kellett beírni -2 és 2 között.)

8.2.10. táblázat Mennyire tetszettek az egy tantárgyat érintő projektfeladatok, illetve mennyire tetszettek a több tantárgyat összekapcsoló projektek (átlagértékek). (A maximális érték 2.)

Projekt típusa	Vizsgált tanulók	Átlagérték	Szórás	Minimális érték	Maximális érték
Egy tantárgyat érintő projekt	A thermoakusztikus projektben résztvevő tanulók	1,09	0,60	0	2
	A thermoakusztikus projektben részt nem vevő tanulók	0,69	0,68	-1	2
	Összes tanuló	0,81	0,68	-1	2
Több tantárgyat összekapcsoló projekt	A thermoakusztikus projektben résztvevő tanulók	1,65	0,49	1	2
	A thermoakusztikus projektben részt nem vevő tanulók	1,39	0,63	0	2
	Összes tanuló	1,47	0,60	0	2

A válaszokból az derült ki, hogy a tanulók az egy tantárgyat érintő projektfeladatokat elfogadják, de ezek nem tetszenek nekik különösebb módon. A több tantárgyat érintő projektmunkában sokkal szívesebben vesznek részt, sőt az 1,47-es átlagérték alapján akár azt is kijelenthetjük, hogy a diákok többsége „szeret” integrált, több tantárgyat összekapcsoló projektekben tevékenykedni (8.2.10. táblázat). Ezt a saját tapasztalataim alapján is hasonlóan ítélem meg. A több tantárgyat is érintő projektmunka során az egyes tanulók sokféle tevékenységi formában vesznek részt és ez a változatos munkavégzés pozitívan befolyásolja a diákok hozzáállását is (Beke, 2011c).

A statisztikai t-próba alapján megállapítottam a két mintából, hogy a termoakusztikus projektfeladatban résztvevő tanulók és a kontroll csoporthoz tartozó tanulók által megadott értékek között szignifikáns a különbség az egy tantárgyat érintő projektfeladatokra adott válaszok alapján $\alpha=0,05$ szignifikancia szint mellett; a több tárgyat érintő projektfeladatok tekintetében nem mutatható ki szignifikáns eltérés.

A 11. kérdésben a tanulók leírhatták a projektmunkával kapcsolatos személyes véleményeiket, ötleteiket, gondolataikat, javaslataikat. Ezt a kérdést a diákok többsége üresen hagyta, de voltak olyanok, akik megfogalmaztak néhány észrevételt. Ezek közül idézek néhányat:

„Általában bírtam a projektfeladatokat.” „Lehetne belőlük több is!” „A témazárók helyett lehetnének projektfeladatok!” „Sokat nevettünk.” „Nem kellett minden órán idegeskednünk, mindenki sokkal nyugodtabb volt.” „Már nem félek a fizikától.” „Jó volt, lehet, hogy mérnök leszek.”

A válaszokból az derült ki, hogy a tanulók általában szívesen vettek részt a különböző projektekben és a projektfeladatok során úgy érezték, hogy van értelme és haszna a munkájuknak (Beke, 2011c). A pedagógusok számára talán ez lehet a döntő érv, hogy miért érdemes projekteket tervezni és megvalósítani.

9. Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretném köszönetemet és hálámat kifejezni témavezetőmnek, Dr. Papp Katalin tanárnőnek, hogy tanított és támogatott a munkámban. Valahányszor akadályba ütköztem, mindig voltak segítő ötletei.

Köszönöm a Fizika Doktori Iskola vezetőjének, Dr. Szabó Gábor professzor úrnak, illetve a Kísérleti Fizikai Tanszék vezetőjének, Dr. Szatmári Sándor professzor úrnak, hogy a kutatásaimhoz szükséges szakirodalom és mérőeszközök a tanszéken a rendelkezésemre álltak.

Köszönöm a feleségemnek, a családomnak és barátaimnak, hogy bátorítottak és támogattak.

Köszönöm az iskolai projektfeladatokban résztvevő tanulóknak a munkájukat.

Végül, de nem utolsó sorban, szeretném kifejezni köszönetemet a tanszék minden dolgozójának és a szakmódszertani csoport minden tagjának a munkámhoz nyújtott segítségükért.

10. Felhasznált irodalom

- Ananthkrishnan, N., Deo, S. and Culick, F. E. C. (2005) Reduced-order modeling and dynamics of nonlinear acoustic waves in a combustion chamber. *Combustion Science and Techn.*, **177**, 221–247.
- Annaswamy, A. M., Fleifil, M., Hathout, J. P. and Ghoniem, A. F. (1997) Impact of linear coupling on design of active controllers for the thermoacoustic instability. *Combustion Science and Technology*, **128** (1–6), 131–180.
- Annaswamy, A. M., Fleifil, M., Rumsey, J.W., Prasanth, R., Hathout, J. P. and Ghoniem, A. F. (2000) Thermoacoustic Instability: Model-based Optimal Control Designs and Experimental Validation. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, **8** (6), 905–918.
- Backhaus, S. and Swift, G. W. (1999) A thermoacoustic Stirling heat engine. *Nature*, **399**, 335–338.
- Backhaus, S. and Swift, G. W. (2000) A thermoacoustic–Stirling heat engine: Detailed study. *J. Acoust. Soc. Am.* **107** (6), 3148–3166.
- Backhaus, S. and Swift, G. W. (2001) Fabrication and use of parallel-plate regenerators in thermoacoustic engines. *Proceedings of the 36th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*, Savannah GA, 29 July – 2 August.
- Backhaus, S. and Swift, G. W. (2002) New varieties of thermoacoustic engines. *9th International Congress on Sound and Vibration*, July.
- Bailey, J. J. (1957) A type of flame-excited oscillation in a tube. *J. of Applied Mechanics*, **24**, 333–339.
- Balasubramanian, K. and Sujith, R. I. (2008a) Non-normality and nonlinearity in combustion–acoustic interaction in diffusion flames. *Journal of Fluid Mechanics*, **594**, 29–57.
- Balasubramanian, K. and Sujith, R. I. (2008b) Thermoacoustic instability in a Rijke tube: nonnormality and nonlinearity. *Physics of Fluids*, **20** (4), 044103.
- Balázs Ildikó, Ostorics László és Szalay Balázs (2007) *A ma oktatása és a jövő társadalma. PISA 2006 összefoglaló jelentés*, Oktatási Hivatal, Budapest.
- Bayly, B. J. (1986) Onset and equilibration of oscillations in general Rijke devices. *Journal of the Acoustical Society of America*, **79** (3), 846–851.
- Báthory Zoltán (1999) Természettudományos nevelésünk. *Iskolakultúra*, (10), 46–54.
- Beke Tamás (2009a) Termoakusztikus jelenségek vizsgálata iskolai projektfeladatban. *A fizika tanítása*, **17** (4), 7–14.
- Beke Tamás (2009b) Termoakusztikus projektfeladat Rijke-cső vizsgálatára. *Fizikai Szemle*, **59** (7–8), 253–257.
- Beke Tamás (2009c) Observation of thermoacoustic phenomena in a school project. *Physics Education*, **44** (5), 536–548.
- Beke Tamás (2009d) Thermoacoustic school project. *Acta Didactica Napocensia*, **2** (2), 9–24.
- Beke Tamás (2009e) Professional scientific blog. *Acta Didactica Napocensia*, **2** (1), 49–58.
- Beke Tamás (2009f) Application of the table manager program in the physics education. *Acta Didactica Napocensia*, **2** (3), 61–74.
- Beke Tamás (2010a) Thermoacoustic school project work with an electrically heated Rijke tube. *Physics Education*, **45** (5), 516–528.
- Beke Tamás (2010b) Modelling of thermoacoustic phenomena in an electrically heated Rijke tube. *European Journal of Physics*, **31** (6), 1331–1344.
- Beke Tamás (2010c) Termoakusztikus iskolai projektfeladat Rijke csővel. in: *Fizikatanítás Tartalmasan és Érdekesen* (szerk. Juhász András és Tél Tamás), ELTE, Fizika Doktori Iskola, Budapest, 453–460.
- Beke Tamás (2010d) Elektromosan fűtött Rijke-cső termoakusztikus modellje. *Fizikai Szemle*, **60** (9), 305–311.
- Beke Tamás (2011a) Rijke-type thermoacoustic oscillations. *European Journal of Physics*, **32** (2), 305–327.
- Beke Tamás (2011b) Termoakusztikai érdekességek. *Fizikai Szemle*, **61** (közlésre elfogadva).

