



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MATEMATIKOS IR GAMTOS MOKSLŲ FAKULTETAS**

Rimantas Vidrinskas

**KOMPOZICINIŲ, GARSĄ IZOLIUOJANČIŲ, MEDŽIAGŲ
KŪRIMAS IR TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas
Doc. dr. Leonas Jakevičius

KAUNAS, 2016

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MATEMATIKOS IR GAMTOS MOKSLŲ FAKULTETAS

KOMPOZICINIŲ, GARSĄ IZOLIUOJANČIŲ, MEDŽIAGŲ
KŪRIMAS IR TYRIMAS

Baigiamasis magistro projektas
Taikomoji fizika (kodas 621F30005)

Vadovas

(parašas) Doc. dr. Leonas Jakevičius
(data)

Recenzentas

(parašas) Lekt. dr. Kristina Bočkutė
(data)

Projektą atliko

(parašas) Rimantas Vidrinskas
(data)

KAUNAS, 2016



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MATEMATIKOS IR GAMTOS MOKSLŲ FAKULTETAS

(Fakultetas)

Rimantas Vidrinskas

(Studento vardas, pavardė)

Taikomoji fizika (kodas 621F30005)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Kompozicinių, garsą izoliuojančių, medžiagų kūrimas ir tyrimas

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

2016 gegužės 31d.

Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Rimanto Vidrinsko**, baigiamasis projektas tema „Kompozicinių, garsą izoliuojančių, medžiagų kūrimas ir tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

Rimantas Vidrinskas

(vardas ir pavardė)

(parašas)

Vidrinskas, Rimantas. Kompozicinių, garsą izoliuojančių, medžiagų kūrimas ir tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Leonas Jakevičius; Kauno technologijos universitetas, Matematikos ir gamtos mokslų fakultetas.

Mokslo kryptis ir sritis: Fiziniai mokslai, Fizika

Raktiniai žodžiai: *akustika, garso izoliacija, patalpų akustika, kompozicinės medžiagos, triukšmo slopinimas*

Kaunas, 2016. 46 p.

SANTRAUKA

Gerai parinkta medžiagų kompozicija gali stipriai pagerinti konstrukcijos mechanines, šilumines ar akustines savybes. Dažnai projektuojant pastatus, įvairių paskirčių patalpas, transporto priemones ar įrengimus galima spręsti įvairias akustikos problemas tam panaudojant kompozicines medžiagas. Tačiau informacijos apie kompozicinių garsą izoliuojančių medžiagų gamybą nėra daug. Ir dauguma esamos informacijos parašyta sudėtinga, daug matematikos žinių reikalaujančia forma.

Šiame darbe, teorinėje dalyje, yra paprastai paaiškinami pagrindiniai akustikos principai, kurie yra reikalingi kuriant kompozicinę garso izoliaciją, pristatomi pagrindiniai garso slopinimo metodai. Darbo priede, pasinaudojant kompiuterine įranga, parodomas pavyzdys, kaip vadovaujantis šiomis žiniomis galima efektyviau panaudoti garso izoliacines medžiagas, taip sumažinant jų užimamą tūrį, arba sumažinant medžiagų sąnaudas.

Antroje darbo dalyje lyginame garso izoliavimo savybes betono pavyzdžių su skirtingais užpildais. Buvo lyginami betono bandiniai su smėlio užpildu, dujų, dujų ir gumos, dujų ir polistireno, dujų ir PVC/PTFE granulėmis. Taip pat praktinėje dalyje išbandome, pradedamą vis dažniau pastatų statyboje taikyti, CLD garso slopinimo metodą, panaudodami gipso kartono plokštes.

Rezultatai parodė, kad kietos porėtos betoninės medžiagos vidutiniuose dažniuose turi šiek tiek prastesnes orinio triukšmo sulaikymo savybes negu smėlio betonas, tačiau pasižymi geresniu aukšto dažnio slopinimu. O bandiniai su gipso kartono plokštėmis parodė, kad ir su 2mm storio klampios ar viskoelastinės medžiagos tarpiniu sluoksniu, galima žymiai pagerinti sienos garso sugėrimo savybes.

Vidrinskas, Rimantas. Research and analysis of sound-insulating composite materials: Master's thesis in physics / supervisor doc. dr. Leonas Jakevičius. The Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Kaunas University of Technology.

Research area and field: Physical sciences, Physics

Key words: Acoustics, sound insulation, room acoustics, composite materials, sound damping

Kaunas, 2016. 46 p.

SUMMARY

A good material composition can greatly improve mechanical thermal and acoustical properties of a structure. Composite materials can be used to solve acoustical problems that arise in building, vehicle, equipment installation, or special purpose room designs. But there is a limited amount of information about developing of sound-insulating composites. And the existing information is often written in mathematical form which is difficult to understand.

The theory section of this work consists of information about sound damping fundamentals that is needed for development of sound-insulating composites. An example of how the efficiency of sound insulation can be improved and its volume or amount of used material can be reduced is demonstrated on appendix section using computer software calculation.

The second part of this work consists of comparison of sound insulation properties of concrete samples with different lightweight aggregates. The compared sample aggregates were, gas, gas and rubber, gas and polystyrene, gas and PVC/PTFE granule. Gypsum board samples and CLD method was also tested in this section.

The results show that at midrange frequencies lightweight aggregates have inferior sound insulating properties than concrete, but at high frequencies they perform better. CLD sample test show that even a thin viscous or viscoelastic layer between gypsum boards can greatly improve sound damping properties of a wall.

TURINYS

Paveikslų sąrašas	7
Lentelių sąrašas	9
Įžanga	11
1.1. Apžvalga	10
1.1.1 Triukšmo samprata	10
1.1.2 Teorinis įvadas.....	13
2. Garso slopinimo metodai.....	17
2.1. Atspindėjimas.....	17
2.1.1. Atspindžiai terpių sandūroje.....	17
2.1.2. Kryptingas garso nuvedimas ir begalinių atspindžių panaudojimas.....	19
2.1.3. Garso išsklaidymas (difuzoriai).....	20
2.2. Sugėrimas.....	21
2.2.1. Slopinimas klampumu. Free layer ir CDL metodai.....	21
2.2.2. Slopinimas varžant dalelių judėjimą.....	24
2.2.3. Slopinimas vidinėmis ertmėmis ir rezonatoriais.....	25
2.2.4. Slopinimas paslankios masės „Limp mass“ metodu	28
2.2.5. Akustinis atskyrimas „Decoupling“	28
3. Tiriamoji dalis.....	31
3.1. Įrangos apžvalga.....	31
3.2. Bandiniai.....	32
3.3. Matavimų rezultatai.....	36
Išvados.....	42
Literatūra	43
Priedai.....	45

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

- 1 pav. Bangos grafikas.
- 2 pav. Tembras ir tonas.
- 3 pav. Triukšmas.
- 4 pav. Garso bangos lūžimas pereinant iš terpės su didesniu garso greičiu į terpę su mažesniu.
- 5 pav. Garso bangos pasidalijimas pereinant iš vienos terpės į kitą [28].
- 6 pav. Beaidžio kambario garso sugėrikliai.
- 7 pav. Garso difuzoriai.
- 8 pav. *Free-lay damping* veikia tempimo ir gniuždymo principu.
- 9 pav. CLD veikia šlyties principu.
- 10 pav. Garsą izoluojančios pertvaros pavyzdys.
- 11 pav. Pertvaros schema.
- 12 pav. Sienos pagal 11 pav. schemą garso slopinimo naudojant ir nenaudojant CLD palyginimas [23].
- 13 pav. Vidaus struktūros vaizdas: a) Porėta putų tipo medžiaga b) Vata [24]
- 14 pav. Akustikos stimulatoriumi AFMG SoundFlow paskaičiuotas absorbcijos koeficientas trimis atvejais: a) 50mm storio stiklo vata prie sienos. b) 50mm storio stiklo vata, 50mm atstumu nuo sienos. b) 100mm storio stiklo vata prie sienos.
- 15 pav. Helmholtzo rezonatorius panaudotas slopinti, dėl stipriai garsą atspindinčių mūrinių sienų, atsiradusį patalpos rezonavimą.
- 16 pav. Membraniniai sugėrikliai paruošti naudojimui įrašų studijoje.
- 17 pav. Garso barjero naudojant masyvųjį vinilą pavyzdys.
- 18 pav. Akustiškai atskirtos vidinės sienos tvirtinimo pavyzdys.
- 19 pav. Išorinės sienos garso slopinimo savybių kitimo tendencija priklausomai nuo rezonanso. Pateikiama akustinių medžiagų gamintojų.
- 20 pav. Stendo schema: 1- Garsą izoluojujantis stendo korpusas; 2 - Anga bandiniams; 3 – Mikrofonas; 4 - Triukšmo šaltinis (garsiakalbis).
- 21 pav. Matavimams atlikti naudotas stendas.
- 22 pav. Kairėje – supiltas bandinys. Dešinėje toks pat bandinys po 1,5 valandos.
- 23 pav. Sukietėjusio bandinio porėta struktūra. a) Natūralus dydis, bandinio paviršius. b) Atskelta ir 10 kart išdidinta, bandinio dalis. Matyti vidinė struktūra.
- 24 pav. Homogeninių bandinių, praleisto triukšmo grafikai.
- 25 pav. Gipso bandinių garso slopinimo grafikai. Grafike matyti, kad iki 6000Hz geriausiu garso slopinimu pasižymi gipso plokštės sulipintos plastilinu.
- 26 pav. Skirtingo storio dujų betono bandinių, garso slopinimo grafikai.

27 pav. Garso slopinimo palyginimas tarp bandinio su ryškia ir pereinamąja sandūra.

28 pav. Smėlio betono ir dviejų gipso kartono plokščių sulipintų klampiu sluoksniu, garso slopinimo palyginimas.

29 pav. Matavimo paklaidos dydis. Garso skirtumas tarp gerai ir prastai užsandarintos bandinio angos.

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1 lentelė. Garso atspindžio koeficiento priklausomybė nuo skiriamosios ribos aplinkų tipo

2 lentelė. Įvairių terpių skersinių ir išilginių greičio bangų palyginimas [8]

3 lentelė. Bandinių sudėčių duomenų lentelė

4 lentelė. Triukšmomačio parodymų lentelė. Betono bandiniai

5 lentelė. Triukšmomačio parodymų lentelė. Gipso kartono bandiniai

6 lentelė. Betono bandinių triukšmo slopinimo lygiai

7 lentelė. Gipso kartono plokščių bandinių slopinimo lygiai

Tikslas ir uždaviniai

Tikslas – Pagaminti kompozicinių, garsą izoliuojančių, medžiagų pavyzdžius ir ištirti jų savybes.

Uždaviniai:

1. Apžvelgti literatūrą ir išrinkti reikiamą informaciją.
2. Pagaminti tiriamųjų medžiagų pavyzdžius.
3. Atlikti tiriamųjų medžiagų orinio triukšmo izoliavimo savybių matavimus.
4. Paaiškinti gautus rezultatus.

IŽANGA

1 Apžvalga

1.1 Triukšmo samprata

Siekiant įvertinti triukšmo mažinimo priemones, pirmiausia reiktų apibrėžti pagrindines sąvokas: kas yra triukšmas ir kaip jis matuojamas. Įvairūs šaltiniai triukšmą keliais būdais:

- „Triukšmu vadiname netvarkingą, įvairaus stiprumo ir dažnio garso bangų mišinį, neįprastą žmogaus klausai, sukeltą nemalonius pojūčius.[1]

- „Triukšmas – tai dirbtinai sukelti įvairaus stiprumo ir dažnio garsai, kurie trukdo dirbti, poilsiauti ir kenkia sveikatai“[2]

- „Triukšmas – tai subjektyvus žmogų veikiančio garso apibrėžimas, kuris parodo, kad garsas yra stiprus, nemalonus, netikėtas, nepageidaujamas arba žalingas, galintis sukelti nepalankias pasekmes sveikatai, ir kurį sukuria pats žmogus arba žmonių veikla, įskaitant transporto priemonių, kelių eismo, geležinkelio eismo, oro eismo spinduliuojamas triukšmas.“[2]

Lietuvių kalbos žodynas - triukšmas tai labai smarkūs garsai, šauksmas, bildesys.

Lietuvos Respublikos triukšmo valdymo įstatyme dėl Lietuvos higienos normos. HN 33-1:2003 sąvoka **akustinis triukšmas** (triukšmas) apibrėžiamas kaip „įvairaus stiprumo ir dažnio garso bangų visuma, kuri gali sukelti nepalankias bei kenksmingas pasekmes sveikatai“.

Europos Parlamento ir Komisijos Direktyva 2002/49/EB apibrėžimas „aplinkos triukšmas“– nepageidaujami arba žmogui kenksmingi išoriniai garsai, kuriuos sukuria žmonių veikla, įskaitant transporto priemonių, kelių eismo, geležinkelių eismo, oro eismo spinduliuojamą triukšmą ir triukšmą, iš pramonės veiklos zonų, kaip apibrėžta 1996 m. rugsėjo 24 d. Tarybos direktyvoje 96/61/EB dėl taršos integruotos prevencijos ir kontrolės:[4]

Lietuvos Respublikos triukšmo valdymo įstatymas, pirmas skirsnis, bendrosios nuorodos. Triukšmas - nepageidaujami arba žmogui kenksmingi išoriniai garsai, kuriuos sukuria žmonių veikla.

Žmonių sveikatai ir gyvenimo kokybei triukšmas daro labai reikšmingą poveikį, kadangi triukšmas blogina klausą iki visiško kurtumo, pažeidžia nervų sistemą, dėl to dažnai skauda galvą, blogėja atmintis, greičiau pavargstama.

