VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Tomas JANUŠEVIČIUS

STATYBINIŲ MEDŽIAGŲ IR KONSTRUKCIJŲ AKUSTINIŲ SAVYBIŲ TYRIMAS IR PANAUDOJIMAS TRIUKŠMUI MAŽINTI PATALPOSE

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
APLINKOS INŽINERIJA IR KRAŠTOTVARKA (04T)

VGTU
LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2011

Disertacija rengta 2007–2011 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Mokslinis vadovas

prof. habil. dr. Donatas BUTKUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, aplinkos inžinerija ir kraštotvarka – 04T).

Konsultantas

doc. dr. Vytautas NAINYS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, aplinkos inžinerija ir kraštotvarka – 04T).

http://leidykla.vgtu.lt
VGTU leidyklos TECHNIKA 1889-M mokslo literatūros knyga

ISBN 978-9955-28-868-8

© VGTU leidykla TECHNIKA, 2011
© Tomas Januševičius, 2011
jtomas@vgtu.lt

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Tomas JANUŠEVIČIUS

RESEARCH ON THE ACOUSTIC QUALITIES OF BUILDING MATERIALS AND STRUCTURES AND THEIR USE FOR NOISE REDUCTION IN PREMISES

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
ENVIRONMENTAL ENGINEERING (04T)

VGTU
LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2011

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2007–2011.

Scientific Supervisor

Prof Dr Habil Donatas BUTKUS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Environmental Engineering – 04T).

Consultant

Assoc Prof Dr Vytautas NAINYS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Environmental Engineering – 04T).

Reziumė

Disertacijoje nagrinėjamos statybinių medžiagų ir konstrukcijų garso izoliacinės savybės. Disertacijos tikslas – natūrinėmis sąlygomis ir triukšmo slopinimo kameroje ištirti ir nustatyti konstrukcijas, kurios, kaip pastatų vidinės ir išorinės sudėtinės dalys, užtikrintų vidaus patalpų apsaugą nuo triukšmo, ir tuo pagrindu sumodeliuoti konstrukcijų garso izoliavimo rodiklius.

Šiame darbe sprendžiami keli pagrindiniai uždaviniai: statybinių medžiagų ir konstrukcijų akustinių savybių tyrimai triukšmo slopinimo kameroje ir natūrinėmis sąlygomis, matavimų rezultatų palyginimas, perspektyvių konstrukcijų garso izoliavimo rodiklių įvertinimas modeliavimo būdu.

Disertaciją sudaro įvadas, aštuoni skyriai, rezultatų apibendrinimas, naudotos literatūros ir autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašas.

Įvadiniame skyriuje pristatoma tiriamoji problema, darbo aktualumas, apibūdinamas tyrimų objektas, formuluojamas darbo tikslas bei uždaviniai, aprašoma tyrimų metodika, nusakomas darbo mokslinis naujumas ir darbo rezultatų praktinė reikšmė, išvardijami ginamieji teiginiai. Įvadas baigiamas disertacijos tema autoriaus paskelbtų publikacijų ir pranešimų konferencijose pristatymu bei disertacijos struktūra.

Pirmajame skyriuje analizuojama su disertacijos tema susijusi literatūra. Skyriaus pabaigoje formuluojamos išvados.

Tyrimų metodikos pateiktos kiekvieno skyriaus pradžioje. Antrajame skyriuje išdiferencijuojami triukšmo slopinimo kameroje vykdyti tyrimai ir analizuojami jų rezultatai. Trečiame skyriuje referuojami ir interpretuojami fasadų ir langų garso izoliavimo tyrimų natūrinėmis sąlygomis rezultatai. Ketvirtame skyriuje analizuojami ir vertinami pertvarų akustiniai natūriniai tyrimai, lyginami jų rezultatai. Penktame skyriuje nagrinėjami ir apibendrinami perdangų smūgio garso izoliacijos tyrimai. Šeštame skyriuje išskirti pertvarų garso izoliacijos rodiklių skaičiavimai pagal masės dėsnį ir tarptautinį standartą LST EN 12354-1; šie skaičiavimai palyginami su tyrimų, atliktų triukšmo slopinimo kameroje ir natūrinėmis sąlygomis, rezultatais. Septintame skyriuje, remiantis tyrimais, aiškinamas perspektyvių pertvarų ir perdangų garso izoliacijos rodiklių modeliavimas BASTIAN programa. Aštuntame skyriuje aprašyti sukurtų žaliuzių triukšmui mažinti tyrimo rezultatai. Darbo rezultatų pagrindu 4 straipsniai paskelbti recenzuojamuose leidiniuose, įrašytuose į ISI Web of Science žurnalų sąrašą su citavimo indeksu, 2 straipsniai – recenzuojamuose leidiniuose, įrašytuose į Mokslinės informacijos instituto (MII) sąrašą (ISI Proceedings), 2 straipsniai – kituose mokslo leidiniuose.

Abstract

The dissertation analyses the sound-insulating qualities of building materials and structures. The aim of the dissertation is to investigate and indentify, under natural conditions and in a noise suppression chamber, the structures which, as internal and external components of buildings, would ensure the protection of interior rooms against noise and to model on this basis the sound reduction indices of structures.

The work deals with several main tasks: investigations of the acoustic qualities of building materials and structures in a noise suppression chamber and under natural conditions; comparison of results obtained from measurements, and the evaluation of the sound reduction indices of perspective structures through modelling.

The introductory chapter introduces the problem addressed and topicality of the work, describes the object of research, formulates aim and tasks of the work, describes research methodology, scientific novelty of the work, points out practical value of the work's results and specifies defended propositions. The introduction ends with a list of articles on the dissertation topic published by the author and the structure of the dissertation.

The first chapter analyses literature relating with the dissertation topic. Conclusions are formulated at the end of the chapter.

The beginning of each chapter presents research methodologies. The second chapter differentiates investigations which were carried out in a noise suppression chamber and analyses their results. The third chapter reviews and interprets the results of the sound-insulating investigations of facades and windows under natural conditions. The fourth chapter analyses and evaluates the acoustic natural investigations of interior walls and compares their results. The fifth chapter analyses and generalises the investigations of the impact sound insulation for ceilings. The sixth chapter presents the calculations of the sound reduction indices which were performed according to the law of mass and according to the international standard LST EN 12354-1; these calculations were compared with the results of the investigations which were carried out in a noise suppression chamber and under natural conditions. The seventh chapter, on the basis of the performed investigations, explains the modelling of the sound reduction indices for perspective interior walls and ceilings with the modelling programme BASTIAN. The eighth chapter describes the investigation results of the jalousies designed for noise minimisation. On the basis of the work results, 4 articles were published in reviewed publications included in the list of ISI Web of Science journals, 2 articles – in reviewed publications on the list of ISI Proceedings, and 2 articles – in other scientific publications.

Žymėjimai

Simboliai

c – garso sklidimo greitis ore, m/s;

c_L – išilginės bangos greitis medžiagoje, m/s.

$D_{nT,W}$ – standartizuotas garso lygių skirtumas, dB;

f – garso dažnis, Hz;

f_c– kritinis dažnis, $f_c = c_o^2/(1{,}8c_L t))$, Hz;

h – medžiagos storis, mm;

$k_o = 2\pi f / c_o$ – bangų skaičius;

$L_{Aeq,T}$ – ekvivalentinis nuolatinis A svertinis garso slėgio lygis, dBA;

L_p – garso slėgio lygis, dB;

l_1, l_2 – stačiakampio elemento ribų ilgiai, m;

m – atitvaros masė, kg/m$^{2;}$

m' – elemento vienetinio ploto masė, kg/m^2;

R_w – garso izoliacijos rodiklis, dB;

t – elemento storis, m;

V – patalpos tūris, m^3;

ΔL – garso slėgio lygio sumažėjimas, dB;

η_{tot} – bendrasis silpninimo faktorius, kuris nustatomas laboratorinėmis sąlygomis;

ρ – atitvaros medžiagos tankis, kg/m^3;
ρ_o – oro tankis, kg/m^3;
σ – laisvųjų lenkimo bangų spinduliuotės faktorius;
σ_f – priverstinio perdavimo spinduliuotės faktorius;
τ – perdavimo koeficientas;

Santrumpos

ISO – Tarptautinė Standartizacijos Organizacija;
STR – statybos techninis reglamentas;
LST – Lietuvos standartizacijos departamentas;
CEN – Europos standartizacijos komitetas;
PSO – Pasaulinė sveikatos organizacija;
AAK – Aplinkos apsaugos katedra;
dBA – decibelai pagal A dažninę charakteristiką.

Turinys

ĮVADAS 1
Tiriamoji problema 1
Darbo aktualumas 2
Tyrimų objektas 3
Darbo tikslas 3
Darbo uždaviniai 3
Tyrimų metodika 3
Darbo mokslinis naujumas ir jo reikšmė 3
Darbo rezultatų praktinė reikšmė 4
Ginamieji teiginiai 4
Darbo rezultatų aprobavimas 4
Disertacijos struktūra 5

1. TRIUKŠMO SKLAIDA PASTATO VIDUJE 7
1.1. Triukšmas gyvenamojoje ir darbo aplinkoje 7
1.2. Triukšmo poveikis žmogaus sveikatai 13
1.3.Triukšmo normavimas ir kontrolė 16
1.4. Sienų su plyšiais ir skylėmis garso izoliacija 17
1.5. Statybinių konstrukcijų oro garso izoliacijos įvertinimas ir nustatymas 19
1.6.Statybinių konstrukcijų oro ir smūgio garso izoliacijos reikalavimai 22
1.7. Akustinio komforto garso klasės 23
1.8. Statybinių medžiagų ir konstrukcijų garso izoliacija 25

1.9. Garso izoliavimo modeliavimo programos 31
1.10. Pirmojo skyriaus išvados 32

2. STATYBINIŲ MEDŽIAGŲ IR KONSTRUKCIJŲ TYRIMAI TRIUKŠMO SLOPINIMO KAMEROJE 33
2.1. Statybinių medžiagų ir konstrukcijų garso izoliavimo savybių tyrimų triukšmo slopinimo kameroje metodika 34
2.2. Lengvų konstrukcijų garso izoliavimo tyrimo rezultatai 40
2.3. Pastato vidinių pertvarų akustinių savybių tyrimo rezultatai 43
2.3.1. Pertvarų, sudarytų iš keramzitinių blokelių, akustinių savybių tyrimo rezultatai 43
2.3.2. Rąstinės sienos garso izoliavimo tyrimo rezultatai 50
2.3.3. Molinių – šiaudinių pertvarų garso izoliavimo tyrimo rezultatai 58
2.3.4. Triukšmą sugeriančios konstrukcijos, naudojant perforuotą skardą, akustinių savybių tyrimo rezultatai 59
2.3.5. Pertvarų, užpildytų biriomis medžiagomis, akustinių savybių tyrimo rezultatai 62
2.4. Antrojo skyriaus išvados 64

3. FASADŲ IR JŲ DALIŲ NATŪRINIAI EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI 65
3.1. Fasadų ir jų dalių natūrinių tyrimų metodika 65
3.2. Fasadų garso izoliacijos natūrinių tyrimų rezultatai 69
3.3. Langų akustinių savybių tyrimo rezultatai 73
3.4. Trečiojo skyriaus išvados 79

4. PASTATO PERTVARŲ GARSO IZOLIAVIMO NATŪRINIAI EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI 81
4.1. Pastato pertvarų garso izoliavimo natūrinių tyrimų metodika 81
4.2. Pertvarų akustinių natūrinių tyrimų rezultatai 83
4.3. Tariamo garso izoliavimo rodiklio R'_w ir standartizuoto garso slėgio lygių skirtumo $D_{nT,W}$ priklausomybės nuo patalpos tūrio tyrimo rezultatai 87
4.4. Ketvirtojo skyriaus išvados 89

5. PASTATO PERDANGŲ GARSO IZOLIAVIMO NATŪRINIAI EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI 91
5.1. Perdangų garso izoliavimo natūrinių tyrimų metodika 91
5.2. Perdangų garso izoliavimo natūrinių tyrimų rezultatai 93
5.3. Penktojo skyriaus išvados 96

6. GARSO IZOLIAVIMO RODIKLIO R_W TEORINIS SKAIČIAVIMAS 97
6.1. Garso izoliavimo rodiklio R_w teorinio skaičiavimo metodika 97
6.2. Teoriškai apskaičiuoto ir eksperimentiškai nustatyto garso izoliavimo rodiklio R_w palyginimas 100
6.3. Šeštojo skyriaus išvados 105

7. STATYBINIŲ KONSTRUKCIJŲ GARSO IZOLIAVIMO SKAITINIS MODELIAVIMAS 107
7.1. Garso izoliavimo pastatuose modeliavimo BASTIAN programa metodika ... 107
7.2. Pertvarų garso izoliacijos modeliavimo BASTIAN programa rezultatai 109
7.3. Perdangų garso izoliacijos modeliavimo BASTIAN programa rezultatai 112
7.4. Septintojo skyriaus išvados 115

8. INŽINERINIAI SPRENDIMAI 117
8.1. Akustinių žaliuzių kūrimas ir tyrimai 117
8.2. Aštuntojo skyriaus išvados 121

BENDROSIOS IŠVADOS 123

REKOMENDACIJOS 125

LITERATŪRA IR ŠALTINIAI 127

AUTORIAUS PUBLIKACIJOS DISERTACIJOS TEMA 135

Contents

INTRODUCTION 1
Problem 1
Topicality of the problem 1
Object of research 2
Aim of the work 3
Tasks of the work 3
Metodology of research 3
Scientific novelity of the work and its value 3
Practical value of the work results 4
Defended positions 4
Approbation of the scientific works 4
Scope of the scientific work 5

1. NOISE SPREAD INSIDE THE BUILDING 7
1.1. Noise in the living and working environment 7
1.2. The impact of noise on human health 13
1.3. Noise rating and contro 16
1.4. Sound insulation of walls with cracks and holes 17
1.5. Evaluation and determination of airborne sound insulation for building structuress 19
1.6. Requirements for airborne and impact sound insulation in building structures 22

1.7. Sound classes for acoustic comfort 23
1.8. Sound insulation of building materials and structures 25
1.9. Sound insulation modelling programmes 31
1.10. First Chapter conclusions 32

2. INVESTIGATIONS OF BUILDING MATERIALS AND STRUCTURES IN A NOISE SUPPRESSION CHAMBER 33
2.1. Methodology for investigating the sound insulation qualities of building materials and structures 34
2.2. Results of investigation on sound insulation in light structures 40
2.3. Results of investigation on the acoutic qualities of building's interior walls .. 43
2.3.1. Results of investigation on the acoustic qualities of interior walls composed of expanded clay tiles 43
2.3.2. Results of investigation on sound insulation of a log wall 50
2.3.3. Results of investigation on sound insulation of clay and straw interior walls 58
2.3.4. Results of investigation on the acoustic qualities of a noise absorbing structure using perforated tin 59
2.3.5. Results of investigation on the acoustic qualities of interior walls filled with bulk materials 62
2.4. Second Chapter conclusions 64

3. NATURAL EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF FACADES AND THEIR PARTS 65
3.1. Methodology for natural investigations of facades and their parts 65
3.2. Results of natural investigations of sound insulation for facades 69
3.3. Results of investigation on the acoustic qualities of windows 73
3.4. Third Chapter conclusions 79

4. NATURAL EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS ON SOUND INSULATION OF BUILDING'S INTERIOR WALLS 81
4.1. Methodology for the natural investigation of sound insulation of building's interior walls 81
4.2. Results of natural acoustic investigations of interior walls 83
4.3. Results of investigation on the dependences of apparent sound reduction index R'_w and standardised level difference for airborne sound $D_{nT,W}$ on the volume of a room 87
4.4. Fourth Chapter conclusions 89

5. NATURAL EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS ON SOUND INSULATION OF BUILDING'S CEILINGS 91
5.1. Methodology for natural investigations on sound insulation of ceilings 91
5.2. Results of natural investigations on sound insulation of ceilings 93
5.3. Fifth Chapter conclusions 96

6. THEORETICAL CALCULATION OF THE SOUND REDUCTION INDEX R_W .. 97
6.1. Methodology for the theoretical calculation of the sound reduction index R_w..... 97
6.2. Comparison of the sound reduction index R_w received from theoretical calculations and from experiments 100
6.3. Sixth Chapter conclusions 105

7. DIGITAL MODELLING OF SOUND INSULATION FOR BUILDING STRUCTURES 107
7.1.Methodology for sound insulation modelling in buildings with the programme BASTIAN.....107
7.2. Results of modelling sound insulation for interior walls with the programme BASTIAN 109
7.3. Results of modelling sound insulation for ceilings with the programme BASTIAN 112
7.4. Seventh Chapter conclusions..... 115

8. ENGINEERING SOLUTIONS 117
8.1. Development and investigation of acoustic jalousies 117
8.2. Eighth Chapter conclusions 121

GENERAL CONCLUSIONS..... 123

RECOMMENDATIONS..... 125

REFERENCES 127

LIST OF THE AUTHOR‘S SCIENTIFIC PUBLICATIONS

ON THE DISERTATION TOPIC 134

Įvadas

Tiriamoji problema

XX a. antroje pusėje techninei pažangai įgavus didžiulį pagreitį, ypač triukšmingi tapo išsivysčiusių šalių miestai. Žmogus, nepajėgdamas prisitaikyti prie naujovių, prie kaitos tempų, išgyvena nepilnavertiškumo kompleksą, kurį bando įveikti vartodamas skatinamąsias priemones, sukeliančias užsimiršimo, adaptacijos, komforto iliuziją. Tai prisideda prie alkoholizmo, toksinių medžiagų, triukšmo manijos ir kitų blogybių įsitvirtinimo gyvenime.

Triukšmas yra aktuali žmogaus aplinkos problema, sukelianti jam sveikatos sutrikimų, iš kurių dažniausios įvairaus intensyvumo ir stiprumo organizmo stresinės reakcijos, apimančios intervalą nuo adaptacijos kompensacinės pakopos iki dekompensacinės stadijos. Todėl reikšmingi ir aktualūs triukšmo įtakos atskiriems susirgimams (arterinei hipertenzijai, išeminėms širdies ligoms, miokardo infarktui) atsirasti tyrimai. Nustatyta, kad padidėjęs aplinkos triukšmas dienos metu veikia net 40% Europos Sąjungos gyventojų, ir apie 20% nakties metu. Pasaulio sveikatos organizacijos (PSO) duomenimis, Europoje 450 milijonų žmonių kasdien patiria 55 decibelų (dBA) triukšmo lygį; 113 milijonų – 65 dBA ir 9,7 milijonai – 75 dBA triukšmą. Garso slėgio lygio padidėjimą 10 dB žmogus suvokia, kaip garsumo padidėjimą 2 kartus. Viena šio diskomforto priežasčių – besikeičiančios statybų tradicijos: pastatų sienos ir perdangos vis dažniau lieja-

mos iš monolitinio betono, kuris nepakankamai izoliuoja garsą. Tokių perdangų ar sienų garso izoliacines savybes galima pagerinti jas padengus garsą absorbuojančiomis medžiagomis. Tačiau jose atsiradę plyšiai ar skylės labai sumažina garso izoliacines savybes.

Vidinės pastatų pertvaros dažnai montuojamos iš lengvų ir tvirtų gipso ar keramzito blokelių, tačiau vienguba pertvara iš jų prastai izoliuoja garsą.

Pagrindiniai triukšmo šaltiniai – tai transportas, pramonės įmonės, statybos darbai, ventiliacijos įrenginiai, kaimynų veikla, šventiniai renginiai ir kt. Triukšmą kelia ir daugybė buityje naudojamų prietaisų, būtent: televizoriai, muzikos instrumentai, vaikų žaislai, dulkių siurbliai, skalbimo mašinos ir t. t.

Būdingiausias miesto triukšmo šaltinis yra automobilių (krovininiai automobiliai, autobusai, troleibusai) ir geležinkelio transportas bei civilinės aviacijos lėktuvai. Transporto keliamas triukšmas sudaro 60–80% miestuose vyraujančio triukšmo. Jis įsiskverbia į gyvenamuosius namus, visuomeninius pastatus, apima žmonių lankomas atviras erdves.

Darbo aktualumas

Triukšmo sklaidos pasiskirstymas gyvenamuosiuose pastatuose per atitvaras, perdangas ir fasadus nepakankamai tiriamas. Nesant galimybės sumažinti triukšmo jo sklidimo šaltiniuose, būtina ieškoti kitų išeičių, būtent, riboti triukšmo patekimą į pastatų vidų. Vadinasi, aktualios lauko ir vidaus statybinių konstrukcijų, mažinančių triukšmo lygį pastatų viduje, paieškos. Medžiagų garso izoliavimo savybes rezultatyviai tyrė buvusios sovietų sąjungos mokslininkai E. J. Judinas, V. N. Nikolskis, G. L. Osipovas. Garso sklaidos pastatuose tiesiogiai per konstrukcijas ir aplinkiniais keliais, tyrimų prerogatyva tenka JAV mokslininkui L. L. Beranekui, kaip vienam iš labiausiai nusipelniusių šios srities mokslininkų apdovanotam mokslo premija. Labai svarbūs ir L. Kreigo bei E. Geretseno šios srities mokslinių tyrimų pasiekimai. Pastarasis nemažai nuveikė pastatų akustikos matavimams skirtų standartų sudarymui. Žymiausi Lietuvos akustikai, pateikę nemažai mokslinių šios srities įžvalgų, yra D. Gužas, J. Stauskis ir A. Jagniatinskis. Vibro bangų susidarymo ir sklaidos klausimais pasaulyje žinomi lietuvių mokslininkai – K. Ragulskis, A. Bubulis ir kt.

Transporto triukšmas yra pagrindinė gyvenamųjų namų problema miestuose. Perdangų medžiagos ir jų konstrukcijos paprastai kuriamos ir parenkamos labiausiai atsižvelgiant į šiluminę varžą. Būtina tirti, ar visada tos medžiagos ir jų konstrukcijos efektyviai izoliuoja garsą, ir ieškoti naujų perdangų ir fasadų konstrukcijų, kurios izoliuotų garsą taip, kad pastatuose garso lygis tenkintų standartuose ir higienos normose nurodytus garso lygius.

Tyrimų objektas

Darbo tyrimų objektas – pastatų pertvaros, perdangos, fasadai ir jų dalys.

Darbo tikslas

Perspektyvių statybinių medžiagų ir konstrukcijų triukšmui mažinti gyvenamosiose ir darbo patalpose eksperimentiniai tyrimai ir efektyvumo įvertinimas.

Darbo uždaviniai

1. Atlikti analizę statybinių medžiagų ir konstrukcijų garsui izoliuoti tarp statinio atitvarų, perdangų ir fasado pagal A, B, C, D, E klasifikacijas.
2. Ištirti statybinių medžiagų ir konstrukcijų akustines savybes triukšmo slopinimo kameroje ir natūrinėmis sąlygomis.
3. Kurti ir tirti perspektyvias statybines konstrukcijas garsui tarp pastato patalpų izoliuoti.
4. Palyginti statybinių konstrukcijų elementų akustines savybes, nustatytas triukšmo slopinimo kameroje ir natūroje.
5. Parinkti, įsisavinti ir pritaikyti modeliavimo programą pastatų vidaus akustikos garso izoliavimui modeliuoti.

Tyrimų metodika

Medžiagų bei iš jų pagamintų konstrukcijų akustinių savybių tyrimai atlikti pagal ISO standartuose pateikiamas bandymų atlikimo metodikas. Darbe taikomos pertvarų, perdangų, fasadų ir jų dalių garso izoliavimo ir garso izoliavimo rodiklių nustatymo metodikos natūrinėmis sąlygomis ir triukšmo slopinimo kameroje. Siekiant teoriškai apskaičiuoti pertvarų garso izoliaciją, naudotos masės dėsnio ir ISO 12354-1 standarte nurodytos formulės. Pertvarų ir perdangų garso izoliacijai prognozuoti taikyta BASTIAN modeliavimo programa.

Darbo mokslinis naujumas ir jo reikšmė

Darbo naujumą apibūdina garso izoliavimo gyvenamuosiuose pastatuose kompleksiniai tyrimai: triukšmo slopinimo kameroje buvo tiriamos esamų ir

naujai sukurtų, statybinių konstrukcijų ir jų elementų akustinės savybės, jos tikrintos betarpiškai patalpose, ieškota perspektyvių statybinių konstrukcijų triukšmui sugerti atitvarose, perdangose ir fasado konstrukcijose, modeliuota garso zoliacijos sklaida per statybines konstrukcijas.

Garso izoliacijos modeliavimo ir matavimo rezultatų analizė leido parinkti tinkamas statybines konstrukcijas garsui izoliuoti tarp pastato atitvarų, perdangų bei fasado ir rekomenduoti jas naudoti statybose.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Pagal atliktus triukšmo sklaidos matavimo ir modeliavimo duomenis tarp pastato atitvarų, perdangų ir fasado gyvenamiesiems pastatams galima parinkti tokias statybines konstrukcijas, kurios geriausiai slopintų arba sulaikytų garso sklidimą tarp gretimų pastato butų bei iš išorės į gyvenamojo namo vidų patenkantį triukšmą. Tokiais rezultatais galima pasinaudoti naujoms konstrukcijoms kurti.

Ginamieji teiginiai

1. Matuojant pertvarų standartizuotą garso slėgio lygių skirtumą $D_{nT,w}$ patalpose, kuriose priimamojo garso patalpos aidėjimo trukmė $T < 0,4$ s, atskaitos aidėjimo trukmės reikšmę T_0 reikia priimti kaip priimamojo garso patalpos aidėjimo trukmių, nustatytų skirtingiems dažniams, vidurkį.
2. Siekiant akustinio komforto, monolitinių medžiagų pertvarų sienelės ploto vieneto masę galima prognozuoti pagal tarptautinį standartą LST EN 12354-1 ir modeliavimo programas.
3. Garsą mažinančių žaliuzių, plokšteles padengtas 3 cm akmens vatos sluoksniu pakreipus į triukšmo pusę 20°–45° kampu, ekvivalentinis triukšmo lygis sumažinimas nuo 8 iki 14 dB.

Darbo rezultatų aprobavimas

Darbo rezultatai paskelbti 4 straipsniuose recenzuojamuose leidiniuose, įrašytuose ISI Web of Science žurnalų sąrašą su citavimo indeksu, 2 straipsniai recenzuojamuose leidiniuose, įrašytuose į Mokslinės informacijos instituto (MII) sąrašą (ISI Proceedings), 2 straipsniai – kituose mokslo leidiniuose. Disertacijo-

je atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti šešiose mokslinėse konferencijose Lietuvoje:

- Jaunųjų mokslininkų konferencijose „*Mokslas – Lietuvos ateitis*“ 2007–2011 m. Vilniuje;
- Tarptautinėse konferencijose „*Environmental Engineering*“ 2008 ir 2011 m. Vilniuje.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, aštuoni skyriai, bendrosios išvados ir rekomendacijos, literatūros sąrašas, autoriaus publikacijų sąrašas. Darbo apimtis yra 152 puslapiai, tekste panaudota 30 numeruotų formulių, 93 paveikslai ir 13 lentelių. Rašant disertaciją panaudoti 105 literatūros šaltiniai.

1

Triukšmo sklaida pastato viduje

Plečiantis urbanizacijai, didėja transporto ar pramonės triukšmas. Akustinis komfortas patalpose, kur dirbama ar ilsimasi, tampa vis aktualesnė problema. Per didelis triukšmas žmogų veikia psichiškai, gali sukelti nuolatinę įtampą, įvairius psichologinius bei kitus sveikatos sutrikimus. Todėl aktualu spręsti patalpų garso izoliacijos problemas.

1.1. Triukšmas gyvenamojoje ir darbo aplinkoje

Nepageidaujamas triukšmas žmones slegia ir vargina, ypač poilsio metu. Pagrindiniai triukšmo šaltiniai: miesto industrija, autotransportas ir kaimynų veikla namuose. Atsižvelgiant į tai, kad tiek eismo, tiek kaimynų triukšmas vargina žmones jų namuose, galima daryti išvadą, kad ne visi namai atlieka savo paskirtį, t. y. tenkina gyventojų akustinį komfortą. Brazilijoje, priešingai nei Prancūzijoje, Anglijoje, Vokietijoje ar Jungtinėse Amerikos valstijose, daugelis namų netenkina garso izoliacijos reikalavimų.