- Beke Tamás (2011c) A projektmunka hatásai a természettudományos tantárgyak tanulásában. *Iskolakultúra*, **11** (4–5) 3–21.
- Billoud, G., Galland, M. A., Huynh Huu, C. and Candel, S. (1992) Adaptive active control of combustion instabilities. *Combust. Sci. and Tech.*, **81**, 257–283.
- Budó Ágoston (1997) *Kísérleti fizika I. (Mechanika, Hangtan, Hőtan)*, Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest.
- Burnley, V. S. (1996) *Nonlinear Combustion Instabilities and Stochastic Sources*, Ph.D. thesis, California Institute of Technology, Pasadena.
- Burnley, V. S. and Culick, F. E. C. (2000) Comment on triggering of longitudinal combustion instabilities in rocket motors: nonlinear combustion response. *Journal of Propulsion and Power*, **16** (1), 164–166.
- Cao, N., Olson, J. R., Swift, G. W. and Chen, S. (1996) Energy flux density in a thermoacoustic couple. *Journal of the Acoustical Society of America*, **99** (6), 3456–3464.
- Carrier, G. F. (1955) The mechanics of the Rijke tube. *Quarterly Applied Mathematics*, **12**, 383–395.
- Ceperley, P. H. (1979) A pistonless Stirling engine–The traveling wave heat engine. *J. Acoust. Soc. Am.* **66**, 1508–1513.
- Churchill, S. W. (1990) Combined free and forced convection around immersed bodies. *Hemisphere Heat Exchanger Design Handbook*, (ed. Hewitt, G.F.), 2.5.9., Hemisphere, Washington, D.C.
- Churchill, S. W. and Chu, H. H. S. (1975) Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a horizontal cylinder. *International Journ. of Heat and Mass Transfer*, **18**, 1049–1053.
- Clavin, P., Kim, J. S. and Williams, F. A. (1994) Turbulence-induced noise effects on high-frequency combustion instabilities, *Combustion Science and Technology*, **96**, 61–84.
- Collyer, A. A. and Ayres, D. J. (1972) The generation of sound in a Rijke tube using two heating coils. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **5**, 73–75.
- Culick, F. E. C. (1976) Nonlinear behavior of acoustic waves in combustion chambers. Parts I and II. *Acta Astronautica*, **3**, 714–757.
- Culick, F. E. C. (1988) Combustion instabilities in liquid-fuelled propulsion systems - an overview. *AGARD-CP-450*.
- Culick, F. E. C. (1997) A note on ordering perturbations and insignificance of linear coupling in combustion instabilities. *Combustion Science and Technology*, **126**, 359–379.
- Culick, F. E. C. and Magiawala, K. (1979) Excitation of acoustic modes in a chamber by vortex shedding. *Journal of Sound and Vibration*, **64**, 455–457.
- Culick, F. E. C. and Yang, V. (1992) Prediction of the stability of unsteady motions in solid-propellant rocket motors. in: *Nonsteady Burning and Combustion Stability of Solid Propellants*, (edited by DeLuca, L., Price, E. W. and Summerfield, M.), Progress in Astronautics and Aeronautics, AIAA, NY, **143**, 719–780.
- de Blok, C. M. (1998) Thermoacoustic system. Dutch Patent. Internat. Appl. Numb. PCT/NL98/00515.
- Dewey, J. (1900) *The School and Society*, Univ. of Chicago Press, Chicago.
- Dewey, J. (1976) *A nevelés jellege és folyamata*, Tankönyvkiadó, Budapest.
- Dickey, N. S., Selamet, A., and Novak, J. M. (2000) The effect of high-amplitude sound on the attenuation of perforated tube silencers. *Journal of the Acoustical Soc. of America*, **108** (3), 1068–1081.
- Dombi Mária Adrienn (2006) A projekt módszer alkalmazása a természettudományok oktatásában. *Módszertani közlemények*, 2. szám, 55–58.
- Dowling, A. P. (1995) The calculation of thermoacoustic oscillations. *Journal of Sound and Vibration*, **180** (4), 557–581.
- Dowling, A. P. and Ffowcs-Williams, J. E. (1983) *Sound and Sources of Sound*, Ellis Horwood, West Sussex, U.K.
- Dowling, A. P. and Stow, S. R. (2003) Acoustic analysis of gas turbine combustors. *Journal of Propulsion and Power*, **19**, 751–764.

- Entezam, B., Van Moorhem, W. K. and Majdalani, J. (2002) Two-dimensional numerical verification of the unsteady thermoacoustic field inside a Rijke-type pulse combustor. *Numerical Heat Transfer*, **A 41**, 245–262.
- Fahey, D. and Timbie, P. (2006) Thermoacoustic Oscillations. *Wave Motion and Optics*, Spring, 1–9.
- Farrell, B. F. and Ioannou, P. J. (2002) Perturbation growth and structure in uncertain flows. part 1 and part 2., *Journal of Atmospheric Sciences*, **59**, 2629–2664.
- Feldman, K. T. (1968) Review of the literature on Rijke thermoacoustic phenomena. *Journal of Sound and Vibration*, **7** (1), 83–89.
- Feldman, K. T. and Carter, L. (1970) A study of heat-driven pressure oscillations in a gas. *ASME Journal of Heat Transfer*, **92**, 536–541.
- Fleifil, M., Annaswamy, A. M., Hathout, J. P. and Ghoniem, A. F. (1998) The origin of secondary peaks with active control of thermoacoustic instability. *Combustion Science and Technol.*, **133**, 227–260.
- Fung, Y. T., Yang, V (1992) Active control of nonlinear pressure oscillations in combustion chambers. *Journal of Propulsion and Power*, **8** (6), 1282–1289.
- Fung, Y. T., Yang, V. and Sinha, A. (1991) Active control of combustion instabilities with distributed actuators. *Combust. Sci. and Tech.*, **78**, 217–245.
- Fülöp Mária (2008) A kooperatív tanulás, A tanulók társas kapcsolatai, Együtt – működik. *Tanító és Tanár*, (1), 30–31.
- Gardner, D. L. and Swift, G. W. (2003) A cascade thermoacoustic engine. *J. Acoust. Soc. Am.* **114** (4), 1905–1919.
- Garrett, S. L. and Backhaus, S. (2000) The power of sound. *American Scientist*, **88** (6), 516–525.
- Gopinath, A., Tait, N. L. and Garrett, S. L. (1998) Thermoacoustic streaming in a resonant channel: The time-averaged temperature distribution. *J. Acoust. Soc. Am.* **103**, 1388–1405.
- Gulati, A. and Mani, R. (1992) Active control of unsteady combustion-induced oscillations. *Journal of Propulsion and Power*, **8** (5), 1109–1115.
- Hantschk, C. C. and Vortmeyer, D. (1999) Numerical simulation of self-excited thermoacoustic instabilities in a Rijke tube. *Journal of Sound and Vibration*, **277** (3), 511–522.
- Hatton, A. P., James, D. D. and Swire, H. W. (1970) Combined forced and free convection with low-speed air flow over horizontal cylinders. *Journal of Fluid Mechanics* **42** 17–31.
- Heckl, M. A. (1985) *Heat sources in acoustic resonators*, Ph.D. Thesis, Cambridge University Press, Cambridge, U.K.
- Heckl, M. A. (1988) Active control of the noise from a Rijke tube. *Journal of Sound and Vibration*, **124**, 117–133.
- Heckl, M. A. (1990) Non-linear acoustic effects in the Rijke tube. *Acustica* **72**, 63–71.
- Hegedüs Gábor (szerk.) (2002) *Projektpedagógia*, Kecskeméti Főiskola TFK, Kecskemét.
- Higgins, B. (1802) *Journal of Natural Philosophy and Chemical Arts*, **1**, 129.
- Hortobágyi Katalin (1991) *Projekt kézikönyv, Alternatív pedagógiák és módszerek*, Iskolafejlesztés Alapítvány - OKI Iskolafejlesztési Központ, ANTENUS-ERFAPRESS Kft.
- Howe, M. S. (1998) *Acoustics of Fluid-Structure Interactions*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Ingard, U. and Singhal, V. K. (1975) Effect of flow on the acoustic resonances of an open-ended duct. *Journal of the Acoustical Society of America*, **58**, 788–793.
- Karpov, S. and Prosperetti, A. (1998) Linear thermoacoustic instability in the time domain. *J. Acoust. Soc. Am.*, **103**, 3309–3317.
- Karpov, S. and Prosperetti, A. (2000) Nonlinear saturation of the thermoacoustic instability. *J. Acoust. Soc. Am.*, **107** (6), 3130–3146.
- Kedia, K. S. (2008) *Thermoacoustic Instability in a Rijke Tube: Impact of Linear Coupling and Stochastic Sources*, Department of Aerospace Engineering, Indian Institute of Technology, Madras.
- Kerwin, E. M. Jr. (1954) *A study of a class of thermoacoustic oscillations*, Sc.D. thesis, Massachusetts Institute of Technology, Boston.