Natūralus gamtos triukšmas – jūros ošimas, upelio čiurlenimas, medžių šlamėjimas, paukščių čiulbėjimas pasižymi visai kitokiomis akustinėmis charakteristikomis, jis nesukelia jokių neigiamų emocijų bei pasekmių sveikatai. Priešingai, natūralus gamtinis triukšmas dažnai veikia žmogų raminančiai.[2]

EEA (European Environment Agency) duomenimis 40% žmonių didžiuosiuose ES miestuose yra veikiami ilgalaikio triukšmo viršijančio 55dB dieną ir apie 34 mln. žmonių kenčiančių nuo 50dB siekiančio triukšmo nakties metu. [3]

Didelio stiprumo, viršijantis 130dB, triukšmas gali sukelti trumpalaikę akustinę traumą, nuo kurios skauda ausyse, svaigsta galva, galima laikinai apkursti ar prarasti sąmonę. Ilgalaikis buvimas intensyvaus triukšmo aplinkoje taip pat gali sukelti klausos nuovargį, kuris pasireiškia klausos jautrumo sumažėjimu. Ilgai veikiant intensyviai triukšmui, vystosi centrinės ir vegetacinės nervų sistemos funkciniai sutrikimai. Tačiau net ir palyginti nestiprus, apie 70dB ilgalaikis triukšmas gali sukelti:

- *galvos skausmus;*
- *svaigimą;*
- *cypimą ausyse;*
- *nemigą;*
- *atminties, dėmesio, orientacijos pablogėjimą;*
- *fizinio bei protinio darbingumo sumažėjimą;*
- *žmogaus klausos ir regos sensomotorinių reakcijų sulėtėjimą;*
- *vibracinį jautrumą;*
- *judesių koordinacijos pablogėjimą;*
- *padidėjusių gamybinių traumų riziką.*

Tyrimais nustatyta, kad triukšmas, kaip ilgai veikiantis lėtinis stresas, veikdamas per centrinę nervų sistemą, sukelia organizme įvairius sutrikimus, kurie gali sąlygoti įvairių susirgimų – hipertoninės ir išeminės širdies ligos, aterosklerozės, skrandžio ir dvylikapirštės žarnos lėtinių uždegimų, opaligės bei įvairių neurozių išsivystymą.[1][2][5][9]

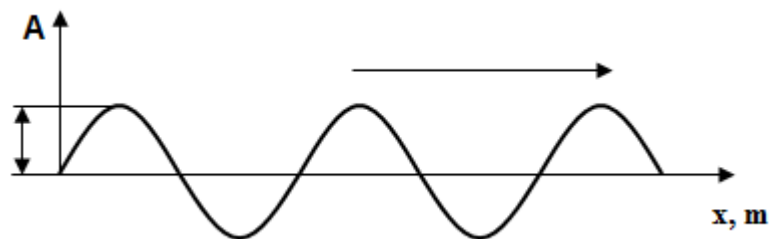
1.2 Teorinis įvadas

Garsas atsiranda kūno paviršiui periodiškai perduodant energiją aplinkos dalelėms, kurių periodinis sutankėjimas ir praretėjimas sukelia bėgančią bangą.

Garso dažnis – t.y. pilnų bangos svyravimų skaičius per sekundę yra matuojamas Herciais (Hz), kaip charakteristika gali būti taikoma tik monochromatinėms bangoms.

Monochromatinės bangos – bangos, kurias galima aprašyti harmoninių svyravimų lygtimi.

$$s(t, x) = A \sin\left(\omega\left(t - \frac{x}{V}\right) + \varphi_0\right) \quad (6)$$



1 pav. Bangos grafikas

Garsas, atitinkantis vieno dažnio virpesius vadinamas tonu.

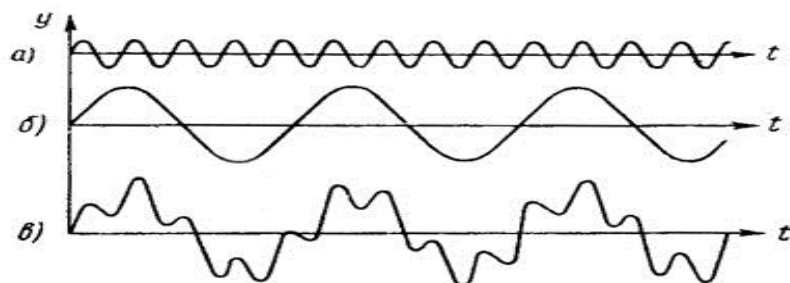
Garso požymis, kurį lemia virpesių dažnis, vadinamas tono aukščiu.

Didesnio dažnio virpesius atitinka aukštesnis tonas.

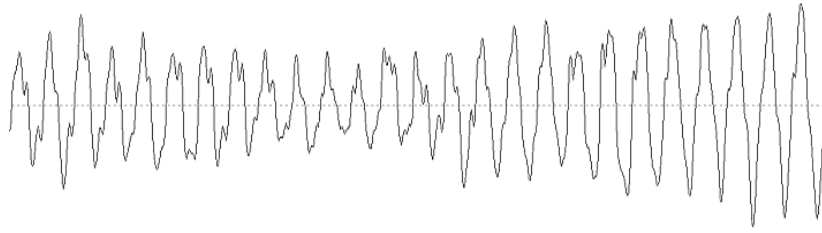
Dažniausiai garsas būna sudėtinis – t.y. sudarytas iš daugelio skirtingų dažnių, fazių ir amplitudžių bangų sumos.

Šių bangų, išskyrus žemiausią dažnį, struktūra vadinama tembru.

Sudėtinio garso žemiausią monochromatinę dažnį atitinkanti banga vadinama pagrindiniu tonu.



2 pav. Tembras ir tonas.



3 pav. Triukšmas

Jeigu pagrindinio tono išskirti neįmanoma – toks garsas vadinamas triukšmu.

Garso sąveika su aplinka galima pavadinti garso savybių priklausomybę, sklindant aplinka.

Skiriami tokie garso sąveikos su aplinka efektai:

1. garso atspindys,
2. garso lūžimas,
3. garso sugertis,
4. garso pralaidumas,
5. garso išsklaidymas,
6. garso difrakcija ir interferencija.

Garso atspindžio koeficiento priklausomybė nuo skiriamosios ribos aplinkų tipo pateikiama 1 lentelėje.

1 lentelė. Garso atspindžio koeficiento priklausomybė nuo skiriamosios ribos aplinkų tipo

Medžiaga	Aliuminis	Vanduo	Alyva	Varis	Nikelis	Gyvsidabris	Plienas	Stiklas
Aliuminis	0	0.72	0.74	0.18	0.24	0.01	0.21	0.02
Vanduo		0	0.006	0.87	0.89	0.75	0.88	0.65
Alyva			0	0.88	0.9	0.76	0.89	0.67
Varis				0	0.08	0.13	0.03	0.19
Nikelis					0	0.19	0.002	0.34
Gyvsidabris						0	0.16	0.04
Plienas							0	0.31
Stiklas								0

Garso bangos energija ne visa atspindima. Todėl reikia kiekybiškai įvertinti atspindžio efektyvumą.

Garso atspindys kiekybiškai išreiškiamas tokia priklausomybe:

$$R = \frac{I_R}{I_0} = \left(\frac{\rho_2 V_2 - \rho_1 V_1}{\rho_2 V_2 + \rho_1 V_1} \right)^2 \quad (6)$$

R- vadinamas garso atspindžio koeficientu, nusakančiu atspindėjusios I ir kritusios I_0 bangos intensyvumų santykį. ρ - medžiagos masės tankis. V - garso bangos sklaidimo greitis.

Garso bangos pralaidumas (transmisija) dviejų aplinkų riboje – neatsispindėjusi ir praėjusi dviejų aplinkų ribą garso bangos energijos dalis.

Garso pralaidumas kiekybiškai išreiškiamas tokia priklausomybe:

$$T = \frac{I_T}{I_0} = \frac{\rho_2 V_1 A_2^2}{\rho_1 V_2 A_1^2} \quad (6)$$

T- vadinamas garso pralaidumo (transmisijos) koeficientu, nusakančiu praėjusios I ir kritusios I_0 bangos intensyvumų santykį. A- garso bangos amplitudė. ρ - medžiagos masės tankis. V - garso bangos sklaidimo greitis.

Garso sugertimi vadinama garso energijos disipacija atitinkamoje aplinkoje.

Disipacija vadiname vienos rūšies energijos virsmu kita energijos rūšimi.

Garso atveju tai vyksta dėl garso bangos energijos virsmo į dalelių (atomų, molekulių) šiluminę energiją. Taip vyksta ne visiškai tamprioje aplinkose. Jei aplinka visiškai tampri – garso disipacijos nevyksta. Visiškai tamprioje aplinkoje garso bangos energija ir intensyvumas kinta tik dėl sferinio paviršiaus plėtimosi. Netamprioje aplinkoje prisideda dar vienas faktorius – sugertis.

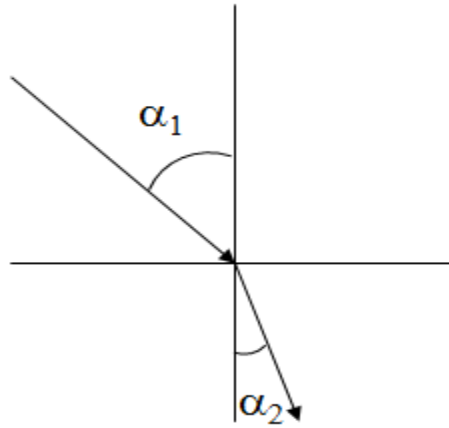
Garso bangos lūžimu vadiname bangos spindulio krypties pasikeitimu skirtingų aplinkų riboje. Garso banga lūžta, t.y. pakeičia kryptį, dėl bangos fronto prisilietimo prie paviršiaus skirtingais laiko momentais.

Garso bangos lūžimas paklūsta tokiems dėsningumams:

1. Lūžęs bangos spindulys yra toje plokštumoje, kurioje yra kritęs spindulys ir tiesė, statmena kritimo paviršiui.

2. Kritimo ir lūžimo kampų sinusų santykis yra lygus bangos greičių tose aplinkose santykiui. Šis santykis vadinamas lūžio rodikliu n_{12} ir yra nustatomas iš sąryšio:

$$n_{12} = \frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{V_1}{V_2} \quad (6)$$



4 pav. Garso bangos lūžimas pereinant iš terpės su didesniu garso greičiu į terpę su mažesniu.

Garso bangų išsklaidymu vadinamas sferinės bangos fronto suskaldymas į daugelį bangų, sklindančių į visas kryptis. Išsklaidymas galimas tada, kai bangos frontas sutinka kliūtis iš medžiagos, kurios matmenys yra mažesni už bangos ilgį ir kurioje bangos sklidimo greitis ženkliai skiriasi nuo tos aplinkos, kurioje banga sklido prieš tai, bangos sklidimo greičio.

Garso bangų išsklaidymą ir sugertį medžiagos paviršiuje ir tūryje galima pritaikyti sprendžiant garso izoliacijos uždavinius. Kaip žinome, garso sugerties koeficientas ženkliai priklauso nuo dažnio. Didėjant garso bangų dažniui sugertis medžiagoje didėja.

Izoliuoti aukštų dažnių garsus dažniausiai nėra problema. Sunkiausiai yra parinkti medžiagas, norint izoliuoti patalpą ar kažkokią erdvę nuo žemų dažnių, ypač artimų infragarsui. Tuo tikslu sumontuojama sudėtingesnė sienų ir lubų danga-konstrukcija, vadinama absorbentu.

Absorbentai gali būti dviejų rūšių:

- aukštadažniai
- žemadažniai.

Kaip aukštadažniai absorbentai dažniausiai yra naudojamos porėtos medžiagos:

- ✓ įvairios vatos,
- ✓ kilimai,
- ✓ medžio ar popieriaus plaušo plokštės,
- ✓ putoplasto plokštės,
- ✓ kitos.

Dėka porėtumo, aukšto dažnio garso banga pereidinėdama iš medžiagos vienos srities, kur garso greitis vienoks į oro tarpus ir vėl į medžiagą, patiria daugkartinius atspindžius ir lūžius. Padidėja paviršinė sugertis.

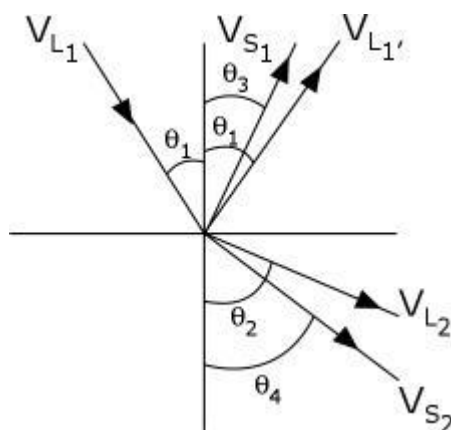
Žemo dažnio garso banga dėl žymiai didesnio bangos ilgio, sklinda tokia medžiaga kaip vientisa, dėl ko sugertis yra žymiai mažesnė. [6]

2. GARSO SLOPINIMO METODAI

2.1 Atspindėjimas

2.1.1 Atspindžiai terpių sandūroje

Garso bangos kaip kuriais atžvilgiais elgiasi labai panašiai į šviesą. Pereidama iš vienos terpės į kitą, kaip ir šviesos banga, garso banga lūžta. Šviesos bangai lūžtant, kai kuriais atvejais ji gali pasidalinti į daugiau, skirtingos poliarizacijos, spindulių. Analogiškai, garso bangai lūžtant skirtingų medžiagų sandūroje, kai kuriais atvejais, ji gali pasidalinti į daugiau, skirtingo tipo (skersinių, išilginių, paviršinių) dedamųjų. [7][8]



5 pav. Garso bangos pasidalijimas pereinant iš vienos terpės į kitą [28].

$$\frac{\sin\theta_1}{V_{L1}} = \frac{\sin\theta_2}{V_{L2}} = \frac{\sin\theta_3}{V_{S1}} = \frac{\sin\theta_4}{V_{S2}} \quad (28)$$

V_{L1} – išilginės bangos greitis pirmojoje terpėje

V_{L2} – išilginės bangos greitis antrojoje terpėje

V_{S1} – skersinės bangos greitis pirmojoje aplinkoje

V_{S2} – skersinės bangos greitis antrojoje aplinkoje

Pirmojo kritinio kampo atveju, antrosios terpės išilginė bangos dedamoji tampa paviršine banga, kuri juda išilgai medžiagų sandūros, o antrąja medžiaga gilyn juda tik skersinė bangos dalis, t.y. kai $\theta_2 = 90^\circ$. Antrojo kritinio kampo atveju kai $\theta_4 = 90^\circ$ ir skersinė bangos dalis pradeda judėti medžiagų sandūroje.

Pavyzdžiui, garsui pereinant iš oro į betoną, pirmasis kritinis kampas yra apie 5 laipsniai. O pereinant iš oro į berilį, pirmasis kritinis kampas apie pusantro laipsnio, antrasis kritinis kampas yra apie 6-7 laipsniai.