Nors teisiniai garso izoliacijos reikalavimai kai kuriose šalyse egzistuoja daugiau nei 50 metų, bet per laiką jie kito. Beto įvairios šalys turėjo savo reikalavimus. Tik per kelis paskutiniuosius praėjusio amžiaus dešimtmečius daugelio šalių sutarimu buvo priimti ir į valstybių teisės aktus įtraukti bendri garso izolia-

cijos tarptautiniai reikalavimai pagal EN ISO 717:1996 (Rasmussen 2010). 1.1 lentelėje pateiktos skirtingų šalių garso izoliacijos klasės ir metai, kuriais šie reikalavimai priimti.

1.1 lentelė. Garso izoliacijos klasės skirtingose šalyse (Rasmussen 2010)
Table 1.1. Sound insulation classes in different countries (Rasmussen 2010)

Šalis	Garso izoliacijos klasės	Metai, kuriais įtrauk-ta į nacionalinę teisę	Nacionalinis standartas
Danija	D/C/B/A	2001	DS 490
Norvegija	D/C/B/A	1997/2005	NS 8175
Švedija	D/C/B/A	1996/1998/2004	SS 25267
Suomija	D/C/B/A	2004	SFS 5907
Islandija	D/C/B/A	2003	IST 45
Vokietija	I/II/III	1994	VDI 4100
Prancūzija	QL/QLAC	1993/1995/2000	Guide Qualitel
Olandija	5/4/3/2/1	1999	NEN 1070
Lietuva	E/D/C/B/A	2004	STR 2.01.07

Pastatų apsaugą nuo triukšmo Lietuvoje reglamentuoja statybos techninės normos STR 2.01.07:2003 „Pastatų vidaus ir išorės aplinkos apsauga nuo triukšmo“, kuriose suformuluota garso klasių (akustinio komforto) sistema. Pastatai pagal akustines savybes skirstomi į penkias klases:

A – ypač gero akustinio komforto sąlygų klasė;
B – pagerinto akustinio komforto sąlygų klasė;
C – priimtino akustinio komforto sąlygų klasė;
D – nepakankamo akustinio komforto sąlygų klasė;
E – ribinio akustinio komforto sąlygų klasė.

Reglamentu STR 2.01.07:2003 nustatytos pastatų vidinėms ir išorinėms atitvarinėms konstrukcijoms tarp pagrindinių akustinių charakteristikų vertės: *ore sklindančio garso izoliavimo rodiklis, smūgio garso izoliavimo rodiklis, aidėjimo trukmė.*

Garsą, sklindantį oru ar atitvarinėmis konstrukcijomis, racionalu izoliuoti porėtomis medžiagomis, pvz., akmens vata, kuri slopina garsą įvairiose pastatų konstrukcijose. Tačiau, sprendžiant apie garso lygio komfortą patalpų viduje, reiktų vertinti ne atskirų medžiagų garso slopinimo savybes, o visos konstrukcijos, kaip nedalomos sistemos, galėjimą izoliuoti garsą (Stauskis 2005).

Garsai būna kelių rūšių:

• oru sklindantis garsas – tai kalba, garso aparatūros, muzikinių instrumentų garsai ir kt.;

• smūgio garsas – mechaninių smūgių į konstrukcijas sukeliamas garsas, sklindantis per atitvarinę konstrukciją į gretimą patalpą;

• struktūrinis garsas – gana toli sklindantis pastato konstrukcijomis garsas.

Oro triukšmo šaltiniai yra žmonių kalba, buitinė, garso ar vaizdo technika, muzikos instrumentai, šunų lojimas, išorinis transporto triukšmas ir kiti objektai, spinduliuojantys triukšmą į orą. Jis tiesiogiai bei aplinkiniais keliais plinta į saugomą nuo triukšmo patalpą per atitvaras bei pro ventiliacijos angas (Fahy 2001).

Smūginio garso šaltiniai – tai žingsniai, baldų stumdymas, daiktų kritimai bei kiti dinaminiai poveikiai į grindis. Toks garsas atitvaromis plinta tiesiogiai bei aplinkiniais keliais į gretimas patalpas. Struktūrinį garsą sukelia vandentiekio sistemos, šiukšlių šachtos, ventiliatorių darbas, gręžimas ir kiti veiksniai (Kuttruff 1991). Konstrukcija, sužadinta tokio šaltinio, svyruoja ir išspinduliuoja į aplinką oro garso bangas.

Garso energija, sklindanti lauke išilginėmis garso bangomis, patalpas geriausiai pasiekia pro atidarytus ar uždarytus langus. Oro triukšmas į gretimas patalpas perduodamas tiesiogiai ir netiesiogiai pro atitvarą, per ventiliacijos angas, plyšius, nesandarumus ir kitus pastato elementus (Barron 1993).

Ore sklindančio garso silpninimas pastato atitvaromis nusakomas garso izoliavimo rodikliais (R'_w, $D_{n,TW}$, R_w arba $R'_w + C_{50–3150}$, dB). Garso izoliavimo rodiklis R_w nustatomas specialiose triukšmo slopinimo kamerose, kuriose nėra sąlygų orui sklisti aplinkinėmis konstrukcijomis. $R'_w + C_{50–3150}$, dB – tariamas garso izoliavimo rodiklis su pataisos sandu dažnių juostoje nuo 50 iki 3150 Hz. Kuo didesnės šių rodiklių vertės, tuo geresnė atitvarų izoliacija (Weissenburger 2005).

Siekiant kuo efektyviau sumažinti tarp atskirų patalpų ore sklindantį garsą, reikalinga tokia daugiasluoksnė atitvara, kurios viduje garso bangos energija būtų sugeriama ir išsklaidoma. Šias funkcijas gali atlikti daugiasluoksnė gipso kartono lakštų konstrukcija iš abiejų atitvaros pusių, ertmę užpildant poringa bei pluoštine akmens vata. Vidaus pertvaroms tarp metalinių profilių įrengti naudojamos trisluoksnės gipso kartono plokštės su akmens vatos užpildu oro tarpuose. Tokia konstrukcija tinka mūrinei pertvarai pakeisti (Arai 2002).

Smūgio garso izoliavimas

Perdangų slopinamas garsas nusakomas normuoto svertinio smūgio garso slėgio lygio ($L_{n,w}$ arba $L_{n,w} + C_{I,\,50–2500}$, dB) verte. $L_{n,w}$ – smūgio garso izoliavimo rodiklis. $C_{I,\,50–2500}$ – papildomas spektro pataisos sandas. Kuo efektyviau slopinamas perdangos smūgio garsas, tuo $L_{n,w}$ vertė yra mažesnė (Concil Directive 89/106/EEC).

Smūgio garsui izoliuoti geriausiai tinka „plaukiojančių“ grindų konstrukcijos – tarp esamos perdangos plokštės ir grindų viršutinio išlyginamojo sluoksnio įterpiamos specialiai tam gaminamos elastingos, efektyviai smūgio garsą slopinančios plokštės.

Perdangos smūgio garso izoliacijos efektyvumą lemia šie vertinimo matai:

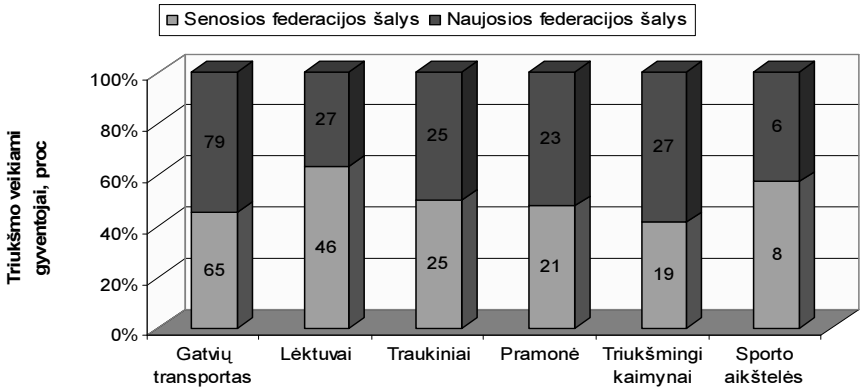
• elastingo sluoksnio (akmens vata ar kita) dinaminis standumas: kuo dinaminio standumo vertė mažesnė, tuo geriau slopinamas smūgio garsas;

• laikančiosios perdangos plokštės ploto vieneto masė: kuo ji didesnė, tuo geriau slopinamas smūgio garsas;

• išlyginamojo sluoksnio ploto masė.

Klojant tarpaukštinę perdangą, būtina užtikrinti, kad viršutinis išlyginamasis sluoksnis nesiliestų prie kitų pastato konstrukcijų, priešingu atveju smūgio garsas persiduos į aplinkines konstrukcijas (Stauskis 2005).

Gyventojus uždaroje patalpoje veikia išoriniai ir vidiniai triukšmo šaltiniai. Išorinio triukšmo pagrindiniai šaltiniai yra automobilių, geležinkelių ir aviacijos transporto keliami garsai. Išorinio triukšmo šaltinių procentinis pasiskirstymas, vadovaujantis 1993 m. Vokietijoje atliktais tyrimais, pavaizduotas 1.1 paveiksle (Gosele 1997).



1.1 pav. Gyventojus veikiančio triukšmo šaltiniai (Gosele 1997)
Fig. 1.1. Sources of noise affecting residents (Gosele 1997)

Kaip matyti iš 1.1 paveikslo, labiausiai gyventojus veikia gatvių transporto triukšmas, kuriuo skundėsi 66% Vakarų ir 79% Rytų Vokietijos gyventojų. Lėktuvų triukšmu atitinkamai skundėsi 46% ir 27% gyventojų. Traukinių, pramonės ir pastatų vidaus triukšmu buvo nepatenkinti apie 20% apklaustųjų (Gosele 1997).

Išorinis triukšmas ypač pavojingas tiems gyventojams, kurių buto langai orientuoti į gatves, kuriose vyksta intensyvus transporto eismas.

Pastatą veikiančio išorinio triukšmo lygiai priklauso nuo srauto intensyvumo, greičio, sunkiojo transporto skaičiaus bendrame sraute ir kt. Pastatą pasiekia ne tik išorinis triukšmas, bet ir vibracija, kurią sukelia judantis transportas. Tokia vibracija gerai plinta gruntu ir, pasiekusi pastato pamatus, sklinda jo konstrukcijomis, tuo sukeldama didesnius triukšmo lygius daugelyje patalpų (Cremer 1998).

Įvairių šaltinių sukeliamo triukšmo garso slėgio lygio priklausomybė nuo dažnio yra labai nevienoda. Vienų garsų sukeltas garso slėgis mažai priklauso nuo oro virpesių dažnio, tačiau yra tokių, kurie esant žemiems ir vidutiniams dažniams, pasižymi dideliais garso slėgio lygiais. Garso lygis L_A yra dydis, matuojamas triukšmomačiu su įjungtu koreguojamuoju filtru A, kuris atitinka žmogaus ausies girdimą garsą. Šis dydis išreiškiamas decibelais dBA. Toks filtras priartina skirtingų dažnių žmogaus ausies jautrį triukšmomačio jautriui. Garso lygį galima apskaičiuoti ir matematiškai. Reikia turėti išmatuotą garso slėgio lygio dažninę charakteristiką, kiekvienai garso slėgio lygio oktavai taikyti korekciją Δ_A, o paskui susumuoti gautas L_i vertes pagal formulę (Bao 1998):

$$L_A = 10\lg\sum_{I=1}^{N} 10^{0.1L_i} . \qquad (1.1)$$

Korekcijos Δ_A vertės pateikiamos 1.2 lentelėje.

1.2 lentelė. Korekcijos Δ_A vertės (Stauskis 2005)
Table 1.2. Correction Δ_A values (Stauskis 2005)

Dažniai, Hz	63	125	250	500	1000	2 000	4 000	8 000
Δ_A, dB	-26	-16	-9	-3	0	1	1	-1

Vidutiniai statistiniai garso lygiai gyvenamuosiuose pastatuose pateikti 1.3 lentelėje. Dažnių juostos, kuriose vyrauja didžiausi garso slėgio lygiai $f(L_{maks.})$ ir didžiausi garso slėgio lygiai įvertinant korekciją: $\Delta - f\ (L + \Delta_A)^{maks.}$, taip pat pačios didžiausios vertės $(L + \Delta_A)^{maks.}$.

Kaip matyti iš 1.3 lentelės, buitinis triukšmas gali pasiekti labai didelius lygius, kurie būna net iki 87 dBA, o vyraujantys yra 84–85 dB triukšmo lygiai.

1.3 lentelė. Buitinių šaltinių triukšmo charakteristikos (Gardonio 1999)
Table 1.3. Characteristics of household noise sources (Gardonio 1999)

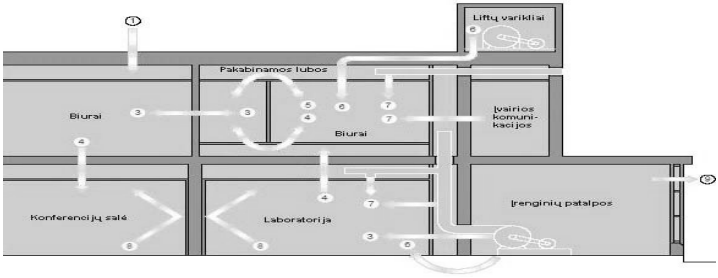
Garso šaltiniai	L_A, dBA	$L_{maks.}$, dB	F, Hz
Radijo ir televizijos muzika	85	85	500
Radijo ir televizijos kalba	81	79	500
Stereogrotuvų ir magnetofonų muzika	84	87	250
Garsi kalba	85	85	500
Normalaus garsumo kalba	65	66	250
Vaikų riksmas	77	80	2 000
Fortepijono skleidžiami garsai	80	82	500
Telefono skambutis	77	80	8 000

1.3 lentelės pabaiga

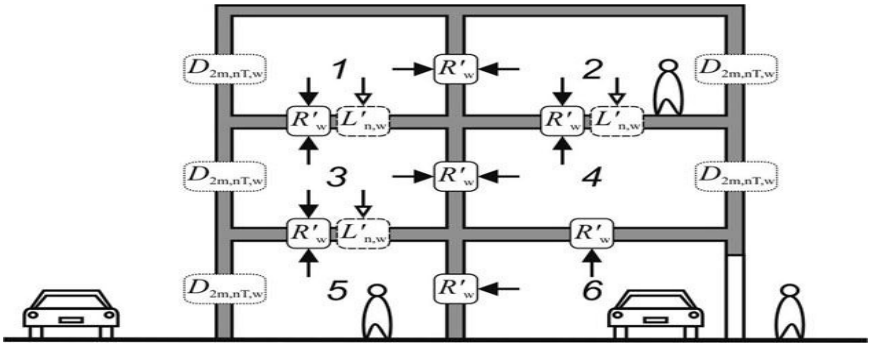
Žadintuvo skambutis	71	80	8 000
Dulkių siurblys	72	76	250
Skalbimo mašina	66	69	1000
Šaldytuvas	47	54	250
Maišytuvas	77	72	2 000
Kondicionierius	60	65	250

Buitinis triukšmas yra labai skirtingas ir nepastovus. Todėl normuojant konstrukcijų garso izoliaciją, taikomas apibendrinto buitinio triukšmo lygis. Jo dažninė charakteristika apima įvairių realių buitinių triukšmų dažnines charakteristikas. Kiekvienoje dažnių juostoje apibendrinto buitinio triukšmo garso slėgio lygis yra artimas vidutiniam statistiniam realaus triukšmo lygiui, kuris šioje juostoje turi didžiausias vertes (Oral 2004).

Pagrindiniai triukšmo šaltiniai gyvenamuosiuose pastatuose atsispindi 1.2 pav. (Leland 1998):



1.2 pav. Triukšmo sklaida administraciniame pastate (http://www.garsoizoliacija.lt/2.htm)
Fig. 1.2. Noise dispersion in an administrative building (http://www.garsoizoliacija.lt/2.htm)



1.3 pav. Triukšmo sklaida gyvenamajame name
Fig. 1.3 pav. Noise dispersion in a dwelling-house

1.3. paveikslas atsispindi, kaip išsisklaido iš išorės patenkantis triukšmas ir virsta atskiromis jo rūšimis:

1. Per sienas perduodamas triukšmas.
2. Per pertvaras perduodamas triukšmas.
3. Per grindis perduodamas triukšmas.
4. Per perdangas, kabamąsias lubas perduodamas triukšmas.
5. Per aplinkines atitvaras perduodamas triukšmas.
6. Triukšmingi ortakiai ir vamzdynai.
7. Patalpos foninis triukšmo lygis.
8. Į išorę perduodamas triukšmas.

1.2. Triukšmo poveikis žmogaus sveikatai

Jau senovėje buvo žinoma apie neigiamą triukšmo poveikį žmonėms. Dar antikinės Romos gyventojai miesto valdžią ragino uždrausti ankstaus ryto metu centrinėmis miesto gatvėmis ginti į ganyklas galvijus, kadangi jų bliovimas ir mekenimas labai trikdė miestelėnų ramų miegą.

Neginčijamai įrodyta, kad triukšmas neigiamai veikia žmonių sveikatą bei gyvenimo kokybę (Obelenis 2002).

Triukšmo poveikį žmogui galima suskirstyti į grupes: (Ščupakas 2007).

- triukšmo įtaka klausai;
- triukšmo poveikis visam organizmui, žmogaus veiklai;
- triukšmo poveikis žmogaus psichikai.

Triukšmo sukeltas klausos pažeidimas vadinamas klausos nervo uždegimu – klausos neuritu arba klausos neuropatija. Žmogaus ausis yra prisitaikiusi prie 35–55 dB intensyvumo garsų. Tačiau įvairiose situacijose žmogų gali veikti daug didesnio intensyvumo garsai, ypač triukšmas darbo aplinkoje.

Klausos neuropatija yra ryškesnė, kai žmogų veikia didelis triukšmas ne vien darbo metu, bet ir po darbo gatvėje ar kitose viešose vietose, taip pat ir namuose. Klausos nervo pažeidimo rizika didėja, jei žmogus turi padidėjusį kraujospūdį ar didesnį cholesterolio kiekį kraujyje, jei perdozuoja kai kuriuos vaistus. Vyresniame amžiuje klausa blogėja ir be triukšmo poveikio. Kiekvieno vyresnio kaip 50 metų žmogaus klausos jautris aukštiems garso dažniams sumažėja po 2 dB kasmet (Ašmenskas 1997).

Ilgalaikis triukšmo poveikis sukelia klausos organo kraujagyslių spazmus, nervinių receptorių medžiagų apykaitos sutrikimus. Garsą suvokiantys nerviniai receptoriai (nervinės galūnės) išsenka, o vėliau dėl distrofinių – degeneracinių pokyčių žūva. Esant aukšto dažnio (2000–8000 Hz) garsams, klausa nukenčia greičiau. Šio sutrikimo žmogus nepastebi, nes kalbinis bendravimas vyksta gerokai žemesniame garsų dažnio diapazone (Malinauskienė 2002).

Vėliau nusilpsta kalbinio dažnio garsų suvokimas, kai klausos receptorių pažeidimas jau toli pažengęs. Tada žmogus jau blogai girdi įprastinę pašnekovo kalbą, jį pradeda varginti ūžesys ausyse ir kiti negalavimai. Tik tada nukentėjusysis kreipiasi į ausų ligų gydytoją. Deja, tada padėti ligoniui sunku, nes klausos receptoriai nuo triukšmo jau gerokai suardyti. Kuo daugiau žūva receptorių, tuo blogesnė klausa. Jei žmogus toliau dirba dideliame triukšme, klausa visai blogėja (Obelenis 2002).

Veikdamas ilgą laiką, triukšmas sutrikdo daugelio organų darbą. Pasaulio sveikatos organizacija (PSO) išanalizavo triukšmo sukeliamus sveikatos pažeidimus (Marozienė 2002):

1. Triukšmas pažeidžia klausą.

Sveikatai iškyla pavojus, kai garsas yra labai didelis, dėl to žmogus gali iš karto apkursti: suaugusiems kurtumas išsivysto, jei garso lygis didesnis kaip 140 dBA, vaikams – 120 dBA. Laikinas kurtumas gali išsivystyti ir esant 110 dBA triukšmo lygiui. Jei garso lygis nuolat didesnis kaip 85 dBA, po tam tikro laiko (5 ir daugiau metų) gali žymiai susilpnėti klausa.

2. Triukšmas skatina streso hormonų išsiskyrimą.

Dėl streso hormonų galimi tokie sveikatos sutrikimai: sumažėja imunitetas, vystosi širdies ir kraujagyslių ligos (padažnėja širdies susitraukimai, ligonis jaučia širdies plakimą ar skausmą), virškinamojo trakto ligos (gali atsirasti gastritas ar opinė liga). Dažniau sergama kepenų ligomis. Dėl triukšmo poveikio gali netgi sumažėti kraujagyslių elastingumas, padidėti cukraus ir cholesterolio kiekis, kraujospūdis, adrenalino išsiskyrimas. Dėl triukšmo gali svaigti galva, ūžti ausyse, plyšti ausies būgnelis, netgi atsirasti skrandžio opa arba virškinamojo trakto sutrikimų.

3. Triukšmas sukelia nepasitenkinimą.

Nepasitenkinimas atsiranda tuomet, kai triukšmas trukdo atlikti įprastinę veiklą: atsipalaiduoti, kalbėtis, klausytis radijo, žiūrėti televizorių. Dienos metu patalpose triukšmas neturėtų būti didesnis kaip 40 dBA, nes priešingu atveju bus trikdoma įprastinė veikla. Kokiais aplinkos veiksniais labiausiai nepatenkinti gyventojai, parodyta 1.4 paveiksle.

4. Triukšmas turi įtakos kalbos suvokimui ir neigiamai veikia mokymo procesą.

Kai triukšmo lygis yra apie 35 dBA, pokalbis ramiu tonu suvokiamas visiškai, o kai 45 dBA – pakankamai. Kalbos suvokimas yra ypač svarbus situacijose, kai reikia išgirsti sudėtingus, naujus dalykus, pvz., mokyklose klausantis užsienio kalbos, konferencijų salėse. Tokiais atvejais aplinkos triukšmo lygis turi būti 15 dBA mažesnis nei kalbančiojo balso lygis. Paprastai kalbant yra sukeliamas apie 50 dBA garso lygis, todėl, kad būtų visiškai suvokta, kas sakoma, aplinkos triukšmo lygis turėtų būti 35 dBA. Vilniaus visuomenės sveikatos centras 2002 metais matavo triukšmo lygius 15-os mokyklų klasėse, kurių langai

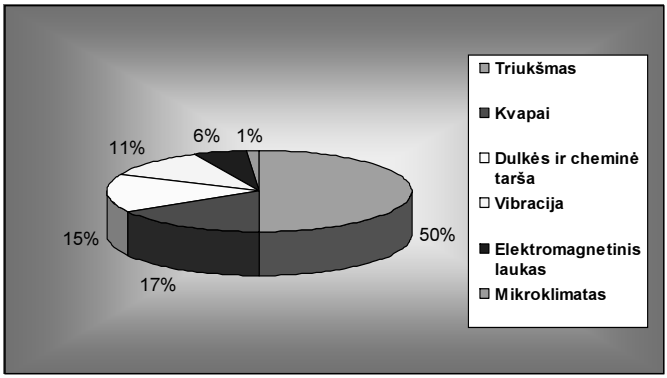
orientuoti į gatvės pusę. Nustatytas triukšmo lygis šiose klasėse siekė 44–61 dBA. Amerikos akustikų draugijos tyrimų duomenimis, net 25% informacijos, perduodamos pamokose neįsisavinama dėl aplinkos triukšmo (Obelenis 2002).

5. Triukšmas turi įtakos protinių užduočių atlikimui.

Protinė veikla, kuriai reikalinga gera atmintis, dėmesio sutelkimas, labai jautriai ir tiesiogiai reaguoja į aplinkos triukšmą, dėl to nukenčia užduočių atlikimo kokybė ir ilgėja jų atlikimo trukmė. Monotoniškam ar fiziniam darbui atlikti triukšmas netrukdo.

6. Triukšmas turi įtakos socialinei elgsenai.

Didelis triukšmas (80 dBA ir daugiau) sukelia agresiją bei mažina draugišką elgseną.



1.4 pav. Veiksniai, sukeliantys gyventojų nepasitenkinimą (Marozienė 2002)
Fig. 1.4. Actions causing residents' dissatisfaction (Marozienė 2002)

Nuolatinis triukšmas aplinkoje sukelia sunkius sveikatos sutrikimus. PSO duomenimis, Europoje 450 milijonų žmonių kasdien yra veikiami 55 dBA triukšmo lygio, 113 milijonų gyventojų – 65 dBA ir 9,7 milijonai gyventojų patiria 75 dBA triukšmą (Pan 1998).

Ekonomiškai išsivysčiusiose šalyse ir Lietuvoje atlikti epidemiologiniai tyrimai atskleidė, kad miokardo infarkto paplitimas, jo kitimo tendencijos yra susijusios su aplinkos veiksniais, nes pusė ligonių, sergančių išemine širdies liga, neturi tradicinių rizikos veiksnių (Wilich et al. 2006).

Mokslinių tyrimų duomenimis, ilgalaikis triukšmo poveikis sukelia homeostazės pakitimus, kuriuos lydi širdies ritmo, raumenų tonuso, smegenų elektrinio aktyvumo pokyčiai, emocinė įtampa. Tyrimais įrodyta, kad 70 dBA triukšmas sukelia funkcinius centrinės bei vegetacinės nervų sistemos sutrikimus, skatina arterinės hipertenzijos ir išeminės širdies ligos atsiradimą (Europos 2004).

1.5 pav. Triukšmo, kaip streso šaltinio, modelis (Europos 2004)
Fig. 1.5. Model of noise as a source of stress (Europos 2004)

Triukšmo poveikyje sutrinka miegas, sumažėja darbingumas, sulėtėja sensomotorinių reakcijų greitis, vystosi neurozės, pasikeičia socialinė saviraiška. Triukšmo poveikį organizmui dažnai sustiprina toksiškos medžiagos, virpesiai, nepalankus mikroklimatas. Triukšmo sukeltų pakitimų organizme dydis priklauso nuo triukšmo charakterio, poveikio laiko ir trukmės paros laikotarpyje, bendros poveikio trukmės ir kitų aplinkos veiksnių. Individualus organizmo jautris, sveikatos būklė, amžius, jautris triukšmui dažnai lemia sukeliamo efekto dydį ir miego sutrikimus (Gardonio 1999).

1.3. Triukšmo normavimas ir kontrolė

Triukšmas pastatuose daugiausia normuojamas šiais statybos techniniais reglamentais: STR. 2.01.01(5):1999 „Esminiai statinio reikalavimai. Apsauga nuo triukšmo“, STR. 2.01.01(3):1999 „Esminiai statinio reikalavimai. Higiena, sveikata, aplinkos apsauga“ bei STR. 2.01.07:2003 „Pastatų vidaus ir išorės aplinkos apsauga nuo triukšmo“, taip pat higienos norma HN 33:2007 „Akustinis triukšmas“. Reglamentuose numatytos akustinės statinių klasės, kurios apibrėžia atitinkamų rodiklių vertes ir apima tam tikrą lygių diapazoną. Pagal klases galima teisingai pasirinkti apsaugos nuo triukšmo rodiklių reikalavimus ir juos susieti su numatoma statinio paskirtimi.

Statybos techninis reglamentas: STR 2.01.01(5):1999 „Esminiai statinio reikalavimai. Apsauga nuo triukšmo“ deklaruoja apsaugą nuo šių triukšmo atmainų:

- statinių išorėje spinduliuojamo oro triukšmo;
- gretimoje patalpoje spinduliuojamo oro triukšmo;
- smūgio triukšmo;
- įrenginių triukšmo;
- perteklinio aidėjimo triukšmo;
- triukšmo, sklindančio į aplinką iš statinių viduje esančių šaltinių.