- Kilpatrick, W. H. (1919) *The project Method*, Teachers College Record, New York.
- Knausz Imre (2009) Interjú két ülésben - Horányi Gáborral I. *Tanít-tani alternatív iskolai folyóirat*, (3), 17–25.
- Korzenszky Richárd (2004) Tanítsunk? Neveljünk? *Mester és Tanítvány*, (4), 114–121.
- Kwon, Y. P. and Lee, B. H. (1985) Stability of the Rijke thermoacoustic oscillation. *Journal of the Acoustical Society of America*, **78** (4), 1414–1420.
- Lajos Tamás (1992) *Az áramlástan alapjai*, Budapesti Műszaki Egyetem, Budapest.
- Lehmann, K. O. (1937) Über die Theorie der Netztöne. *Annalen der Physik*, **29**, 527–555.
- Levine, H. and Schwinger, J. (1948) On the radiation of sound from an unflanged circular pipe. *Physical Review Letters*, **73**, 383–406.
- Lienhard, J. H. (1973) On the commonality of equations for natural convection from immersed bodies. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **16**, 2121–2123.
- Lienhard, J. W. IV. and Lienhard, J. W. V. (2003) *A Heat Transfer Textbook* (3rd edition) Phlogiston Press, Cambridge, Massachusetts.
- Lieuwen, T. C. (2003) Statistical characteristics of pressure oscillations in a premixed combustor. *Journal of Sound and Vibration*, **26** (1), 3–17.
- Lieuwen, T. C. and Banaszuk, A. (2005) Background noise effects on combustor stability. *Journal of Propulsion and Power*, **21** (1), 25–31.
- Lord Rayleigh (Strutt, J. W.) (1878) The explanation of certain acoustical phenomena. *Nature*, **18**, 319–321.
- Lord Rayleigh (Strutt, J. W.) (1879) Acoustical observations. *Philosophical Magazine*, **5** (7), 149–162.
- Lord Rayleigh (Strutt, J. W.) (1896) *The Theory of Sound*, **2**, (2nd ed.), Macmillan, London.
- Lönnermark, A. (2005) On the Characteristics of Fires in Tunnels. Lund Institute of Technology, Lund.
- Majdalani, J., Entezam, B. and Van Moorhem, W. K. (2001) The Rijke Tube Revisited via Laboratory and Numerical Experiments. *American Institute of Aeronautics and Astronautics 2001–2961*, 35th AIAA Thermophysics Conference, (11–14 June 2001), Anaheim, CA.
- Maling, G. C. (1963) Simplified analysis of the Rijke phenomenon. *Journal of the Acoustical Society of America*, **35** (7), 1058–1060.
- Margolin, A. (1999) Early investigations of solid-propellant combustion instability in Russia. *Journal of Propulsion and Power*, **15** (6), 922–925.
- Marone, I. Y. and Tarakanovskii, A. A. (1967) Investigation of sound generation in a Rijke tube. *Soviet Physics - Acoustics*, **12** (2), 261–263.
- Matveev, K. I. (2003) *Thermoacoustic Instabilities in the Rijke Tube: Experiments and Modeling*. Ph.D. thesis, California Institute of Technology, Pasadena.
- Matveev, K. I. and Culick, F. E. C. (2003a) Limit-Cycle Properties of a Rijke Tube. *Technical Acoustics*, **12**, 1–13.
- Matveev, K. I. and Culick, F. E. C. (2003b) A model for combustion instability involving vortex shedding. *Combustion Science and Technology*, **175**, 1059–1083.
- McIntosh, A. C. and Rylands, S. (1996) A model of heat transfer in Rijke Tube Burners. *Combustion Science and Technology*, **113–114**, 273–289.
- McQuay, M. Q., Dubey, R. K. and Carvalho, J. A. (2000) The effect of acoustic mode on time-resolved temperature measurements in a Rijke-tube pulse combustor. *Fuel*, **79** (13), 1645–1655.
- Meirovitch, L. (1967) *Analytical Methods in Vibrations*, Macmillan Publishing Co., Inc., New York.
- Merk, H. J. (1957) Analysis of heat-driven oscillations of gas flows. *Applied Scientific Research*, **A 6**, 402–420.
- Mills, A. F. (1992) *Heat Transfer*, Irwin, Homewood, Illinois.
- M. Nádaszi Mária (2003) *Projektoktatás, Elmélet és gyakorlat*, Gondolatok Kiadói Kör, Budapest.
- Nemesné Müller Márta (1933) Életgyógyászatban folyó tanítás a Családi Iskolában. *Magyar Paedagogia*, (11).

- Neumeier, Y. and Zinn, B. T. (1995) Active control of combustion instabilities using real time identification of unstable combustor modes. in: *Proceedings of the IEEE Conference on Control Applications*, Albany, NY, 691–698.
- Neuringer, J. L. and Hudson, G. E. (1952) An investigation of sound vibrations in a tube containing a heat source. *Journal of the Acoustical Society of America*, **24**, 667–674.
- Nicoli, C. and Pelce, P. (1989) One-dimensional model for the Rijke tube. *Journal of Fluid Mechanics*, **202**, 83–96.
- Nicoud, F., Benoit, L., Sensiau, C. and Poinot, T. (2007) Acoustic modes in combustors with complex impedances and multidimensional active flames. *AIAA Journal*, **45**, 426–441.
- Papp Katalin és Nagy Anett (2007) Public Relation és a fizikatanítás - avagy hogyan tegyük vonzóvá a fizika tantárgyat. *Fizikai Szemle*, **57** (1), 18–24.
- Piskoltiné Tóth Andrea (2006) A kooperatív tanulás. *Módszertani közlemények*, (3), 89–94.
- Pukánszky Béla és Németh András (1996) *Neveléstörténet*, Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest.
- Pun, W. (2001) *Measurements of Thermo-Acoustic Coupling*, Ph.D. Thesis, California Institute of Technology, Pasadena.
- Putnam, A. A. and Dennis, W. R. (1954) Burner Oscillations of the Gauze-Tone Type. *Journal of the Acoustical Society of America*, **26** (5), 716–725.
- Radnóti Katalin (2008a) A projektmódszer alkalmazásának gyakorisága a közoktatásban. in: *A projektpedagógia mint az integrált nevelés egy lehetséges eszköze* (szerk. Radnóti Katalin), Educatio Társadalmi Szolgáltató Közhasznú Társaság, Budapest, 11–22.
- Radnóti Katalin (2008b) Pedagógiai koncepció. in: *A projektpedagógia mint az integrált nevelés egy lehetséges eszköze* (szerk. Radnóti Katalin), Educatio Társadalmi Szolgáltató Közhasznú Társaság, Budapest, 23–62.
- Radnóti Katalin (2009) A természettudományi nevelés és a fizikaoktatás helyzete a 2008-as tanári felmérés tükrében. *Új Pedagógiai Szemle*, (3), 3–16.
- Radnóti Katalin, Nahalka István, Poór István és Wagner Éva (2002) *A fizikatanítás pedagógiája*. Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest.
- Raun, R. L. and Beckstead, M. W. (1993) A numerical model for temperature gradient and particle effects on Rijke burner oscillations. *Combustion and Flame*, **94**, 1–24.
- Raun, R. L., Beckstead, M. W., Finlinson, J. C. and Brooks, K. P. (1993) A review of Rijke tubes, Rijke burners and related devices. *Progress in Energy and Combustion Science*, **19**, 313–364.
- Réti Mónika (2009) A természettudományok helyzete. in: *Szárny és teher, A magyar oktatás helyzetének elemzése - háttéranyag, A Bölcsék Tanácsa oktatási szakértői bizottságának és a bizottság által felkért szakértőknek az elemzése*, Bölcsék Tanácsa Alapítvány, 97–102.
- Riess, P. (1859) Das Anblasen offener Röhren durch eine Flamme. *Annalen der Physik und Chemie*, **2** (108), 653–656.
- Riess, P. (1860) Anhaltendes Tönen einer Röhre durch eine Flamme. *Annalen der Physik und Chemie*, **2** (109), 145–147.
- Rijke, P. L. (1859) Notiz über eine neue Art, die in einer an beiden Enden offenen Röhre enthaltene Luft in Schwingungen zu versetzen. *Annalen der Physik*, **2** (107), 339–343.
- Rocard, M., Csermely, P., Jorde, D., Lenzen, D., és Walberg-Henriksson, H. (2007) *Science Education NOW: A renewed Pedagogy for the Future of Europe*, (Rocard-report), Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.
- Rott, N. (1969). Damped and thermally driven acoustic oscillations in wide and narrow tubes. *Z. Angew. Math. Phys.*, **20**, 230–243.
- Rott, N. (1976) Thermally driven acoustic oscillations. IV. Tubes with variable cross section. *Z. Angew. Math. Phys.*, **27**, 197–224.
- Rott, N. (1980) Thermoacoustics. *Adv. Appl. Mech.*, **20**, 135–175.
- Rott, N. (1983) Thermally driven acoustic oscillations, VI. Excitation and power. *Z. Angew. Math. Phys.*, **34**, 609–626.