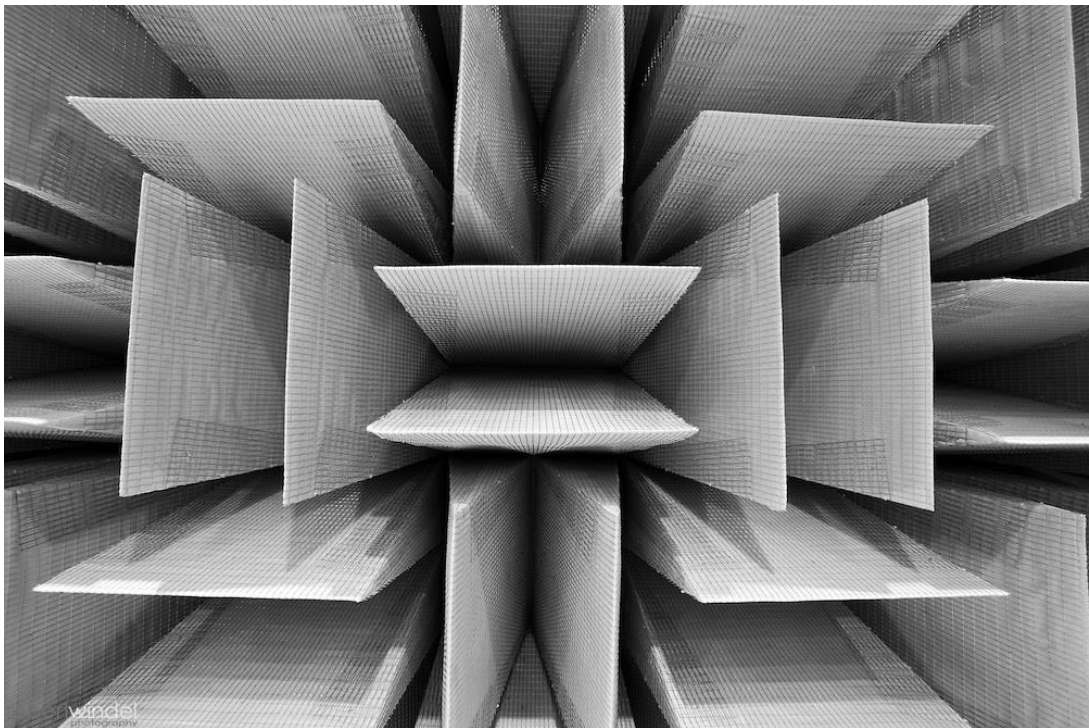
2 lentelė. Įvairių terpių skersinių ir išilginių greičio bangų palyginimas [8]

Medžiaga	Tankis (g/cm ³)	Bangos greitis (m/s)	
		Išilginė	Skersinė
Oras	0,001	330	-
Aliuminis	2,7-2,8	6250-6350	3100
Berilis	1,82	12800	8710
Kaulas	1,738	2240+-8%	-
Žalvaris	8,1	4430	2120
Bronza	8,86	3530	2230
Geležis	7,7	4500	2400
Šokoladas (tamsus)	1,302	2584	960
Varis	8,9	4660	2260
Kamštis	0,24	510	-
Stiklas	2,23-2,51	5570-5770	3430-3440
Glicerinas	1,261	1920	-
Auksas	19,3	3240	1200
Ledas	1,00	3980	1990
Švinas	11,4	2160	700
Švino cirkonio titanatas	7,65	3791	-
Magnis	1,74	5790	3100
Nikelis	8,3	5630	2960
Aliejus	0,920-0,953	1380-1500	-
Organinis stiklas	1,18	2670	1120
Polietilenas	0,920	2000	-
Kvarcas	2,65	5736	-
Sidabras	10,5	3600	1590
Minkštieji audiniai	1,06	1540	-
Plienas	7,8	5850	3230
Nerūdijantis plienas	7,67-8,03	5660-7390	2990-3120
Alavas	7,3	3320	1670
Titanas	4,54	6100	3120
Volframas	19,25	5180	2870
Vanduo (20°C)	1,00	1480	-
Mediena, ąžuolas (pagal medienos kryptį)	0,4615	4640	1750
Mediena, ąžuolas (prieš medienos kryptį)	0,4615	1630-2150	1460-1750
Cinkas	7,1	4170	2410

2.1.2 Kryptingas garso nuvedimas ir begalinių atspindžių panaudojimas

Paprastą garso atspindėjimo naudojimą galime dažnai pamatyti naudojama įvairiuose sprendimuose, pavyzdžiui, garso barjerai uždengti greitkeliui, esančiam netoli gyvenamųjų namų.

Patalpose tam, kad būtų sukurta visiška tyła, naudojamas begalinių atspindžių metodas. Veikimo principas paremtas tuo, kad garso banga patekusi į tokią kliūtį gali atsispindėti tik į vieną pusę – gilyn. Matematiškai tokie sugėrikliai gali būti apskaičiuoti, kad garsas judėdamas vis siaurėjančiu plyšiu galėtų atsispindėti neribotą skaičių kartų. Kiekvieną kartą garsas atsispindėdamas, sugėrikliui perduoda dalį energijos. Sugėriklių ilgis turi būti bent $\frac{1}{4}$ bangos ilgio kurią norim, kad jis efektyviai nuslopintų. Šis metodas yra labai efektyvus, tačiau visiškai nepraktiškas. Naudojamas beveik vien tik beaidžiuose kambariuose, skirtuose bandymams.



6 pav. Beaidžio kambario garso sugėrikliai.

2.1.3 Garso išsklaidymas (difuzoriai)

Difuzoriai tiesiogiai garso neslopina, tačiau jį išsklaido atsitiktinėmis kryptimis. Dėl to patalpoje susidaro mažiau stovinčių bangų ir interferencijų. Išsklaidytas garsas užpildo visą patalpą vienodai, dėl to sumažėja jos aidai ir patalpos rezonansai.

Difuzoriai dažnai naudojami įrašų studijose, koncertų salėse, kino teatruose, rečiau konferencijų salėse. Muzikantai, grojantys su akustiniais instrumentais, taip pat teikia pirmenybę difuzoriams. Pagal juos, patalpa lieka labiau „gyva“, mažiau nutildyta.



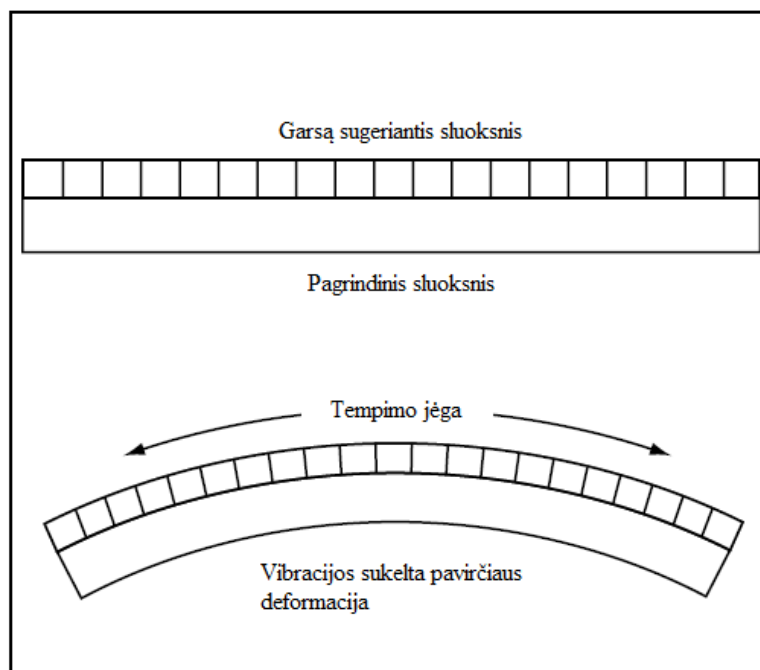
7 pav. Garso difuzoriai.

2.2 Sugėrimas

2.2.1 Slopinimas klampumu. Free layer ir CLD metodai

Garso slopinimui dažnai yra naudojamos viskoelastinės medžiagos. Tai yra tokios medžiagos, kurios deformuojamos gali kaupti energiją, tačiau dėl histerezės dalį jos išsklaido. Pagal panaudojimo būdą tokios medžiagos gali būti: lakštai, dervos ar naudojamos kaip klijai, surišant kitas statybines medžiagas.

Slopinimas dėl tempimo (angl. *Free-layer* arba *extensional damping*), tai vienas iš paprasčiausių klampios ar viskoelastinės medžiagos panaudojimo vibracijos slopinimui būdų. Sluoksnis tokios medžiagos tiesiog gali būti priklijuojamas prie konstrukcijos paviršiaus, arba užtepamas karštu būdu. Tokiu atveju vibracija ir garsas yra slopinami, kai banguojant slopinamosios medžiagos paviršiui, vyksta tempimas ir gniuždymas slopinančiajame sluoksnyje. Dėl vidinės trinties klampiam slopinančiajame sluoksnyje dalis mechaninės vibracijos energijos virsta medžiagos šilumine energija. Tokiu būdu taip pat nuslopinami ir konstrukcijos rezonansai. Slopavimo efektyvumas priklauso nuo slopinančiojo sluoksnio storio ir panaudotos medžiagos klampumo. [10][11]

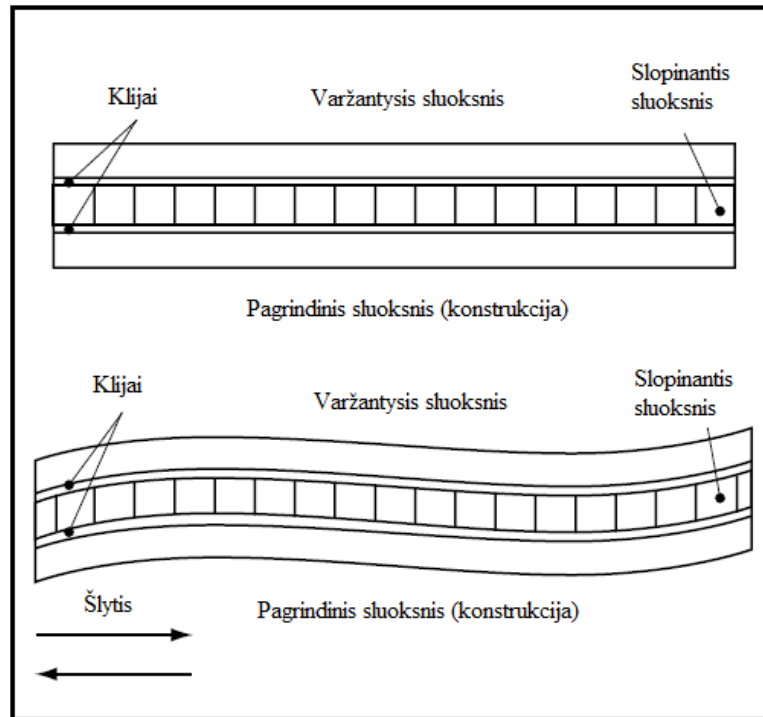


8 pav. *Free-laye damping* veikia tempimo ir gniuždymo principu.

Slopinimas varžančiuoju sluoksniu (angl. *Constrained-layer damping* (CLD)) naudojamas padidinti garso ir vibracijos slopinimą standžiose konstrukcijose. Suformuojamas vadinamas „sumuštinis“, sudarytas iš pagrindinio sluoksnio (konstrukcijos), slopinančiojo (viskoelastinio) ir varžančio (viršutinio) sluoksnių. Kai vibracijų metu sistema lankstosi, šlyties jėgos, atsiradusios

tarp sluoksnių deformuoja slopinantį sluoksnį tarp jų, ir tokiu būdu vibracijos energija verčiama į slopinančiojo sluoksnio, dėl vidinės trinties, atsirandančią šilumos energiją.

CLD naudojama triukšmui mažinti pastatų sienose, laivuose, automobiliuose, metalinėse talpyklose, garso kolonėlėse, ir kitur, kur yra didesnių vibruojančių paviršių. [10][11]

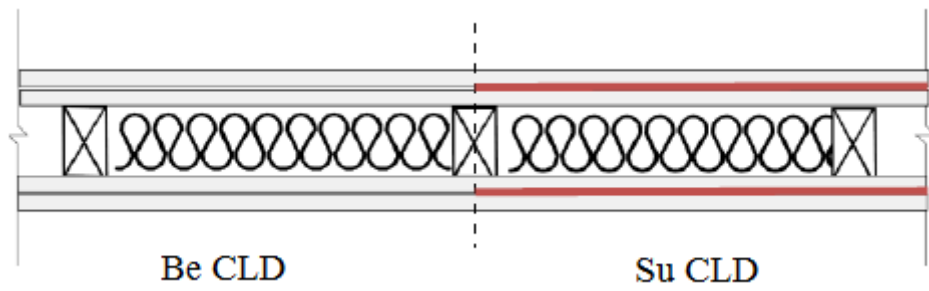


9 pav. CLD veikia šlyties principu.

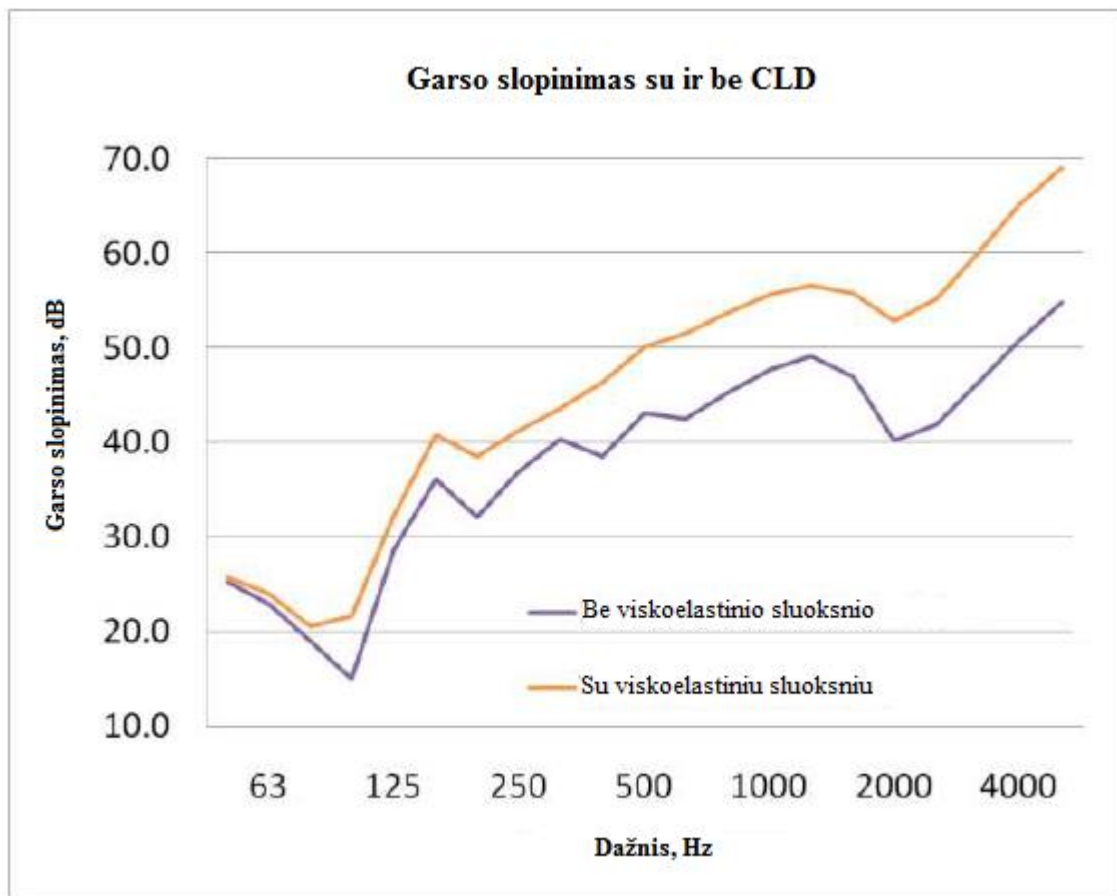


10 pav. Garsą izoliuojančios pertvaros pavyzdys.