1.4. Sienų su plyšiais ir skylėmis garso izoliacija

Triukšmo tyrėjai Fasoll, Beranek ir kiti, eksperimentiniais tyrimais nustatė, kad pertvarų garso izoliacines savybes labai sumažina plyšiai, skylės tarp elementų ir jų mazgai. Plyšiai ir skylės ypač būdingos surenkamiems stambiaplokščiams ir blokiniams bei mūriniams ir monolitiniams pastatams, kuriuose naudojami surenkamieji elementai, pvz., perdangos plokštės. Monolitiniai namai labai paplitę Turkijoje. Čia atlikti triukšmo izoliavimo tyrimai ir nustatyti dideli neatitikimai reikalaujamai minimaliai triukšmo izoliacijai. Be to monolitiniuose namuose ypač palankios sąlygos triukšmui plisti aplinkinėmis konstrukcijomis. Tyrimais nustatyta, kad triukšmas jomis nukeliauja iki tolimiausių kaimynų. Monolitiniuose pastatuose plyšių atsiranda dėl pastato sienų, pamatų sėdimo ir deformacijų. Plyšiai ir skylės atsiranda įrengiant šildymo, ventiliacijos, elektros, vandentiekio, kanalizacijos, dujų komunikacijas (Hall 1984).

Pro plyšius perduodamo garso stiprumas priklauso nuo garso bangų difrakcijos, bangų, sklindančių iš skylės, atspindžio, oro tūrio, rezonanso, garso sugerties skylės paviršiuose, trinties ir šilumos apykaitos tarp jų. Skylėje ar plyšyje savųjų oro svyravimų atsiranda dėl to, kad sąveikauja tiesioginė garso banga ir banga, atsispindėjusi nuo skylės galo (Cheng 2005).

Vidinėse ir išorinėse pastatų atitvarose paprastai daug skylių ir plyšių atsiranda įrengiant rozetes, komunikacijas, tenkinant kitas reikmes, kurios stipriai sumažina atitvaros oro garso izoliaciją. Carneal eksperimentiniais tyrimais nustatė, kad garso bangų perdavimas proporcingai priklauso nuo skylės dydžio (Carneal and Fuller 2004).

Garso perdavimas pro dideles skyles

Didelės pastatų skylės – tai ventiliacijos angos, durys, atviri ar pusiau atviri langai. Garso energija, einanti per didelę skylę, yra proporcinga jos plotui. Fiziškai garso slėgio lygis didėja proporcingai skylės ploto logaritmui. Fiziologiškai garso lygių fonai yra skirtingi ir priklauso nuo dažnio (Stauskis 2007).

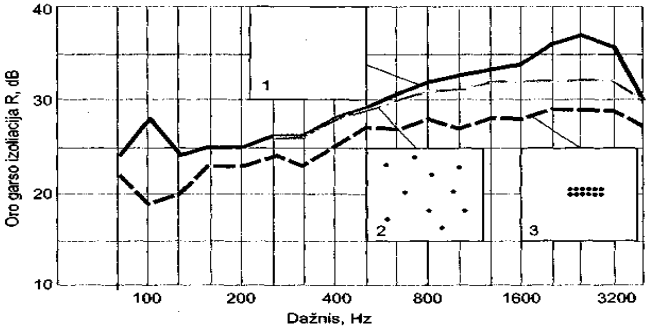
Garsas lengvai į patalpas patenka ventiliacijos ortakiais. Esant žemiems dažniams, mažėjant skylės plotui, garso intensyvumas silpnėja. Naudojant mažo

skerspjūvio ortakius, mažiau perduodama žemųjų dažnių garsų. Triukšmui, sklindančiam ortakiais, sumažinti reikia šių sąlygų (Sas 1995):

- ortakio vidinius paviršius padengti garso sugeriamąja medžiaga,
- įrengti akustinius filtrus.

Garso perdavimas pro mažas skyles ir plyšius

Kaip jau minėta, plyšiai ir skylės turi didelę įtaką atitvarų garso izoliacijai. Esant dideliam skylės skersmeniui *a,* palyginus su skylę perėjusiu bangos ilgiu, garso bangų frontas bus plokščias, todėl visas krintantis į skylę garsas pereis per ją. Kitaip būna tada, kai santykis λ/a yra didelis. Tuomet perėjusi garso banga būna sferinė. Kadangi krintančios į skylę plokščiosios garso bangos ir perėjusios sferinės bangos tarp savęs skiriasi, banga atsispindi nuo skylės. Todėl 100 mažų skylių, išskaidytų plokštės plote, mažiau susilpnina garso izoliaciją negu viena skylė, kurios plotas lygus 100 mažų skylių bendram plotui (Sauskis 2005). Kaip sklinda garsas, prarandamas per įvairiai išdėstytas pertvaros skyles, parodyta 1.6 pav.



1.6 pav. Skylės ir plyšio įtaka plokštės garso izoliacijai
1) – pertvara, kurios matmenys 2 x 2 m, be skylių; 2) – pertvaroje 10 skylių po 10 mm, jos visame pertvaros plote išsidėsčiusios chaotiškai; 3) – skylės yra pertvaros centre (Stauskis 2005)

Fig. 1.6. The influence of a hole and crack on the sound insulation of a slab
1) – interior wall with the dimensions 2 x 2 m, without holes; 2) – 10 holes in the interior wall of 10 mm each with chaotic arrangement within an interior wall area; 3) – holes in the centre of the interior wall (Stauskis 2005)

Jeigu skylės atitvaroje išsidėsčiusios chaotiškai, tai plokštės garso izoliacija esant 700–800 Hz dažniui, nesumažėja. Garso izoliacija pradeda mažėti 4–6 dB, kada dažniai būna 2–3 kHz. Jeigu skylės yra vienoje plokštės vietoje, garso izoliacija sumažėja visų dažnių diapazonu nuo 2 iki 8 dB.

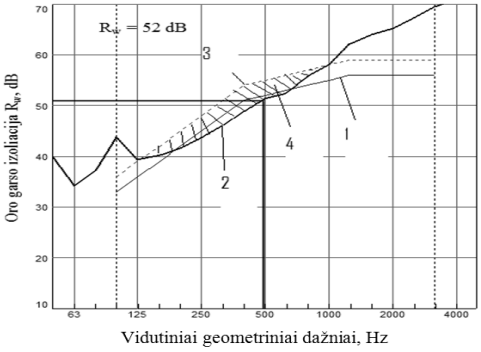
1.5. Statybinių konstrukcijų oro garso izoliacijos įvertinimas ir nustatymas

Projektuojant įvairios paskirties pastatų sienas, pertvaras ir perdangas, langus ir duris, reikia žinoti, kokia privaloma tokių konstrukcijų oro ir smūgio garso izoliacija ir kaip ji įvertinama.

Statybinių konstrukcijų – sienų, pertvarų, grindų, langų ir durų oro garso izoliacija nustatoma matavimais natūrinėmis sąlygomis arba laboratorijose bei skaičiuojant. Kai kurių akustikų teigimu, laboratorijoje ir natūroje išmatuoti garso izoliavimo rodikliai skiriasi nuo 3 iki 6 dB. Matuojama trečdalio ar oktavos dažnių juostose, laikantis tarptautiniuose standartuose pateiktų taisyklių. Pagal tarptautinius ISO standartus, kurie priimti beveik visose Europos šalyse, oro garso izoliacija įvertinama vienu skaičiumi. Įvairiems triukšmo šaltinių spektrams ir garso izoliavimo rodikliams su labai žemomis vertėmis nustatyti imta taikyti spektro pataisos sandus C ir C_{tr}. Tačiau reikia pasakyti, kad sandų matavimai kai kuriose šalyse privalomi, o kai kuriose, pvz., Lietuvoje, nebūtini.

Praktikoje atitvaros oro garso izoliacija įvertinama vienu skaičiumi, kuris gaunamas matuojant. Nuo matavimų rūšies priklauso vartojami terminai ir simboliai (Kaiser 2001).

Tarptautinis standartas, charakterizuojantis statinio dalių ar statinių atitvarų oro garso izoliaciją, pateikia lyginamąsias dydžio vertes, dydžio pavadinimą ir žymenį.



1.7 pav. Oro garso izoliacijos rodiklio trečdalio oktavos juostose nustatymas
1) – atskaitos norminė kreivė; 2) – išmatuota konstrukcijos oro garso izoliacijos dažninė charakteristika; 3) – atskaitos norminė kreivė, perstumta į nepalankių nuokrypių pusę; 4) – nepalankūs nuokrypiai

Fig. 1.7. Determination of the airborne sound reduction index in a one-third octave band
1) – standard curve of reference; 2) – measured frequency characteristics of the airborne sound insulation for the structure; 3) – standard curve of reference shifted towards the area of unfavourable deviations; 4) – unfavourable deviations

Lyginamoji oro garso izoliavimo rodiklio vertė – tai vieninė vertė dB, nustatoma atskaitos kreivėje 500 Hz dažnyje po to, kai kreivė buvo perstumta pagal metodą, apibrėžtą LST EN ISO 717-1 dalyje. Kreivės perstūmimo pavyzdys pateiktas 1.7 pav, o norminės kreivės parametrai pateikti 1.5 lentelėje. Lyginimo metodikos pagrindu oro garso izoliacijos rodiklis nustatomas norminę kreivę 1 dB žingsniu perstūmus link išmatuotos kreivės, kol susidariusių nepalankių nuokrypių suma bus arčiausiai 32 dB reikšmės, tačiau jos neviršys, o matavimus atlikus 5-iose oktavos dažnių juostose, kreivė perstumiama iki tol, kol susidaro 10 dB skirtumas. Tačiau tyrimais įrodyta ir rekomenduojama vartoti trečdalio oktavos juostų dažnius.

Lyginamųjų oro garso izoliavimo rodiklių verčių pavadinimai ir žymenys priklauso nuo matavimų tipo. Jie pateikiami 1.4 ir 1.5 lentelėse.

Statybos techniniame reglamente STR 2.01.07:2003 oro garso izoliacija apibūdinama izoliacijos rodikliu R_w.

Gautos matavimų dydžių vertės pagal LST. EN ISO 140-3, LST. EN ISO 140-4, LST. EN ISO 140-5, LST. EN ISO 140-7 ir LST. EN ISO 140-10 lyginamos su norminėmis, t.y. atskaitos vertėmis visoje 100–3150 Hz matuojamoje dažnių srityje.

1.4 lentelė. Lyginamosios dydžio vertės, charakterizuojančios laboratorines statinių dalių oro garso izoliavimo savybes trečdalio oktavos juostose (Rasmussen and Rindel 2005)

Table 1.4. Comparative values characterising laboratory sound insulation qualities of building's elements in a one-third octave band (Rasmussen and Rindel 2005)

Svertinė dydžio vertė	Dydis ir žymuo	Standartas
Garso izoliavimo rodiklis R_w	Garso izoliavimo koeficientas R (*)	LST EN ISO 140-3:1999 lt
Norminis kabamųjų lubų lygių skirtumo rodiklis,	Norminis kabamųjų lubų lygių skirtumas, $D_{n,c}$	LST EN ISO 140-9:1999 lt
Norminis statinio dalių lygių skirtumo rodiklis, $D_{n,e,w}$	Norminis kabamųjų lubų lygių skirtumas, $D_{n,c}$	LST EN ISO 140-10:1999 lt

1.5 lentelė. Lyginamosios dydžio vertės, charakterizuojančios statinių atitvarų oro garso izoliavimo savybes trečdalio oktavos arba oktavos dažnių juostose (Rasmussen and Rindel 2005)

Table 1.5. Comparative values characterising airborne sound insulating qualities of building partitions in one-third octave or octave frequency bands (Rasmussen and Rindel 2005)

Svertinė dydžio vertė	Dydis ir žymuo	Standartas
Tariamasis garso izoliavimo rodiklis R'_w	Tariamasis garso izoliavimo koeficientas, R'	LST EN ISO 140-4:2001

1.5 lentelės pabaiga

Tariamasis garso izoliavimo rodiklis $R'_{45^o,\ w}$	Tariamasis garso izoliavimo koeficientas, R'_{45}	LST EN ISO 140-5:2001
Tariamasis garso izoliavimo rodiklis $R'_{tr,s,w}$	Tariamasis garso izoliavimo koeficientas, $R'_{tr,s}$	LST EN ISO 140-5:2001
Standartinis lygių skirtumo rodiklis, $D_{nT,W}$	Standartinis lygių skirtumas, D_{nT}	LST EN ISO 140-4:2001

Spektro pataisos sandas – tai vertė dB, pridedama prie lyginamosios (vieninės) oro garso izoliavimo rodiklio vertės (pvz., R_w), kad būtų galima įvertinti atitinkamo garso spektro charakteristiką.

1.6 lentelė. Oro garso izoliacijos atskaitos norminės kreivės vertės (Rasmussen[a] and Rindel 2010)
Table 1.6. Values of the standard reference curve for airborne sound insulation (Rasmussen[a] and Rindel 2010)

Daznis, Hz	Norminės atskaitos kreivės vertės, dB	
	Trečdalio oktavų dažnių juostose	Oktavų dažnių juostose
100	33	
125	36	36
160	39	
200	42	
250	45	45
315	48	
400	51	
500	52	52
630	53	
800	54	
1000	55	55
1250	56	
1600	56	
2 000	56	56
2 500	56	
3 150	56	

Perstumtos atskaitos kreivės vertė (dB) 500 Hz dažnių juostoje atitinkamai yra R_w, R'_w arba $D_{nT,W}$. Rodiklis R_w rodo, kad įvertintas garsas, sklindantis tik tie-

siogiai pro atitvarą, o rodiklis $R'_{w,}$ kad papildomai įvertintas ir garsas, sklindantis netiesioginiais keliais per gretutines atitvaras.

Matavimų rezultatams oktavos dažnių juostose palyginti vartojamos tik atskaitos vertės oktavos juostose.

Atitvarų oro garso izoliacijos rodiklis, atsižvelgiant į pastato paskirtį, atitvaros tipą, akustinio komforto klases, turi būti ne mažesnis nei norminis.

Spektro pataisos sandai C ir C_{tr} vartojami tam, kad būtų atsižvelgta į įvairius triukšmo šaltinių spektrus ir kad būtų galima įvertinti garso izoliavimo rodiklius su labai mažomis bent vienoje dažnių juostoje vertėmis (tokiais atvejais įvertinimas, gautas pagal atskaitos kreivę, nėra patikimas). Nustatant išorinių ir vidinių atitvarų garso izoliaciją, skaičiavimuose naudojamas atitvaros plotas, kuris žymimas – S. Jei reikia nustatyti išorinio lango garso izoliaciją, imamas šio lango plotas iš mažo slėgio patalpos pusės. Tokiu atveju nurodoma, kad per išorinę sieną pereina nedaug garso. Daugelio autorių laboratoriniai bandymai parodė, kad lyginamosios dydžio vertės, gautos pagal atskaitos kreivę, atitiktis yra geresnė (Hans 2005).

1.6. Statybinių konstrukcijų oro ir smūgio garso izoliacijos reikalavimai

Europos Sąjungos šalyse nėra bendrų oro ir smūgio garso izoliacijos normų. Kiekviena Europos Sąjungos narė paprastai turi pasitvirtinusi savo norminius reikalavimus. Lietuvoje tokie reikalavimai reglamentuojami STR.2.01,07:2003 „Pastatų vidaus ir išorės aplinkos apsauga nuo triukšmo“. Reglamente nustatyti pastatų vidaus ir išorės apsaugos nuo triukšmo kokybės reikalavimai, pastato atitvarų ir jo dalių akustinių rodiklių vertės.

Reglamentas privalomas visiems statybos dalyviams, taip pat juridiniams ir fiziniams asmenims.

Rusijoje atlikta tyrimų naujuose namuose su pagerinta garso izoliacija ir nustatyta, kad daugelis butų neatitiko B klasei keliamų garso izoliacijos reikalavimų.

Naujai projektuojamų dvibučių, daugiabučių ir blokuotų gyvenamųjų pastatų vidaus aplinkos garso klasė turi būti ne žemesnė kaip C. Vienbučių gyvenamųjų pastatų garso klasė, projektuojama statytojo ar užsakovo pageidavimu, turi būti ne žemesnė kaip E. Rekonstruojant ar kapitališkai remontuojant pastatus, kai jo ir atskirų patalpų paskirtis nekeičiama ir kai atliekami konstrukciniai atitvarų pakeitimai, pastatų, patalpų bei gretimų patalpų vidaus aplinkos apsaugos nuo triukšmo kokybė turi nepablogėti ir atitikti ne žemesnes rodiklių vertes, taikomas E garso klasei (Clark 2000).

Keičiant pastato ar jo patalpų paskirtį, apsaugos nuo triukšmo kokybė turi atitikti ne žemesnes rodiklių vertes nei taikomos C garso klasei.

Pastato išorės aplinkos garso klasė yra informacinio pobūdžio. Jei pastato išorės aplinkos garso rodiklis neįvertinamas, tai aplinka turi būti pažymėta kaip „Neklasifikuota“.

Naujai pastatytų, rekonstruotų ar kapitališkai suremontuotų įvairios paskirties statinių ar jų dalių į aplinką skleidžiamas triukšmas neturi bloginti šalia esančių pastatų vidaus ir išorės aplinkos garso klasių rodiklių (Carneal 1995).

Projektuojant pastatą, reikia vadovautis akustiniais skaičiavimais pagal atitinkamus standartus, numatant pastato ir jo dalių būsimą garso klasę, kurios visų rodiklių reikalavimai turi būti įvykdyti. Pastato ar jo dalių faktinė garso klasė turi atitikti projektinę (Carneal 2004). Tačiau daugelyje butų atliktais tyrimais nustatyta, kad apie 60% neatitinka projektinės klasės. Apklausa vykdyta 24 šalyse, būtent: Austrijoje, Belgijoje, Olandijoje, Estijoje, Suomijoje, Čekijoje, Danijoje, Suomijoje, Prancūzijoje, Vokietijoje, Vengrijoje, Islandijoje, Italijoje, Latvijoje, Lietuvoje – visos jos Europos standartizacijos komiteto narės (CEN) – ir Rusijos Federacijoje. Gyventojų buvo klausiama, ar juos tenkina jų būsto akustinės savybės. 50% apklaustųjų atsakė neigiamai, nors jų būstai ir atitiko reikalavimus. Nepasitenkinimą A arba B garso izoliavimo klasės būstais dėl akustikos pareiškė apie 10% tyrimo dalyvių (Kim 2005, Fasol 2005).

1.7. Akustinio komforto garso klasės

Gyvenamųjų pastatų vidaus aplinkos apsaugos nuo triukšmo klasifikavimas

Gyvenamųjų pastatų vidinių ir išorinių atitvarinių konstrukcijų pagrindiniai akustiniai reikalavimai yra šie: oro garso izoliavimo rodiklis, smūgio garso izoliavimo rodiklis, aidėjimo trukmė (Kruger 2004).

Gyvenamojo pastato išorinės ir vidinės sienos tarp butų privalo turėti ne mažesnį kaip norminį oro garso izoliacijos rodiklį, tarpaukštinės perdangos – dar papildomai ir ne didesnį už norminį smūgio garso izoliavimo rodiklį. Turi būti gerai izoliuoti ventiliacijos kanalai ir iki minimumo sumažintas inžinerijos įrenginių triukšmas. Pastato laiptinėse ir bendrojo naudojimo patalpose leidžiama ne didesnė nei reglamentuojama aidėjimo trukmė, priklausanti nuo pastato garso klasės (Nelson 1992).

Nepakankama grindų izoliacija pašalinama jas uždengus kilimais, tačiau tai sukelia natūralų rezonansą prie 500 Hz. Nuėmus kilimą, grindų izoliacija smarkiai pablogėja.

Europos šalių oro ir smūgio garso izoliacijos rodikliai

Europos šalyse oro ir smūgio garso izoliacijos privalomi rodikliai skirtingi. Jie pateikiami 1.7 lentelėje.

1.7 lentelė. Europos šalių oro garso izoliacijos norminės vertės (Jagniatinskis et al. 2001; Rasmussen 2010)
Table 1.7. Standard values of airborne sound insulation of Europe's countries (Jagniatinskis et al. 2001; Rasmussen 2010)

Valstybė	Žymėjimas	Mažiausio lygio vertė, dB	R_w ekvivalentas, dB
Prancūzija	$D_{nT,A}$	53	≈52-57
Austrija	$D_{nT,W}$	55	≈53-56
Olandija	$D_{nT,A}$	52	≈51-56
Norvegija	$R`_w$	55	55
Suomija	$R`_w$	55	55
Islandija	$R`_w$	55	55
Estija	$R`_w$	55	55
Švedija	$R`_w + C$	52	≈53-55
Lietuva	$R`_w$ arba $D_{nT,W}$	55	≈53-55
Lenkija vert., horizontaliam	$R`_w$ arba $D_{nA,T}$	51	≈50-54
		50	≈49-54
Latvija	$R`_w$	54	54
Ispanija	$D_{nT,A}$	50	≈49-54
Vokietija vert., horizontaliam	$R`_w$	54	54
		53	53
Junginė karalystė	$D_{nT,W} + C_{tr}$	45	≈50-53
Danija vert., horizontaliam	$R`_w$	53	53
		52	52
Slovakija	$R`_w$	52	52
Portugalija	$D_{n,W}$	50	≈48-51

Kaip matyti iš 1.7 lentelės, Norvegijos, Austrijos, Suomijos ir Baltijos šalių, oro ir smūgio garso izoliacijos rodikliai yra patys aukščiausi. Tačiau šalyse, kur privalomas rodikliss mažesnis, reikalaujamas kartu ir pataisos sandas.

Keturiose šalyse numatyta, kad oro garso izoliacijos rodikliai turi būti ne mažesni kaip 50 dB, penkiose šalyse – ne mažesni kaip 52 dB ir dviejose šalyse – ne mažesni kaip 53 dB. Latvijoje garso izoliacija turi būti ne mažesnė kaip 54 dB, o dar keturiose šalyse garso izoliacija turi būti ne mažesnė kaip 55 dB. Skirtumas tarp mažiausio ir didžiausio rodiklio siekia net 5 dB. Tačiau nevienodus reikalavimus keliančios šalys yra skirtingose klimatinėse sąlygose.

Lietuvos, kaip ir kitų Baltijos šalių, oro ir smūgio garso izoliacijos rodikliai yra tarp pačių aukščiausių verčių.

1.8. Statybinių medžiagų ir konstrukcijų garso izoliacija

Vienasluoksnių atitvarų oro garso izoliacija

Gyvenamųjų ir visuomeninių namų statyboje plačiai naudojamos įvairių medžiagų vienasluoksnės atitvarinės konstrukcijos. Nuo atitvaros struktūros priklauso garso perėjimo per ją pobūdis. Atitvara gali svyruoti ir kaip vienas elementas, ir atskirais sluoksniais su skirtingomis amplitudėmis ir fazėmis (Bao 1997).

Pagal savo struktūrą plokštės būna vienalytės ir nevienalytės. Akustiniu požiūriu vienalytės plokštės yra iš betono, mūro su tinku, medžio, metalo, su tankiai išdėstytomis briaunomis. Tokių elementų sluoksniai tarp savęs būna standžiai sujungiami visu plokštės plotu. Tuštumos konstrukcijoje, pvz., perdangoje arba briaunotoje plokštėje, atstumas tarp briaunų gali būti nedidelis (Sas 1993).

$$b \leq \frac{\lambda_i}{4}, \tag{1.2}$$

čia: b – sienutės tarp plokštumų plotis skersine kryptimi arba atstumas tarp briaunų; λ_i – bangų ilgis sienutėje arba briaunoje.

Dažniausiai nevienalytės plokštės susideda iš dviejų ar daugiau tvirtų medžiagų sluoksnių, kuriuos atskiria oro tarpas ir izoliacinis sluoksnis. Šie sluoksniai svyruoja skirtingomis amplitudėmis ir fazėmis ir gali turėti įtakos plokštės garso izoliacijai (Leissa 1993).

Dažnai garso izoliacija ir garso sugertis tapatinamos, nors tarp jų yra principinis skirtumas. Garsą izoliuojanti atitvara turi nepraleisti garso energijos iš triukšmingos patalpos į tylią patalpą. Garso sugerties paskirtis – sumažinti garso slėgio lygį atitvaroje, o kartu ir patalpoje. Paprastai izoliuojamos atitvaros garso sugertis būna nedidelė, todėl garsas nuo jos gerai atsispindi (Bullmore 1987).

Garso sugertis charakterizuojama sugerties koeficientu α, kuris randamas pagal formulę:

$$\alpha = \frac{E_{\text{sug.}}}{E_{\text{kr.}}}, \tag{1.3}$$

čia: $E_{sug.}$ – sugerta energija, kuri lygi $E_{kr.} - E_{atsp.}$; $E_{kr.}$ – krintanti energija į plokštę; $E_{atsp.}$ – atspindėta energija nuo plokštės.

Atitvaros oro garso izoliacija charakterizuojama garso perėjimo per atitvaras koeficientu τ, kuris randamas pagal formulę:

$$\tau = \frac{E_{\text{pr.}}}{E_{\text{kr.}}}, \tag{1.4}$$

čia: τ – garso perėjimo per plokštę koeficientas; $E_{pr.}$ – per plokštę praėjusi energija; $E_{kr.}$ – į plokštę krintanti energija.

Dalis garso bangų energijos, sklindančios uždaroje patalpoje, pasiekusios atitvarą, nuo jos atsispindi, dalis prarandama konstrukcijos medžiagoje, o kita dalis pereina per ją į izoliuojamą patalpą.

Monolitinės struktūros garso izoliavimas padidinamas sieneles padengus lengvais apmušalais, bet garso izoliacijos pagerėjimą dėl apmušalo geriausia matuoti garso izoliavimui tirti skirtoje laboratorije.

Dvigubųjų masyviųjų atitvarų oro garso izoliacija

Daugelis akustikų teigia, kad vienasluoksnių atitvarų oro garso izoliaciją dažniausiai galima pagerinti didinant atitvaros masę, tenkančią ploto vienetui. Tačiau vienasluoksnės masyvios atitvaros masės ir ploto didinimas norimo rezultato dažniausiai neduoda. Geresnė garso izoliacija pasiekiama dvigubų konstrukcijų atitvaromis. Jas sudaro dvi sienelės, tarp kurių yra oro tarpas, kuris gali būti užpildytas garso sugeriamąja medžiaga, padidinančia pertvaros garso izoliavimo savybes (Fuller 1997).

Kai sienelės yra masyviosios ir lanksčiosios, tai, jas sujungiant su standžia ištisine siena, keičiasi spinduliuojamos garso energijos intensyvumas.

Nyderlandų akustikas Geretsenas, tyrinėjęs daugiasluoksnes išorines sienas su pasireiškiančiais rezonansais, padarė išvadą, kad garso izoliacija tokioms sienelėms turi būti nustatyta specialioje triukšmo tyrimo laboratorijoje, nes pastatuose didelės įtakos rezultatams turi aplinkinėmis konstrukcijomis sklindantis garsas (Gerretsen 2006).

Kai tarp dvigubosios atitvaros ir išilginės sienos yra standusis ryšys, tai garso banga sklinda aplinkiniais keliais. Jei sienelės yra masyviosios, tai iš pirmos į antrą sienelę perduodama daug garso energijos, ir spinduliuotė į izoliuojamą pa-

talpą bus stipri. Dėl to atitvaros izoliacija sumažės. Kai sienelės yra lanksčiosios ir lengvosios, tai į antrą sienelę perduodama nedaug energijos, todėl jos bus mažai išspinduliuota į izoliuojamą patalpą (Beranek 1992).

Kuo mažesnis oro tarpo storis, tuo didesnis rezonansinis dažnis ir tuo labiau, esant aukštesniems dažniams, garso izoliacija didėja. Jeigu atstumas tarp plokščių didelis, tai rezonansinis dažnis yra mažas, izoliacija pradeda augti esant žemesniems dažniams (Bao 1997).

Dvisluoksnių atitvarų žemųjų dažnių diapazone izoliacija sumažėja arti visos atitvaros savojo dažnio. Aukščiau šio dažnio orinį garsą geriau izoliuoja dvisluoksnė atitvara. Šis dažnis turėtų būti mažesnis nei 100 Hz. Jis bus tuo žemesnis, kuo didesnis bus atstumas tarp plokščių arba kuo mažesnis bus tampriojo sluoksnio dinaminis standis (Licitra 2000).

Būna atvejų, kai iškyla aukštesnės klasės garso izoliacijos poreikis, t.y., kad oro garso izoliacijos rodiklis būtų ne mažesnis kaip R'_w= 60 dB. Tai aukštas reikalavimas ir pasiekti jį naudojant vienasluoksnę sieną sudėtinga. Tokiu atveju tikslinga naudoti dvi masyviąsias sieneles su oro tarpu (Paurobally 1999).