- Sarpotdar, S. M., Ananthkrishnan, N. and Sharma, S. D. (2003) The Rijke Tube - a Thermo-acoustic Device. *Resonance*, **8** (1), 59–71.
- Schmid, P. J. (2007) Nonmodal stability theory. *Annual Review of Fluid Mechanics*, **39**, 129–162.
- Stuart, J. T. (1966) Double boundary layers in oscillatory viscous flow. *J. of Fluid Mech.*, **24**, 673–687.
- Swift, G. W. (1988) Thermoacoustic engines. *Journal of the Acoustical Soc. of Am.*, **84** (4), 1145–1180.
- Széplaki Erzsébet (2008) Már nem elég lámpásnak lenni (Megváltozó pedagógiai szerepek). *Tanító és Tanár*, (1), 26–27.
- Tarakanovskii, A. A. and Steinberg, V. B. (1972) Generation of acoustic oscillations in a Rijke tube with a double gauze system. *Soviet Physics - Acoustics*, **18** (2), 246–250.
- Torczynski, J. R. and O'Hern, T. J. (1995) Reynolds number dependence of the drag coefficient for laminar flow through electrically-heated photoetched screens. *Experiments in Fluids*, **18**, 206–209.
- Ujházy András (2004) Hagyjátok csodálkozni a gyerekeket! (avagy hogyan tanítsunk természettudományos tárgyakat). *Mester és Tanítvány*, (3), 121–128.
- Victor András (1991) A természettudományos oktatásunk nemzetközi összehasonlítások tükrében. *Természet Világa*, (11).
- Wheatley, J. C. (1986) Intrinsically irreversible or natural heat engines. in: *Frontiers in Physical Acoustics*, (edited by Sette, D.), Amsterdam, 435–475.
- Wheatley, J. C., Hofler, T., Swift, G. W. and Migliori, A. (1985) Understanding some simple phenomena in thermoacoustics with applications to acoustical heat engines. *Am. J. Phys.*, **53**, 147–162.
- Widrow, B. and Stearns, S. D. (1985) *Adaptive signal processing*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J.
- Wollan, J. J., Swift G. W., Backhaus, S. and Gardner, D. L. (2002) Development of a thermoacoustic natural gas liquefier. *Proceedings of AIChE Meeting*, New Orleans LA, March 11-14.
- Worlikar, A. S. and Knio, O. M. (1996) Numerical simulation of a thermoacoustic refrigerator. I. Unsteady adiabatic flow around the stack. *J. Comput. Phys.*, **127**, 424–451.
- Worlikar, A. S. and Knio, O. M. (1999) Numerical study of oscillatory flow and heat transfer in a loaded thermoacoustic stack. *Numer. Heat Transfer*, **A35**, 49–65.
- Worlikar, A. S., Knio, O. M. and Klein, R. (1998) Numerical simulation of a thermoacoustic refrigerator. II. Stratified flow around the stack. *J. Comput. Phys.*, **144**, 299–324.
- Yazaki, T., Iwata, A., Maekawa, T. and Tominaga, A. (1998) Traveling wave thermoacoustic engine in a looped tube, *Phys. Rev. Lett.* **81**, 3128–3131.
- Yuan, H., Karpov, S. and Prosperetti, A. (1997) A simplified model for linear and nonlinear processes in thermoacoustic prime movers. II. Nonlinear oscillations. *J. Acoust. Soc. Am.*, **102**, 3497–3506.
- Yoon, H. G., Peddieson, J. and Purdy, K. R. (1998) Mathematical modeling of a generalized Rijke tube. *International Journal of Engineering Science*, **36** (11), 1235–1264.
- Yoon, H. G., Peddieson, J. and Purdy, K. R. (2001) Non-linear response of a generalized Rijke tube. *International Journal of Engineering Science*, **39** (15), 1707–1723.
- Zinn, B. T. and Lores, M. E. (1972) Application of the galerkin method in the solution of nonlinear axial combustion instability problems in liquid rockets. *CST*, **4**, 269–278.
- Zinn, B. T. and. Lieuwen, T. C. (2005) *Combustion instabilities: Basic Concepts, Combustion instabilities in gas turbine engines: operational experience, fundamental mechanisms, and modeling*. AIAA Inc., (edited by Lieuwen, T. C. and Yang, V.).
- Zukauskas, A. (1987) Convective heat transfer in cross flow. in: *Handbook of Single-Phase Convective Heat Transfer* (edited by Kakac, S., Shah, R. K. and Aung, W.), Wiley, New York.

11. Összegzés

2007-ben hozták nyilvánosságra azt a jelentést, melyben az Európai Unióhoz tartozó országokban a természettudományos oktatás megújításának szükségességét vizsgálták. A Rocard Bizottság, más tanulmányokkal összhangban rámutatott, hogy az EU tagállamokban szinte egységesen csökken a felsőoktatásba jelentkező mérnökök száma és a természettudományos szakokra jelentkezők is egyre kevesebben vannak; a fiatalok nagy része nem érdeklődik a természettudományos tantárgyak és a matematika iránt. Európa jövője szempontjából döntő, hogy a természettudományok oktatása fejlődjön, ezért mielőbb cselekedni kell helyi, regionális, országos, sőt egész uniós szinten. A nevelési-oktatási folyamatba a hagyományos szereplők (gyermek, szülő, tanár) mellett egyéb tényezőket is be kell vonni (tudósok, szakemberek, felsőoktatási intézmények, helyi szervezetek, stb.). A természettudományok oktatása csak akkor lehet sikeres, ha képesek leszünk választ adni a XXI. század kihívásaira. A hagyományos elven oktatott természettudományos tantárgyak a legtöbb gyermek számára érthetetlen és felesleges nyűgnek számítanak. Ezen a helyzeten mindenképpen változtatnunk kell (Beke, 2009d). A természettudományos iskolai projektfeladat – mint kollaboratív tudásmegosztó módszer – megfelel e céloknak. A dolgozatom célja a természettudományos oktatásban alkalmazott projekt módszer jellemzőinek vizsgálata és a kidolgozott módszer tapasztalatainak bemutatása volt.

A dolgozatomban egy termoakusztikai projektjellegű fizikai mérési és vizsgálati feladatot mutatok be részletesen, melyet Rijke csövekkel végeztünk. A projekt célja az volt, hogy a tanulók fizikai ismereteinek bővítése mellett egyrészt az alkalmazott informatikai, másrészt a team-munka jellegű képességeik és készségeik is fejlődjenek. Az iskolai projektünkben kihasználtuk az érdeklődésen alapuló oktatási módszer lehetőségeit, aminek a következtében sikerült a diákokat többféle manuális és szellemi tevékenységbe bevonni a csoportos munkavégzés során (Beke, 2009a-d, 2010c).

A dolgozatban vizsgáltam, hogy a projekt módszer alkalmazása milyen hatást gyakorol a tanulók motivációs szintjére a természettudományok általános és középfokú oktatásában. Megállapítottam, hogy a természettudományos tantárgyak oktatásában a projekt módszer az általános és a középiskolás korú tanulóknál sikeresen alkalmazható; segít abban, hogy a diákok a természettudományos tantárgyakhoz kapcsolódó attitűdjét pozitív irányban befolyásolja (Beke, 2011c).