Labai efektyviai CLD galima panaudoti įrenginėjant pastatų vidines sienas, kada jos yra gaminamos iš dvigubų gipso kartono plokščių. Tarp dviejų gipso kartono plokščių įterpus po ploną viskoelastinį sluoksnį (9 pav.), kai kuriais dažniais, sienos garso izoliacinės savybės pagerėja iki 10 dB, [23] nors bendras sienos storis beveik nepasikeičia.



11 pav. Pertvaros schema.



12 pav. Sienos pagal 11 pav. schemą garso slopinimo naudojant ir nenaudojant CLD palyginimas. [23]

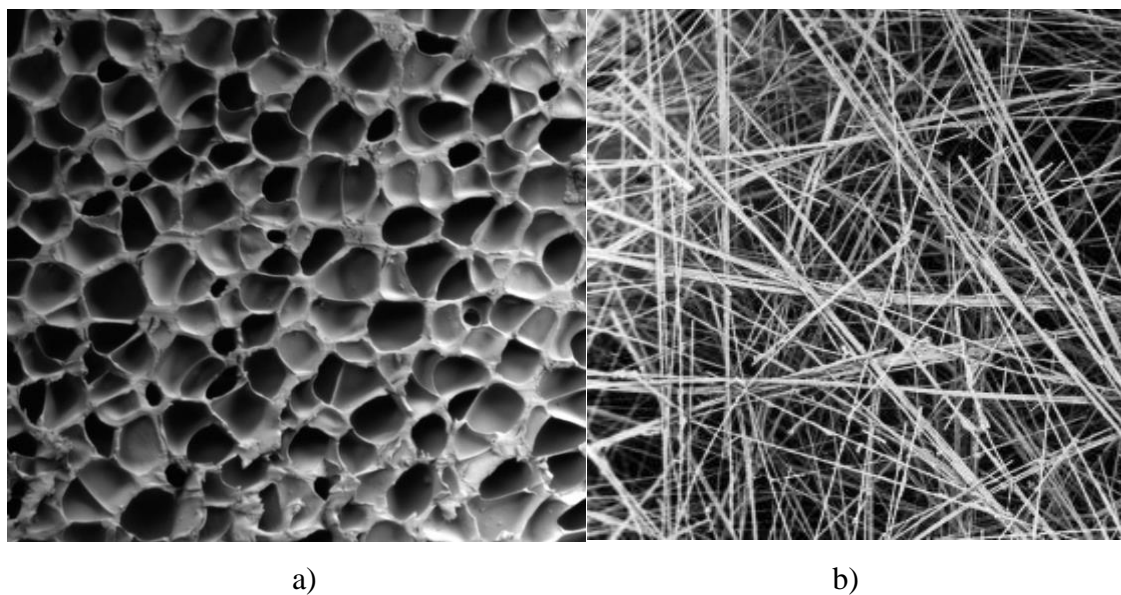
2.2.2 Slopinimas varžant dalelių judėjimą

Porėtose medžiagose, tokiose kaip įvairios vatos, pluoštai, veltiniai, putų polimerai ir kt., garso sugertis vyksta dėl kelių priežasčių. Išskirti reikėtų du pagrindinius mechanizmus:

1. medžiagos karkaso vibracijos,
2. dujų trintis medžiagoje.

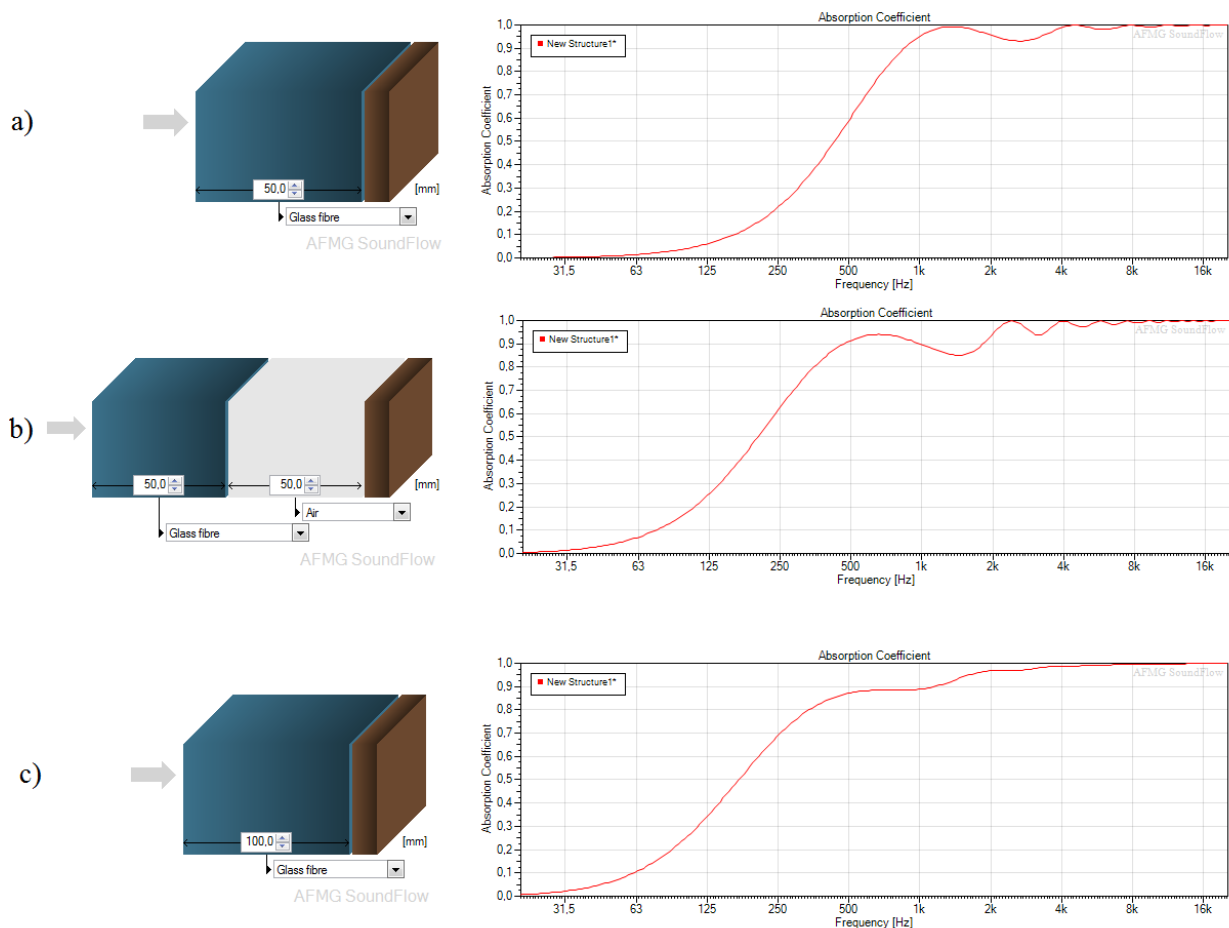
Medžiagos karkaso vibracijas sukelia garso slėgis ir oro dalelių judėjimo greičių svyravimai medžiagoje. Pluoštinėse medžiagose, dėl šios vibracijos, vyksta trintis tarp fibrų, ir nemaža dalis garso energijos būna paverčiama šiluma.

Medžiagos viduje virpant orui, jo dalelės trinasi į medžiagos karkasą taip atiduodamos dalį savo energijos. Taip pat kai oras juda mažomis erdmėmis, pradeda stipriai reikštis jo klampumas. Gaminant tokias garso izoliacijas yra norima kaip įmanoma padidinti medžiagos plotą, kuris sąveikauja su oru, taip padidinant klampią trintį. Todėl dažniausiai garso izoliacinių vatų fibros būna orientuotos lygiagrečiai bangos sklidimui ir dalelių judėjimui. [22]



13 pav. Vidaus struktūros vaizdas: a) Porėta putų tipo medžiaga b) Vata [24]

Vatos garso sugėrimo efektyvumas priklauso nuo oro dalelių judėjimo greičio, bet ne nuo jų slėgio. Į tai reiktų atsižvelgti parenkant tokio tipo garso sugėriklių vietą. Pavyzdžiui, prie pat sienos paviršiaus, garso slėgis būna didesnis, tačiau oro dalelių greitis būna mažiausias. Garso bangai atsispindėjus ir tolstant nuo paviršiaus, oro dalelės tuo tarpu juda greitėdamos iš aukštesnio slėgio zonos žemesnio link. Maksimalų judėjimo greitį pasiekia būdamos ketvirčio bangos ilgio atstume nuo sienos, ten kur yra slėgio minimumas.



14 pav. Akustikos stimuliatoriumi AFMG SoundFlow paskaičiuotas absorbcijos koeficientas trimis atvejais: a) 50mm storio stiklo vata prie sienos. b) 50mm storio stiklo vata, 50mm atstumu nuo sienos. b) 100mm storio stiklo vata prie sienos.

Grafikuose matome, kad atitraukus vatą nuo sienos, gauname rezultatą panašų lyg būtų padidintas vatos storis (14 pav. b) ir c) atvejai). Toliau didinant atstumą nuo sienos, gali atsirasti bangos ilgių, kurių maksimumai nebeatpenka į vatos tūrį, ir jie nebebus efektyviai slopinami.

2.2.3 Slopinimas vidinėmis ertmėmis ir rezonatoriais

Vienas iš efektyviausių būdų slopinti žemiausią dažnį tai naudoti rezonatorius. Rezonatoriai gali būti dviejų tipų. Tai – atviras Helmholtzo tipo ir uždaras membraninis.

Originalus Helmholtzo rezonatorius buvo į butelį panašus indas su siauru ilgu kakleliu. Kai išorinė jėga slegianti orą į indą staiga dingdavo, oras išeidamas iš talpos dėl savo masės ir inercijos palikdavo viduje mažesnę slėgį negu aplinkos ir vėl būdavo traukiamas atgal vidun. Grįždamas oras, dėl tų pačių priežasčių, susislėgdavo iki aukštesnio slėgio nei aplinka. Taip procesas vis silpdamas kartodavosi keletą kartų. Rezonansinis dažnis priklauso nuo oro tūrio ir kaklelio matmenų.

Helmholtzo tipo rezonatoriai gali būti į garso kolonėles panašios dėžės su reikiamam dažniui paskaičiuotomis skylėmis (portais) (15 pav.). Arba tai gali būti tiesiog oro tūris, uždarytas sienoje su perforuota plokšte. Kad rezonatorius garsą slopintų, jis turi būti dalinai užpildytas garsą sugeriančia medžiaga.



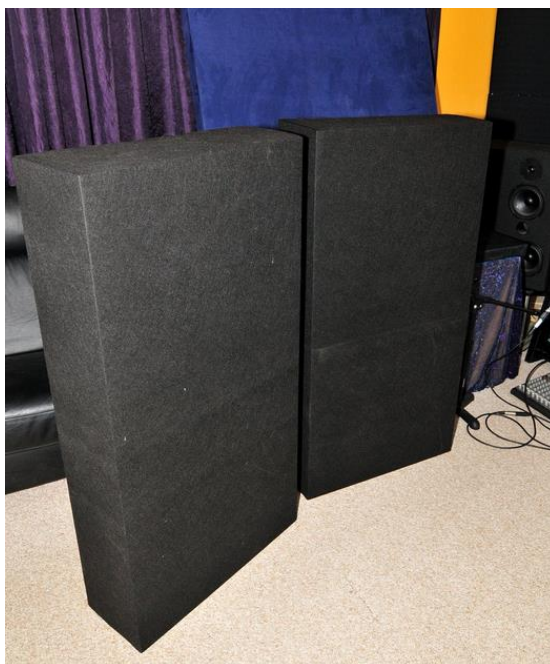
15 pav. Helmholtzo rezonatorius panaudotas slopinti, dėl stipriai garsą atspindinčių mūrinių sienų, atsiradusį patalpos rezonavimą.

Rezonatoriaus dažnį galima apskaičiuoti pagal formulę:

$$f_H = \frac{v}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{V_0 L}} \quad [25]$$

Kur f_h – rezonansinis dažnis, v – garso greitis, A – porto diametras, V_0 – vidaus tūris, L – efektyvus porto ilgis (jeigu porto ilgis palyginti su jo diametru yra ne didelis, prie porto ilgio reiktų pridėti $\sim 1.6r$)

Kitas rezonatoriaus tipas tai yra vadinamas membraninis sugėriklis. Jis yra padarytas iš uždaros dėžės, kurios viena siena yra elastinga masyvi membrana (16 pav.).



16 pav. Membraniniai sugėrikliai paruošti naudojimui įrašų studijoje.

Tai yra masės ir spyruoklės sistema, kur masė yra membrana o spyruoklė – oro standumas. Rezonansinį dažnį galima apskaičiuoti pagal formulę :

$$f = \frac{600}{\sqrt{MD}}$$

Kur f – rezonansinis dažnis, M – membranos tankis kg/m^2 , D – dėžės gylis cm .

Dėžė turi būti sandari, iš dalies užpildyta garsą sugeriančia medžiaga.

Rezonatoriai efektyviausiai veikia siauroje dažnių juostoje aplink jų rezonansinį dažnį. Todėl jie dažniausiai yra taikomi tada, kai reikia kontroliuoti, dažniausiai dėl patalpoje susidariusios stovinčios bangos, atsiradusį siaurajuostį žemo dažnio triukšmą. Skirtingai negu garsą sugeriančios vatos, kurių efektyvumas priklauso nuo oro dalelių judėjimo greičio, rezonatoriai geriausiai garso energiją sugeria būdami ten, kur garso slėgis yra didžiausias. Patalpose tokios vietos dažniausiai būna kampuose.