Dvisluoksnės atitvaros tarp butų daromos iš skylėtųjų, pilnavidurių, silikatinių plytų, akytojo ar kitokio betono blokelių ir kt. Šių atitvarų sienelės yra masyviosios. Norint užtikrinti aukštą jų oro garso izoliaciją, reikia užpildyti oro tarpą. Dvigubųjų pertvarų iš masyvių sienelių oro garso izoliacijos rodikliai turi dideles vertes, bet tik tada, kai į oro tarpą dedamos mineralinės vatos plokštės, kurių standis nedidelis. Kai į oro tarpą dedama kieta polistireno plokštė, oro garso izoliacijos rodikliai labai stipriai krinta. Šis sumažėjimas ypač didelis, kai sienelės yra iš gelžbetonio. Dvigubosios atitvaros oro tarpo užpildymas mineraline vata tuo efektyvesnis, kuo lengvesnės abi sienelės (Gagliardini 1993).

Dvigubųjų lengvųjų atitvarų oro garso izoliacija

Dviguba lengva konstrukcija susideda iš dviejų plonųjų ir lengvųjų plokščių, tarp kurių yra garso sugeriamoji medžiaga. Plonos plokštės turi didelį kritinį dažnį ir didelį standį esant įlinkiui, o oro tarpo pripildomoji medžiaga yra standi esant šlyties poslinkiams. Tokios konstrukcijos kritinis dažnis, kai oro tarpo pripildomosios medžiagos sugerties koeficientas $\alpha < 0{,}8$, randamas pagal formulę (Ferreira 2004; Matsumoto et al. 2006):

$$f_{\mathrm{kr},l.} = f_{\mathrm{kr},a.}\sqrt{1-\alpha^2}\ , \tag{1.5}$$

čia $f_{kr,.l}$ – vienos plokštės kritinis dažnis, Hz.

Didžiausia kritinio dažnio vertė bus tada, kada šlyties bangos greitis bus mažesnis už garso greitį ore. Padidinti kritinį dažnį galima ne tik mažinant plokščių storį, bet ir mažinant oro tarpo užpildo standį, esant šlyčiai.

Oro tarpą pripildžius garsą sugeriančia medžiaga, garso izoliacija padidėja, kai dažniai didesni už dvisluoksnės atitvaros rezonansinį dažnį. Tokiu atveju izoliuojamoji medžiaga neturi sudaryti akustinio tiltelio tarp abiejų standžiųjų sienelių, kad struktūrinis garsas galėtų pereiti iš vieno sluoksnio į kitą. Geriau naudoti minkštą užpildą, kurio prapūtimo varža sudaro apie 10 kN s/m^2.

Dvigubosios atitvaros rezonansinis dažnis f_0 randamas pagal formulę (Cameal 1993; Matsumoto et al. 2006; V. Hongisto. 2001):

$$f_0 = \frac{1}{2\pi}\frac{1}{\sqrt{m_{\mathrm{ef}}F}}, \tag{1.6}$$

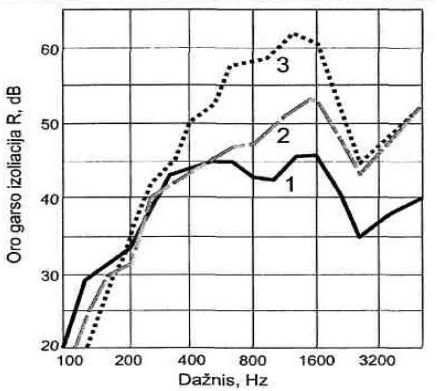
čia: $\frac{1}{m_{\mathrm{ef}}} = \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2}$; m_1, m_2 – dvigubosios atitvaros plokščių masės; $F = l/s'$ – oro tarpo tamprumo pastovioji (ploto vienetui); s' – dinaminis standumo koeficientas.

Jeigu dvigubąją atitvarą sudaro gipskartonio plokštės, gera garso izoliacija gaunama tuo atveju, jei gipso kartono plokštės tvirtinamos prie laikančiojo karkaso, garsas perduodamas tiek pro oro tarpą, tiek pro standumo ryšius, kuriais tvirtinamos plokštės (Jagniatinskis). Tokios atitvaros oro garso izoliacijai įtakos turi plokščių medžiaga ir storis, jų tvirtinimo prie karkaso būdai, karkaso tipai, oro tarpas ir garso sugeriamoji medžiaga, kuria jis užpildomas. Garso izoliacija labai sumažėja, jeigu atitvara remiasi į perdangą. Toks atrėmimo mazgas padeda susidaryti garso tilteliui, per kurį praeina garsas. Dėl garso, sklindančio per gretutines konstrukcijas, sumažėja tokios dvigubosios atitvaros didžiausia izoliacija, o garso izoliacija, ištirta natūraliomis sąlygomis ir laboratorijoje, gali skirtis 4–8 dB (Jagniatinskis 2001). Kitų autorių teigimu, sienelių, išmatuotų laboratorijoje ir natūroje, rezultati skiriasi 3–6 dB (Hongisto 2001; Jones 1976; Gerretsen 1979).

Lengvųjų lakštinių medžiagų dvigubosios atitvaros kritinis dažnis yra viršutinėje normuojamo diapazono dalyje. Jo įtaka garso izoliacijai pavaizduota 1.8 pav.

Iš 1.8 pav. grafiko matyti, kad diapazone iki 300 Hz visų pertvarų izoliacija yra vienoda nepaisant tyrimo sąlygų, nes garso, sklindančio netiesioginiais keliais, įtaka yra nedidelė. Vidutinių ir aukštųjų dažnių diapazone izoliacija sumažėja. Tai lemia garsas, sklindantis netiesioginiais keliais. Tačiau mažiausios izoliacijos R kritimo prie rezonanso vertės menkai priklauso nuo matavimo sąlygų. Kai dažniai didesni kaip 400 Hz, gaunamas labai didelis (nuo 5 iki 15 dB) izoliacijos skirtumas tarp tyrimų rezultatų, atliktų natūraliomis sąlygomis ir laboratorijoje. Tai lemia garsas, sklindantis netiesioginiais keliais per gretutines konstrukcijas. Kai dažniai aukšti – 2 500 Hz – izoliacija labai sumažėja dėl bangų sutapimo, kurį

lemia kritinis atitvaros dažnis, esantis aukštųjų dažnių diapazone (Gardonio 1997).



1.8 pav. Dvigubosios atitvaros iš gipskartonio plokščių su metaliniu karkasu oro garso izoliacijos dažninė charakteristika: 1 ir 2 – ištirta natūraliomis sąlygomis namuose, kuriuose garso sklidimo intensyvumas netiesioginiais keliais yra skirtingas; 3 – ištirta specialiose akustinėse kamerose

Fig. 1.8. Frequency characteristics of airborne sound insulation for a double partition of gypsum cardboards with a metal frame: 1 and 2 – investigated under natural conditions in houses in which the intensity of noise dispersion by different routes is indirect; 3 – researched in special acoustic chambers

Didėjant oro tarpui tarp plokščių, gerėja oro garso izoliacija, tiek naudojant mineralines vatas, tiek ir be jos. Didėjant oro tarpo storiui, izoliacijos rodiklis padidėja tada, kai yra dvigubas tarp savęs atskirtas karkasas ir kai oro tarpas užpildytas mineraline vata (European 2000).

Karkaso tipas taip pat turi įtakos atitvaros izoliacijai. Jei kitos sąlygos vienodos, mažiausia izoliacija būna, kai karkasas sukonstruotas iš medinių tašelių, nes jis yra standus skersine kryptimi ir gerai perduoda vienos plokštės lenkimo momentą kitai. Naudojant vientisą karkasą iš plonų metalinių profilių, izoliacija gali padidėti maždaug 3 dB, palyginus su mediniu karkasu. Šis efektas didėja, kai atitvara yra iš dviejų gipso plokščių ir kai oro tarpas užpildytas mineraline vata (Quirt 1985).

Palyginus viengubą karkasą su dvigubu, iš dviejų gipso plokščių ir mineralinės vatos pripildyto oro tarpo, pastarasis labai padidina izoliaciją.

Antras gipso sluoksnis izoliacijos rodiklį kiek padidina. Šis padidėjimas neturi ryškios priklausomybės nuo kitų konstrukcinių parametrų. Tokio izoliacijos padidėjimo negalima vertinti tik plokščių masės padidėjimu. Įtakos turi tai, kad didėjant plokštės masei, kartu didėja jos standis. Dėl to išlieka tas pats kritinis

dažnis. Vienasluoksnė dvigubo storio plokštė tokio izoliacijos efekto neduoda (Kaiser 2003).

Dažniausiai praktikoje paplitusią lengvąją pertvarą sudaro dvi gipso plokštės, tarp kurių yra oro tarpas, paprastai užpildomas garsą sugeriančiąja medžiaga. Ji gerai sugeria oro tarpe susidarančias garso bangas. Tokios konstrukcijos izoliacija priklauso ne tik nuo jos storio, bet ir nuo mechaninių jungčių skaičiaus ir jų tipo bei nuo medžiagos, kuria užpildomas oro tarpas. Tyrimai rodo, kad tokios dvisluoksnės pertvaros izoliacija yra 5–7 dB didesnė tada, kai oro tarpas pripildytas visiškai, o ne iš dalies. Mineralinės vatos tūrio masė neturi įtakos izoliacijai. Lemiamos įtakos turi užpildo akustinės savybės ir šio užpildo bei oro tarpo storio santykis (Nabelek 1974).

Kai kurių mokslininkų teigimu, didesnis medžiagos tankis nepagerina visos atitvaros garso izoliacijos. Teigiama, kad savitoji oro srauto varža *r* nepadidina oro garso izoliacijos kai jos srauto varža yra didesnė negu 5 kPa/m^2, 1.8 lentelėje pateikiami tyrimų rezultatai, kai pertvara iš dalies ar visiškai užpildyta izoliuojamąja medžiaga su skirtinga *r* verte. Pertvara susideda iš metalinio karkaso, prie kurio iš abiejų pusių pritvirtintos 9,5 mm storio gipso kartono plokštės. Izoliuojamųjų medžiagų oro srauto varža nuo 6 iki 25 kPa/m^2 atitinka izoliuojamosios vatos tankį nuo 12 iki 70 kg/m^3.

1.8 lentelė. Oro garso izoliacijos rodiklio kitimas, atsižvelgiant į oro srauto varžą ir užpildo storį (Stauskis 2005)
Table 1.8. Dynamics of the airborne sound reduction index taking account of airflow resistance and filler thickness (Stauskis 2005)

Izoliuojamosios medžiagos oro srauto varža r, kPa/m^2	Oro garso izoliacijos rodiklis R_w, dB	
	Užpildo storis 40 mm	Užpildo storis 80 mm
6	43	48
8	42	49
15	44	49
25	43	48

Kai 100 mm storio oro tarpe įdėta 40 mm storio mineralinės vatos plokštė, izoliacijos rodiklis R_w = 49 dB. Kai mineralinės vatos storis siekia 100 mm, t. y., kai užpildomas visas oro tarpas, rodiklis padidėja 5 dB ir R_w = 54 dB. Vadinasi, kad kuo didesnis mineralinės vatos sluoksnio storis, tuo didesnė izoliacija visų dažnių diapazone (Heckl 1980).

Atitvaros izoliacija menkai gerėja, kai didėja tik jos storis. Padidinus viengubosios atitvaros su atskiru karkasu storį nuo 80 mm iki 160 mm, izoliacijos rodikliai atitinkamai kinta nuo R_w = 33 dB iki R_w = 34 dB, t. y. rodiklis padidėja tik

1 dB. Kai 80 mm storio pertvara užpildoma 40 mm storio mineraline vata, rodiklis R_w = 42 dB ir padidėja 9 dB. Kai 80 mm storio pertvara užpildyta iki galo, tai, palyginus su neužpildyta pertvara, jos rodiklis siekia R_w = 49 dB ir, palyginus su neužpildyta pertvara, padidėja 16 dB, o su iš dalies užpildyta – 7 dB (Pfiffner 1996).

Yang ir kiti (Wieland et al., 2002; Czachor, 2002; Bainbridge, 2000; Taylor et al., 2006; Henderson, 2006) tyrė šiaudų ir padangų atliekų mišinius. Tyrimų rezultatai parodė, kad šiaudų ir perdirbtų padangų gumos mišiniai turėjo panašias mechanines savybes kaip ir mediena. Tačiau šiaudų – molio sienos nėra standartizuotos. Be to, šiaudai kiekvienoje šalyje auginami skirtingomis sąlygomis, namų statybai naudojamos įvairaus tankumo ir storio sienų konstrukcijos, skiriasi ir tinko sudėtis ir storis. Autoriai nepateikia tokių namų vidinių ir išorinių sienų garso izoliavimo rodiklių, t. y. detalesnių R_w ar $D_{nT,W}$, tyrimų.

1.9. Garso izoliavimo modeliavimo programos

Triukšmo sklaidai modeliuoti aplinkoje ir pastatuose vartojamos įvairios modeliavimo programos. Modeliuose atsižvelgiama į aplinkos sąlygas, pastato konstrukcijos ypatybes. Praktikoje dažniausiai vartojama standartizuoto metodo pagrindu Naujojoje Zelandijoje sukurta modeliavimo programa ZORBA, kurios programinė įranga skirta statybinių elementų garso sugerties prognozavimui. Programa gali apskaičiuoti garso sugertį vieno–dviejų sluoksnių sienelėse (Mickaitis 2008).

Pasitelkus programą, apskaičiuojamas statistinis absorbcijos koeficientas vienos trečiosios oktavos dažnių juostoje su pasirinktu ar normaliu kritimo kampu ir kompleksine akustine varža. Remiantis programa, taip pat galima apskaičiuoti perdavimo nuostolius porėtoje medžiagoje. Gilesnei analizei atlikti pasitelkiami programos devyni skirtingi sklidimo modeliai. Duomenys gali būti eksportuojami į Word, Excel ar PDF formatus. ZORBA yra galingas įrankis, leidžiantis greitai ir tiksliai apskaičiuoti triukšmo absorbcijos ypatybes, kurios atitinka daugelio programų reikalavimus.

INSUL programa apskaičiuoja viengubų ar dvigubų sienelių, grindų ar stiklo paketų garso izoliavimo charakteristikas. Programa grindžiama analitiniais skaičiavimais, tačiau duomenys turi būti paprasto dizaino. Programa apskaičiuoja garso sumažinimą trečdalio oktavos juostoje ir pateikia svertinius garso izoliavimo rodiklius: R_w arba $R_w + C_{50\text{-}3150}$.

INSUL tinka greitam naujų medžiagų ir sistemų įvertinimui. Programa vartoja įvairių medžiagų ir sienelių vidinę duomenų bazę. Sudėtingesnės pertvaros sukurtos remiantis Sharpo, Cremerio ir kitų mokslininkų darbais.

Per daugiau nei 15 metų INSUL programa pertvarkyta į nesudėtingą plačiam naudojimui tinkančią priemonę, ir pateikia gana tikslius duomenis. Švedų mokslininkai atliko tyrimus, kuriais lygino INSUL prognozes ir matavimo rezultatus. Padaryta išvada, kad INSUL gali prognozuoti R_W su vidutine, maždaug 0,5 dB paklaida. INSUL atsižvelgiama į galutinio dydžio poveikį, kuris yra labai svarbus, kai norima prognozuoti nedidelių objektų, pvz., langų, izoliaciją. INSUL turėtų gerokai palengvinti konsultantų ir produktų gamintojų pastangas užtikrintai teisingai nurodyti norimą konstrukcijų garso izoliaciją. INSUL vidinė duomenų bazė yra atvira redagavimui ir papildymui. Rezultatus galima eksportuoti į Excel, Word programas.

1.10. Pirmojo skyriaus išvados

1. Pagrindiniai triukšmo šaltiniai pastatuose yra buitinė technika, kaimynų veikla ir transporto priemonių triukšmas iš aplinkos. Triukšmas tarp patalpų daugiausia sklinda ventiliacijos ortakiais, kanalizacijos vamzdynais, o taip pat konstrukcijų plyšiais bei skylėmis.
2. Didėjant miestams ir transporto srautams, plečiamos gatvės, kurios vis labiau „priartėja“ prie gyvenamųjų namų, dėl to juose didėja triukšmo lygis.
3. Gera garso izoliacija dažniausiai būdinga didelės masės konstrukcijoms su oro tarpu, užpildytu garsą sugeriančia medžiaga, pavyzdžiui, akmens ar stiklo vata.
4. Siekiant užtikrinti gyventojų komfortą ir apsaugą nuo triukšmo, pertvarų, perdangų ir fasadų garso izoliacija normuojama ir skirstoma į klases. Lietuvoje teisiškai įtvirtintos penkios garso izoliavimo klasės; reikalaujama, kad naujai pastatytuose namuose perdangos, pertvaros ir fasadai atitiktų ne žemesnę kaip C garso izoliavimo klasę.
5. Pastatų pertvaroms, perdangoms ir fasadams šiuo metu naudojamos naujos medžiagos ir iš jų sudarytos konstrukcijos, kurių akustinės savybės dar nepakankamai ištirtos.
6. Patalpų apsaugai nuo triukšmo iš lauko pusės svarbus fasadas, kuriame didžiausias triukšmo laidininkas yra langai. Įvairios konstrukcijos langai pasižymi nevienoda garso izoliacija, kuri dažniausiai tiriama triukšmo slopinimo kamerose, tačiau trūksta tyrimų natūrinėmis sąlygomis.
7. Projektuojant pastatus, svarbu numatyti konstrukcijas, kurios leistų pasiekti reikalingą garso izoliavimo komforto klasę; šiam tikslui įgyvendinti galima pasitelkti konstrukcijų garso izoliacijos modeliavimo programas.

2

Statybinių medžiagų ir konstrukcijų tyrimai triukšmo slopinimo kameroje

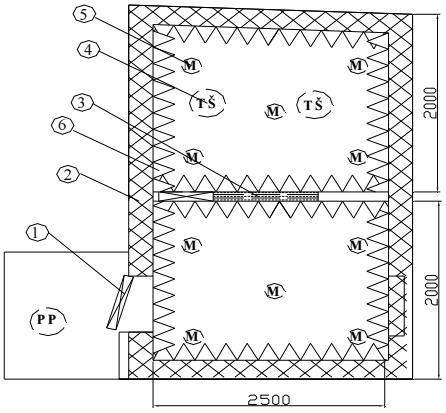
Šiame skyriuje aprašomi pavienių medžiagų ir iš jų sudarytų įvairių konstrukcijų akustinių savybių tyrimai triukšmo slopinimo kameroje. Skirtingos medžiagos, priklausomai nuo jų morfologinių savybių, kietos jos ar minkštos, porėtos ar tankios, nevienodai sąveikauja su garso bangomis. Kietos medžiagos atspindi ir izoliuoja garsą, minkštos ir porėtos sugeria per jas besiskverbiančių triukšmo bangų energiją, paversdamos ją į šiluminę. Pavienių medžiagų ir iš jų sudarytų kompozitų akustinės savybės ištirtos triukšmo slopinimo kameroje. Matuojamas garso izoliavimo rodiklis R_w, standartizuotas garso slėgio lygių skirtumas $D_{nT,W}$ ir akustinės medžiagų savybės, slopinant garsą dažninėje charakteristikoje. Skyriaus tematika paskelbti šie straipsniai: *Butkus et al 2008, Butkus and Januševičius 2009.*

2.1. Statybinių medžiagų ir konstrukcijų garso izoliavimo savybių tyrimų triukšmo slopinimo kameroje metodika

Triukšmo slopinimo kamera sukurta VGTU Aplinkos apsaugos katedroje. Ši kamera skirta įvairių medžiagų ir iš jų sudarytų konstrukcijų garso sugerties, atspindžių ir garso izoliacijos nustatymui (patikros metodas apibrėžtas EN ISO 140-3 standartu).

Bendras triukšmo slopinimo kameros vaizdas pateiktas 2.1 pav. Triukšmo slopinimo kamera susideda iš dviejų patalpų, perskirtų dviguba siena, ir greta esančios patalpos, skirtos matavimo aparatūrai. Pirmoji patalpa sąlygiškai vadinama siunčiamo garso kamera, antroji – priimamojo garso kamera.

Triukšmo slopinimo kameros patalpos tarpusavyje ir išorinio statinio atžvilgiu akustiškai izoliuotos akmens vatos plokštėmis. Tokia konstrukcija leidžia sumažinti netiesioginį garso pralaidumą tarp kameros patalpų. Be to, šios patalpos izoliuojamos nuo išorinio triukšmo ir tai minimizuoja foninį triukšmą jose. Kameros patalpas skiriančioje sienoje yra 1 m^2 anga, kurioje standžiai įtvirtinamas 1,0 m x 1,0 m tiriamasis bandinys. Kamera atskirta ir izoliuota nuo pastato.



2.1 pav. Triukšmo slopinimo kameros vaizdas iš viršaus: 1) – durys; 2) – kameros atitvaros dengtos porolonu ir akmens vata; 3) – narvelis tiriamiesiems bandiniams įtaisyti; 4) – triukšmo šaltinių pozicijos (TŠ); 5) – mikrofonų pozicijos (M); 6) – pjaustytas porolonas; PP – duomenų registravimo ir apdorojimo patalpa

Fig 2.1. View of a noise suppression chamber from above: 1) – door; 2) – chamber's partitions covered with foam and rock wool; 3) – cage for accommodating researched samples; 4) – positions of noise source (NS); 5) – positions of microphones (M); 6) – cut foam; PP – room for data recording and processing

Siunčiamojo ir priimamojo garso patalpose yra pastovios mikrofonų vietos, o siunčiamojo garso patalpoje su visakrypčiu garsiakalbiu sukuriamas pastovus difuzinis garso laukas, o jo spektras pasirinktoje dažnių srityje nepertraukiamas. Garso lygiui matuoti naudojamas trečdalio oktavos pločio juostos filtras. Matavimo trukmė kiekvienoje atskiroje mikrofono vietoje ir kiekvienoje 1/3 oktavos dažnių juostoje yra ne mažesnė kaip 60 s. Matuojami šie parametrai:

1. Vidutinis garso slėgio lygis siunčiamojo garso patalpoje.
2. Vidutinis garso slėgio lygis priimamojo garso patalpoje.
3. Vidutinis garso reverberacijos laikas priimamojo garso patalpoje.
4. Garso slėgio lygio sumažėjimas visoje dažnių juostoje.

Pagal gautus parametrus su kompiuterine programine įranga „BZ 7210 Qualifier“ apskaičiuojamas orinio garso izoliavimo rodiklis R_w ir/arba standartizuotas garso slėgio lygių skirtumas $D_{nT,W}$.

Orinio garso izoliavimo rodiklis R_w apskaičiuojamas kritusios į bandomąją atitvarą garso galios L_1 santykio su praėjusia per bandinį garso galia L_2 dešimteriopas dešimtainis logaritmas. Šis dydis žymimas R_w ir išreiškiamas decibelais pagal formulę (Rasmussen[a] and Rindel 2010) :

$$R_w = L_1 - L_2 + 10\lg (S/A), \tag{2.1}$$

čia: L_1 – vidutinis garso slėgio lygis siunčiamojo garso patalpoje, dB; L_2 – vidutinis garso slėgio lygis priimamojo garso patalpoje, dB; S – bandinio plotas, m^2, lygus tuščios bandymo kameros angos plotui;

$A = \left(\frac{0{,}163V}{T}\right)$ – lygiavertis garso sugerties plotas priimamojo garso patalpoje, m^2.

Standartizuotasis garso lygių skirtumas $D_{nT,W}$ apskaičiuojamas pagal formulę (Gerretsen 2006) :

$$D_{nT,W} = D + 10\lg\frac{T}{T_0}, \tag{2.2}$$

čia: D – garso slėgio lygių skirtumas siunčiamojo ir priimamojo garso patalpoje dB; T – priimamojo garso patalpos aidėjimo trukmė, s; T_0 – atskaitos aidėjimo trukmė; gyvenamosioms patalpoms $T_0 = 0{,}5$ s.

Tačiau triukšmo slopinimo kameroje tiriant standartizuotą garso slėgio lygio skirtumą, atskaitos aidėjimo trukmė $T_0 = 0{,}5$ s pakeičiama į triukšmo slopinimo kameros aidėjimo trukmės vidutinę vertę, t. y. 0,15 s.

Vidutinis garso slėgio lygis patalpoje – garso slėgio erdvinės ir laikinės vidurkio vertės kvadrato santykio su atskaitos garso slėgiu kvadratu dešimtainis

logaritmas, kai erdvinė vidutinė vertė nustatoma visoje patalpos erdvėje. Šis dydis žymimas L ir išreiškiamas decibelais (Demirel 2006). Pagal 2.3 formulę apskaičiuojamas triukšmo lygis kiekvienoje atskiroje vietoje, o pagal 2.4 formulę apskaičiuojamas bendras triukšmo lygis.

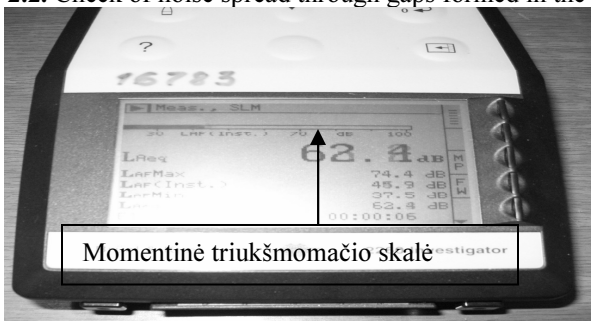
$$L = 10 \lg [1/T_m \int_0^{T_m} (p^2(t) / p^2{}_0) dt], \quad (2.3)$$

$$L = 10 \lg (l/n \sum_{i=1}^{n} 10^{Li/10}), \quad (2.4)$$

čia: p_1, p_2, …., p_n – vidutinės kvadratinės garso slėgio vertės, skirtingose patalpos n vietose; p_0 – garso slėgio slenkstinė vertė, $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa.

Triukšmo slopinimo kameroje sumontavus mėginį, garso izoliacijos rezultatų patikimumui didelės įtakos turi garso praėjimas per konstrukcijos šonus. Todėl kruopščiai nustatomas garso praėjimas pro galimai atsiradusius tarpus tarp narvelio ir konstrukcijos (2.2 pav.).

2.2 pav. Garso sklidimo pro susidariusius konstrukcijos tarpus patikrinimas
Fig. 2.2. Check of noise spread through gaps formed in the structure



2.3 pav. Triukšmomačio momentinė garso skalė
Fig. 2.3. Instantaneous sound scale of the sound level meter

Triukšmomatis vedamas pagal konstrukcijos ir narvelio kraštus kaip pavaizduota 2.2 pav. ir stebima momentinė triukšmomačio skalė, pavaizduota 2.3 pav. Ši skalė parodo momentinį per laiką nesuintegruotą ekvivalentinį garso lygį. Jeigu konstrukcija triukšmo slopinimo kameros tiriamajame lange sumontuota sandariai ir garsas nepraeina per konstrukcijos kraštus, tada momentinis garsas išlieka tokio paties lygio visose konstrukcijos vietose. Jei nustatoma, kad garsas veržiasi per konstrukcijos tarpus, tada ji išardoma ir montuojama iš naujo.

Triukšmo slopinimo kameros foninio triukšmo lygiai, dB

Prieš atliekant tyrimus triukšmą slopinančioje kameroje, išmatuojamas kameros foninis triukšmo lygis, kurį sąlygoja aplinkos triukšmas. Ekvivalentinis fono triukšmo lygis triukšmo slopinimo kameroje gautas 14,0 dBA, o dažnių juostoje nuo 100 Hz iki 3150 Hz triukšmas pateiktas 2.1 lentelėje.

2.1. lentelė. Foninio triukšmo lygiai triukšmą slopinančioje kameroje
Table. 2.1. Background noise levels in a noise suppression chamber

Dažnis, Hz	Triukšmo lygis, dB
100	18,9
125	9,1
160	3,2
200	2,0
250	0
315	0
400	0
500	0
630	0
800	0
1000	0
1250	0,8
1600	1,7
2000	2,6
2500	3,6
3150	4,6

Prieš pradedant triukšmo tyrimus, patikrinama, ar triukšmą slopinančioje kameroje esantis triukšmo lygis atitinka reikalavimus foniniam triukšmui: visose mikrofono išdėstymo vietose fono triukšmo lygis visose pasirinktosios dažnių srities juostose turi būti bent 10 dB mažesnis nei bandomojo šaltinio garso slėgio lygis, oro temperatūra matavimo metu neturi būti žemesnė negu 15 ºC ir ne aukštesnė kaip 30 °C.