A disszertációban bemutattam a termoakusztika alapfogalmait, a meghatározó kutatási irányait, illetve kapcsolódásukat más kutatási területekhez és a témakör szakirodalmát is áttekintettem. Ez azért lényeges, mert a hazai szakirodalom eddig ezzel nem foglalkozott mélyrehatóan, ezért bizonyos értelemben ez hiánypótlásnak számít (Beke, 2011b). A termoakusztika szakirodalmának tanulmányozását követően olyan kísérleteket gyűjtöttem, alakítottam át, illetve fejlesztettem ki, melyek olcsó, minden oktatási intézményben megtalálható eszközökkel végezhetőek el. Ezek a kísérletek a fizikát tanító kollégáknak segítséget nyújthatnak a fakultatív tanulói kísérletek egyszerű eszközökkel történő elvégzéséhez. Az általam összegyűjtött, illetve továbbfejlesztett kísérletek a diákok életkorának és tudásának megfelelően különböző módon értelmezhetőek a

középiskolás szinttől az egyetemi szintű fizikatanításig. A Rijke csövek vizsgálatával összetett termoakusztikus jelenségek kialakulása magyarázható meg. (Beke, 2009a-d, 2010a-d, 2011a).

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. A nyomás és a hőátadás közötti fázis szabja meg, hogy a rendszer stabil vagy instabil állapotban van-e a Rayleigh-feltétel alapján. Ha a nyomás oszcillációja és a hőkibocsátás fázisban vannak egymással, akkor kialakul egy akusztikus rezgés, a nyomás oszcillációja erősödik.

A Rijke cső egy rezonátor üreg természetes vagy kényszerített konvekciós légárammal, és egy hőforrással a belsejében, ami általában egy felforrósított rács szokott lenni. A Rijke cső az egyik legegyszerűbb termoakusztikus eszköz, amely a hőt akusztikus energiává alakítja (Beke, 2009a-d). Ha a cső hangot bocsát ki, akkor a cső instabil (gerjesztett) állapotban van. A Rijke cső segítségével viszonylag kényelmesen tanulmányozhatjuk a termoakusztikai instabilitások kialakulását, mert bizonyos paraméterek esetén a rendszerben erőteljes hang keletkezik ahhoz hasonlóan, ahogy a valós technikai (ipari) berendezésekben is felléphet ilyen termoakusztikai oszcilláció.

A termoakusztika alapvető szerepet játszik számos technikai alkalmazásban pl. szilárd vagy folyékony tüzelésű égőkamrák, rakétahajtóművek, vagy gázturbinák instabilitásai. A kialakuló vibráció és a fokozott hőátadás rontják a berendezés működésének hatásfokát, illetve csökkentik az élettartamot. 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. Hűtésre, fűtésre, elektromos energia előállítására is használhatjuk a hangot, ez megteremti a kapcsolatot az akusztika és a termodinamika között.

Az iskolai projektben önkéntes alapon vehettek részt a gimnáziumunk tanulói. A méréseket délutánonként hajtottuk végre fizika szakkör-foglalkozásokon. A tanulók a kísérleteket csoportmunkában végezték a vezetésem mellett, a csoportokban 3 – 6 tanuló dolgozott együtt. Egy-egy tanulói csoport vizsgálta az egyes csövek viselkedését, az eszközök egy részét közösen használtuk (pl. zajszintmérő, digitális hőmérő); ez külön szervezést igényelt. Ezen kívül arra is ügyelnünk kellett, hogy az egyik team Rijke csövének hangja ne zavarja meg a másik csoport mérését; ezért a munkánkat össze kellett hangolni, hiszen korlátos erőforrásokon osztozkodtunk, illetve egymás zavarása nélkül kellett dolgoznunk (Beke, 2009a-d). Ezzel – mintegy mellékesen – a tanulók szervezőképességét is fejlesztettem, sőt a szociális kompetenciák (osztozkodás a közös eszközökön) is fejlődtek.

A termoakusztikai projektben 3 fő célt fogalmaztam meg: 1. a gimnáziumunk tanulóival közösen megvizsgáltam a gázzal fűtött Rijke csövek viselkedését; 2. építettem egy elektromosan fűtött Rijke csövet, hogy az adatokat pontosítsam; 3. kifejlesztettem két különböző számítási modellt a rendszer stabilitásának meghatározására a kísérletek során megfigyelt adatok alapján.

A célok elérése érdekében először gázzal fűtött Rijke csöveket használtunk. Megállapítottam, hogy a termoakusztikus rendszer fő paramétereit (Rijke cső geometriai adatai, cső helyzete, rács áteresztő képessége, rács pozíciója, légáram intenzitása, hőteljesítmény) tekintve minden paraméter esetén létezik egy alsó és egy felső küszöbérték. Az alsó küszöbérték alatt, illetve a felső küszöbérték felett nem gerjeszthető a rendszer. Az eddigi kutatások általában csak a hőteljesítmény alsó küszöbértékét említik. A vizsgálataink szerint az összes említett paraméter esetén van alsó és felső küszöbérték is, a rács fűtésének időtartamát tekintve csak az alsó küszöbértékét figyeltük meg. Ha a rendszert sikerült gerjesztett állapotba hozni, akkor mindig vannak olyan paraméter kombinációk, amelyben a korábban instabil rendszer stabilá válik, azaz ha a cső hangot bocsát ki, akkor akár egyetlen paraméter változtatásával elérhetjük azt, hogy ez az instabil csőállapot megszűnjék, magyarul a hang elhal.

A termoakusztikus projekt 2. állomásában egy vízszintes helyzetű, árammal fűtött Rijke csövet alkalmaztunk a kísérletekhez. A korábbi mérések alapján megállapítottam, hogy a cső hangkibocsátását a cső geometriai paraméterein (hossza és átmérője) kívül a cső helyzete (a vízszintessel bezárt dőlésszöge), a rács helyzete (x_r), rácsra jutó hőteljesítmény, a rács hőmérséklete, a csövön átáramló légáram intenzitása (m_i), a fűtés időtartama és a rács áteresztőképessége határozza meg. A 3 fő rendszer paramétert (rács pozíció, légáram intenzitás és a fűtőteljesítmény) egymástól függetlenül tudtam változtatni (Beke, 2010a). A valós rendszerekben lezajló termoakusztikus folyamatok általában nagyon bonyolultak. Az instabilitások modellezésekor először egy „egyszerűsített” modellt dolgoztam ki. Megvizsgáltam, hogy az egyes légáram intenzitás értékek mellett mekkora az a legkisebb hőteljesítmény, amivel éppen gerjeszteni lehet a rendszerünket, és ezeket az összetartozó értékpárokat ábrázoltam egy koordináta rendszerben, így a pontokat összekötve megkaptam azt a határvonalat, ami a rendszer stabil állapotát az instabil állapotától elválasztja (Beke, 2010a).

A stabilitási határvonalat meghatároztam mind a négy kijelölt rácspozíció ($x_r=L/8$, $x_r=L/4$, $x_r=3L/8$, és $x_r=5L/8$) esetén. Az első három esetben a rendszer 1. akusztikus módban, az utolsó esetben a 2. akusztikus módban volt. A stabilitási határvonal parabola-szerű görbe, melynek van egy legalacsonyabb pontja, ekkor kell a legkisebb hőteljesítmény a rendszer gerjesztéséhez. Az akusztikus veszteségek növekszenek a frekvenciával, ezért a rendszer magasabb gerjesztéséhez több energia szükséges. Az első akusztikus módhoz tartozó határgörbék ezért alacsonyabban helyezkednek el, mint a 2. akusztikus módban. A legalacsonyabban az $x_r=L/4$ rácspozícióhoz tartozó határvonal adódott, mind az „egyszerű” modell, mind a mérések alapján (Beke, 2010a).

Megállapítottam, hogy az „egyszerűsített” modell általában jóval kisebb kritikus teljesítményt ad meg, mint amit a mérések során tapasztaltam. Az eltérés akár 30% – 60% is lehet a közepes légáram intenzitás tartományban, magasabb légáram intenzitások esetében a hiba 50% – 100%-os. Ilyen nagy hiba a gyakorlati technikai alkalmazások esetén nem engedhető meg. A hiba forrása az volt, hogy az „egyszerűsített” modellben nem volt elég alapos a hőátadás vizsgálata, pl. nem számoltam a hősugárzás hatásával. A mérések során nemlineáris jelenségeket is megfigyeltem (pl.

hiszterézis, vagy örvények keletkezése), ezekre nem ad magyarázatot az „egyszerű” modell (Beke, 2010a).