Kad rezonatoriai pilnai pasiektų savo „darbinį režimą“, jiems dažniausiai reikia kelių ar netgi keliolikos garso bangos ciklų, kol jų darbinė masė (oras ar membrana) pilnai išsijudina. Panašiai būna ir kai slopinamas garsas staiga dingsta. Rezonatoriui sustoti taip pat reikia kelių ciklų, todėl dingus slopinamam garsui, jie dar keletą milisekundžių skamba. Todėl jie labiau yra naudojami ten, kur labiau svarbu slopinti garso lygį negu maksimaliai sumažinti reverberacijos laiką.

2.2.4 Slopinimas paslankios masės „Limp mass“ metodu

Garsas ore tai yra juo judanti slėgio banga, kuri turi maksimumą ir minimumą. Pagal garso lygį galime pasiskaičiuoti koks susidaro oro slėgis joje. Pavyzdžiui 94dB garsas sukuria apie 1Pa slėgį. Šis slėgis, veikiantis kliūtį, veikia ją jėga $F=p \cdot A$, kur F – jėga, p slėgis, A – plotas. 1Pa slėgis sukuria 1N/m^2 kliūtį veikiančią jėgą. Jeigu ši kliūtis yra paslanki, tada ją judinant yra atliekamas darbas, kuriam yra naudojama garso energija.

Praktikoje tai gali būti panaudojama keliais būdais. Pavyzdžiui, išmušant sienas masyvia minkšta medžiaga. Tam geriausiai tiktų plonas švino sluoksnis, tačiau dažnai naudojamas masyvusis vinilas (MLV „Mass Loaded Vinyl“), tai yra vinilo, impregnuoto bariu ir siliciu danga.

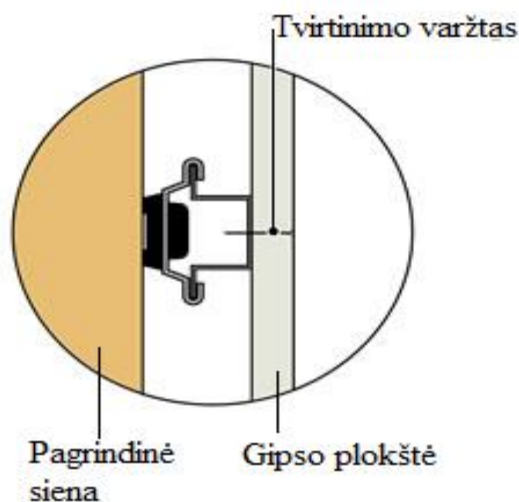


17 pav. Garso barjero naudojant masyvųjį vinilą pavyzdys.

Naudojant auditorijose ar kino teatruose šią funkciją gali atlikti masyvaus audinio užuolaidos, ar kitos dekoracijos. Taip pat iš dalies ir pakabinami akustiniai skydai.

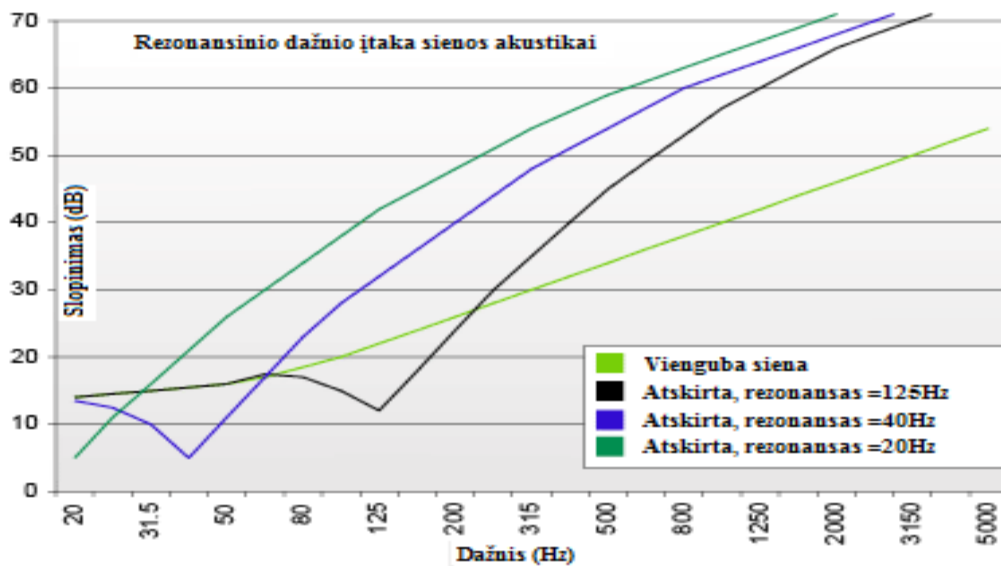
2.2.5 Akustinis atskyrimas „Decoupling“

Tokiais atvejais kai reikia akustiškai izoliuoti triukšmingą patalpą nuo likusio pastato, pvz. kino teatrą, kazino, ar barą, kurie yra įrengti bendrame pastate kartu su administracinėmis patalpomis. Arba priešingais atvejais, kai reikia izoliuoti vieną patalpą, nuo triukšmingo pastato, pvz. administracinę patalpą, kuri yra įrengta cecho pastate, ir jeigu garso izoliacijai galim sau leisti panaudoti daugiau patalpos tūrio, tada vienas iš efektyviausių dalykų ką galime padaryti, tai akustiškai atskirti izoliuojamą patalpą nuo likusio pastato tam, kad struktūrinis triukšmas neturėtų galimybės pasiekti patalpos sienų ir grindų. Tai atliekama įrengiant dvigubas vidines sienas ir jas tvirtinant prie išorinių sienų ir grindų su specialiais minkšto polimero arba gumos laikikliais.



18 pav. Akustiškai atskirtos vidinės sienos tvirtinimo pavyzdys.

Tačiau pasukus šiuo keliu susiduriame su kita problema, tai yra atsiradęs naujosios sienos rezonansas. Rezonanso dažnis, priklausomai nuo konstrukcijos, dažniausiai būna tarp 40 Hz ir 150 Hz. Artimu dažniu savo rezonansui, siena praranda garso izoliavimo savybes, todėl būtina kiek leidžia galimybės šį dažnį žeminti, arba slopinti.



19 pav. Išorinės sienos garso slopinimo savybių kitimo tendencija priklausomai nuo rezonanso. Pateikiama akustinių medžiagų gamintojų.

Atskirtos sienos rezonansinį dažnį žeminti galima keliai būdais:

- Didinti atskirtos sienos masę.
- Didinti oro tarpą tarp pagrindinės ir atskirtos sienų.

- Tarpą užpildyti izoliacine vata.

Rezonansą slopinti taip pat yra keli būdai. Pavyzdžiui, naudoti labiau vibraciją sugeriančius, viskoelastinio polimero, sienos tvirtinimo elementus. O jeigu atskirta siena yra gaminama iš gipso kartono, naudoti CLD metodą.

Atskyrus sieną labai svarbu ją gerai užsandarinti, kad tarp sienų esantis oru sklindantis triukšmas neturėtų galimybės plisti į patalpą. Reiktų nepamiršti ir ventiliacijos angų, rozečių, jungiklių, ir kitų elektros instaliacijos elementų.

3. TIRIAMOJI DALIS

3.1 Įrangos apžvalga

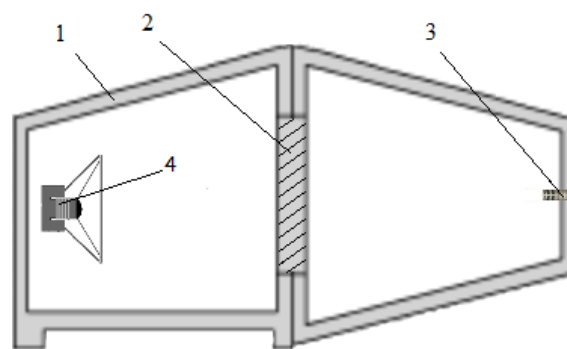
Matavimams buvo naudojamas garsą izoliuojantis stendas su triukšmo šaltiniu ir mikrofonu.

Signalo šaltinis – kompiuteris.

Garso stiprintuvas Vector Research VA-1400.

Plačiajuostis garsiakalbis Visaton BG17.

Triukšmomatis.



20 pav. Stendo schema: 1- Garsą izoliuojantis stendo korpusas; 2 - Anga bandiniams; 3 – Mikrofonas; 4 - Triukšmo šaltinis (garsiakalbis).



21 pav. Matavimams atlikti naudotas stendas.

3.2 Bandiniai

Naudotas cementas CEM I 42.5R, „Akmenės cementas“

Gipso kartono plokštė – tipas GKB, Storis 12.5 mm. „Knauf“.

Klijai - Kaučiukiniai klijai KN-3

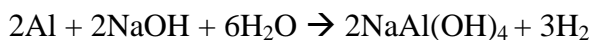
Bandiniai buvo gaminami pagal stendo pertvaros angą – 25x25cm. Tam pasigaminome rėmelius, į kuriuos liejome betoną. Iš viso bandinių buvo pagaminta 15 vnt. Iš jų 5 vnt. Homogeniniai, pagaminti iš cemento ir įvairių priemaišų, kad būtų galima patikrinti skirtingų užpildų įtaką garso sugėrimui. 5 vnt. dvisluoksniai, sudaryti pusė iš smėlio betono ir kita pusė iš kompozicinio mišinio. Šie bandiniai skirti patikrinti, kokią įtaką garsui daro skirtingų savybių medžiagų sandūra. Dvisluoksniai bandiniai buvo dviejų tipų. Vieni, kurių abu sluoksniai buvo supilti kartu, turi tolygų perėjimą iš vienokios medžiagos struktūros į kitokią. Kiti bandiniai, kurių antras sluoksnis buvo užpiltas tik leidus pirmajam sustingti, turi ryškią ribą tarp sluoksnių. Dar 4 bandiniai buvo pagaminti iš gipso kartono plokštės. Tai vieno sluoksnio, dviejų sluoksnių, dviejų sluoksnių tarpusavyje suklijuotų elastingais klijais ir dviejų sluoksnių sulipintų klampia medžiaga. Šie bandiniai skirti patikrinti CLD garso slopinimo metodo veiksmingumui. Taip pat pasigaminame ir etaloninį, vien iš smėlio betono supiltą bandinį, su kuriuo lyginsime kitų medžiagų akustines savybes.

Homogeniniai bandiniai.

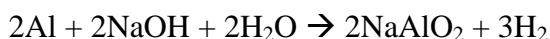
Šie bandiniai yra lengvi, jų rišančioji medžiaga – cementas, užpildas - dujos ir kai kur, papildomos medžiagos. Medžiagai sutvirtinti taip pat dedama ir polistireninių fibrų.

Gamyba.

Gaminant bandinius, visos sudedamos dalys yra maišomos viename inde, vėliau supilamos į formą ir paliekama stingti. Kad išgautumėm porėtą medžiagos struktūrą, turim kietėjančiame mišinyje sukelti cheminę reakciją, kurios metu išsiskirtų dujos. Tam į mišinį dedama NaOH ir Al pudra. Jie reaguoja su vandeniu ir gauname:



arba



Reakcijų produktas – tai kieta medžiaga ir vandenilio dujos. Reakcijos greitis nedidelis, taigi sumaišius visas sudedamąsias dalis ir supylus formą, ir 2 – 3 valandas galime matyti kaip bandinys auga.



22 pav. Kairėje – supiltas bandinys. Dešinėje toks pat bandinys po 1,5 valandos.



a)



b)

23 pav. Sukietėjusio bandinio porėta struktūra. a) Natūralus dydis, bandinio paviršius. b) Atskelta ir 5 kartus išdidinta, bandinio dalis. Matyti vidinė struktūra.

Naudoti bandiniai:

1. Dujų betonas 2 l ir Dujų betonas 4 l. Šie bandiniai yra lengviausi, susideda tik iš cemento, dujų ir fibrų. Dujų betonas 2 l yra dvigubai plonesnis už kitus bandinius. Lyginant šių dviejų bandinių rezultatus tarpusavyje, bus galima nustatyti, kaip priklauso garso slopinimo savybės nuo medžiagos storio, ir kokią dalį triukšmo praleidžia pats matavimų stendas.

2. Betonas su polistirenu. Kitaip jis dar ji dažnai vadinamas „polistirolbetonu“. Tai paskutiniu metu vis dažniau grindims ir stogams naudojamas betono tipas. Jis pasižymi geresne nei smėlinis betonas termoizoliacija, daug mažesniu tankiu, ir geresne garso izoliacija.

3. Betonas su PVC ir PTFE granulėmis. Kaip viskoelastinę medžiagą užpildui panaudotos PVC ir PTFE granulės, gautos iš smulkintų laidų izoliacijos atliekų.

4. Betonas su guma. Kaip elastinė medžiaga užpildui panaudotos gumos granulės.

5. Smėlio betonas. Tai yra bandinys iš standartinio betono, kuris sudarytas iš cemento ir smulkaus žvyro užpildui. Gaminant tokio tipo bandinius, buvo naudojamas vibracinis stalelis.

6. Smėlio betonas ir dujų betonas supilta kartu/atskirai. Tai dviejų sluoksnių bandinys, kurio pusė yra smėlio betonas, o kita pusė – dujų betonas. Vienu atveju į bandinio formą supilame smėlio betoną, supurtome ant vibracinio stalelio, ir užpilame ant viršaus antrą sluoksnį. Taip padarius skiediniai nesusimaišo tarpusavyje, tačiau sudūrimo vietoje palaipsniui iš dujų betono pereina į smėlio betoną. Jeigu į formą supylę vieną sluoksnį, dieną palaukiame, kad jis sukietėtų, tada užpilame antrąjį, tuomet gauname dviejų struktūrų sudūrimo ribą.

7. Smėlio betonas ir guma supilta kartu/atskirai. Taip pat kaip ir su dujų betonu, tik čia jo vietoje naudotas betonas su guma.

8. Bandiniai su gipso kartono plokšte. „Sumuštinis“ iš gipso plokščių yra praktiškas būdas išbandyti CLD (Constrained-layer damping) efektyvumą. Tam vieną matavimą atliksime tiesiog su dviem suglaustomis plokštėmis, taip, kaip jos dažniausiai yra naudojamos statant sienas. Antru atveju dvi plokštės suklijuojamos elastingais (KN-3) klizais. Trečiu atveju dvi plokštės yra sulipinamos klampiu sluoksniu. Tam panaudojamas plastilinas.