Akustiniams tyrimams naudojama įranga

Akustinėms konstrukcijų savybėms triukšmo slopinimo kameroje tirti naudota Danijoje pagaminta Bruel&Kjaer matavimo įranga.

2.2. lentelė. Triukšmo tyrimams naudojama įranga
Table. 2.2. Equipment used for noise research

Eil. Nr.	Techninė arba programinė įranga	Modelis
1.	Garso mikrofonų kalibratorius	4294
2.	Realaus laiko garso spektro analizatorius Bruel&Kjaer mediator	2260 D
3.	Mikrofonai Bruel&Kjaer	4189
4.	Omnipower Omnidirectional garso šaltinis (su trikoju)	4292 (UA1690)
5.	Galios stiprintuvas (300W)	2716
6.	Taptavimo mašina	
7.	Programinė įranga Qualifier, pastatų akustikos ataskaitų ruošimui ir duomenų apdorojimui	BZ 7210
8.	Aplinkos sąlygų matavimo prietaisas Testo	452

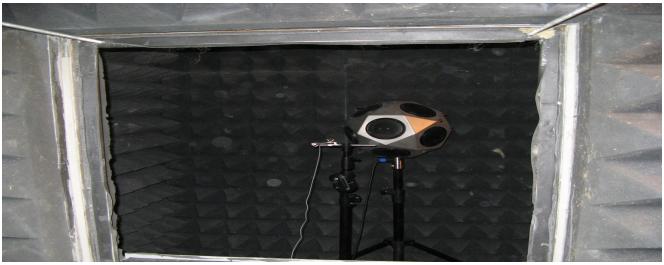
Prietaisas turi du matavimo kanalus, todėl galima vienu metu matuoti garsą dviem mikrofonais, išdėstytais skirtinguose taškuose. Garso lygį matuojant Bruel&Kjaer mediator 2260 ir 2238 matuokliais, santykinė matavimo paklaida yra ±1,5%. Dėl įmontuoto procesoriaus ir specializuotų programų su prietaisu būtina statistiškai apdoroti matavimo rezultatus.

Duomenims apdoroti naudota programinė įranga BZ 7210 Qualifier. Šios programinės įrangos galimybės:

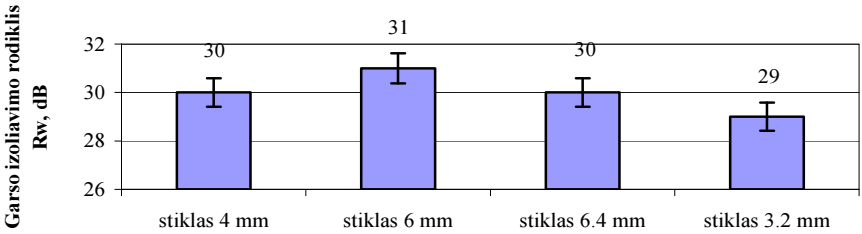
- realaus laiko 1/1 arba 1/3 oktavos diapazoninė analizė;
- triukšmo charakteristikų grafinis vaizdavimas, naudojant nustatytas žymes;
- garso įrašymas;
- statistinis paklaidų apskaičiavimas.

Skirtingo storio stiklo garso izoliacijos savybių tyrimas

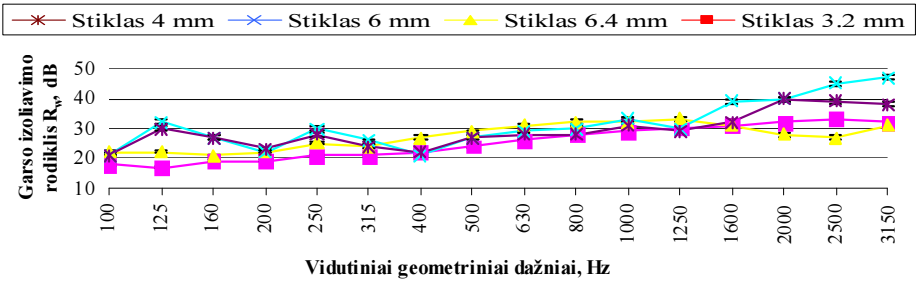
Siekiant įsitikinti triukšmo slopinimo kameroje atliktų bandymų rezultatų atitikimu tyrimų rezultatams natūrinėmis sąlygomis, atlikti bandymai su gerai izoliuotu stiklu, kaip pavaizduota 2.4 paveiksle. Stiklas pasirinktas dėl stabilių jo garso izoliavimo savybių. Viengubo stiklo garso izoliacija mažai keičiasi kintant stiklo storiui.



2.4 pav. Stiklo akustinių savybių tyrimas, triukšmo slopinimo kameroje
Fig 2.4. Research on the acoustic qualities of glass in a noise suppression chamber



2.5 pav. Garso izoliacijos priklausomybė nuo stiklo storio
Fig. 2.5. Dependence of sound insulation on glass thickness

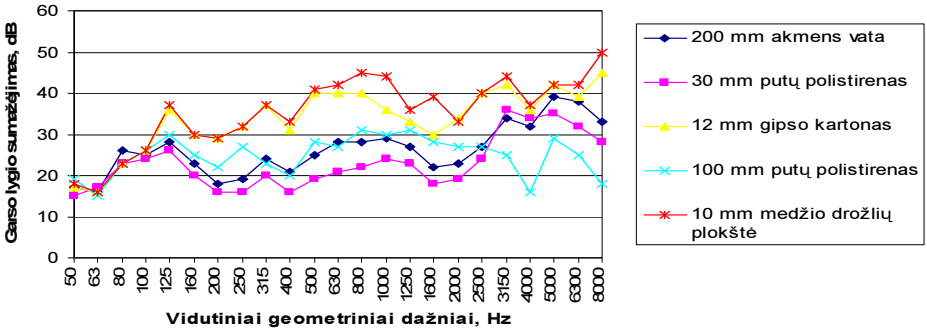


2.6 pav. Garso izoliacijos priklausomybės nuo stiklo storio dažninės charakteristikos
Fig. 2.6. Dependences of sound insulation on the frequency characteristics of glass `thickness

2.5 ir 2.6 paveiksluose pavaizduoti 6; 4; 6,4 ir 3,2 mm storio stiklo garso izoliavimo rodikliai. VGTU triukšmo slopinimo kameroje stiklo garso izoliacijos rodikliai matuoti panaudojus 6 ir 4 mm storio stiklą, o Danijos laboratorijoje išmatuoti garso izoliacijos rodikliai, panaudojus 6,4 ir 3,2 mm storio stiklą. Nustatyta, kad, stiklo storiui padidėjus dvigubai, izoliavimo koeficientas padidėjo tik 1 dB. Tai nulemia akustinė stiklo savybė atspindėti garsą jo nesugeriant, o garso perdavimas per stiklą pasireiškia stiklo svyravimais, kuriuos sukelia garso bangų energija. Storesnis stiklas yra standesnis ir mažiau svyruoja geriau izoliuodamas garsą. Tai matyti išmatavus 6 ir 4 mm storio stiklo garso izoliacijos rodiklius. VGTU triukšmo slopinimo kameroje išmatuoti skirtingo storio stiklų garso izoliavimo duomenys, kaip matyti iš 2.5 pav., 1 dB didesni už Danijos laboratorijoje atliktų tyrimų rezultatus. Tam įtakos turėjo ir nevienodas stiklo storis, ir skirtingas stiklo sumontavimas tiriamajame lange. Tačiau paklaidos ribose duomenys koreliuoja tarpusavyje.

2.2. Lengvų konstrukcijų garso izoliavimo tyrimo rezultatai

Pastatų šiluminei izoliacijai ir sienų apdailai bei triukšmui sumažinti juose plačiai naudojamas putų polistirenas, akmens vata, medžio drožlių plokštės ir gipso kartonas. Tačiau šios medžiagos pasižymi skirtingomis triukšmą izoliuojančiomis savybėmis. Siekiant ištirti šių medžiagų akustines savybes, buvo atlikti eksperimentiniai tyrimai triukšmo slopinimo kameroje. Tyrimo rezultatai geometrinių dažnių juostose pavaizduoti 2.7 paveiksle.



2.7 pav. Garso lygio sumažėjimo įvairiose medžiagose dažninė charakteristika
Fig. 2.7. Frequency characteristics of sound level reduction in various materials

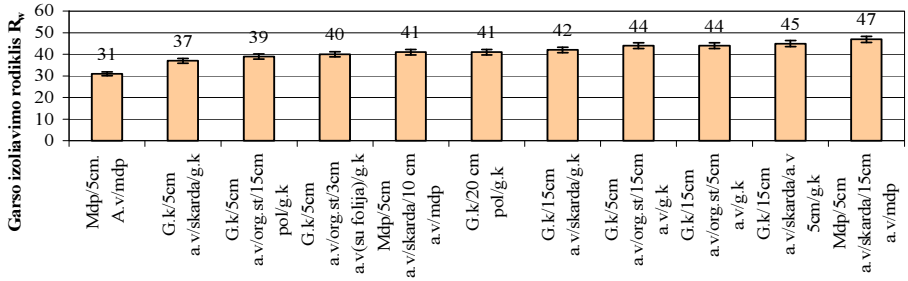
Esant žemiems dažniams 50–500 Hz, gipso kartonas ir medžio drožlių plokštė garso lygį susilpnino nuo 18 iki 40 dB, mažiausiai garsą sumažino

30 mm storio putų polistirenas. Esant vidutiniams 630–2000 Hz dažniams, geriausiomis garso ribojimo savybėmis pasižymėjo medžio drožlių plokštė, kuri garso lygį sumažino iki 8 dB, t. y. geriau negu gipso kartonas. Esant aukštiems dažniams nuo 2500 iki 5000 Hz, gipso kartonas ir medžio drožlių plokštė garso lygį sumažino beveik identiškai: nuo 40 iki 45 dB. Esant aukštesniems negu 5000 Hz dažniams, medžio drožlių plokštė garso lygį 5 dB izoliavo geriau negu gipso kartono plokštė.

Triukšmo slopinimo kameroje išmatuoti dažniausiai naudojamų pastatuose triukšmui slopinti medžiagų – polistireno, medžio drožlių plokščių, gipso kartono ir akmens vatos – garso izoliacijos rodikliai. Ištyrus šių medžiagų akustines savybes, nustatytos šių medžiagų, kaip kompozitų, akustinės savybės, o tyrimų rezultatai pateikti 2.8 pav.

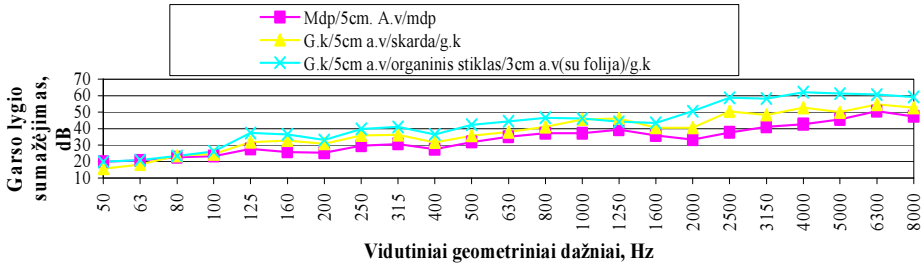
Iš dviejų medžio drožlių plokštės lakštų sudarius konstrukciją su tarpiniu 5 cm akmens vatos sluoksniu, orinis garso izoliavimo rodiklis siekė 31 dB. Kita konstrukcija sudaryta iš dviejų 1,2 cm gipso kartono lakštų, 5 cm akmens vatos sluoksnio ir į konstrukciją papildomai įterpto 2 mm skardos lakšto, kuris atspindi garsą. Šiuo atveju garso izoliavimo rodiklis siekė 37 dB. Sudarius konstrukciją iš dviejų 1,2 cm gipso kartono lakštų, 5 cm akmens vatos sluoksnio, organinio stiklo, 15 cm polistireno, oro garso izoliavimo rodiklis, lyginant su prieš tai tirta konstrukcija, padidėjo 2 dB ir siekė 39 dB.

Konstrukcijas sumontavus iš 1,2 cm gipso kartono, 5 cm akmens vatos, 5 mm storio organinio stiklo, 3 cm akmens vatos su folija ir gipso kartono, garso izoliavimo rodiklis R_w siekė 40 dB. Sudarius konstrukciją iš dviejų medžio drožlių plokščių su 5 ir 10 cm akmens vatos sluoksniu, tarp kurių įstatyta garsą turinti atspindėti 2 mm storio skarda, išmatuotas garso izoliavimo rodiklis siekė 41 dB. Toks pat garso izoliavimo rodiklis nustatytas panaudojus konstrukciją iš gipso kartono, 20 cm polistireno ir antro gipso kartono sluoksnio. Siekiant suploninti konstrukciją ir išlaikyti garso izoliacijos lygį, pasiektą panaudojus konstrukciją su polistirenu, pastarasis buvo pakeistas į 15 cm akmens vatos sluoksnį su skardos lakštu, o garso izoliavimo rodiklis R_w šitokiai konstrukcijai siekė 42 dB. Siekiant padidinti konstrukcijos garso izoliavimo rodiklį, ji sudaryta iš dviejų gipso kartono lakštų, su 5 ir 15 cm akmens vatos sluoksniais, su viduje tarp jų įtaisytu organinio stiklo lakštu. Orinio garso izoliavimo rodiklis tokiai konstrukcijai siekė 44 dB. Konstrukcijoje iš gipso kartono ir dviejų skirtingo storio sluoksnių akmens vatos, su organiniu stiklu tarp jų, organinį stiklą pakeitus į plonesnį skardos lakštą, garso izoliavimo rodiklis padidėjo iki 45 dB. Kadangi geresnėmis garso izoliavimo savybėmis, matuojant pavienes medžiagas, išsiskyrė medžio drožlių plokštė, konstrukcijoje, kuri pasižymėjo 45 dB garso izoliavimo rodikliu, gipso kartonas pakeistas į medžio drožlių plokštę. Šios konstrukcijos garso izoliavimas padidėjo iki 47 dB.



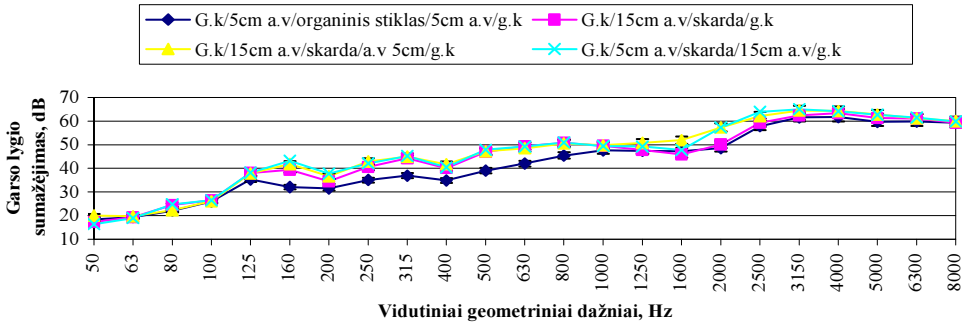
2.8 pav. Įvairių konstrukcijų garso izoliavimo rodikliai: Mdp. – medžio drožlių plokštė; G.k. – gipso kartonas; org. st. – organinis stiklas; pol. – polistirenas; a.v. – akmens vata

Fig. 2.8. Sound reduction indices for different structures: WCb – wood chipboard; G.cb – gypsum cardboard, gl. – perspex; pol. – Polystyrene, r.w. – rock wool



2.9 pav. Garso lygių sumažėjimas gipso kartono ir medžio drožlių plokščių konstrukcijose

Fig. 2.9. Reduction of sound levels in gypsum cardboard and wood chipboard structures



2.10 pav. Garso lygių sumažėjimas gipso kartono konstrukcijose

Fig. 2.10. Reduction of sound levels in gypsum cardboard structures

Konstrukcijų savybės, leidžiančios sumažinti garso lygį oktaviniuose dažniuose, pavaizduotos 2.9 ir 2.10 pav. Kuo geriau medžiagos ar konstrukcijos sumažina garso lygį įvairiuose dažniuose, tuo geresnis šitų konstrukcijų garso izoliacijos rodiklis. Esant žemiems dažniams nuo 50 iki 100 Hz, visų konstrukcijų akustinės savybės beveik vienodos. Aukščiausiu garso sumažinimu pasižymėjo konstrukcija iš gipso kartono / 5 cm akmens vatos / 1 cm organinio stiklo / 3 cm akmens vatos su folija/gipso kartono. Ši konstrukcija garso lygį sumažino iki 40 dB, esant garso dažniams iki 500 Hz ir iki 60 dB, esant aukštiems dažniams (2500–8000 Hz).

Tiriant lengvas konstrukcijas garsui mažinti, geriausiomis garso izoliavimo savybėmis tarp pavienių medžiagų pasižymėjo medžio drožlių plokštės. Akmens vata geriau mažina garsą negu polistirenas, o iš nagrinėtų daugiasluoksnių konstrukcijų geriausiomis garso izoliavimo savybėmis, esant aukštiems ir žemiems dažniams, pasireiškė minėta konstrukcija iš gipso kartono.

2.3. Pastato vidinių pertvarų akustinių savybių tyrimo rezultatai

2.3.1. Pertvarų, sudarytų iš keramzitinių blokelių, akustinių savybių tyrimo rezultatai

Tyrimai atlikti VGTU AAK triukšmo slopinimo kameroje, analizuotos konstrukcijų garso izoliavimo savybės. Tiriamosios pertvaros, naudojamos gyvenamuosiuose pastatuose, privalėjo atitikti bent C garso izoliavimo klasę. Nagrinėtos dvigubos sienos savybės, sumontuotos iš 3 MPa keramzitinių blokelių:

a) su oro tarpu, užpildytu 75 mm akmens vata ir 10 mm tinko sluoksniu;

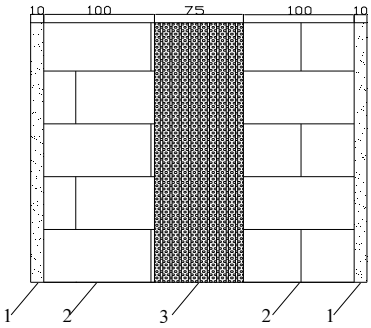
b) sienelę iš abiejų pusių papildomai uždengus 12 mm gipso kartono plokštėmis;

c) dviejų sluoksnių sienelę su 50 mm oro tarpu ir 50 mm akmens vatos sluoksniu, bei sienelę iš abiejų pusių užtinkavus 15 mm tinko sluoksniu;

d) dvigubą sienelę su 50 mm oro tarpu ir 50 mm akmens vatos sluoksniu bei sienelę, iš abiejų pusių užtinkavus 15 mm tinko sluoksniu, ir sienelę, iš abiejų pusių papildomai užtrynus 2 mm glaisto sluoksniu;

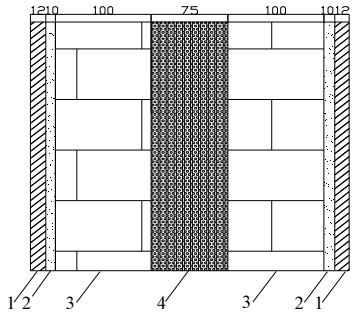
e) dvigubą sienelę su 50 mm oro tarpu ir 50 mm akmens vatos sluoksniu bei sienelę, iš abiejų pusių užtinkavus 15 mm tinko sluoksniu, sienelę, iš abiejų pusių papildomai užtrynus 2 mm glaisto sluoksniu ir iš priimamojo garso patalpos pusės uždengus gipso kartono plokšte.

Tyrimui paruoštų sienelių schemos pateiktos 2.11–2.15 pav.



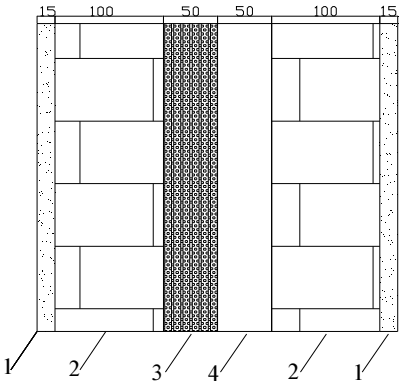
2.11 pav. Tiriamosios sienelės schema: 1) – 10 mm tinkas; 2) – keramzitiniai blokeliai „FIBO“ (3 MPa), (100×185×490); 3) – 75 mm akmens vata „Paroc“

Fig. 2.11. Chart of the wall under investigation: 1) – 10 mm plaster; 2) – expanded clay tiles “FIBO” (3 MPa), (100×185×490); 3) – 75 mm rock wool “Paroc”



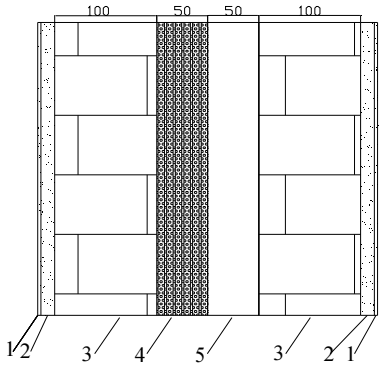
2.12 pav. Tiriamosios sienelės schema: 1) – 12 mm gipso kartono plokštė; 2) – 10 mm tinkas; 3) – keramzitiniai blokeliai „FIBO“ (3 MPa), (100×185×490); 4) – 75 mm akmens vata „Paroc“

Fig. 2.12. Chart of the wall under investigation: 1) – 12 mm gypsum cardboard ; 2) – 10 mm plaster; 3) – expanded clay tiles “FIBO” (3 MPa), (100×185×490); 4) – 75 mm rock wool “Paroc”



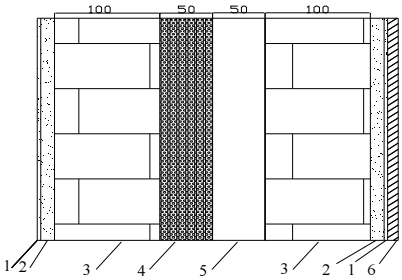
2.13 pav. Tiriamosios sienelės schema: 1) – 10 mm tinkas; 2) – keramzitiniai blokeliai „FIBO“ (3 MPa), (100×185×490); 3) – 50 mm akmens vata „Paroc“; 4) – 50 mm oro tarpas

Fig. 2.13. Chart of the wall under investigation: 1) – 10 mm plaster; 2) – expanded clay tiles “FIBO” (3 MPa), (100×185×490); 3) – 50 mm rock wool “Paroc”; 4) 50 mm air space



2.14 pav. Tiriamosios sienelės schema: 1) – 2 mm glaistas; 2) – 10 mm tinkas; 3) – keramzitiniai blokeliai „FIBO“ (3 MPa), (100×185×490); 4) – 50 mm akmens vata „Paroc“; 5) – 50 mm oro tarpas

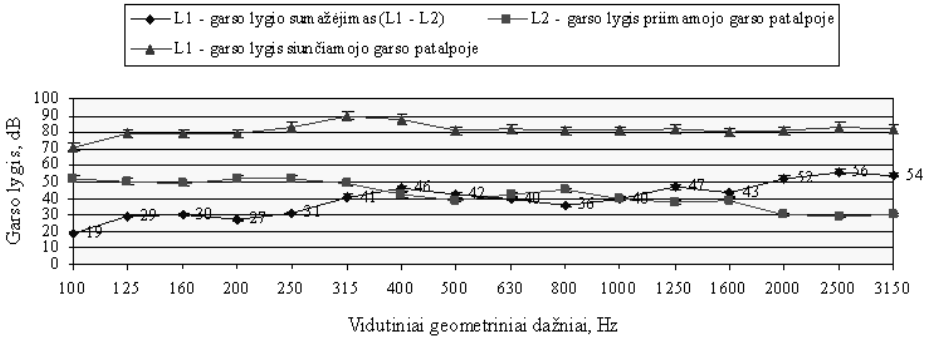
Fig. 2.14. Chart of the wall under investigation: 1) – 2 mm putty; 2) – 10 mm plaster; 3) – expanded clay tiles “FIBO” (3 MPa), (100×185×490); 4) – 50 mm rock wool “Paroc”; 5) – 50 mm air space



2.15 pav. Tiriamosios sienelės schema:
1) – 2 mm glaistas; 2) – 10 mm tinkas; 3) – keramzitiniai blokeliai „FIBO“ (3 MPa), (100×185×490); 4) – 50 mm akmens vata „Paroc“; 5) – 50 mm oro tarpas; 6) – gipso kartono plokštė

Fig. 2.15. Chart of the wall under investigation:
1) – 2 mm putty; 2) – 10 mm plaster; 3) – expanded clay tiles “FIBO” (3 MPa), (100×185×490); 4) – 50 mm rock wool “Paroc”; 5) – 50 mm air space; 6) – gypsum cardboard

Pirmiausia eksperimentas atliktas triukšmo slopinimo kameroje sumontavus dvigubą keramzitinių blokelių sienelę ir tarpą tarp blokelių užpildžius 75 mm akmens vatos sluoksniu, kaip pavaizduota 2.11 pav. Sumontuotos sienelės garso izoliacinės savybės buvo tiriamos panaudojant baltą garsą, kuris turi beveik vienodas vertes visuose dažniuose. Garso izoliavimo rodiklis R_W siekė 42 dB. Tiriant nuo 100 Hz iki 400 Hz dažniuose, nustatyta, kad minimaliausiai (21 dB) triukšmo lygis sumažėjo esant 100 Hz dažniui, daugiausia (42 dB) garso lygis sumažinamas esant 400 Hz dažniui (2.16 pav.).

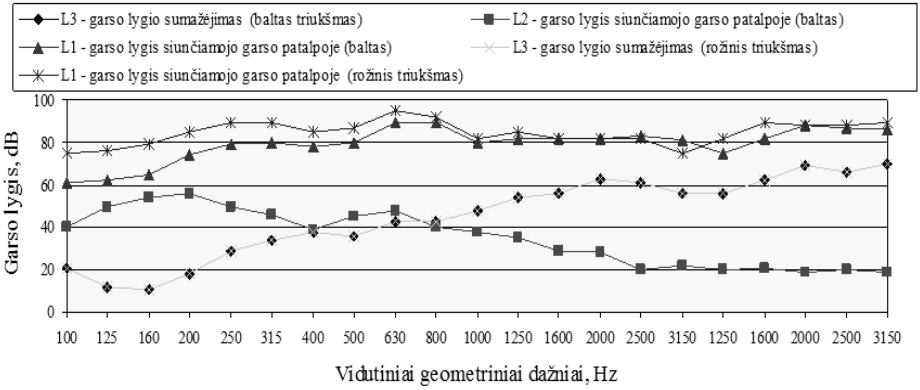


2.16 pav. Garso lygio sumažėjimas vidutinių geometrinių dažnių juostoje, tarpą tarp keramzitinių blokelių užpildžius 75 mm akmens vatos sluoksniu, o iš išorės blokelius padengus 10 mm tinko sluoksniu (pagal 2.11 pav.)

Fig. 2.16. Sound level reduction in the band of average geometrical frequencies when spaces between expanded clay tiles are filled with 75 mm layer of rock wool and external tiles are covered with 10 mm layer of plaster (In Figure 2.11)

Esant vidutiniams dažniams (nuo 500 iki 1000 Hz), garso lygis sumažėja nuo 37 iki 45 dB.

Geriausia garso sugertimi sienelė pasižymėjo esant aukštiems dažniams, kur garso lygis sumažėja nuo 43 dB, esant 1600 Hz dažniui, iki 56 dB, esant 2500 Hz.



2.17 pav. Garso lygio sumažėjimas vidutinių geometrinių dažnių juostoje, tarpą tarp keramzitinių blokelių užpildžius 75 mm akmens vatos sluoksniu, sienelę iš abiejų pusių uždengus gipso kartono plokštėmis (pagal 2.12 pav.)