A termoakusztikus projektben a következő célom az volt, hogy az „egyszerűsített” modellt továbbfejlesszem és a rendszer stabil és instabil állapota közötti átmenetet pontosabban meghatározzam. A Rijke csőben a termoakusztikus instabilitás kialakulása függ a hő átadástól, ezért a cső belsejében kialakuló hőmérsékletet és a hőtranszfer folyamatát részletesen is megvizsgáltam. A hőtranszfer analízise során figyelembe vettem a hőkonvekció, a hővezetés és a hősugárzás hatását is (Beke, 2010bd). A hőátadás vizsgálatára egydimenziós modellt alkalmaztam, a kapott eredmények a közepes légáram intenzitás és közepes hőteljesítmény esetén jól egyeztek a mért értékekkel.

A Rijke cső stabilitási határainak meghatározására kifejlesztettem egy numerikus algoritmust, amely a „továbbfejlesztett” modellen alapult. Megvizsgáltam a veszteségek hatásait és a termoakusztikai rendszerben fellépő csillapítási mechanizmust. Első lépésben a rácspozíciót fixáltam, majd beállítottam a légáram intenzitást és a fűtőteljesítményt. Megvizsgáltam, hogy az adott akusztikus módban stabil-e a rendszer. Ha a rendszer stabil az adott körülmények között, akkor változtattam a fűtőteljesítményen, majd kezdtem előlről a tesztelést. Ha bármely esetben gerjeszthető a rendszer, akkor az egész rendszer instabil. Az eljárás segítségével meg lehet határozni a rendszer stabil és instabil állapotát elválasztó határvonalat (Beke, 2010bd). Az algoritmus implementálása C++ nyelven történt. Bemutattam, hogy a modell alapján kapott frekvenciák jól egyeznek a mérési eredményekkel (Beke, 2011a).

Megállapítottam, hogy a „továbbfejlesztett” modellből elméletileg kapott adatok jóval pontosabbak. Az „egyszerű” modell alapján a stabilitási görbe értékei gyakran csak feleakkorák voltak, mint a kísérletileg kapott görbe értékei. A „továbbfejlesztett” modell alapján sokkal jobb egyezést kaptam; közepes hőteljesítmény és légáram intenzitás mellett a kísérletekből kapott és a modell alapján számított görbe között jóval kisebbek az eltérések, mint az „egyszerű” modell esetén, ezért a „továbbfejlesztett” modell jobban alkalmas a valós fizikai rendszer leírására. Ebben a tartományban a mért és a számított értékek közötti különbség általában 15%-nál kisebb, tehát a „továbbfejlesztett” modell jóval pontosabb, mint az eredeti „egyszerű” modell (Beke, 2010bd). Túlzottan magas, illetve túlzottan alacsony hőteljesítmény és légáram intenzitás esetén mindkét modell torzít, hiszen itt már olyan fizikai effektusok is felléphetnek (pl. örvényképződés), amelyeket egyik modellnél sem vettem figyelembe.

A termoakusztikai projektünkben a diákokkal olyan termoakusztikus folyamatokat vizsgáltam és modelleztem, amelyek valós technikai rendszerekben is felléphetnek. A projekt folyamán csoportmunkában végeztük kísérleteinket a Rijke csövekkel. Alapvetően olyan olcsó eszközöket használtunk, amelyek minden iskolában megtalálhatók. A Rocard-jelentés két fontos megállapítása, hogy az iskolai kísérletek költségeit csökkenteni kell és a tanulókat nagyobb mértékben be kell vonni különböző projektekbe. A mérési-vizsgálati projektfeladatunkban ezek az elvek is érvényesültek.

A projektben a tanulóknak nem csak a termoakusztikai ismereteik gyarapodtak, hanem a természettudományos gondolkodásuk, problémalátó és problémamegoldó képességük is fejlődött, illetve bővültek az alkalmazott informatikai ismereteik is. A természettudományos kompetenciák mellett a szociális jellegű (team-foglalkozás, feladatelosztás, eszközök megosztása, stb.) készségeik is fejlődtek, amit mindenképpen hasznosnak ítélek a jövő szempontjából (Beke, 2009a-d). A projektben a tanulók kedvet kaptak arra, hogy a fizikai, a matematikai és az informatikai ismereteiket együttesen felhasználják, tudásukat még hatékonyabban kamatoztassák a problémák megoldásában.

A termoakusztikus projekt zárásaként megvizsgáltam, hogy a résztvevő diákjaink tanulmányi munkájában, „tanulási teljesítményében” mennyire „mérhető” a projektben való részvétel hatása. Kimutattam, hogy azoknak a tanulóknak, akik hosszabb távon részt vettek a projektben javult a fizika és az informatika tanórai teljesítménye és a projektmunka hatására a tanulók egyenletesebben teljesítettek a témazáró dolgozatokban is (Beke, 2011c).

Egy kérdőíves vizsgálatban arra kerestem választ, hogy a projektfeladatokban való részvétel hogyan befolyásolta a tanulók projektekkel kapcsolatos attitűdjét. Elsősorban a természettudományos tantárgyakkal kapcsolatosan szerettem volna megtudni, vajon milyen hatást gyakoroltak a természettudományos jellegű projektek a diákok tantárgyakhoz fűződő „beállítódására”, ezért megkértem a diákokat, hogy az elmúlt néhány tanév során az iskolánkban megvalósított kisebb-nagyobb projektekkel kapcsolatosan töltsenek ki egy rövid kérdőívet. A válaszokból kiderült, hogy a tanulók általában szívesen vettek részt a különböző projektekben és a projektfeladatok során úgy érezték, hogy van értelme és haszna a munkájuknak. A pedagógusok számára talán ez lehet a döntő érv, hogy miért érdemes projekteket tervezni és megvalósítani (Beke, 2011c).

A pedagógus kollégák és a diákok visszajelzései megerősítik azt a véleményemet, hogy a projekt módszer kiválóan alkalmas a természettudományos tantárgyak feldolgozására részben vagy akár egészében is. A projektelvű oktatási módszerek fejlesztését hasznosnak és szükségesnek ítélem. Az eddigi projektfeladatok során a tanulókkal közösen elért eredmények ösztönzést adnak a téma további kutatására.

12. Summary

The Rocard Committee made a report in 2007 about the science education system of the EU. The Rocard-report in accordance with other studies highlighted an alarming decline in young people's interest in the science studies and mathematics. For the future of Europe it is crucial to develop the education of natural sciences, and for this it is necessary to act on local, regional, national and EU-level. Beyond the traditional actors (child, parent, teacher) others (scientists, professionals, universities, local institutions, etc.) should also be involved in the educational processes. Teaching Science can only be successful if we are able to answer the challenges of the 21st century. Teaching Physics and other Science subjects with the traditional methods are unintelligible and considered unnecessary for most students. This situation needs to be improved (Beke, 2009d). The scholastic natural scientific projects answer the purposes as a collaborative knowledge-sharing method. In this work I was going to examine the characteristics of the project method.

In my thesis I present a project type of physical measuring and examination task with Rijke tubes. The aim of our project is while students enlarge their knowledge about thermoacoustics; on the one hand they develop their applied information technologic (IT) skills, while on the other their cooperative skills are improving as well. Our school project promotes a pedagogy using an inquiry-based approach that succeeds to develop excitement around science; presents the processes and methods of science together with its products and promote a wide range of practices including inquiry based activities, hands-on/minds-on operations and group projects (Beke, 2009a-d).

In the course of my research I examined the effects of the usage of project method on the motivation level of students in primary and secondary education. I claim that project method in science subjects can successfully be used in case of primary and secondary school students; it helps students to develop positive attitude towards science subjects (Beke, 2011c).

In my thesis I have presented the basic notions of thermoacoustic, the relevant researches and its connections to other researching areas, and the literature of this topic has also been reviewed. In our country the topic has not been treated profoundly, so my paper can be regarded as a supply of this deficiency (Beke, 2011b). After examining the literature of thermoacoustics, I collected, transformed and developed experiments which can be carried out with cheap equipments which can be found in every school. These experiments help teachers of physics to perform students' experiments with simple equipments. The experiments collected and transformed can be modified to fit for students from secondary school to university. With the examination of Rijke tubes, the development of complex thermoacoustic phenomena can be understood (Beke, 2009a-d, 2010a-d, 2011a).