3 lentelė. Bandinių sudėčių duomenų lentelė

Bandinys	Vanduo, ml	Cementas, g	Užpildas, g		Smėlis, g	Užpildo kiekis, g	NaOH, g	Gipsas, g	Al pudra, g	Polistireninės fibros, g	Masė be vandens, g
Dujų betonas 2l	210	581.5	Dujos				2.4	1.6	0.6	1.62	587.72
Dujų betonas 4l	820	1163	Dujos				4.8	3.2	1.2	3.24	1175.44
Betonas su polistirenu	820	1163	EPS granulės			40	4.8	3.2	1.2	3.24	1215.44
Betonas su PVC/PTFE	820	1163	PVC/PTFE granulės			172	4.8	3.2	1.2	3.24	1347.44
Betonas su guma	820	1163	Smulkinta guma			172	4.8	3.2	1.2	3.24	1347.44
Smėlio betonas	820	1163	Smėlis		3500						4663
Smėlio betonas ir polisternas	820	1163	Smėlis	EPS granulės	1750	20	2.4	1.6	0.6	1.62	2939.22
Smėlio ir dujų betonas supilta kartu	820	1163	Smėlis	Dujos	1750		2.4	1.6	0.6	1.62	2919.22
Smėlio ir dujų betonas supilta atskirai	820	1163	Smėlis	Dujos	1750		2.4	1.6	0.6	1.62	2919.22
Smėlio betonas ir betonas su guma supilta kartu	820	1163	Smėlis	Guma	1750	86	2.4	1.6	0.6	1.62	3005.22
Smėlio betonas ir betonas su guma supilta atskirai	820	1163	Smėlis	Guma	1750	86	2.4	1.6	0.6	1.62	3005.22

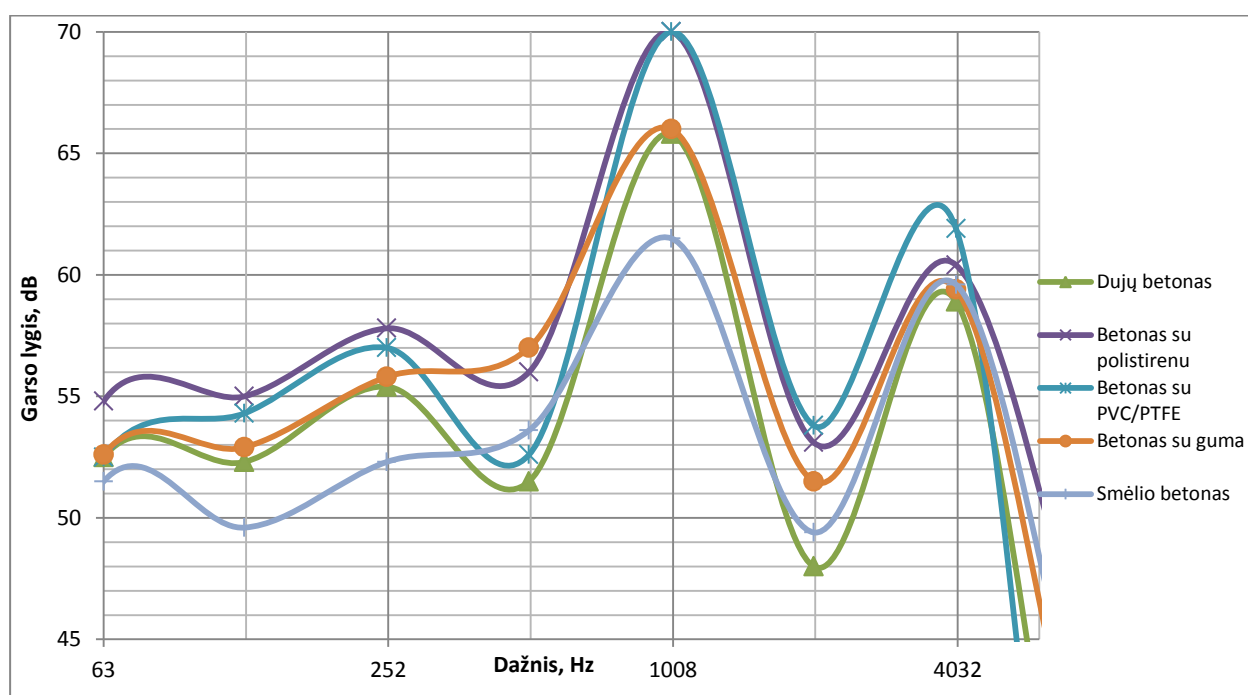
4.3 Matavimų rezultatai

4 lentelė. Triukšmomačio parodymų lentelė. Betono bandiniai

Nr.	Bandinys	Dažnis, Hz / Garso lygis, dB										Bendras triukšmo lygis, dB	Pastabos
		31.5	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	16k		
1	Tuščia											20	Be garso
2	Tuščia											84.8	Baltas triukšmas
3	Tuščia	52	47	37	18	17.5	18	16	16	18	17		Be garso
4	Tuščia	58	68.5	82	79	81	86.5	79	85.5	83	65		Baltas triukšmas
5	Tuščia	46.7	66	80	78.4	82.8	90.2	79.8	84.1	71.4	42		Sin
6	Tuščia	86.9	94.6	104	93.1	92.4	96.6	83.8	88.2	77.3	52		Sin+filtrai
7	Dujų betonas 2l	36.3	51	51.4	62	59.9	69.8	53	61.1	34.7	26	62.6	Sin
8	Smėlio ir dujų betonas supilta kartu	35.4	49.8	51.1	53.9	53.9	63.5	47	55.7	38.2	28	58	Sin
9	Smėlio ir gumos betonas supilta atskirai	36.2	52.4	53.9	56	58.4	70	50.2	59.2	39.1	27	59.4	Sin
10	Smėlio ir dujų betonas supilta atskirai	37	53	52.6	56	57.3	67.8	50.5	58.3	40	27	58.3	Sin (neužsisandarino stendo angoje)
11	Smėlio ir gumos betonas supilta kartu	36.4	52.5	52.3	55.6	57.5	67.6	53.7	62.9	37.7	27	59.6	Sin
12	Smėlio betonas	36.4	51.5	49.6	52.3	53.6	61.5	49.4	59.6	38.8	27	55.6	Sin
13	Smėlio betonas ir betonas su polistirenu	37.6	52.5	52	53.3	55.4	66.4	33.4	36.1	45	29	58.1	Sin
14	Betonas su guma	38	52.6	52.9	55.8	57	66	51.5	59.4	36.5	28	58	Sin
15	Dujų betonas 4l	38.1	52.5	52.3	55.4	51.5	65.8	48	58.9	29.5	29	56.5	sin
16	Betonas su PVC/PTFE	38	52.5	54.3	57	52.6	70	53.8	61.9	20	28	60.6	Sin
17	Betonas su polistirenu	38.4	54.8	55	57.8	56	70	53.1	60.4	42.8	28	59.5	Sin
18	Gipso plokštės su klampiu sl.	34.9	49.6	49.6	55.4	56.6	61.1	59.9	58.4	32.4	27	55.5	Sin
19	Smėlio betonas	39.3	52.6	58.6	59.5	61.3	70.5	59.6	76.1	61.4	28		Sin, paklaidos testas
20	Smėlio betonas	36.6	53	59	59.6	61.2	69.9	59.2	78.2	58.6	25		Sin, paklaidos testas
21	Gipso plokštės su klampiu sl.	52	57	57.5	57.5	62	64	60.5	61.6	55.1	41	61.9	Triukšmas, palyginimui
22	Gipso plokštės su klampiu sl.	35.4	50.1	57.7	57.5	59.3	67.2	54.9	59	46	31	61.9	Sin, palyginimui

5 lentelė. Triukšmomačio parodymų lentelė. Gipso kartono bandiniai

Nr	Bandinys	Dažnis, Hz / Garso lygis, dB										Pastabos
		31.5	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	16k	
1	2 Gipso plokštės	48	58.4	55.4	57.4	55.5	61	59.3	56.4	48.8	40.5	su klampiu sluoksniu
2	2 Gipso plokštės	48.9	59.7	56	56.4	57.8	68.6	58	59.3	55.2	31.5	suglausti
3	2 Gipso plokštės	48.9	58.7	55.4	54.6	56.2	65.4	60.1	71.7	49.5	34	suklijuotos
4	1 Gipso plokštė	51	59	61	59.6	62.5	70.8	58.4	71.6	52.4	29	
5	Tuščia	60.5	69	80	74.5	83.9	90.3	77	82	78	53.1	



24 pav. Homogeninių bandinių, praleisto triukšmo grafikai.

Iš triukšmo lygio matavimo duomenų iš karto matyti, kad stendo ir garsiakalbio kombinacija turi du rezonansinius dažnius, tai yra 1kHz ir 4kHz į kuriuos reikės atsižvelgti skaičiuojant garso slopinimo lygį. Tam, kad patikrinti stendo dažninę charakteristiką, buvo atlikti stendo be bandinio ir foninio triukšmo matavimai.

Taip pat iš šių duomenų jau galime matyti, kad orinį triukšmą iki ~1700Hz geriausiai sulaikė smėlio betono bandinys. Aukštesniame dažnyje geriausiai garšą slopino dujų betono bandinys.

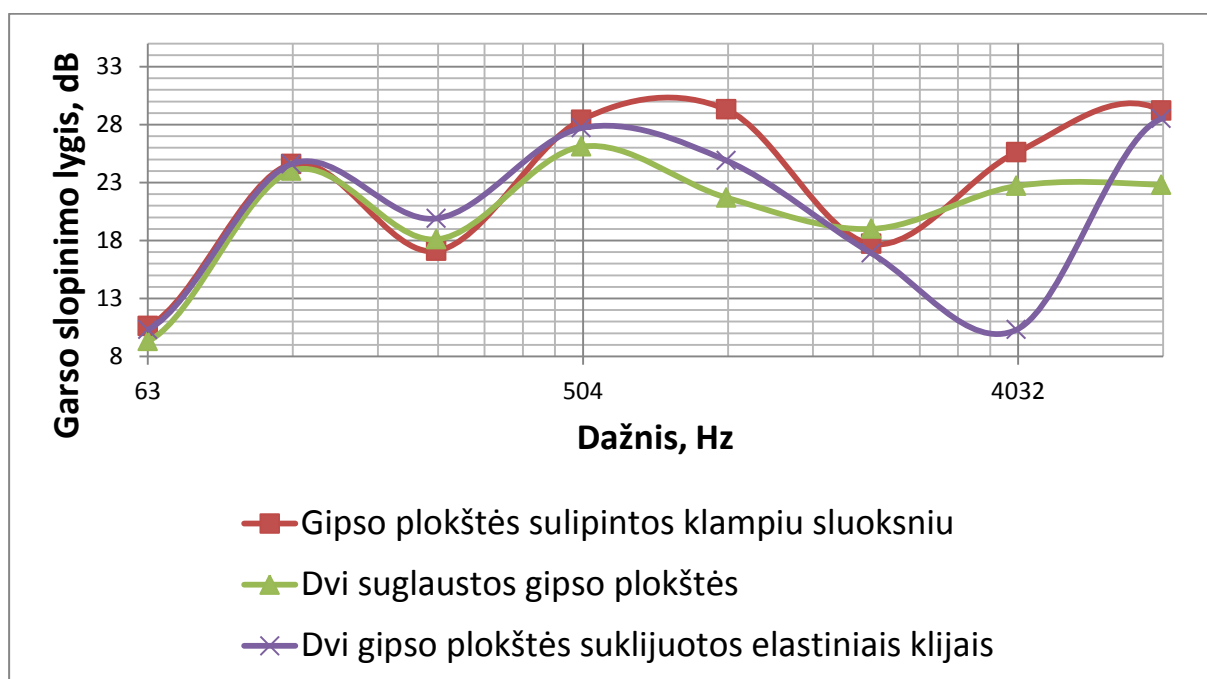
Pagal išmatuotą triukšmo stiprumą be bandinio, apskaičiuojame garso slopinimo lygius.

6 lentelė. Betono bandinių triukšmo slopinimo lygiai

Nr	Bandinys	Dažnis, Hz / Garso slopinimo lygis, dB										Pastabos
		31.5	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	16k	
1	Dujų betonas 2l	10.4	15	30.5	16.4	22.9	20.4	26.8	23	36.7	16.1	Sin
2	Smėlio ir dujų betonas supilta kartu	11.3	16.2	30.8	24.5	28.9	26.7	32.8	28.4	33.2	13.3	Sin
3	Smėlio ir gumos betonas supilta atskirai	10.5	13.6	28	22.4	24.4	20.2	29.6	24.9	32.3	14.7	Sin
4	Smėlio ir dujų betonas supilta atskirai	9.7	13	29.3	22.4	25.5	22.4	29.3	25.8	31.4	14.5	Sin
5	Smėlio ir gumos betonas supilta kartu	10.3	13.5	29.6	22.8	25.3	22.6	26.1	21.2	33.7	15.2	Sin
6	Smėlio betonas	10.3	14.5	32.3	26.1	29.2	28.7	30.4	24.5	32.6	15.2	Sin
7	Smėlio betonas ir betonas su polistirenu	9.1	13.5	29.9	25.1	27.4	23.8	46.4	48	26.4	13.2	Sin
8	Betonas su guma	8.7	13.4	29	22.6	25.8	24.2	28.3	24.7	34.9	14.2	Sin
9	Dujų betonas 4l	8.6	13.5	29.6	23	31.3	24.4	31.8	25.2	41.9	12.9	sin
10	Betonas su PVC/PTFE	8.7	13.5	27.6	21.4	30.2	20.2	26	22.2	51.4	13.7	Sin
11	Betonas su polistirenu	8.3	11.2	26.9	20.6	26.8	20.2	26.7	23.7	28.6	13.6	Sin
12	Gipso plokštės su klampiu sluoksniu	11.8	16.4	32.3	23	26.2	29.1	19.9	25.7	39	14.3	Sin
13	Smėlio betonas	7.4	13.4	23.3	18.9	21.5	19.7	20.2	9	7	13.3	Sin paklaidos testas
14	Smėlio betonas	10.1	13	22.9	18.8	21.6	20.3	20.6	3.9	12.8	16.7	Sin paklaidos testas
15	Gipso plokštės su klampiu sluoksniu	6	11.5	24.5	21.5	19	22.5	18.5	23.9	27.9	23.6	Triukšmas palyginimui
16	Gipso plokštės su klampiu sluoksniu	11.3	15.9	24.2	20.9	23.5	23	24.9	25.1	25.4	11.1	Sin palyginimui