Fig. 2.17. Sound level reduction in the band of average geometrical frequencies when spaces between expanded clay tiles are filled with 75 mm layer of rock wool and the wall is covered with gypsum cardboards from both sides (In Figure 2.12)

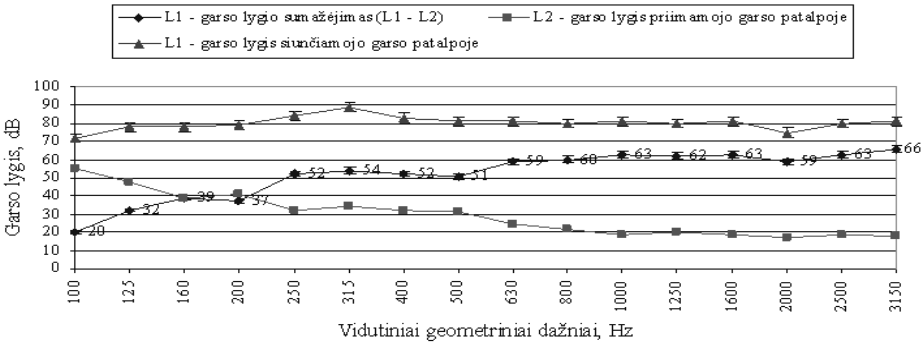
Kadangi 2.11 pav. pavaizduota sienelė nepakankamai gerai izoliuoja garsą, ji iš abiejų pusių buvo apdengta gipso kartono plokštėmis, kurios įprastai naudojamos pastatuose ir pasižymi geromis garso izoliacinėmis savybėmis. Sienos vaizdas pateiktas 2.12 pav. Sienelės garso izoliacinės savybės buvo tiriamos baltu ir rožiniu garsu (baltas garsas visuose dažniuose turi vienodas vertes, o rožinis garsas didesnes vertes turi žemuose dažniuose). Garso lygio sumažėjimo dažniuose rezultatai pavaizduoti 2.17 pav. Sienos garso izoliavimo rodiklis siekė 48 dB, tačiau jis nepakankamas garso izoliacijos komfortui pasiekti.

Mažiausias garso lygio sumažėjimas (12–13 dB) gautas esant 125–160 Hz dažniams. Esant 500–1000 Hz vidutinių dažnių juostai, garso lygio sumažėjimas kito nuo 36 iki 49 dB. Didžiausias garso lygio sumažėjimas išmatuotas esant 800 Hz dažniui ir siekė 49 dB. Esant aukštiems dažniams, garso lygio izoliavimas didėjo nuo 43 iki 63 dB. Aukščiausias garso lygio sumažėjimas (iki 70 dB) išmatuotas esant aukštiems 4000–5000 Hz dažniams.

Nors rožinis garsas turi didesnes vertes, esant žemiems dažniams, tačiau sienelės garso izoliacija tokia pati, kaip balto garso, visoje dažnių juostoje. Toliau tyrimai buvo atliekami tik su baltu garsu.

Triukšmo slopinimo kameroje sumontuota sienelė iš dviejų keramzitinių blokelių sluoksnių, su 50 mm oro tarpu ir 50 mm akmens vatos sluoksniu, oro tarpas tarp akmens vatos ir blokelių paliktas, kad konstrukcija nebūtų vientisa ir sunkiau perduotų garsą. Garso izoliacijai sustiprinti, konstrukcija iš abiejų pusių užtinkuota 10 mm tinko sluoksniu, kuris padidina jos masę bei užpildo susidariusius tarpus. Remiantis masės dėsniu, nustatyta, kad, didėjant pertvaros masei dvigubai, garso izoliacija padidėja 6 dB per oktavą, todėl 2.13 pav. pavaizduotos konstrukcijos išmatuotas garso izoliavimo rodiklis R_w siekė 53 dB. Oro tarpas, esantis tarp atskirų keramzito sienelės sluoksnių, padidino garso izoliaciją, o akmens vata, pasižyminti geromis garso sugerties savybėmis, sugėrė dalį į ją kritusio garso.

Ši sienelė taip pat pasižymėjo geresne garso izoliacija žemuose dažniuose (2.18 pav.): esant dažniams nuo 125 iki 400 Hz, garsas sumažėja nuo 20 iki 54 dB. Aukštas garso lygio sumažėjimas nustatytas esant 315 Hz dažniui ir siekė 54 dB. Vidutiniuose dažniuose (500–1000 Hz) garso lygis sumažėja nuo 51 iki 63 dB. Aukštuose dažniuose (1250–3150 Hz) garso lygis sumažėja nuo 59 iki 66 dB. Didžiausias garso lygio sumažėjimas nustatytas esant 3150 Hz dažniui.

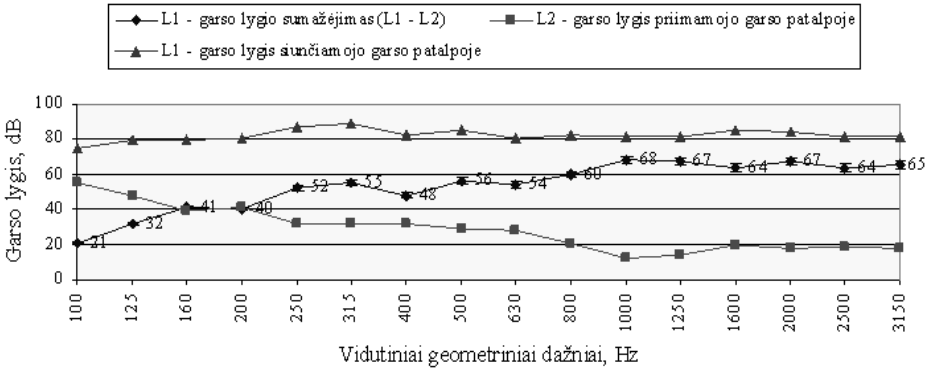


2.18 pav. Garso lygio sumažėjimas vidutinių geometrinių dažnių juostoje, tarpą tarp keramzitinių blokelių užpildžius 50 mm akmens vatos sluoksniu, palikus 50 mm oro tarpą, sienelę užtinkavus iš abiejų pusių (pagal 2.13 pav.)

Fig. 2.18. Sound level reduction in the band of average geometrical frequencies when spaces between expanded clay tiles are filled with 50 mm layer of rock wool by leaving 50 mm air space and the external wall is plastered from both sides (In Figure 2.13)

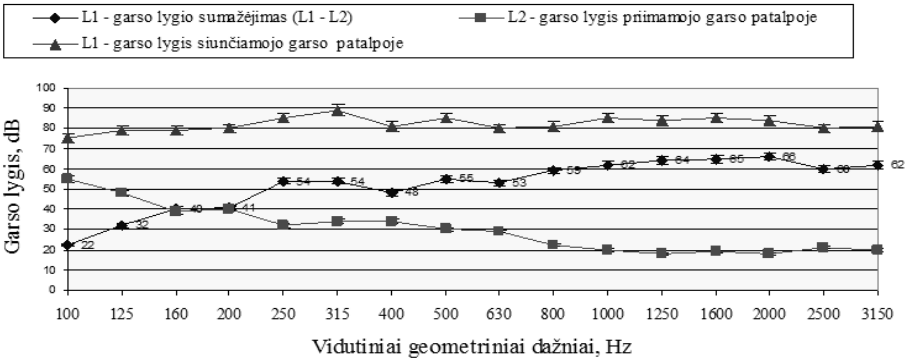
Siekiant pagerinti garso izoliavimo rodiklį, 2.13 pav. pavaizduota konstrukcija, iš abiejų pusių buvo užtrinta 2 mm tankiu glaistu. Konstrukcijos (2.14 pav.) garso izoliavimo rodiklis R_w padidėjo 1 dB ir siekė 54 dB. Konstrukcijos garso

lygių sumažėjimas dažniuose pavaizduotas 2.19 pav. Esant dažniams nuo 100 iki 400 Hz, garsas sumažėjo nuo 21 iki 55 dB. Esant vidutiniams dažniams nuo 500 iki 1000 Hz, garso sugertis siekė nuo 51 iki 68 dB, o esant aukštiems dažniams (nuo 1250 iki 3150 Hz) garso lygis sumažėjo iki 68 dB.



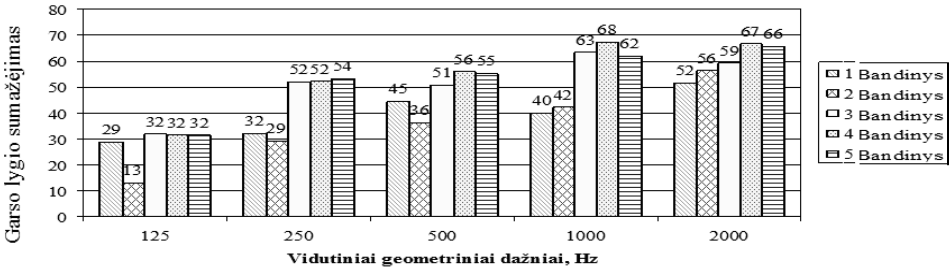
2.19 pav. Garso lygio sumažėjimas vidutinių geometrinių dažnių juostoje, tarpą tarp keramzitinių blokelių užpildžius 50 mm akmens vatos sluoksniu, palikus 50 mm oro tarpą, sienelę užtinkavus ir užtrynus glaistu iš abiejų pusių (pagal 2.14 pav.)

Fig. 2.19. Sound level reduction in the band of average geometrical frequencies when spaces between expanded clay tiles are filled with 50 mm layer of rock wool by leaving 50 mm air space and the wall is plastered and puttied from both sides (In Figure 2.14)



2.20 pav. Garso lygio sumažėjimas vidutinių geometrinių dažnių juostoje, tarpą tarp keramzitinių blokelių užpildžius 50 mm akmens vatos sluoksniu, palikus 50 mm oro tarpą, sienelę užtinkavus ir užtrynus glaistu iš abiejų pusių iš tyliosios pusės uždėjus gipso kartono plokštę (pagal 2.15 pav.)

Fig. 2.20. Sound level reduction in the band of average geometrical frequencies when spaces between expanded clay tiles are filled with 50 mm layer of rock wool by leaving 50 mm air space and the wall is plastered and puttied from both sides and covered with a gypsum cardboard from the silent side (In Figure 2.15)



2.21 pav. Garso lygio sumažėjimas vidutinių geometrinių dažnių juostoje, panaudojant skirtingas pertvaras

Fig. 2.21. Sound level reduction in the band of average geometrical frequencies by using different partitions

Iš abiejų pusių užglaisčius sienelę 2 mm glaisto sluoksniu, iki 4 dB pagerėjo garso sugertis, esant žemiems ir aukštiems dažniams, lyginant su anksčiau tirtomis sienelėmis.

Sienelę iš tyliosios pusės uždengus gipso kartono plokšte, garso izoliavimo rodiklis R_w siekė 54 dB (2.20 pav.). Garso lygis esant žemiems dažniams sumažėjo nuo 22 iki 54 dB, esant vidutiniams dažniams garso lygis sumažėjo nuo 55 iki 62 dB, o esant aukštiems dažniams – iki 66 dB (2000 Hz dažniui).

Remiantis 2.21 pav. duomenimis, galima teigti, kad esant žemiems 125 ir 250 Hz dažniams, geriausiai garsą sumažino pertvaros su 50 mm oro ir 50 mm akmens vatos sluoksniu. Tai nulėmė pertrauktos konstrukcijos, nes masyviosios konstrukcijos dalys neturi tiesioginio sąlyčio tarpusavyje ir sunkiau persiduoda savitieji garso bangų svyravimai.

Esant 500 Hz dažniui, aukščiausias garso lygio sumažinimas (55 ir 56 dB) gautas sienelės tarpą tarp keramzitinių blokelių užpildžius 50 mm akmens vatos sluoksniu, palikus 50 mm oro tarpą, sienelę užtinkavus ir užtrynus glaistu iš abiejų pusių, bei tą pačią sienelę iš tyliosios pusės uždengus gipso kartono plokšte (2.14 ir 2.15 pav.).

Esant 1000 Hz dažniui, didžiausiu, t. y. iki 68 dB, garso sumažinimu pasižymėjo sienelė, kurioje tarpas tarp keramzitinių blokelių užpildytas 50 mm akmens vatos sluoksniu bei paliktas 50 mm oro tarpas iš abiejų pusių, sienelę užtinkavus ir užtrynus glaistu, o mažiausias (40 dB) garso lygio sumažėjimas išmatuotas tarpą tarp keramzitinių blokelių užpildžius 75 mm akmens vatos sluoksniu, o iš išorės blokelius padengus 10 mm tinko sluoksniu.

Esant 2000 Hz dažniams, didžiausiu, t. y. iki 67 dB, garso lygio sumažinimu pasižymėjo sienelė, kurioje tarpas tarp keramzitinių blokelių užpildytas 50 mm akmens vatos sluoksniu bei paliktas 50 mm oro tarpas, sienelę iš abiejų pusių užtinkavus ir užtrynus glaistu, o mažiausias 52 dB garso lygio sumažėji-

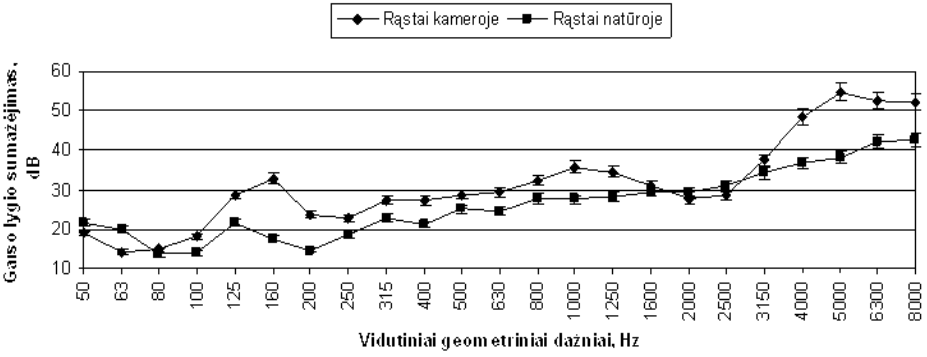
mas gautas tarpą tarp keramzitinių blokelių užpildžius 75 mm akmens vatos sluoksniu, o iš išorės blokelius padengus 10 mm tinko sluoksniu.

Tiriant keramzitines pertvaras triukšmo slopinimo kameroje, nustatyta, kad dviguba keramzitinė pertvara su oro tarpu nepasiekia tokio garso izoliavimo lygio, kad galėtų būti naudojama patalpose kaip tarpbutinė pertvara. Tačiau tinkama garso izoliacija, tenkinanti akustinį komfortą, gauta tik užpildžius dvigubos keramzitinės sienelės oro tarpą akmens vata, kadangi jos garso sugertis geresnė, o nelygų keramzitinių pertvarų paviršių užtinkavus 10 mm tinko sluoksniu bei užtrynus glaistu ir iš vienos pusės uždengus gipso kartono plokšte.

2.3.2. Rąstinės sienos garso izoliavimo tyrimo rezultatai

Keičiantis statybų kultūrai, didėjant aplinkos užterštumui, vis dažniau vietoje plytų mūro namų statyboje naudojamos naujos kartos medžiagos, kaip antai: silikatiniai blokeliai, karkasinės konstrukcijos ir kitos. Anksčiau Lietuvoje, kaip ir Skandinavijos šalyse, namai statyti iš rąstų, kurie šiandien vėl populiarėja, kaip ekologiški ir statomi iš atsinaujinančių išteklių.

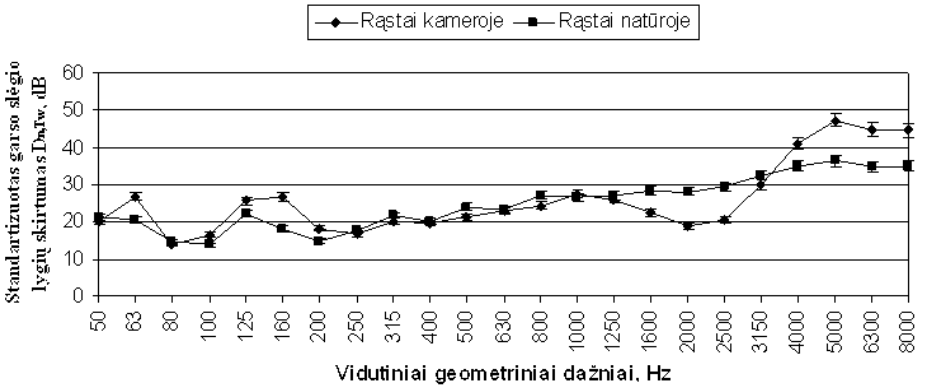
Matavimai buvo atlikti rąstiniame name, pastatytame iš stačiakampių rąstų, kurių skersmuo 15 cm, tiriamos sienos plotas 10 m². Matuotas standartizuotas garso slėgio lygio skirtumas $D_{nT,W}$. Analoginė rąstinė siena sumontuota triukšmo slopinimo kameroje (2.29 pav.) ir tirtas standartizuotas garso slėgio lygio skirtumas $D_{nT,W}$. Natūroje tirtos sienos standartizuotas garso slėgio lygio skirtumas gautas 26 dB, o triukšmo slopinimo kameroje 29 dB. Standartizuotų garso slėgio lygių skirtumo neatitikimas tarp tyrimų – 3 dB.



2.22 pav. Garso lygio sumažėjimo rąstinėje sienoje dažninė charakteristika
Fig. 2.22. Frequency characteristics of sound level reduction in a log wall

2.22 paveiksle pateikti rąstinės sienos triukšmo slopinimo kameroje ir natūroje tyrimo rezultatai. Natūroje garso izoliavimo rezultatai nustatyti aukštesni iki

5 dB, tik esant žemiems 50–63 Hz ir aukštiems 2000–2500 Hz dažniams. Tam įtakos turi skirtinga medžiagos struktūra ir sumontavimas, nes natūroje sumontuotos sienos rąstai stipriau įveržti.



2.23 pav. Standartizuoto garso slėgio lygių skirtumo $D_{nT,W}$ rodikliai perskaičiuoti kiekvienai dažnio juostai natūriniuose ir kameriniuose tyrimuose

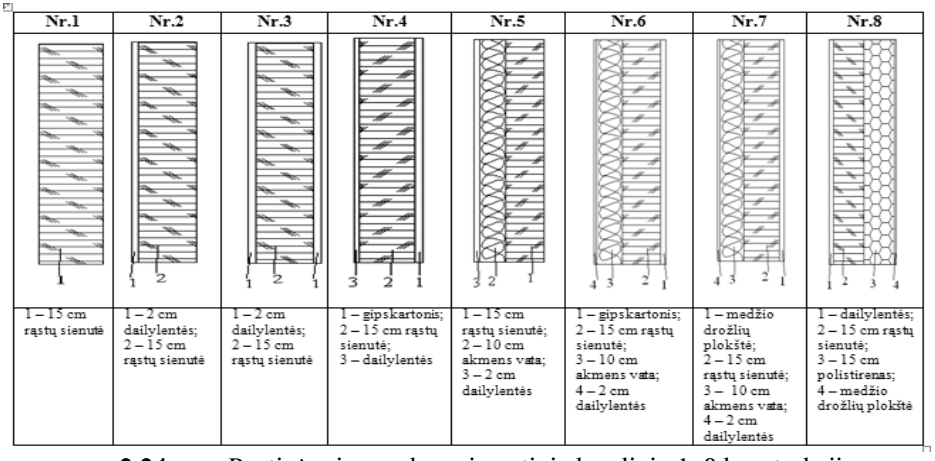
Fig. 2.23. The indices of standardised pressure level difference for airborne sound $D_{nT,W}$ recalculated for each frequency band during natural and chamber investigations

Rąstinės sienos standartizuoto garso slėgio lygio skirtumo $D_{nT,W}$ tyrimo rezultatai natūroje ir kameroje pateikti 2.23 paveiksle. Remiantis standartizuotu garso slėgio lygių skirtumu, garso izoliavimo rodiklių rezultatai panašūs, tik esant 250–1250 Hz dažniams. Kameroje sumontuotoje sienoje atsiradęs rezonansas, esant 2000–2500 Hz dažniams, sumažina standartizuotą garso slėgio lygio skirtumą iki 10 dB.

Skirtingi rezultatai, matuojant natūroje ir triukšmo slopinimo kameroje, gaunami dėl skirtingų rąstų sugulimo ir susispaudimo natūraliomis sąlygomis ir triukšmo slopinimo kameroje. Kaip rodo Geretseno ir kitų tyrimai bei patirtis, kameroje ir natūroje išmatuoti garso izoliavimo rodikliai skiriasi nuo 3 iki 6 dB (Hongisto 2001; Jones 1976; Gerretsen 1979). Nustatytas pertvaros standartizuotas garso slėgio lygių skirtumas ($D_{nT,W}$ = 29 dB) yra nepakankamas, pertvaros C garso klasei (55 dB). Tačiau esant ilgalaikiam aplinkos garso slėgio lygiui (L_{dvn} = 50 dB), tokia išorinė atitvara atitinka reikalaujamą C garso klasę.

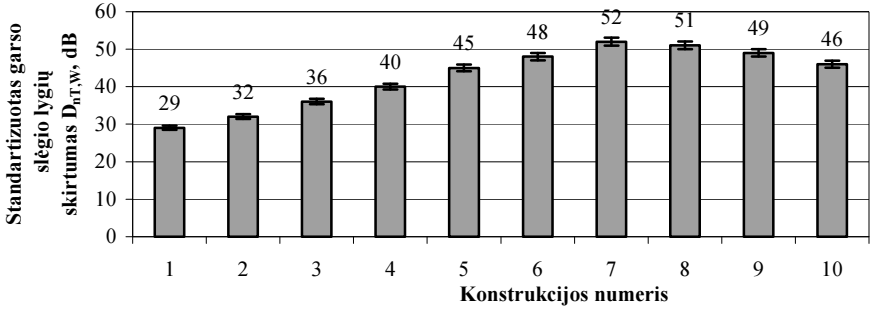
Natūrinėmis sąlygomis atlikti pertvaros akustinių savybių pagerinimo darbus yra sudėtinga, todėl atlikti tyrimai triukšmo slopinimo kameroje, siekiant nustatyti geriausią būdą rąstinės vidinės ir išorinės pertvaros akustinėms savybėms pagerinti. Kameroje rąstinė siena uždengiama dažniausiai rąstiniams namams dengti naudojamomis medžiagomis, pvz., ji aptaisyta 2 cm pločio dailylentėmis, tarp dailylenčių ir rąstų paliktas 2 cm oro tarpas, kuris padidina garso

izoliaciją. Sienelės, dengtos dailylentėmis, schema pateikta 2.24 pav. 2 konstrukcijoje. Išmatuotas garso slėgio lygių skirtumas $D_{nT,W}$ siekė 36 dB. Sekanti konstrukcija sudaryta rąstinę sieną dengiant dailylentėmis ir gipso kartono plokšte, kuri pasižymėjo geromis garso izoliacinėmis savybėmis, tiriant pavienių medžiagų garso izoliavimą. Išmatuotas standartizuotas garso slėgio lygių skirtumas 4 dB didesnis negu sieną dengiant tik dailylentėmis (2.30 pav.), sienos schema pavaizduota 2.24 pav. 4 konstrukcijoje. Geriau garsas izoliuotas dailylentes pakeitus gipso kartono plokšte. Kadangi, rąstinę sieną iš vienos ar dviejų pusių apdengus dailylentėmis ir gipso kartonu, garso izoliavimo rodiklis vis tiek gautas nepakankamas, siena buvo dengta garsą sugeriančiomis (akmens vata arba polistirenu) ir garsą izoliuojančiomis medžiagomis (dailylentėmis, medžio drožlių plokštėmis arba gipso kartonu).



2.24 pav. Rąstinės sienos eksperimentinių bandinių 1–8 konstrukcijos
Fig. 2.24. Structures of experimental samples 1–8 of a log wall

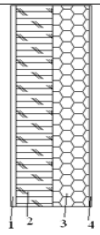
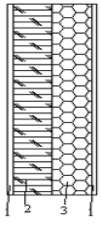
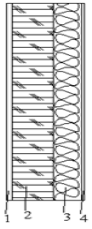
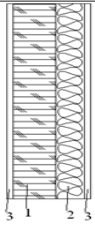
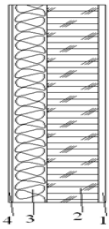
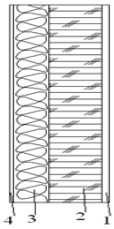
Sieną apdengus 10 cm akmens vatos sluoksniu ir dailylentėmis, kaip pavaizduota 2.24 pav. 5-oje konstrukcijoje, garso izoliavimo rodiklis siekė 45 dB (2.25 pav.). Siekiant padidinti sienos garso izoliavimą, minimaliai pastorinant ir pasunkinant sieną, konstrukcija iš kitos pusės papildomai buvo apdengta gipso kartono plokšte (2.24 pav. 6-oji konstrukcija). Standartizuotas garso slėgio lygis siekė 48 dB, t. y. pagerėjo 3 dB, lyginant su gipso kartonu nedengta konstrukcija. Sekanti, 7-oji, konstrukcija sudaryta panaudojus 10 cm akmens vatą, apkalus dailylentėmis bei apdengus medžio drožlių plokšte, kuri iš pavienių medžiagų išsiskyrė geriausiomis garso izoliacinėmis savybėmis. Tuomet standartizuotas garso slėgio lygių skirtumas siekė 52 dB.



2.25 pav. Konstrukcijų standartizuoto garso slėgio lygių skirtumo $D_{nT,W}$ tyrimo rezultatai (žr. 2.24 pav. ir 2.26 pav.)

Fig. 2.25. Research results of the standardised pressure level difference for airborne sound $D_{nT,W}$ for structures (see Figs. 2.24 and 2.26)

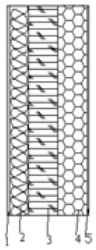
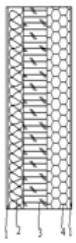
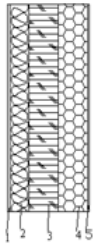
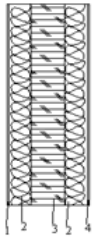
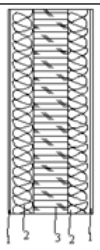
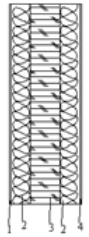
Kadangi pastatams apšiltinti ir garsui izoliuoti dažnai naudojamas polistirenas, 8–10 tyrimo konstrukcijose 10 cm storio akmens vata pakeista į 15 cm storio polistireną. Rąstinę sieną iš vienos pusės apdengus polistirenu ir apkalus dailylentėmis, o iš kitos – medžio drožlių plokšte, standartizuotas garso slėgio lygis siekė 51 dB. Medžio drožlių plokštę pakeitus gipso kartonu, kaip pavaizduota 2.26 pav. 9–oje konstrukcijoje, išmatuotas $D_{nT,W}$ rodiklis siekė 49 dB, t. y. 2 decibelais buvo mažesnis negu panaudojus medžio drožlių plokštę. Nustatytas 10 konstrukcijos (rąstinė siena su 15 cm polistirenu iš abiejų pusių apkalta 2 cm dailylentėmis) 46 dB standartizuotas garso slėgio lygių skirtumas.