Thermoacoustic (combustion) instability can appear in a thermal device (engine) when the unsteady heat release is conjoined with the pressure fluctuations; if the heat, released in the system, depends on fluctuations of pressure and velocity, a feedback loop is formed, and this effect can destabilize the whole thermodynamic system. When the heat release has a component in phase with the pressure fluctuation, then, according to Rayleigh's criterion, acoustic oscillations can be

enhanced; this effect results in excitation of eigenacoustic modes of the system. Thermoacoustics study dealt with conditions under which thermal interaction can result in the excitation of the acoustic modes of the system.

Thermoacoustic oscillations play important roles in various technical applications; for instance, in jet or rocket motors, thermoacoustic engines, pulse combustors, industrial burners. The Rijke tube is a resonator cavity with natural or forced mean flow and a concentrated heat source (generally a heated grid). The Rijke pipe converts heat into sound by creating a self-amplifying standing wave, this thermoacoustic phenomenon is an excellent example of resonance. If the tube emits sound we can say, that the system is in unstable (excited) state. If there is not sound emission, then the system is in stable state (Beke, 2009a-d). The Rijke tube is a convenient thermodynamic system for studying the fundamental physics of thermoacoustic phenomena and thermoacoustic instabilities, since at certain values of the main system parameters a loud sound can be generated. This vibration phenomenon is similar to that in real-world physical devices prone to thermoacoustic instability.

Important thermoacoustic phenomena are the acoustically unstable combustors: gas turbine engines and jet engines are susceptible to combustion instability, which is a special case of thermoacoustic instability. Pressure and flow oscillations inside the engine can lead to unacceptable levels of vibration and enhanced heat transfer that degrade the propulsive efficiency of the engine or even destroy the set-up. Refrigeration, heating, electricity and mechanical energy are all examples of the applications that sound is well-suited for, and they introduce the notion of a tie between acoustics and thermodynamics.

The 16 – 19 years old students from our grammar school were invited to volunteer in this project. We carried out the measuring in the afternoons on extracurricular Physics classes. We executed the experiments in team work and each team consisted of 3 – 6 students. In the course of the measurements we were working with 7 different Rijke tubes; each of the teams examined the behaviour of different tubes and shared some of the utensils (sound level meter, infrared thermometer). It needed specific organization. In addition to this, we had to be careful that the Rijke pipe did not disturb the work of the other team. The work of the teams had to be harmonized as we shared a finite number of resources and had to work without the distraction of others (Beke, 2009a-d). With this aligned work we additionally improved the students' organizing skills, moreover their social competence is developed (sharing the tools).

Our thermoacoustic project work has been carried out with three primary intentions. My 1st aim was to investigate the behaviour of gas heated Rijke tubes with grammar school students. The 2nd goal was to obtain data for the stability boundary of thermoacoustic oscillations in the electrically heated Rijke pipe. My 3rd aim was to develop 2 different mathematical models, and with the help of these models I could determine the transition to instability and explain the linear phenomena observed in the measurements.

In order to achieve the goals we first used gas heated Rijke tubes. I ascertained that regarding the main parameters of thermoacoustic system (the geometric data of the Rijke tube, the position of

the pipe, the transmissivity of the réseau, the position of the mesh, the mass airflow rate and the heating power) there are a minimum and a maximum threshold value for the given parameter. I found that for each tube for each parameter there is a minimum threshold value below which no self-sustained acoustic oscillations may be possible, and there is a maximum threshold value for the given parameter above which the excitation is eliminated. So far research papers have only mentioned the minimum threshold value of heating power generally. According to our experiments there is also an inferior and a superior threshold value of the foregoing parameters. In case of the heating time of the mesh only a minimum threshold value can be marked. If the system can be excited, there are always such combination of parameters in which the preceding unstable system becomes stable, i.e. when the tube sounds, only with the alteration of one parameter it is possible to stop the unstable state of the tube, namely the sound fades.

In the 2nd step of the project a horizontally positioned Rijke tube with mean flow provided by an industrial vacuum cleaner and electrically heated grid was employed. I found this tube type an apt system for studying thermoacoustic instabilities first experimentally then theoretically in convenient manner. I ascertained that issuing of sound is dependent on the location of the tube, grid position (x_r), heating power, mesh temperature, mass airflow rate, heating time and the porosity of mesh. The three main system parameters – heated grid's location, mass airflow rate and heating power – can be varied and controlled independently (Beke, 2010a).

Thermoacoustic instabilities in real thermal devices are very complex phenomena; my goal in the modelling was the investigation of the most important factors; thus a simplified mathematical theory involving heat transfer, acoustics and thermoacoustic interactions is discussed to get the transition to excited state. The general behaviour of the stability-instability boundary has been captured from this model (Beke, 2010a).

The method to obtain the stability-instability boundary at 'upstream' mesh position was similar to the measurements at 'downstream' grid position: for the fixed mass airflow rate, the power was increased until the excited regime is attained. The stability curve has been determined for four heater locations ($x_r=L/8$, $x_r=L/4$, $x_r=3L/8$ and $x_r=5L/8$). In the first three cases, it was found that the first acoustic mode caused transition to excited regime; in the fourth case, it was the second mode that became unstable. I found that the general shape of the stability-instability demarcation curves resemble distorted parabolas in all grid position; there is an optimal value of the mass airflow rate when the heating power needed to excite the system is minimal. The acoustic losses increase with circular frequency, thus the critical power increases for higher modes of vibration. The stability-instability boundary of the first mode is lower than that of the second mode. The critical heating power at heater location $x_r=L/4$ is lower than those at another mesh's position. This phenomenon is observed in experiments and predicted in the simplified model too (Beke, 2010a).

I ascertained that the simplified model greatly underestimated the test results generally. In the intermediate flow rate range, the error is about 30% – 60%, and in the low and high flow rate range, the error is about 50% – 100%. I know that the large quantitative errors are not acceptable for the real-world practical (industrial) application of this model. The sources of errors must be due

to the ignorance of heat losses from the system. I neglected heat losses from the heater due to thermal radiation to environment and to heat conduction to the tube walls. The consequence of this approximation is that significant factors are not accounted for. Hysteresis effect at the stability-instability borderline and vortex shedding have been observed during the tests, but these nonlinear phenomena cannot be predicted by this linear simplified model.

My next goal was to develop an advanced theoretical model based on the simple model that would describe the transition to thermoacoustic instability more accurately than the previous simplified model. Thermoacoustic instabilities in the Rijke tube are dependent on the properties of the eigenacoustic modes and on the processes of heat addition to airflow, so I had to carry out a detailed heat transfer analysis aimed at determining the temperature field and heat release in the thermoacoustic system. The heat transfer process in the system includes natural heat convection, forced heat convection, heat conduction, and thermal radiation (Beke, 2010bd). A numerical computer simulation procedure underlay as basis of heat transfer analysis of the system. I developed an approximate one-dimensional quasi-steady heat transfer model using energy conservation equations, it was proper for lower and moderate supplied power at intermediate mass airflow rate.

I developed a numerical algorithm for determining stability-instability boundary of the Rijke tube. The stability-instability border-line was allocated with the help of iterative methods. The first step is to choose a grid position and a mass airflow rate, then the heating power is varied and the given acoustic mode is tested; if this mode is unstable, then our thermoacoustic system is unstable. If the thermoacoustic system is stable at given position of réseau, mass airflow rate and heating power, then the power supply is changed and the whole test-procedure is beginning from start, and it is repeated for other mass airflow rates and heated grid positions; and in this manner the test-process is applied for each acoustic mode. If we find the whole acoustic modes stable than the thermoacoustic system is stable; if the system is unstable, then we must analyze the frequencies too (Beke, 2010bd, 2011a).

With the help of the iterative numerical procedure the critical power can be determined, so I can find the boundary limit between stable and excited states of the system (Beke, 2010bd). The computer simulation model was implemented in C++. Using the advanced model for the Rijke tube I demonstrated that in the presence of the weak linear coupling between the modes, there is a small shift in the system frequencies (Beke, 2011a).

We can see a great improvement achieved in the accuracy of the results by the advanced theoretical model compared to the numerical results obtained by the simplified model. In the simplified model, the computed stability–instability boundary corresponds to the heating power level sometimes not more than half as large as that obtained during the experimental tests generally. Applying the advanced model the agreement is much better: in the intermediate mass airflow rate and heating power the numerical results befit with the experimental data well. Both low and high ranges of system parameters, where assumptions for some parts of the modelling are not perfect, errors are more, but we can state that the advanced model predicts better results than

the simplified model. The computed stability–instability boundary obtained from the advanced model can be used for approximate estimations of transition to the excited state. In the range of intermediate airflow rates the results are close to the experimental data, the error is about 10%–15% in the advanced model (Beke, 2010bd).