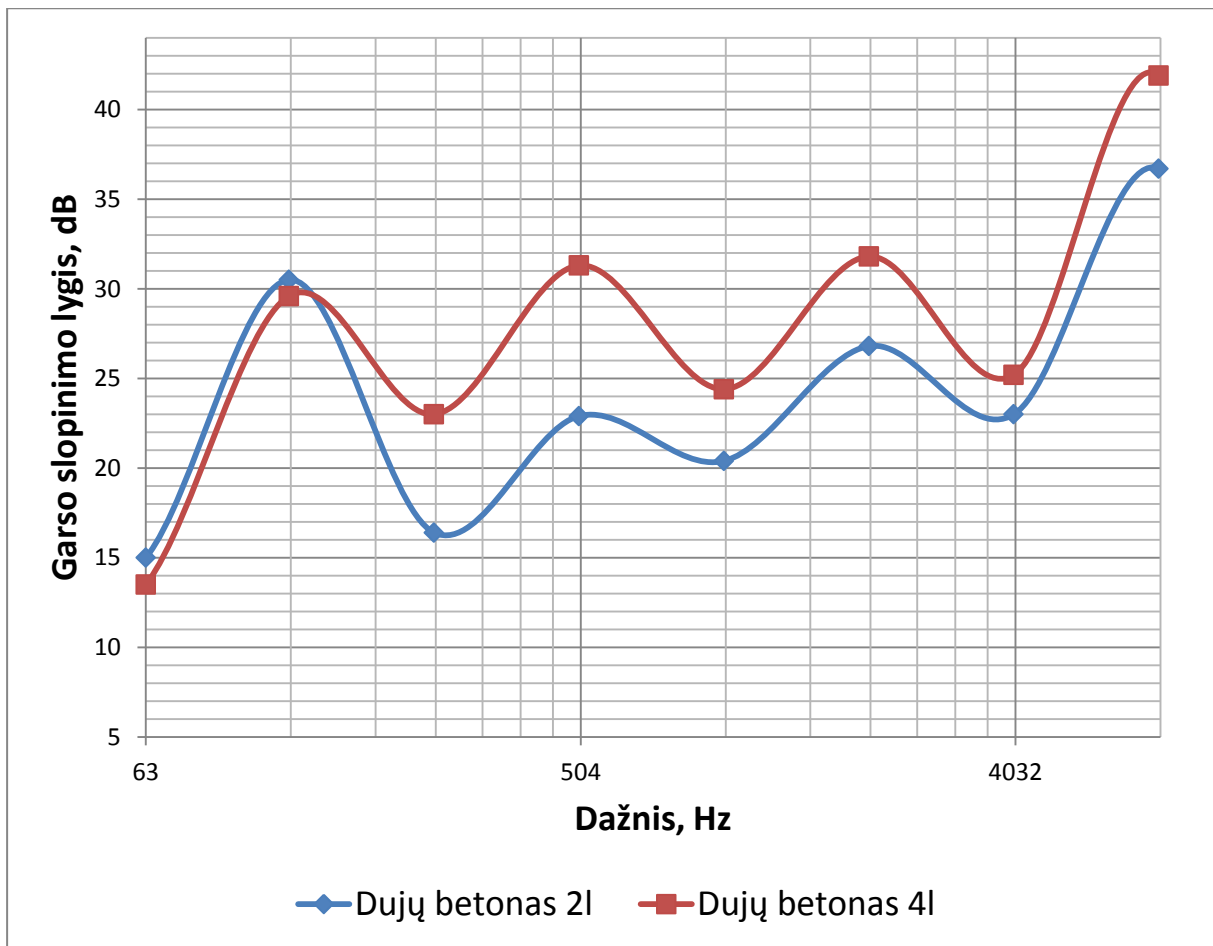
7 lentelė. Gipso kartono plokščių bandinių slopinimo lygiai

Nr	Bandinys	Dažnis, Hz / Garso slopinimo lygis, dB										Pastabos
		31.5	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	16k	
1	2 Gipso plokštės	12.5	10.6	24.6	17.1	28.4	29.3	17.7	25.6	29.2	12.6	su klampiu sluoksniu
2	2 Gipso plokštės	11.6	9.3	24	18.1	26.1	21.7	19	22.7	22.8	21.6	suglaustos
3	2 Gipso plokštės	11.6	10.3	24.6	19.9	27.7	24.9	16.9	10.3	28.5	19.1	suklijuotos
4	1 Gipso plokštė	9.5	10	19	14.9	21.4	19.5	18.6	10.4	25.6	24.1	



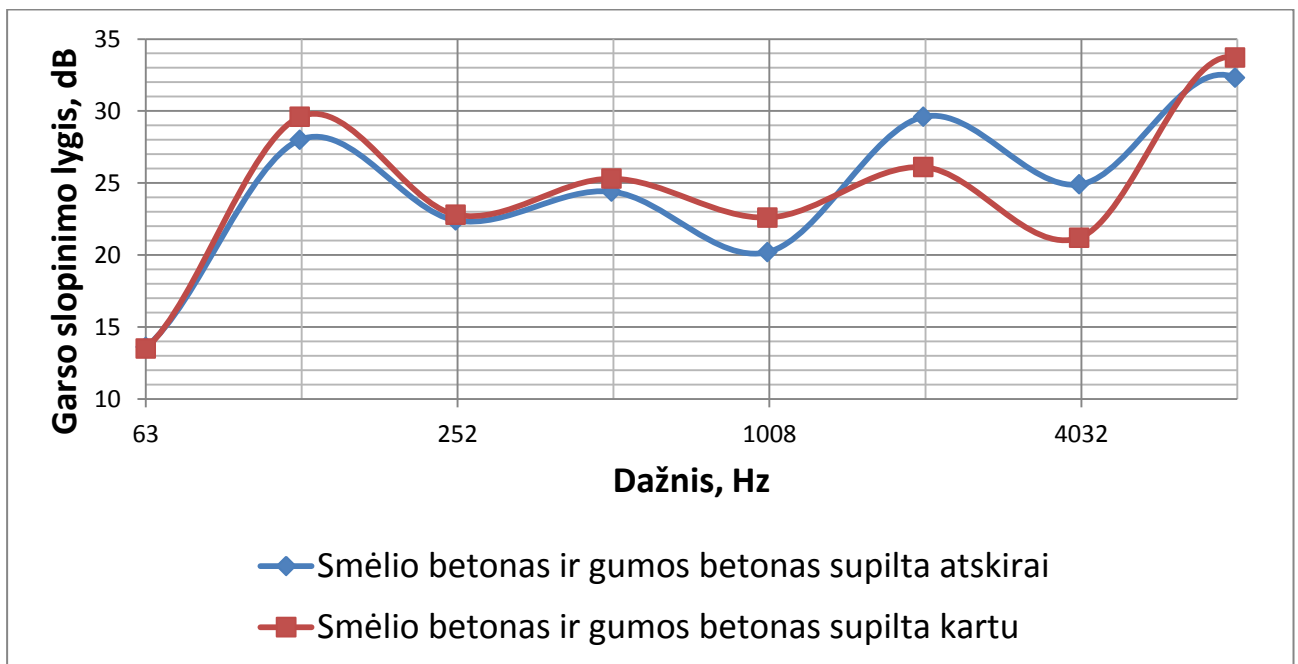
25 pav. Gipso bandinių garso slopinimo grafikai. Grafike matyti, kad iki 6000Hz geriausiu garso slopinimu pasižymi gipso plokštės sulipintos plastilinu.

Lyginant garso slopinimo lygius gipso kartono bandinių, geriausią rezultatą buvo gautas su CLD bandiniu, tai yra bandinys su tarpiniu klampiu sluoksniu. Bandinys kuris buvo klijuotas elastiniais kljais, turėjo pagerėjusias garso slopinimo savybes dažniuose iki 1500Hz. Tačiau dėl rezonanso prie ~3500Hz, šis bandinys stipriai praleido 2000 – 6000 Hz dažnio triukšmą. CLD bandinio rezonansas buvo prie ~2000Hz, tačiau rezonanso poveikis buvo gerokai mažesnis dėl vibraciją slopinančio klampaus sluoksnio.



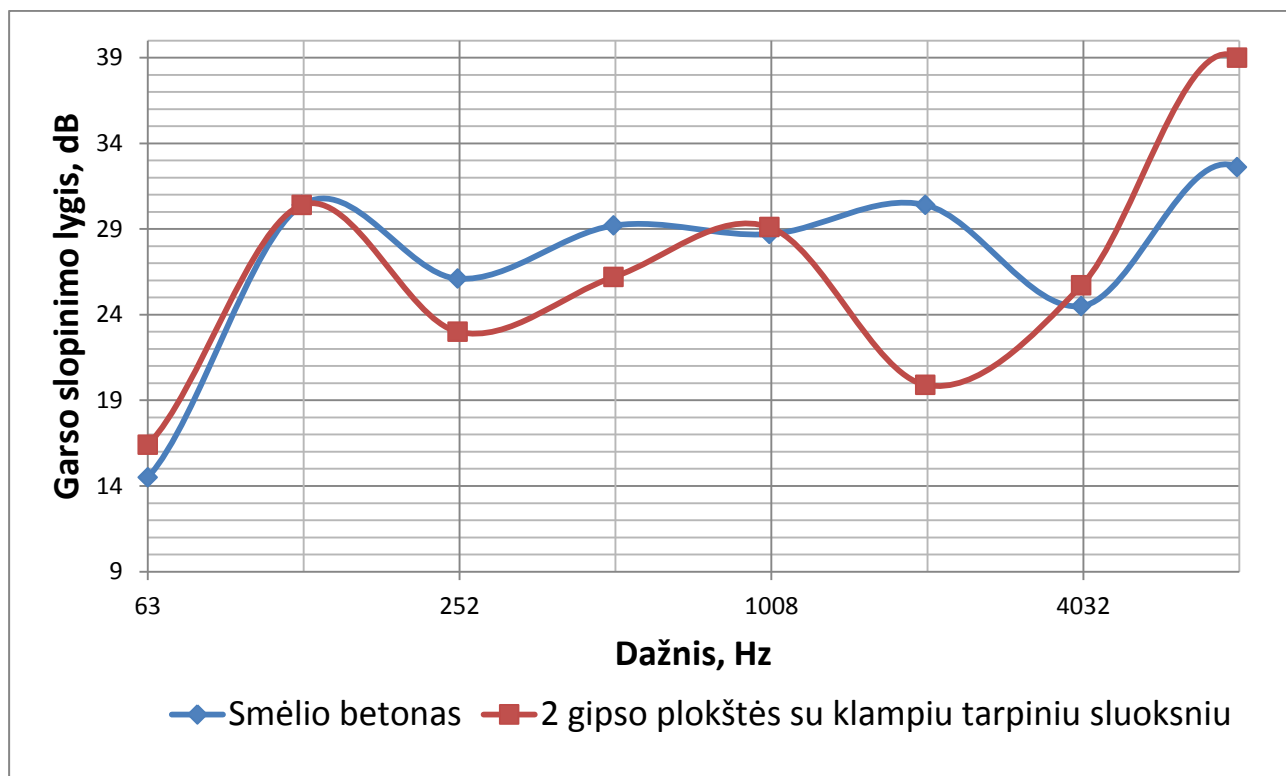
26 pav. Skirtingo storio dujų betono bandinių, garso slopinimo grafikai.

Lyginant tokios pačios sudėties, bet dvigubo storio bandinius, buvo gautas 6,1dB triukšmo lygio skirtumas.



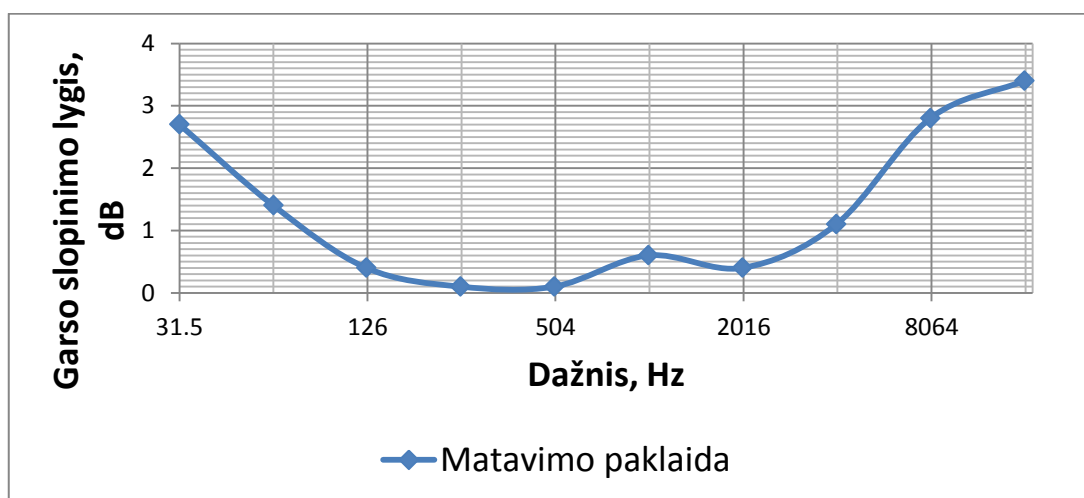
27 pav. Garso slopinimo palyginimas tarp bandinio su ryškia ir pereinamąja sandūra.

Lyginant bandinius su skirtingo storio sandūra tarp dviejų tipų medžiagų, bendro triukšmo lygio skirtumas buvo gautas 0,2dB. Tačiau dažninės charakteristikos buvo gautos skirtingos.



28 pav. Smėlio betono ir dviejų gipso kartono plokščių sulipintų klampiu sluoksniu, garso slopinimo palyginimas.

Lyginant kaip orinį triukšmą sulaiko tokio paties storio betonas ir dviguba gipso kartono plokštė su CLD, buvo gauta, kad tik žemiausius ir aukščiausius dažnius gipso plokštės su CLD sulaikė geriau už smėlio betoną.



29 pav. Matavimo paklaidos dydis. Garso skirtumas tarp gerai ir prastai užsandarintos bandinio angos.

IŠVADOS

1. Matavimai buvo atlikti dviem būdais. Vienu – iš garso šaltinio buvo generuojamas baltas triukšmas, o mikrofonu gautas signalas filtruojamas triukšmomačio filtrais, kad išskirti tik siaurą juostą. Kitu būdu, buvo generuojamas vieno dažnio sinuso formos signalas, tačiau priimamas signalas filtruotas nebūdavo. Pirmu atveju mums nėra aktualūs garsiakalbio harmoniniai iškraipymai ir bandinių „darbo sąlygos“ yra panašesnės į realiąsias. Antruoju atveju, iš garso šaltinio, t.y. stiprintuvo ir garsiakalbio, neviršydami nominalaus jų galingumo, galime išgauti daug stipresnį garsą. Stipresnis signalas, reiškia tai, kad aplinkos triukšmo įtaka matavimo rezultatams bus mažesnė. Mūsų naudotas triukšmomatis, nenaudojant signalo filtrų veikė tiksliau ir rodė labiau patikimus rezultatus. Todėl naudojame tik antruoju matavimo būdu gautus rezultatus.

2. Gauti rezultatai parodė, kad lyginant vienodo storio mažo tankio medžiagas, geriausiai garsą izoliavo dujų betonas be priemaišų. Tiek gumos, tiek PVC/PTFE granulės rezultatus pablogino. Lyginant dujų ir smėlio betono garso slopinimo grafikus matyti, kad dažniuose iki ~1700Hz geriau garsą sulaiko betonas su smėlio užpildu, aukštesnį dujų betonas.