Nr.9	Nr.10	Nr.11	Nr.12	Nr.13	Nr.14
					
1 – dailylentės; 2 – 15 cm rąstų sienutė; 3 – 15 cm polistirenas; 4 – gipskartonis	1 – 2 cm dailylentės; 2 – 15 cm rąstų sienutė; 3 – 15 cm polistirenas	1 – dailylentės; 2 – 15 cm rąstų sienutė; 3 – 15 cm akmens vata; 4 – gipso kartonas	1 – 15 cm rąstų sienutė ; 2 – 15 cm akmens vata; 3 – 2 cm dailylentės	1 – medžio drožlių plokštė; 2 – 15 cm rąstų sienutė; 3 – 15 cm akmens vata ; 4 – 2 cm dailylentės	1 – gipso kartono plokštė; 2 – 15 cm rąstų sienutė; 3 – 15 cm akmens vata; 4 – 2 cm dailylentės

2.26 pav. Rąstinės sienos eksperimentinių bandinių 9–14 konstrukcijos

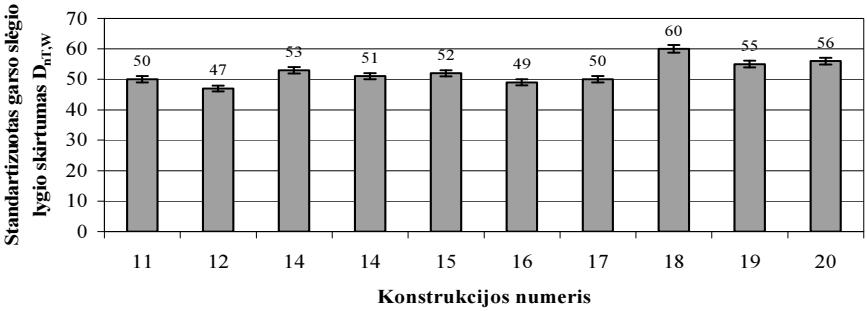
Fig. 2.26. Structures of experimental samples 9–14 of a log wall

Polistireną pakeitus 15 cm akmens vata, kuri pasižymi geresnėmis garso sugerties savybėmis, bei apkalus dailylentėmis ir apdengus gipso kartonu (2.26 pav. 12 konstrukcija), standartizuotas garso slėgio lygių skirtumas siekė 50 dB, t. y. garso izoliavimo rodiklis 2 dB didesnis negu panaudojus 10 cm storio akmens vatą (2.28 pav.). Gipso kartoną pakeitus dailylentėmis (2.26 pav. 13 konstrukcija), garso izoliavimo rodiklis siekė 47 dB, t. y. buvo 3 dB mažesnis negu sieną iš vienos pusės padengus gipso kartono plokšte. Akmens vata atskiria pagrindinę rąstų sieną nuo pagalbinės triukšmą izoliuojančios medžio drožlių plokštės, gipso kartono ar dailylenčių. Siekiant dar labiau padidinti konstrukcijos garso izoliavimo rodiklį, rąstinė siena iš vienos pusės buvo padengta 15 cm akmens vata, dailylentėmis ir medžio drožlių plokšte, turinčia geriausias garso izoliacines savybes. Išmatuotas standartizuotas garso slėgio lygis siekė 53 dB, tačiau gyvenamiesiems pastatams pagal C klasės normas būtinas bent 55 dB rodiklis. Išorines sienas galima dengti iš vienos pusės akmens vata ar polistirenu bei dailylentėmis, medžio drožlių plokštėmis ar gipso kartonu (2.24 ir 2.26 pav. 5–14 konstrukcijos), galima dengti išorines sienas, nes esant bet kokiam aplinkos garso lygiui (3.1 lentelė), išorinės sienos atitiks labai geras garso izoliavimo savybes, priskiriamas A arba B garso izoliavimo klasėms.

Nr.15	Nr.16	Nr.17	Nr.18	Nr.19	Nr.20
					
1 – 2 cm dailylentės; 2 – 10 cm akmens vata; 3 – 15 cm rąstų sienutė; 4 – 5 cm polistirenas; 5 – medžio drožlių plokštė	1 – 2 cm dailylentės; 2 – 10 cm akmens vata; 3 – 15 cm rąstų sienutė; 4 – 5 cm polistirenas	1 – 2 cm dailylentės; 2 – 10 cm akmens vata; 3 – 15 cm rąstų sienutė; 4 – 5 cm polistirenas; 5 – gipskartonis	1 – 2 cm dailylentės; 2 – 10 cm akmens vata; 3 – 15 cm rąstų sienutė; 4 – medžio drožlių plokštė	1 – 2 cm dailylentės; 2 – 10 cm akmens vata; 3 – 15 cm rąstų sienutė	1 – 2 cm dailylentės; 2 – 10 cm akmens vata; 3 – 15 cm rąstų sienutė; 4 – gipskartonis

2.27 pav. Rąstinės sienos eksperimentinių bandinių 15–20 konstrukcijos
Fig. 2.27. Structures of experimental samples 15–20 of a log wall

Rąstinę sieną tik iš vienos pusės apdengus akmens vata ar polistirenu bei apkalus ar apdengus dailylentėmis, medžio drožlių plokštėmis ar gipso kartonu, nepasiekiamas gyvenamiesiems pastatams būtinas 55 dB garso izoliavimo rodiklis, tačiau atitinka laikino apgyvendinimo pastatams keliamą 50 dB garso izoliavimo reikalavimą. Tai svarbu žinoti, nes šiuo metu paplitę svečių namai, kaimo turizmo sodybos ir pan.



2.28 pav. Konstrukcijų standartizuoto garso slėgio lygių skirtumo $D_{nT,W}$ tyrimo rezultatai (žr. 2.26 pav. ir 2.7 pav.)

Fig. 2.28. Research results of the standardised pressure level difference for airborne sound $D_{nT,W}$ for structures (see Figs. 2.26 and 2.27)

2.29 pav. Triukšmo slopinimo kameroje sumontuota 15 cm pločio rąstinė siena

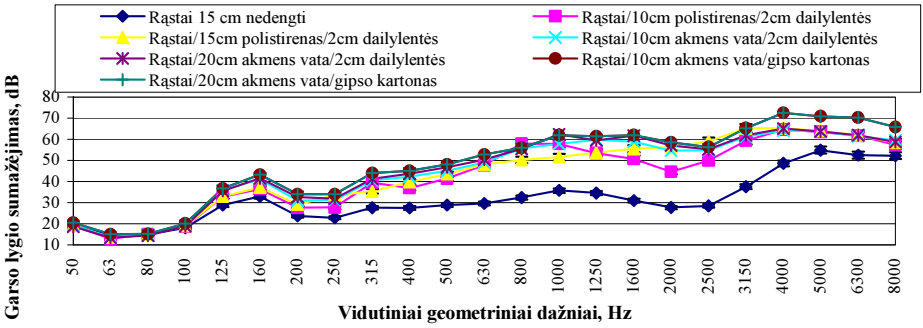
Fig. 2.29. Log wall, 15 cm wide, assembled in a noise suppression chamber

Siekiant rąstinės sienos garso izoliavimo rodiklį padidinti iki gyvenamiesiems namams reikalaujamos C garso izoliavimo klasės, siena dengiama iš abiejų pusių garsą sugeriančiomis medžiagomis (akmens vata ar polistirenu) bei aptaisoma gipso kartonu, medžio drožlių plokšte ar apkalama dailylentėmis. Sieną apdengus akmens vatos 10 cm sluoksniu ir 5 cm polistirenu (2.27 pav. 15 konstrukcija) bei iš vienos pusės apkalus dailylentėmis, o iš kitos pusės – medžio drožlių plokšte, pasiektas 52 dB garso izoliavimo rodiklis. 15-tos konstrukcijos (2.27 pav.) medžio drožlių plokštę pakeitus dailylentėmis, kaip pateikta 16-oje konstrukcijoje, garso izoliavimo rodiklis sumažėjo 3 dB ir siekė 49 dB. Dailylentes pakeitus geresnėmis garso izoliacijos savybėmis pasižyminčia gipso kartono plokšte (2.27 pav. 17 konstrukcija), nustatytas 50 dB garso izoliavimo rodiklis.

2.30 pav. Triukšmo slopinimo kameroje sumontuota 15 cm pločio rąstinė siena ir padengta 2 cm pločio dailylentėmis
Fig. 2.30. A log wall, 15 cm wide, assembled in the noise suppression chamber and covered with sidings, 2 cm wide

Geriausias garso izoliavimo rodiklis, būtent 60 dB, gautas rąstinę sieną iš abiejų pusių apdengus 10 cm akmens vata ir apkalus dailylentėmis bei medžio drožlių plokšte (2.27 pav. 18 konstrukcija). Standartizuotas 60 dB garso slėgio lygis atitinka B garso izoliavimo klasę, kuri užtikrina padidintą garso izoliavimo komfortą. Akmens vata, atskirianti pagrindinę rąstų sieną nuo pagalbinės garsą izoliuojančios medžio drožlių ar gipso kartono sienelės, padeda sumažinti jų savituosius svyravimus, kuriuos sukelia į šiuos atitvarus kritusios garso bangos. Kadangi rąstinės sienos dažniausiai apkalamos dailylentėmis, tai tokios sienos, iš abiejų pusių apdengtos 10 cm akmens vatos sluoksniu ir apkaltos 2 cm dailylentėmis (2.27 pav. 19 konstrukcija), garso izoliavimo rodiklis siekė 53 dB. Dailylentes iš vienos pusės pakeitus gipso kartono plokšte, garso izoliavimo rodiklis siekė 56 dB ir atitiko C garso izoliavimo klasę.

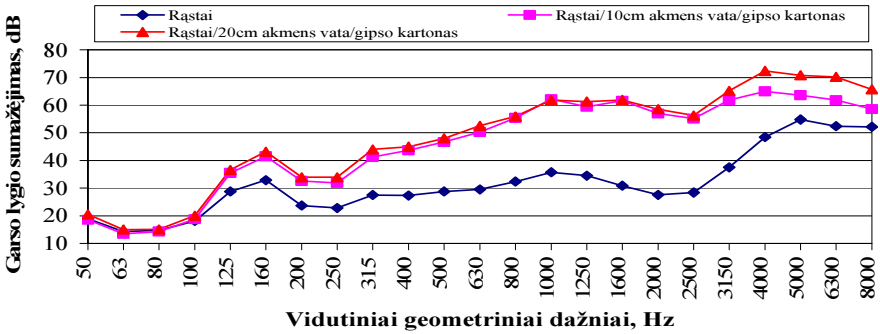
2.31 paveiksle atvaizduotos garso lygio mažėjimo tendencijos, esant įvairiems dažniams. Kai dažniai žemi, garso lygį iki 40 dB įmanoma sumažinti panaudojus 20 cm akmens vatą ir dailylentes. Kai dažniai vidutiniai (nuo 500 Hz iki 1000 Hz), garso lygis daugiausia sumažėjo papildomai panaudojus 20 cm akmens vatą. Esant dažniams nuo 1250 iki 2000 Hz, didžiausias garso sumažėjimas nustatytas panaudojus akmens vatą. Esant dažniams nuo 2500 iki 3150 Hz, didžiausio garso lygio sumažėjimo pasiekta panaudojus 20 cm polistireną, o esant dažniams nuo 4000 Hz ir aukščiau, garso lygio sumažėjimas buvo identiškas visoms panaudotoms medžiagoms.



2.31 pav. Garso lygio sumažėjimas rąstinėje sienoje, tiriant triukšmo slopinimo kameroje

Fig. 2.31. Sound level reduction in a log wall during investigations in a noise suppression chamber

2.32 paveiksle nubrėžta garso lygio sumažėjimo kreivė vidutinių geometrinių dažnių juostose, triukšmo slopinimo kameroje sumontavus rąstinę sieną bei ją padengus 10 ir 20 cm storio akmens vatos sluoksniu ir aptaisius 1,2 cm storio gipso kartonu. Esant žemiems 50–100 Hz dažniams, garso lygis visais trimis atvejais sumažinamas vienodai – iki 20 dB. Esant žemiems 125–1000 Hz dažniams vientisa rąstinė siena garso lygį sumažino 30–35 dB intervalu, o sienos, padengtos skirtingu akmens vatos sluoksniu ir aptaisytos gipso kartonu, garso lygis sumažėjo 38–62 dB. Toks pat garso sumažėjimas gautas esant skirtingam akmens vatos sluoksniui. Kaip matyti iš 2.32 paveikslo, esant 2000 ir 2500 Hz dažniui, garso izoliavimas staiga sumažėja ir po to pradeda didėti.



2.32 pav. Garso lygio sumažėjimas rąstinėje sienoje, tiriamoje triukšmo slopinimo kameroje, keičiant akmens vatos storį

Fig. 2.32. Sound level reduction in a log wall during investigations in a noise suppression chamber by changing a rock wool thickness

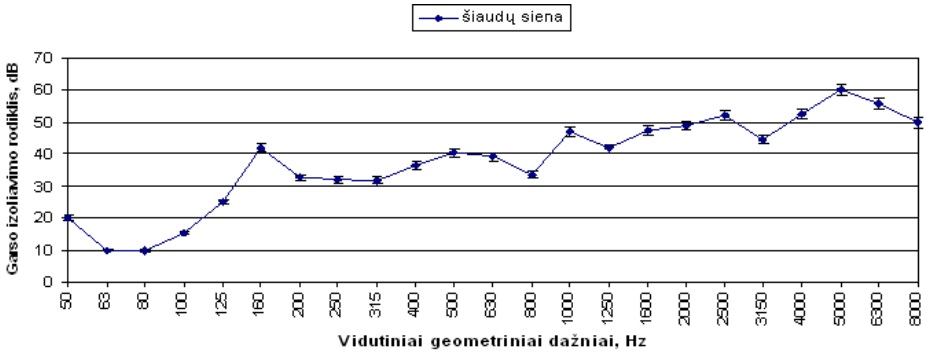
Atlikti tyrimai parodė, kad rąstiniams namams, nedengtiems apšiltinimui ir garso izoliavimui skirtomis medžiagomis, būdinga prasta garso izoliacija. Geriausia tokio namo garso izoliacija gaunama rąstinę sieną iš abiejų pusių apdengus 10 cm akmens vata ir apkalus dailylentėmis bei apdengus medžio drožlių plokšte.

2.3.3. Molinių – šiaudinių pertvarų garso izoliavimo tyrimo rezultatai

Daugelio autorių teigimu, moliniai – šiaudiniai namai pasižymi itin gera šilumine izoliacija, bei tvirtumu ir ilgaamžiškumu (Adomaitis, 2007; Architektūros ir aplinkos...2010).

Literatūroje dauguma autorių remiasi Vienos technikos universitete (Austrija), atliktais garso izoliacijos tyrimais, kuriais nustatyta, kad karkasinės, presuotais šiaudais apšiltintos ir tinkuotos sienos garso izoliavimo rodiklis yra 55 dB (*Wandsysteme*, 2001). Vadinasi, tokia išorinė siena labai gerai izoliuoja garsą ir tenkina pastatų išorinėms sienoms keliamus reikalavimus (STR 2.01.07:2003).

Triukšmo slopinimo kameroje atlikti šiaudų pertvaros, kuri montuojama į namo karkasą, kaip vidinė ar išorinė siena, akustiniai tyrimai. Tyrimo rezultatai pateikti 2.33 paveiksle.



2.33 pav. 45 cm šiaudų sienos, sudarytos iš presuotų šiaudų ir nutinkuotos 1 cm molio tinku, garso izoliavimo rodiklis, esant įvairiems dažniams

Fig. 2.33. The sound reduction index at different frequencies for 45 cm straw wall composed of pressed straw and plastered with 1 cm clay plaster

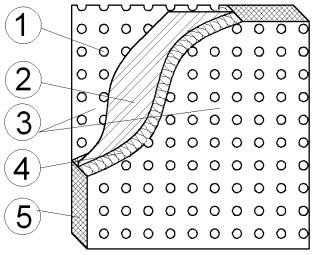
Tyrimo metu šiaudų pertvara pasižymėjo ypač prasta garso izoliacija esant žemiems dažniams (63–80 Hz): garso izoliacija siekė 10 dB. Esant žemiems dažniams nuo 100–160 Hz, garso izoliacija didėjo 15–42 dB intervale. Toliau didėjant dažniams (200–400 Hz), garso izoliacija siekė 32–38 dB. Esant viduti-

niams dažniams (500–1000 Hz) šiaudinės pertvaros garso izoliacija nustatyta nuo 40 iki 48 dB. Esant aukštiems dažniams nuo 1250 iki 8000 Hz, garso izoliavimas siekė nuo 42 dB, esant 1250 Hz, iki 60 dB, esant 5000 Hz. Bendras apskaičiuotas garso izoliavimo rodiklis R_w siekė 40 ± 2 dB. Šis dydis – pakankama garso izoliacija fasadui, kai aplinkos L_{dvn} triukšmo lygis 55–60 dB, tačiau nepakankama vidinėms pertvaroms.

2.3.4. Triukšmą sugeriančios konstrukcijos, naudojant perforuotą skardą, akustinių savybių tyrimo rezultatai

Mažinant garso lygį gamybinėse patalpose, kur yra dulkių ir drėgmės, kuriama garsą sugerianti konstrukcija, sudaryta iš perforuotos ir neperforuotos skardos su viduje įtaisyta stiklo vata. Konstrukcijos garso izoliavimo savybės buvo tiriamos triukšmo slopinimo kameroje (konstrukcijos pjūvis pavaizduotas 2.34 pav.). Atlikti skirtingos konstrukcijos bandinių akustiniai tyrimai triukšmo slopinimo kameroje atspindėti 2.35, 2.36 ir 2.37 paveiksluose.

a)



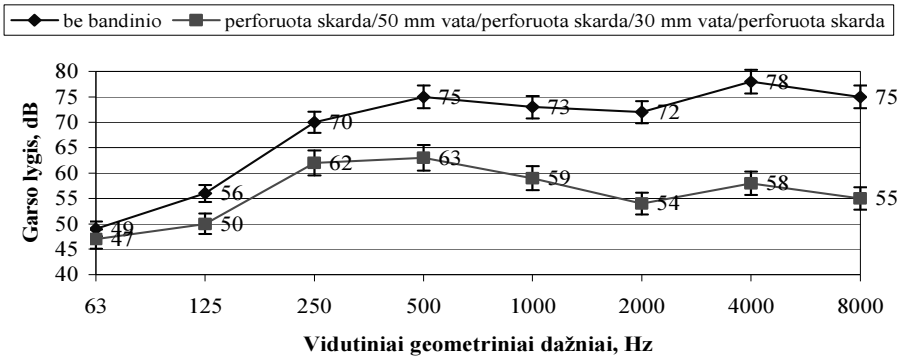
b)

2.34 pav. Perforuotos skardos ekranas su užpildu: a) bendras konstrukcijos vaizdas; b) konstrukcijos pjūvis: 1 ir 3) – perforuota skarda su 40% perforacija; 2) – 0,5 mm storio skarda; 4) – 30 ir 50 mm storio stiklo vatos plokštės; 5) – dulkes sulaikantis 0,2 mm stiklo pluošto audinys

Fig. 2.34. Perforated tin shield with a filling: a) general view of the structure; b) section of the structure: 1 and 3) – perforated tin with 40% perforation; 2) – 0.5 mm thick tin; 4) – 30 and 50 mm thick glass wool boards; 5) – 0.2 mm glass fibre material suppressing dust

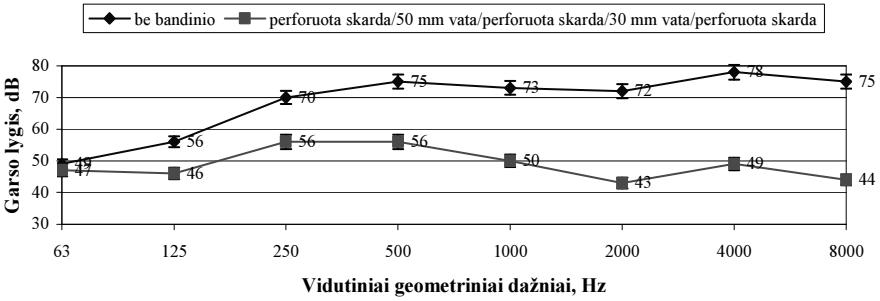
Mėginio, padaryto iš perforuotos skardos / 80 mm vatos sluoksnio / perforuotos skardos, tyrimo rezultatai pavaizduoti 2.35 paveiksle. Esant žemiems dažniams nuo 63–250 Hz, garso lygis sumažinamas nuo 2–8 dB; esant vidutiniams dažniams nuo 500–1000 Hz, garso lygis sumažinamas nuo 12–14 dB, o esant aukštiems 2000–8000 Hz dažniams, garso lygis sumažėjo nuo 18 iki 20 dB.

Didesnis garso lygio sumažėjimas, esant vidutinio aukštumo dažniams, nustatytas panaudojus 80 mm storio konstrukcijas, dengtas perforuotos skardos lakštais ir užpildytas 50 mm storio Paroc vata, 0,5 mm storio skardos lakštas ir 30 mm storio Paroc vata, nepriklausomai nuo to, kuria puse jos buvo sumontuotos garsą siunčiamosios patalpos atžvilgiu. Šių konstrukcijų efektyvumas buvo beveik identiškas ir siekė 13–24 dB.



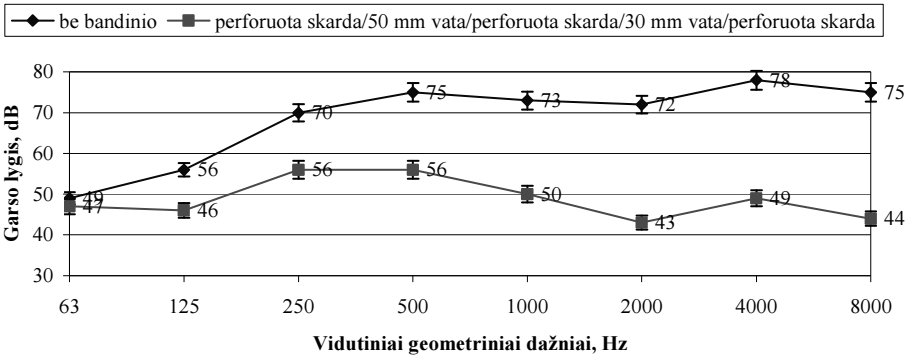
2.35 pav. Garso lygio sumažėjimas panaudojus bandinį iš perforuotos skardos / 80 mm vatos/perforuotos skardos
Fig. 2.35. Sound level reduction by using a sample of perforated tin/80 mm wool/perforated tin

Bandinys su viduje įmontuota perforuota skarda (2.36 pav.), esant žemiems 63–250 Hz dažniams, garso lygį sumažino 2–16 dB, esant vidutiniams dažniams 500–1000 Hz, garso lygis sumažėjo 19–23 dB, o esant aukštiems 2000–8000 Hz dažniams, garso lygis sumažėjo 29 iki 31 dB.



2.36 pav. Garso lygio sumažėjimas, panaudojus bandinį iš perforuotos skardos / 50 mm vatos / skardos / 30 mm vatos / perforuotos skardos
Fig. 2.36. Sound level reduction by using a sample of perforated tin/50 mm wool/tin/30 mm wool/perforated tin

Triukšmo slopinimo kameroje išmatuoti „triukšmingosios“ ir „tyliosios“ patalpų garso lygiai, įstačius tiriamuosius bandinius. Bandinys su viduje įmontuota skarda (2.37 pav.), esant žemiems dažniams 63–250 Hz, garso lygį sumažino 2–13 dB; esant vidutiniams 500–1000 Hz dažniams, sumažino 19–24 dB, o esant aukštiems 2000–8000 Hz dažniams, garso lygis sumažėjo iki 38 dB.



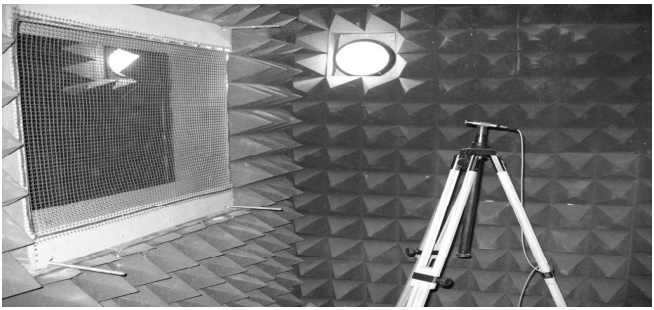
2.37 pav. Garso lygio sumažėjimas, panaudojus bandinį iš perforuotos skardos / 30 mm vatos / skardos / 50 mm vatos / perforuotos skardos
Fig. 2.37. Sound level reduction by using a sample of perforated tin/30 mm wool/tin/50 mm wool/perforated tin

Ištyrus visas tris konstrukcijas, didžiausias garso sumažinimo efektyvumas esant žemiems dažniams (63–250 Hz), pasižymėjo konstrukcija, sudaryta iš perforuotos skardos / 50 mm vatos / skardos / 30 mm vatos / perforuotos skardos. Esant vidutiniams dažniams (500–1000 Hz), geriausiai garsą iki 24 dB sumažino konstrukcijos su viduje įtaisyta skarda. Esant aukštiems dažniams (2000 iki 8000 Hz), geriausiai garsą sumažino konstrukcija, sudaryta iš perforuotos skardos / vatos 30mm / skardos / vatos 50 mm / perforuotos skardos. Garso lygis, panaudojus perforuotą skardą, sumažėjo dėl skardoje esančių skylučių, kurios išsklaidė garso bangas.

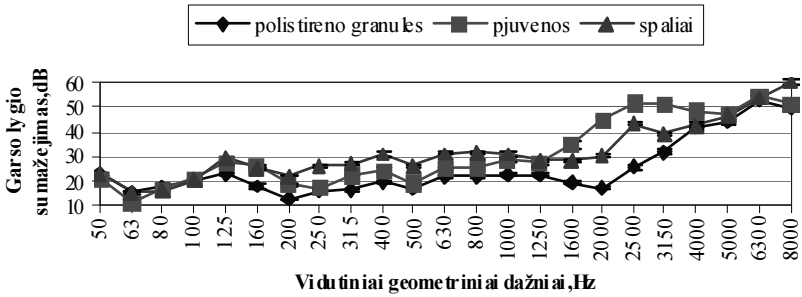
Atliekant tyrimus, esant aukštiems dažniams, 1 m^2 konstrukcija buvo užpildyta perforuotos skardos lakštais su 80 mm storio vatos sluoksniu. Tyrimu nustatyta, kad garsas sumažėjo, lyginant jį su rezultatais be bandinio, siekė 18–20 dB. Tačiau ši konstrukcija, esant aukštiems dažniams, 10–18 dB mažiau slopino garsą negu konstrukcijos, kuriose tarp 30 ir 50 mm storio vatos sluoksnio buvo įmontuotas skardos lakštas. Pastarasis atspindėjo dalį į jį kritusio garso, o akmens vata, buvusi iš abiejų skardos lakšto pusių, sumažino jo priverstinius svyravimus.

2.3.5. Pertvarų, užpildytų biriomis medžiagomis, akustinių savybių tyrimo rezultatai

Geresnė garso izoliacija pasiekiama oro tarpus tarp sienų užpildant akmens ar stiklo vata, putomis arba užpilant biriomis medžiagomis, kurios pasitarnauja kaip garsą izoliuojančios ir šiluminę varžą turinčios medžiagos. Siekiant ištirti atskirų birių medžiagų garso izoliacines savybes, sukonstruota 1 m. ilgio, 1 m. aukščio ir 20 cm pločio konstrukcija. Konstrukcijos rėmas padarytas iš medžio drožlių plokščių, o šonai padengti tinkleliu, kaip pavaizduota 2.38 pav. Tirtos birios medžiagos buvo supilamos į konstrukciją ir įstačius į matavimo narvelį matuojamos garso izoliavimo savybės.



2.38 pav. Garso izoliavimui tirti birių medžiagų konstrukcija, įmontuota triukšmo slopinimo kameros narvelyje
Fig. 2.38. Structure of bulk materials for sound insulation investigation assembled in a noise suppression chamber's cage

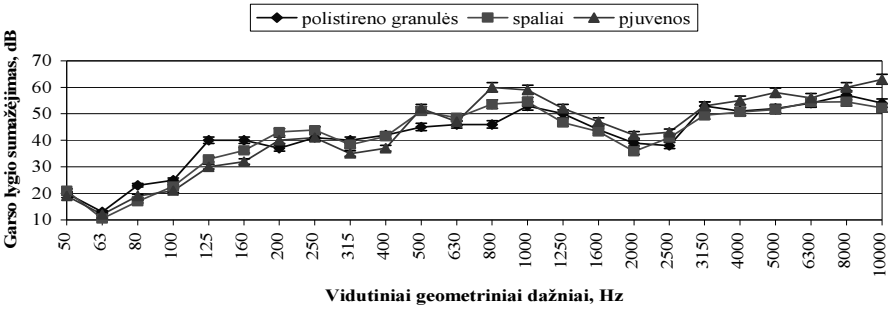


2.39 pav. Spalių, pjuvenų ir polistireno granulių poveikis garso lygiui sumažinti
Fig 2.39. The impact of chaff, sawdust and polystyrene granules on sound level reduction

Siekiant išsiaiškinti, ar konstrukcija neturės įtakos medžiagų akustinėms savybėms nustatyti, pirmiausia buvo ištirtas tuščios konstrukcijos poveikis garso

lygiui. Įsitikinus, kad konstrukcija nedaro jokio poveikio garsui sklisti buvo atlikti birių medžiagų akustinių savybių tyrimai. Konstrukcija buvo užpildoma spaliais, medžio drožlėmis ar polistireno granulėmis. Garso izoliavimo rezultatai pavaizduoti 2.39 paveiksle.