The main theme of my theses was investigation of thermoacoustic instability with the help of Rijke tubes. In this work I wished to present a project work in which we can examine thermoacoustic phenomena with easy-to-prepare tools at school. We performed the experiments with the tubes in team work. Basically we used cheap apparatus that can be found in every school. Two of the most important statements of the Rocard-report (2007) are that the expense of the experiment should be reduced and also we should put a higher emphasis on the project work of the students. These were fully realized in our measurement series. We can tell that not only the students' knowledge about thermoacoustic vibrations was developing in our school project, but also their problem-oriented thinking and scientific model-thinking and their ability to apply computer and use IT in Physics lesson, and besides these, their social skills were improving as well (team-work, sharing task and sharing tools, etc.), which I think will be very important regarding the future (Beke, 2009a-d). Students take fancy in using their physical, mathematical and IT knowledge together and take advantage of it.

At the end of our thermoacoustic project I examined how the attendance of our students in the experiments affected their schoolwork. I have found that those who attended in the medium and long run have improved in their performance of physics and IT, and they have performed in tests more equally (Beke, 2011c).

I have been examining the effects of participation in a project work on the attitude of students towards project work with the help of questionnaires. First of all, I wanted to know in reference to science subjects how project work had affected their stance to the subject. Therefore I made them fill in questionnaires regarding all the projects done at school during the year. Analyzing the answers it became obvious that students welcome the different projects and they felt the purpose and the usefulness of their work. It might be a determinative argument for teachers why it is worth to plan and realize project work (Beke, 2011c).

The feedback of teachers and students reinforces my view that project method is absolutely suitable for science subjects both partly and totally. I have found the development of teaching methods based on project work useful and necessary. The results that were attained with students in the projects encourage me to further study the topic.

13. Melléklet

Kérdőív

Iskolai projektek

Kedves Tanulók!

Az elmúlt néhány tanév során iskolánkban több kisebb-nagyobb projektben vehettetek részt. Ezek közül voltak kötelező projektek (pl. „A pizza-történet, pizza-készítés, egészséges és egészségtelen táplálkozás, élettani-fizikai hatások”, vagy „Fagyalt-projekt”) és voltak választható projektek (pl. „Modern lakóház tervezése és építése”, vagy „Termoakusztikai jelenségek vizsgálata Rijke-cső segítségével”). Ebben a kérdőívben a projektfeladatokkal kapcsolatos véleményetekre vagyunk kíváncsiak. Arra kérünk Benneteket, válaszoljatok a kérdésekre, hogy javaslataitokat felhasználhassuk a jövőben. A kérdőív kitöltése önkéntes alapon történik, a neveteket nem kell felírni.

Életkorod:

☐

Hányadik évfolyamba jársz?

☐

Nemed (húzd alá a megfelelőt):

lány/fiú

1., Hány kötelező projektben vettél részt eddig az iskolánkban?

☐

2., Hány szabadon választható projektben vettél részt eddig az iskolánkban?

☐

3., Az iskolán kívül hány projektben vettél részt?

☐

4., Szívesen részt veszel a projektmunkában?

☐

Válaszként egy egész számot kell beírni -2 és 2 között. Írd be azt a számot, ami leginkább kifejezi a véleményed! A számok jelentése:

-2	Nagyon utálok a projektfeladatokat.
-1	Nem szeretem a projektmunkát, de azért valahogy kibírom.
0	Különböbben nem szeretem, de nem is utálok. Ez van, és kész.
1	Szeretem a projekteket általában, de azért néha egy kicsit unom.
2	Szívesen vettem részt eddig az összes projektfeladatban.

5., Szerinted van-e értelme a projektmunkának?

☐

Válaszként egy egész számot kell beírni -2 és 2 között. Írd be azt a számot, ami leginkább kifejezi a véleményed! A számok jelentése:

-2	Semmi értelmét nem láttam az egyik projektnek sem.
-1	Nem sok értelmét láttam az eddigi projektnek, de azért valahogy kibírtam.
0	Különböbb értelmét nem láttam, de ez volt a feladatunk, ezért részt vettem bennük.
1	Szerintem volt értelme a projektmunkánknak, de azért lehetett volna néha egy kicsit jobb is.
2	Tetszett a projektmunka, mert értelmét láttam a munkánknak.

6., A projektmunka során néha egyedül, máskor párosan, esetleg csoportban kell tevékenykedni. Melyik fajta munkavégzést kedveled?

Válaszként egy-egy egész számot kell beírni az a, b, c, kérdésekhez, -2 és 2 között. Írd be azt a számot, ami leginkább kifejezi a véleményed! A számok jelentése:

-2	Teljes mértékben utálok.
-1	Nem szeretem.
0	Elviselem valahogy.
1	Tűrhető.
2	Tetszik, szeretem.

a, Mennyire szeretsz egyedül dolgozni?

☐

b, Mennyire szeretsz párosan dolgozni?

☐

c, Mennyire szeretsz csoportban dolgozni?

☐

7., Szerinted a tananyag hány százalékát lehetne (kellene) projektmunkával feldolgozni az alábbi tantárgyakból?

Válaszként egy százalék értékét kell beírni 0% és 100% között. Írd be azt a százalék értéket, ami leginkább kifejezi a véleményed! A százalék értékek jelentése:

0%	Ne legyen egy projektfeladat se!
...	...
50%	Szerintem a tananyag felét lenne célszerű projektmunkában feldolgozni.
...	...
100%	Minden tananyagot projektszerűen kellene feldolgozni!

- a, fizika ☐
- b, kémia ☐
- c, biológia ☐
- d, földrajz ☐
- e, informatika ☐
- f, technika, háztartástan ☐

8., Az alábbi tantárgyak esetén a projektmunkának volt-e későbbi haszna, eredménye?

Válaszként egy-egy egész számot kell beírni -2 és 2 között. Írd be azt a számot, ami leginkább kifejezi a véleményed! A számok jelentése:

-2	Semmi haszna nem volt a projekteknek.
-1	Nem sok hasznát láttam a projektnek, de azért valahogy kibírtam.
0	Különösebb haszna nem volt.
1	Szerintem volt valamennyi haszna a projektmunkánknak.
2	Nagyon hasznosnak érzem a projektmunkánkat.

- a, fizika ☐
- b, kémia ☐
- c, biológia ☐
- d, földrajz ☐
- e, informatika ☐
- f, technika, háztartástan ☐

9., A projektmunka hogyan befolyásolta az adott tantárgyhoz való viszonyodat?

Válaszként egy-egy egész számot kell beírni -2 és 2 között. Írd be azt a számot, ami leginkább kifejezi a véleményed! A számok jelentése:

-2	A projektek hatására megutáltam az adott tantárgyat.
-1	A projektek hatására kevésbé szeretem az adott tantárgyat.
0	A projektmunka különösebb nem befolyásolta a tantárgy megítélését.
1	A projektmunka hatására jobban szeretem az adott tantárgyat.
2	A projektmunka hatására sokkal jobban szeretem az adott tantárgyat.

- a, fizika ☐
- b, kémia ☐
- c, biológia ☐
- d, földrajz ☐
- e, informatika ☐
- f, technika, háztartástan ☐

10., A projektfeladatok közül volt olyan, ami csak egyetlen tantárgyat érintett, de voltak olyan projektek is, amelyekben több tantárgy is összekapcsolódott. Melyik típus mennyire tetszett?

Válaszként egy-egy egész számot kell beírni -2 és 2 között. Írd be azt a számot, ami leginkább kifejezi a véleményed! A számok jelentése:

-2	Nagyon rossz volt.
-1	Nem igazán tetszett.
0	Különöbben nem tetszett, de azért elviselhető volt.
1	Általában tetszett, de volt egy-két dolog, amin változtatnék.
2	Nagyon tetszett az egész projekt.

- a, egy tantárgyat érintő projektfeladat ☐
- b, több tantárgyat összekapcsoló projektmunka ☐

11., Ha van valamilyen személyes véleményed, ötleted, gondolatod, javaslatod a projektmunkával kapcsolatban, akkor kérlek írd le!

Köszönjük szépen, hogy válaszoltál a kérdésekre.