3. Patį žemiausią dažnį, iki 125Hz, geriausiai slopina klampiu sluoksniu sulipintos gipso plokštės. Jos 1-2 dB lenkia smėlbetonio, ir 2-3 dB dujų betono bandinius.

4. Žemiausio dažnio paklaidą lėmė struktūrinis foninis triukšmas. Nors matavimai buvo atliekami vėlyvais vakarais, kada foninis triukšmas yra mažiausias, tačiau prietaisas stipriai reaguodavo į pastate vaikščiojančių žmonių žingsnius, lauke judančias transporto priemones ir kitus įrengimus.

LITERATŪRA

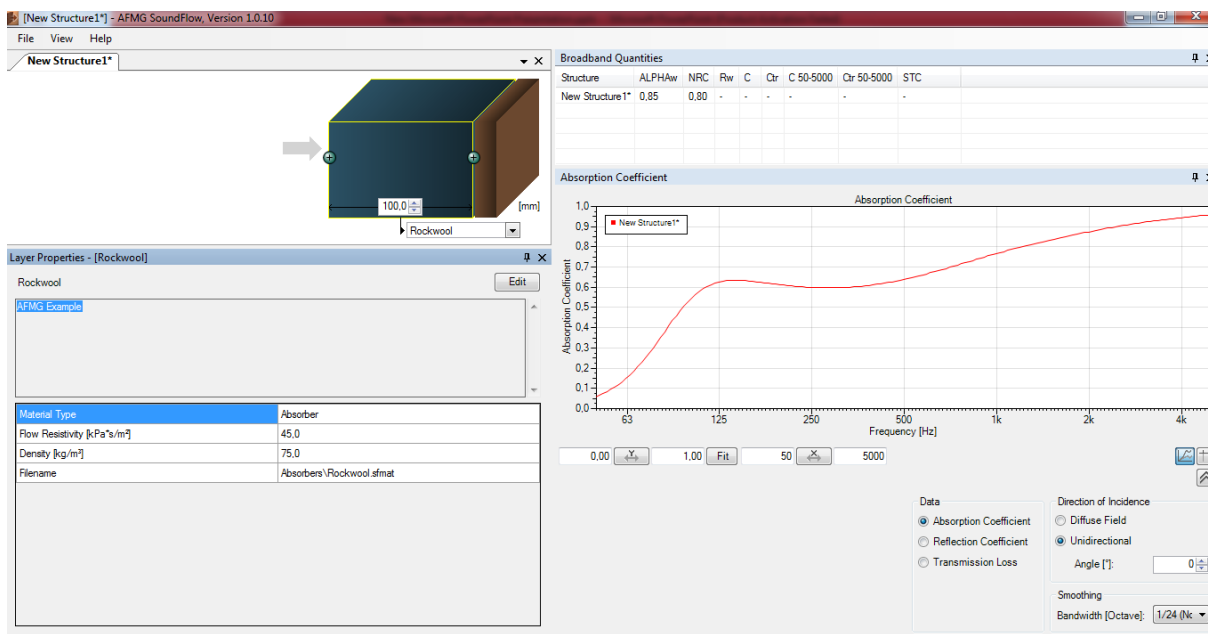
1. Aplinkos triukšmas, Praktinio mokymo sistema, VGTU, [žiūrėta 2014-05-29] Prieiga per:
<http://iti.vgtu.lt/imitacijosmain/Showinfo.aspx?objid=2121&tipoid=1>
2. PETRAUSKAITĖ, V. Transporto priemonių keliamo triukšmo valdymo politika. Magistro darbas. Mykolo Riomerio universitetas Strateginio valdymo ir politikos fakultetas, 2006. p. 9-10
3. The European environment, State and outlook, Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2010. ISBN 978-92-9213-151-7. [žiūrėta 2014-05-30] Prieiga per:
http://www.ab.gov.tr/files/ardb/evt/1_avrupa_birligi/1_6_raporlar/1_3_diger/environment/eea__2010_the_european_environment_synthesis.pdf p. 99-100
4. Triukšmo poveikis darbe, Europos Parlamento ir Tarybos direktyvos 2003/10/EB dėl būtiniausių sveikatos ir saugos reikalavimų, susijusių su fizinių veiksnių (triukšmo) keliama rizika darbuotojams, taikymo neprivalomas gerosios patirties vadovas, Liuksemburgas: Europos Sąjungos leidiniu biuras, 2009, ISBN 978-92-79-11344-42007. p. 111-120
5. Penick, T. [interaktyvus] [žiūrėta 2014-05-22] Prieiga per internetą:
<http://www.tomzap.com/notes/AcousticsEE363N/EngineeringAcoustics.pdf>. p. 21-23, 25
6. Akustikos fizikos pagrindai, [žiūrėta 2014-05-25] Prieiga per:
<http://www.fizika.ktu.lt/Akustika/Akustikos%20fizika.ppt>
7. Acoustics Animations – Mode, Incident Medium Wave Speed Greater than the Receiving Medium Wave Speed with an Incident Longitudinal Wave Conversion [žiūrėta 2014-05-28] Prieiga per:
<http://www.physics.byu.edu/research/acoustics/animationsMC.aspx>
8. Rose, J.L. Ultrasonic Waves in Solid Media, 1999, ISBN 0 521 64043 p. 47-49.
9. Petkienė, A. Šilalės rajono savivaldybės visuomenės sveikatos biuras, 2011-02-02, [žiūrėta 2014-05-28] Prieiga per: <http://www.silalesvsb.lt/?p=521>
10. Ungar, E. E. Acoustics and vibration, Noise and Vibration Control Engineering, Vibration Isolation, 1992. p. 460-461; 466-480.
11. Renninger, J. Understanding Damping Techniques for Noise and Vibration Control, Aearo Company, www.earsc.com. Prieiga per: <http://www.earsc.com/pdfs/engineering/understandingdamping.pdf> p. 2-4.
12. Seybert, A. F. Sound Absorption and Sound Absorbers, Engineering Acoustics, Department of Mechanical Engineering University of Kentucky, 2002. [žiūrėta 2014-05 29] Prieiga per:
<http://www.engr.uky.edu/vac/ME610/Lectures/Chapter%207%20Sound%20Absorption%20and%20Sound%20Absorbers.pdf> p. 5-7, 9, 15, 28-31
13. Beltman, W. M. Viscothermal Wave Propagation Including Acoisto-Elastic Interaction, Part I: Theory Journal of Sound and Vibration, Department of Mechanical Engineering, 1999, Article No. jsvi.1999.2355. Prieiga per: <http://doc.utwente.nl/32062/1/t000000b.pdf>
14. Bruel; Kjaer, Publications Sound Intensity, Booklet BR 0476-11, DK-2850 [žiūrėta 2014-05-20] Prieiga per:
<http://www.bksv.com/doc/br0476.pdf> p. 7-8.
15. Everest, F.A. Master Handbook of Acoustics, Fourth Edition,[interaktyvus] 2001, No. 0-07-139974-7.[žiūrėta 2014- 05-15] Prieiga per:

- <http://andrealbino.wikispaces.com/file/view/Master+Handbook+of+Acoustics+-+5th+Edition+-+F.+Alton+Everest,+Ken+C.+Pohlmann.pdf> p. 117-120; 125-133; 179-222.
16. Europos parlamento ir komisijos direktyva 2002/49/EB dėl aplinkos triukšmo įvertinimo ir valdymo, 2002 m. birželio 25 d. p. 4 (3 straipsnis, Sąvokų apibrėžimai)
 17. GRUBLIAUSKAS, R. Aplinkos triukšmo ir jo mažinimo, taikant lengvas konstrukcijas, tyrimai bei skaitinis modeliavimas. Daktaro disertacija. VGTU Technologijos mokslai Aplinkos inžinerija ir kraštovarkla. 2009, p. 31-34.
 18. Jacobsen, F.; Poulsen, T.; Rindel, J. H.; Gade, A. Ch.; Mogens, O, Fundamentals Of Acoustics And Noise Control, Technical University of Denmark, April 2007, Note No. 31200 [žiūrėta 2014-05-19] Prieiga per: http://www.etsist.upm.es/uploaded/docs_personales/ulin_nabatov_vladimir/ACUSTICA_ARQUITECTONICA_CF/FINN_JACOBSEN_FUND_ACUST_2011.pdf
 19. Kuttruff, H., Acoustics - An introduction, Taylor and Francis Group, 2007. p. 271-276, 280
 20. Moser, M. Engineering Acoustics An Introduction to Noise Control Second Edition, Springer-Verlag 2009, Berlin Heidelberg. p. 194-207
 21. Muehleisen, R. T. Measurement of the Acoustic Properties of Acoustic Absorbers, Illinois Institute of Technology, 2008, [žiūrėta 2014-05-22] Prieiga per internetą: http://www.inceusa.org/nc07/links/Muehleisen_plenary_acoustic_properties_materials.pdf p. 9-10, 18
 22. Kropp W. Absorber, Chalmers University of Technology, Division of Applied Acoustics. [žiūrėta 2014-05-22] Prieiga per internetą: http://www.ljudlandskap.acoustics.nu/downloads/ljudbok/specialister/kapitel_3/rubrik9/9absorber.pdf
 23. Sabourin, I.; Schoenwald, S.; Richter, J-G.; Zeitler, B. Sound transmission loss improvement by a viscoelastic material used in a constrained layer damping system. National Research Council Canada. 2011. [žiūrėta 2016-05-12] Prieiga per internetą: <http://nparc.cisti-icist.nrc-cnrc.gc.ca/eng/view/accepted/?id=3d918e67-6c5c-44af-800b-39912f7f495c>
 24. Delong America Inc. [interaktyvus] [žiūrėta 2014-05-15] Prieiga per internetą: <http://www.lv-em.com/sem-polymer-foam>
 25. Wolfe, J. Helmholtz Resonance. *Department of acoustics*. [interaktyvus] [žiūrėta 2014-05-15] Prieiga per internetą: <http://www.phys.unsw.edu.au/jw/Helmholtz.html>
 26. <http://www.acs.psu.edu/drussell/Demos/refract/refract.html>
 27. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/sound/refrac.html>
 28. Nondestructive Testing (NDT) Recource center [interaktyvus] [žiūrėta 2014-05-22] Prieiga per internetą: <http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/Physics/modeconversion.htm>
 29. R. Vidrinskas, L. Jakevičius, D. Vaičiukynienė, D. Nizevičienė, V. Vaitkevičius. Damping of acoustic radiation in composite construction materials // Radiation interaction with materials: fundamentals and applications 2014 : 5th international conference, Kaunas, Lithuania, May 12–15, 2014

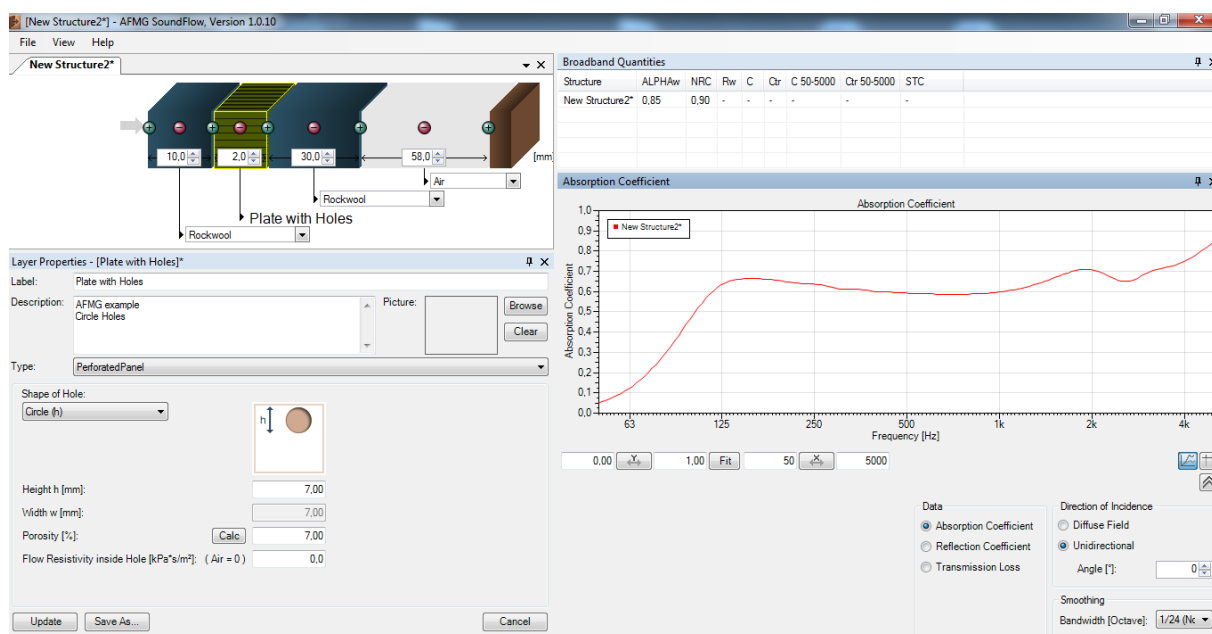
PRIEDAI

Paprastos ir kompozicinės garso izoliacijos palyginimas kompiuterinės įrangos pagalba

Kad palyginti kaip skiriasi paprastos ir kompozicinės garso izoliacijos efektyvumas, naudojame programą **AFMG SoundFlow**.



Pirmame paveikslėlyje matome 100mm storio Rockwool garso izoliacijos sluoksnio schemą ir slopinimo grafiką.



Antrame paveikslėlyje parodytas 100mm storio kompozicinės garso izoliacijos schema ir slopinimo grafikas. Ji susideda iš tokios pačios Rockwool garso izoliacijos kaip ir pirmame atvejuje, perforuotos plokštės ir oro. Pirmą izoliacijos dalį – 10mm vatos veikia kaip aukšto dažnio garso izoliacija. Antrą dalį – 2mm perforuota plokštė, 30mm Rockwool vatos ir 58mm oro tarpas veikia kaip rezonatorius žemesniam dažniui. Bendras tokios izoliacijos storis yra lygiai toks pat kaip ir pirmu atveju tai yra 100mm. Garso slopinimo savybės abiejais atvejais yra panašios, pirmasis kiek geriau slopina aukštus, antrasis žemus dažnius. Tačiau antruoju atveju statybinių medžiagų sunaudota per pus mažiau nei pirmuoju.

Koeficientai:

ALPHA_w Absorbcijos koeficientas pagal ISO 11654,

NRC garso slopinimo koeficientas pagal ASTM C 423 – 02a,