Esant žemiems dažniams t. y. iki 125–200 Hz, visos trys medžiagos beveik identiškai sumažino garso lygį. Esant žemiems dažniams nuo 250–500 Hz, labiausiai garso lygį iki 30 dB sumažino spaliai, prastesnėmis garso izoliavimo savybėmis pasireiškė pjuvenos. Jos garso lygį sumažino iki 25 dB. Mažiausiai garso lygį susilpnino polistireno granulės – tik iki 20 dB. Spalių tankis didesnis negu pjuvenų, o lengviausios polistireno granulės. Nustatyta, kad garsą geriau mažina didesnio tankio medžiagos. Be to, spalių dalelės yra smulkesnės, tad susidaro didesnis paviršiaus plotas, absorbuojantis ir išsklaidantis į juos kritusį garsą. Esant dažniams nuo 500–1000 Hz, geriausiai garso lygį sumažino spaliai – iki 30 dB, pjuvenos – iki 25 dB, o polistireno granulės iki – 22 dB. Esant 1000–1250 Hz dažniams, spalių ir pjuvenų garso izoliavimo savybės buvo identiškos. Nuo 1600–5000 Hz daugiausia garsą sumažino pjuvenos – 50 dB, spaliai – 45 dB, o polistireno granulės – 30 dB. Esant aukštesniems negu 6000 Hz dažniams, visos trys medžiagos garsą mažino vienodai. Didžiausias garso izoliavimo rodiklis R_w išmatuotas panaudojus spalius (23 dB), medžio drožlių garso izoliavimo rodiklis siekė 20 dB, o mažiausias garso izoliavimo rodiklis išmatuotas polistireno granulėms (13 dB).



2.40 pav. Garso lygio mažėjimas, naudojant spalių, pjuvenų ir polistireno granules, apdengtas medžio drožlių plokštėmis

Fig. 2.40. Sound level reduction by using chaff, sawdust and polystyrene granules covered with wood chipboards

Anksčiau atliktais tyrimais su pavienėmis medžiagomis, pvz., gipso kartonu ar medžio drožlių plokšte, buvo nustatyta, kad geriausiomis garso izoliacinėmis savybėmis pasižymėjo medžio drožlių plokštė. Todėl jomis buvo apdengta konstrukcija su spaliais, pjuvenomis ir polistireno granulėmis. Prasčiausiai (nuo 10 iki 22 dB) garsas sumažintas esant žemiems dažniams nuo 50 iki 100 Hz.

Esant žemiems dažniams nuo 125 iki 400 Hz, garso lygis, naudojant spalių užpildą, sumažintas iki 42 dB. Didžiausias garso lygio sumažėjimas (iki 60 dB) pasiektas pjuvenų užpildu esant vidutiniams dažniams nuo 500 iki 1000 Hz. Esant aukštiems nuo 1250 iki 10000 Hz dažniams, garso izoliavimas siekė nuo 40 dB, esant 2000 Hz, iki 62 dB, esant 10000 Hz.

Iš atlikto tyrimo matyti, kad, esant žemiems dažniams, visų trijų medžiagų garso sugertis beveik vienoda; esant vidutinio aukštumo dažniams, efektyviausiai garsą sumažino spaliai, o esant aukštiems dažniams, didžiausia garso sugertimi pasižymėjo pjuvenos.

2. 4. Antrojo skyriaus išvados

1. Parengtos matavimo metodikos, siekiant ištirti pavienių medžiagų ir jų kompozitų akustines savybes triukšmo slopinimo kameroje. Jos vertinamos pagal garso lygio sumažėjimą, bei garso izoliavimo (R_w) ir garso slėgio lygių skirtumo ($D_{nT,W}$) rodiklius.
2. Dviguba keramzitinė sienelė privalomą pastatams C garso izoliavimo klasę atitinka, ją iš abiejų pusių užtinkavus 15 mm tinko sluoksniu, bei iš abiejų pusių užtrynus 2 mm glaisto sluoksniu, oro tarpą užpildžius akmens vata ir iš vienos pusės uždengus gipso kartonu.
3. Esant žemiems 125–250 Hz dažniams, perforuotos skardos konstrukcija su viduje įmontuota perforuota skarda, garso lygį sumažino 4–6 dB geriau, negu konstrukcija be viduje įmontuotos perforuotos skardos.
4. Rastų siena, kurios skersmuo 15 cm, nedengta garsą sugeriančiomis ir izoliuojančiomis medžiagomis, neatitinka garso izoliacijos reikalavimų, kadangi jos standartizuotas garso slėgio lygių skirtumas ($D_{nT,W}$) yra 29 dB.
5. Didžiausias ir reikalaujamą C garso izoliavimo klasę atitinkantis standartizuotas garso slėgio lygių skirtumas ($D_{nT,W}$) 60 dB nustatytas rąstinę sieną iš abiejų pusių apdengus 10 cm akmens vatos sluoksniu ir medžio drožlių plokšte bei apkalus dailylentėmis.
6. Šiaudų molio pertvaros, kurios šiaudų storis 40 cm ir iš abiejų pusių nutinkuota molio tinku, (šiaudų tankis 90–110 kg/m^3) garso izoliavimo rodiklis R_w sudarė 40±2 dB ir pertvaroms reikiamos vertės nesiekė.
7. Sukurta konstrukcija, kurioje buvo tirtos birių medžiagų akustinės savybės. Lyginant polistireno granules, spalius ir pjuvenas, geriausia garso sugertimi, esant 250–1000 Hz dažniams, pasižymėjo spaliai. Esant aukštiems dažniams nuo 1600–4000 Hz, geriausia garso sugertimi pasižymėjo pjuvenos. Prasčiausiai garsą sugėrė polistireno granulės.

3

Fasadų ir jų dalių natūriniai eksperimentiniai tyrimai

Nuolat didėjant aplinkos triukšmui, vidaus patalpų triukšmas stiprėja. Fasadų atitikimas akustinei komforto klasei tiesiogiai priklauso nuo garso izoliavimo rodiklio ir aplinkos triukšmo klasės, kuri randama atlikus aplinkos triukšmo matavimus dienos, vakaro ir nakties metu ir apskaičiavus L_{dvn}. Fasadai susideda iš skirtingą garso izoliaciją turinčių elementų, kaip antai: langų, orlaidžių ir sienų. Įvairūs langai pasižymi nevienoda garso izoliacija, todėl šiame skyriuje pristatomi skirtingų langų ir fasadų garso izoliacijos, bei fasadų su balkonų konstrukcijomis ir be jų garso izoliacijos tyrimų rezultatai. Fasadų ir jų dalių bei aplinkos triukšmo klasės nustatymo tema paskelbti straipsniai: *Vaišis and Januševičius 2008; Vaišis and Januševičius 2009; Baltrėnas et al 2010; Vaišis et al 2008; Petraitis and Januševičius 2008.*

1.1. Fasadų ir jų dalių natūrinių tyrimų metodika

Pastatų fasadai sudaryti iš skirtingą garso izoliaciją turinčių elementų, būtent: langų ir išorinių sienų. Todėl tariamas garso izoliavimo rodiklis $R'_{45°}$ arba stan-

dartizuotas garso slėgio lygių skirtumas $D_{ls,2m,nT,W}$ matuojamas bendrai visam fasadui arba atskiroms jo dalims, pavyzdžiui, langams.

$D_{ls,2m,nT,W}$ – indeksai reiškia:

ls – garso šaltinis, dvylikabriaunis garsiakalbis,

2m – matavimai, atliekami 2 metrų atstumu nuo fasado,

nT,w – matavimai, atliekami n kartų, įvertinant aidėjimo trukmę.

Tariamam garso izoliavimo rodikliui $R'_{45°}$ tirti naudotas garso šaltinis – garsiakalbis, kuris buvo statomas ant žemės arba keliamas į viršų prieš tiriamąjį fasadą ne arčiau kaip 7 metrų atstumu. Garso bangų kritimo kampas tarp garsiakalbio ašies, nukreiptos į bandomojo objekto centrą, ir fasado paviršiaus statmens, lygus 45° kampui. Pastatų fasadų ar jų dalių akustiniai tyrimai atlikti trečdalio oktavos dažnių juostoje. Garsas, krintantis į fasadą, matuotas 2 m atstumu prieš fasadą per vidurį, o viduje matuota dešimtyje skirtingų vietų, kurios parinktos taip, kad kuo vienodžiau pasiskirstytų visame plote, išlaikant mažiausius atstumus: 0,7 m atstumas tarp mikrofonų, 0,5 m atstumas tarp bet kurios mikrofono vietos ir patalpos ribų, 1,0 m atstumas tarp bet kurios mikrofono vietos ir garso šaltinio, o mikrofono aukštis – 1,5 m nuo grindų. Vidaus patalpoje taip pat buvo matuojama garso aidėjimo trukmė, kuri nustatyta pasirenkant devynias skirtingas garsiakalbio pozicijas ir išvedant aritmetinius vidurkius. Skaičiavimams panaudoti patalpos tūrio bei fasado ploto matavimai.

Tariamas fasado garso sumažėjimo rodiklis $R'_{45°}$ apskaičiuojamas pagal formulę (Myung – Jun and Ha – Geun 2007) :

$$R'_{45°} = L_{1,s} - L_2 + 10\lg\left(\frac{S}{A}\right) - 1{,}5, \qquad (3.1)$$

čia: $L_{1,s}$ – vidutinis garso slėgio lygis į bandomąjį paviršių, dB; L_2 – vidutinis garso slėgio lygis priimamojo garso patalpoje, dB; S – bandinio plotas, m^2 ;

$A = \left(\frac{0{,}163V}{T}\right)$ – lygiavertis garso sugerties plotas priimamojo garso patalpoje, m^2.

Fasado garso izoliacija pagal standartizuotą garso slėgio lygį $D_{ls,2m,nT,W}$ apskaičiuojama pagal formulę (Myung – Jun and Ha – Geun 2007), kuri nuo (2.2) formulės skiriasi tuo, kad matavimai atliekami 1–2 metrų atstumu nuo tiriamojo fasado):

$$D_{ls,2m,nT,W} = L_{1,2m} - L_2 + 10\lg\frac{T}{T_0}, \qquad (3.2)$$

čia: $L_{1,2\ m}$ – vidutinis nuolatinio garso slėgio lygis į bandomąjį paviršių, įskaitant atspindžius nuo bandinio ir fasado; L_2 – vidutinis nuolatinio garso slėgio lygis priimamojo garso patalpoje; T – priimamojo garso patalpos aidėjimo trukmė sekundėmis; T_0 – atskaitos aidėjimo trukmė; gyvenamosioms patalpoms T_0 = 0,5 s.

3.1 pav. Langų garso izoliacijos natūriniai tyrimai individualiame name, garso šaltinį pakėlus nuo žemės
Fig. 3.1. Natural investigations of window sound insulation in an individual house by raising the noise source above the ground

Fasado garso izoliacijai didelę įtaką daro langai, kurių gebėjimas izoliuoti vidaus aplinką nuo išorinio triukšmo priklauso nuo langų sandaros ir jų dydžio. Tačiau langų, kaip atskirų elementų, garso izoliacija, matuojama taikant elementinį metodą (3.1 pav.). Mikrofonas lipnia juosta klijuojamas ant bandinio paviršiaus iš išorinės ir vidinės pusės, be to, išorinis mikrofonas apgaubiamas pusrutulio formos nuo vėjo saugančiu ekranu. Mikrofonas tiriamojo bandinio paviršiuje išdėstomas dešimtyje vietų, parenkamų kuo tolygiau. Tariamas garso sumažėjimo rodiklis $R'_{45°}$ fasado elementui apskaičiuotas pagal (3.1) formulę, o garso slėgio lygiai L_1 ir L_2 apskaičiuoti pagal (3.3) formulę:

$$L_1 = 10\ \lg\ (10^{L1/10}+10^{L2/10}+...+10^{Ln/10}) - 10\lg(n), \qquad (3.3)$$

čia: L_1, L_2, L_n – yra garso slėgio lygiai 1, 2,..., n matavimo vietose.

Pastato fasado garso izoliavimo klasė surandama pagal 3.1 ir 3.2 lenteles.

3.1 lentelė. Gyvenamųjų pastatų išorinių atitvarų ore sklindančio garso izoliavimo klasifikatorius. Mažiausios standartizuotojo lygių skirtumo rodiklio $D_{2m,nT,W}$ vertės
Table 3.1. Classifier of airborne sound insulation for dwelling buildings' exterior walls. The lowest values of standardised noise level difference for airborne sound index $D_{2m,nT,W}$

	Išorinių atitvarų garso klasė				
	A	B	C	D	E
Išorės aplinkos garso klasė	Rodiklis $D_{2m,\ nT,\ W}$ (dB)				

3.1 lentelės pabaiga

A	32	29	24	21	20
B	35	32	27	23	21
C	40	35	30	25	23
D	45	40	35	28	23
E	50	45	40	33	28
Neklasifikuojama	55	50	45	38	33

3.2 lentelė. Transporto šaltinių garso slėgio lygių pastato išorėje klasifikatorius. Didžiausios vidutinių ilgalaikių A svertinių garso lygių, išreikštų per L_{dvn}, vertės
Table 3.2. Classifier of transport source sound pressure levels outside a building. The highest values of the average long-term weighted sound pressure levels A expressed through L_{dvn}

Apsaugomos erdvės tipas	Triukšmo rodiklis	Pastato išorės aplinkos garso klasė					
		A klasė	B klasė	C klasė	D klasė	E	Neklasifikuojama
Pastato išorės aplinka bent vienoje vietoje	L_{dvn}	45	50	55	60	65	> 65

Išmatavus aplinkos triukšmo lygius, apskaičiuojamas ilgalaikis svertinis garso slėgio lygis L_{dvn}:

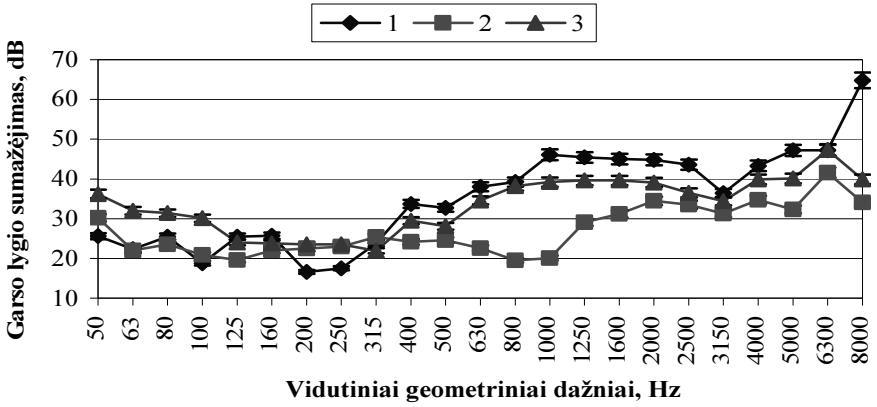
$$L_{dvn} = 10\lg\frac{1}{24}\left(12x10^{\frac{L_{dienos}}{10}} + 4x10^{\frac{L_{vakaro}+5}{10}} + 8x10^{\frac{L_{nakties}+10}{10}}\right), \quad (3.4)$$

čia: L_{dienos} – triukšmo lygis dienos metu, dB; L_{vakaro} – triukšmo lygis vakaro metu, dB; $L_{nakties}$ – triukšmo lygis nakties metu, dB.

Iš 3.2 lentelės nustatoma išorinės aplinkos garso klasė. Fasado garso klasė nustatoma pagal išmatuotą fasado garso izoliavimo rodiklį ir pagal ilgalaikį aplinkos garso slėgio lygį, (3.1 lentelė).

3.2. Fasadų garso izoliacijos natūrinių tyrimų rezultatai

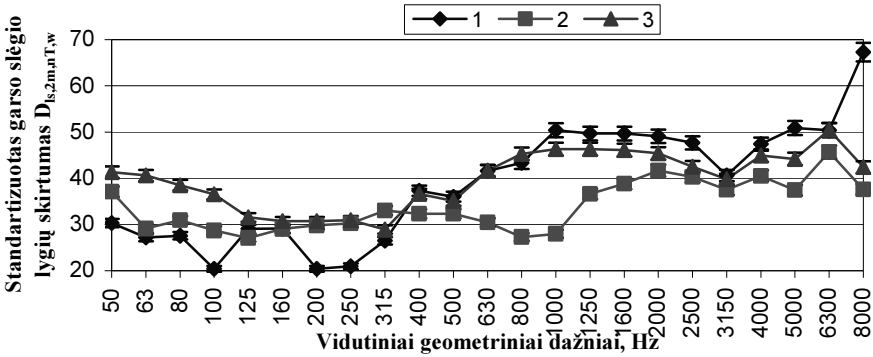
Atlikti fasadų natūriniai garso izoliacijos tyrimai pastatuose, kurie pastatyti iš skirtingų medžiagų ir kuriuose įstatyti nevienodą garso izoliaciją turintys langai. Tyrimai atlikti Molėtuose, Šiauliuose, Vilniuje ir Palangoje. Molėtuose tirtas pastatas, kurio fasadas sudarytas iš molinių 250 mm blokelių, 150 mm polistireno, 4 mm dekoro, kuris iš vidinės pusės padengtas 10 mm tinko sluoksniu ir užglaistyta 2 mm glaistu bei nudažytas. Fasade įmontuotas 9 m^2 plastikinis langas, kurio rėmas sudarytas iš 6 oro kamerų ir stiklo paketo, dengto plėvele. Kitas tyrimas atliktas Vilniuje: namo fasadas sudarytas iš 520 mm plytų mūro, dviejų 1,5 m^2 ploto, klijuoto medžio rėmų ir stiklo paketo langų. Trečias tirtas namas yra Palangoje. Jo fasadas sudarytas iš akyto betono blokelių, polistireno, lentų, 3 m^2 plastikinių rėmų langų, susidedančių iš 5 kamerų ir stiklo paketo. Tyrimų rezultatai pateikti 3.2 ir 3.3 paveiksluose.



3.2 pav. Garso lygio sumažėjimas vidutinių geometrinių dažnių juostoje: 1) – fasado išorė, sudaryta iš 250 mm molinių blokelių, 150 mm polistireno, 4 mm dekoro, iš vidinės pusės – 10 mm tinkas, 2 mm glaistas ir dažai; 9 m^2 plastikinis langas, sudarytas iš 6 kamerų ir stiklo paketo dengto plėvele; 2) – fasadas, sudarytas iš 520 mm plytų mūro, dviejų klijuoto medžio langų po 1,5 m^2 iš 6 kamerų ir stiklo paketo; 3) – akyto betono blokeliai, polistirenas, lentos, 3 m^2 plastikinis langas, susidedantis iš 5 kamerų ir stiklo paketo

Fig. 3.2. Sound level reduction in the band of the average geometrical frequencies: 1) – facade exterior composed of 250 mm clay blocks, 150 mm polystyrene, 4 mm decor, from inside – 10 mm plaster, 2 mm putty and paint; 9 m^2 plastic window composed of 6 chambers and a glass package covered with film; 2) – façade composed of 520 mm brickwork, two glued wood windows 1.5 m^2 and 6 chambers and a glass package; 3) – cellular concrete blocks, polystyrene, boards, 3 m^2 plastic window, composed of 5 chambers and glass package

Kaip matyti iš 3.2 pav., esant žemiems dažniams (nuo 50 iki 100 Hz), didžiausias garso lygio sumažėjimas (iki 37 dB) nustatytas esant 3 konstrukcijos fasadui. Kitų dviejų fasadų konstrukcijų garso lygis sumažėjo beveik identiškai – nuo 20 iki 30 dB. Fasado garso izoliacijai labiausiai įtakos turi langų garso izoliacija, langų dydis, kitų fasado dalių garso izoliacija. Esant dažniams nuo 400 iki 1000 Hz, prasčiausiai garsą izoliavo 2 fasado konstrukcija, o geriausiai (iki 47 dB) – molinių blokelių fasadas, tačiau pastarasis, esant nuo 50 iki 100 Hz dažniams, pasižymėjo prasčiausiomis garso izoliavimo savybėmis. Esant aukštiems, t. y. nuo 1250 iki 8000 Hz dažniams, geriausiomis garso izoliacijos savybėmis pasižymėjo fasadas, kuriame sumontuotas didžiausias langas. Garso lygis, esant daugeliui dažnių, sumažėjo apie 43 dB. Prasčiausiai garsas izoliuotas plytų mūro fasade (2 konstrukcija): garso lygis, esant nuo 1250 iki 8000 Hz dažniams, sumažėjo apie 40 dB. Priežastis – nekokybiški langai, nes tokios pat konstrukcijos pertvara be langų pasižymėjo ypač aukšta garso izoliacija visuose dažniuose.



3.3 pav. Standartizuoto garso slėgio lygio skirtumo $D_{ls,\,2m,\,nT,\,W}$ tyrimo rezultatai. 1) – fasado išorė sudaryta iš 250 mm molinių blokelių, 150 mm polistireno, 4 mm dekoro; iš vidinės pusės – 10 mm tinko, 2 mm glaisto, 9 m^2 plastikinis langas iš 6 oro kamerų ir plėvele dengto stiklo paketo; 2) – fasadas sudarytas iš 520 mm plytų mūro, dviejų 1,5 m^2 klijuoto medžio langų su stiklo paketais; 3) – fasadas, sudarytas iš akyto betono blokelių, polistireno, lentų, 3 m^2 plastikinio lango iš 5 oro kamerų ir stiklo paketo

Fig. 3.3. Research results of the standardised pressure level difference for airborne sound $D_{ls,2m,nT,W}$ 1) – facade exterior composed of 250 mm clay blocks, 150 mm polystyrene, 4 mm decor, from inside – 10 mm plaster, 2 mm putty and paint; 9 m^2 plastic window composed of 6 chambers and a glass package covered with film; 2) – façade composed of 520 mm brickwork, two glued wood windows 1.5 m^2 with glass packages; 3) – façade composed of cellular concrete blocks, polystyrene, boards, 3 m^2 plastic window, 5 air chambers and glass package

Fasadų garso lygio sumažėjimo rezultatai pagal (3.2) formulę perskaičiuoti į standartizuotą garso slėgio lygių skirtumą $D_{ls,2m,nT,W}$ ir pateikti 3.3 pav. Matuotų fasadų $D_{ls,2m,nT,W}$ reikšmės gautos 39 dB esant pirmai konstrukcijai, 41 dB esant trečiai konstrukcijai ir 35 dB esant antrai fasado konstrukcijai. Perskaičiavus į $D_{ls,2m,nT,W}$ esant žemiems dažniams, prasčiausias garso izoliavimas gautas esant pirmai konstrukcijai ir siekė iki 30 dB. Iki 40 dB gautas garso izoliavimas esant trečiai konstrukcijai. Antros konstrukcijos garso izoliacija, esant dažniams nuo 630 iki 1600 Hz, buvo prasčiausia, tai ir nulėmė šios konstrukcijos blogiausią garso izoliavimo rodiklį.

Taip pat atlikti fasadų garso izoliavimo tyrimai standartizuotam garso slėgio lygių skirtumui $D_{ls,2m,nT,W}$ nustatyti, naujai pastatytuose daugiaaukščiuose namuose, kurių fasadai sudaryti iš 6 mm dailylenčių, 27 mm ventiliuojamo oro tarpo, 13 mm vėjo izoliacinės plėvelės, 50 mm akmens vatos tarp vertikalaus medinio karkaso, 60 mm akmens vatos tarp horizontalaus medinio karkaso, 3,5 MPa akyto betono blokelių; 200 mm mūro sienos, vidaus apdailos tinko, klijuoto medžio langų su stiklo paketais. Tiriamųjų fasadų išorės vaizdai pateikti 3.4 paveiksle. Tirtas fasadų garso izoliavimas, priklausomai nuo langų garso izoliavimo (3.4 pav. pavaizduoti fasadai su balkonais ir be balkonų).

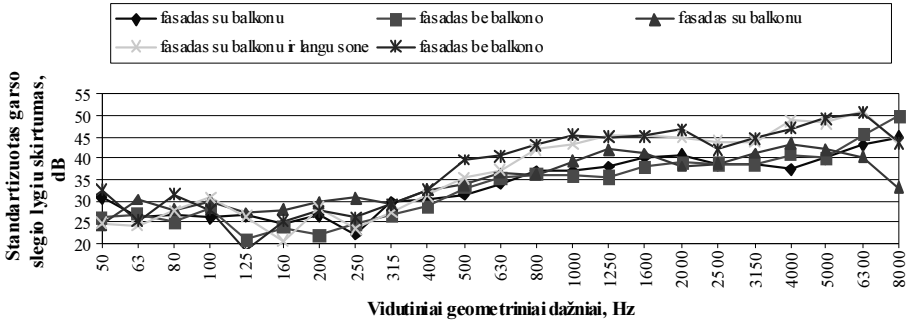
a)

b)

3.4 pav. Tiriamasis fasadas: a) su varstomomis klijuoto medžio 3,2 m^2 balkono durimis be balkono, b) su varstomomis klijuoto medžio 4 m^2 balkono durimis su balkonu

Fig. 3.4. The façade investigated: a) with hinged balcony door of glued wood, 3.2 m^2, without a balcony, b) with hinged glued wood balcony door, 4 m^2, with a balcony

3.5 paveiksle pateikta informacija apie fasadų su balkonais ir be jų garso izoliacija, esant įvairiems dažniams. Esant žemiems dažniams (nuo 50 iki 250 Hz), fasadų garso izoliacija siekė nuo 25 iki 32 dB. Tačiau kritinis dažnis, kuriam esant konstrukcija blogai izoliuoja garsą, buvo skirtingas. Jis priklauso nuo langų kritinio dažnio ir balkonų buvimo ar nebuvimo.



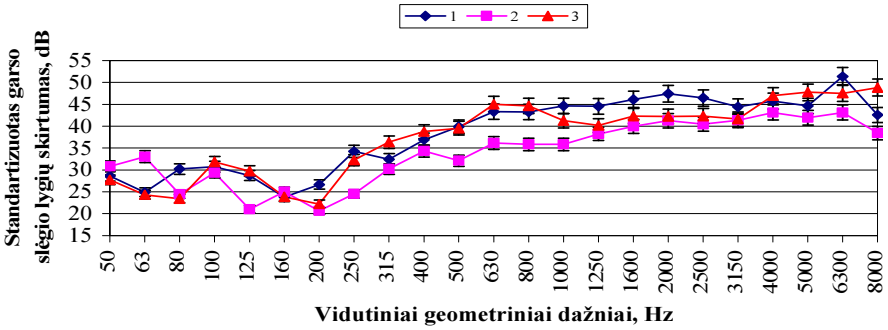
3.5 pav. Fasadų standartizuoto garso slėgio lygio skirtumo $D_{ls,2m,nT,W}$ tyrimo rezultatai: – fasadų su balkonu tyrimo rezultatai; –fasadų be balkonų tyrimo rezultatai

Fig. 3.5. Research results of the standardised pressure level difference for airborne sound $D_{ls,2m,nT,W}$: – Research results of facades with balconies; –research results of facades without balconies

Kritinis dažnis languose nustatytas esant 125–250 Hz, o fasaduose be balkono – ties 125 Hz riba, ir tai sutampa su langų, kurie įstatyti šiuose fasaduose, kritiniu dažniu. Fasadų su balkonais kritinis dažnis susidarė esant 250 Hz dažniui, o fasadų su balkonu ir langu šone kritiniai dažniai ir garso izoliacijos sumažėjimas susidarė atitinkamai ties 160 ir 250 Hz dažniais, tai sutampa su langų garso izoliavimu ir juose susidarančiais kritiniais dažniais. Esant vidutinio aukštumo dažniams, garso izoliavimas siekė nuo 32–40 dB, esant 500 Hz dažniui, iki 37–47 dB, esant 1000 Hz dažniui. Aukštiems dažniams nuo 1250 iki 8000 Hz fasado garso izoliacija siekia iki 50 dB, esant fasadams su balkonu ir papildomu langu šone bei fasadui be balkono. Kitų fasadų garso izoliacija siekia apie 43 dB. Tai tiesiogiai susiję su balkono durų ir langų garso izoliacija.

3.6 paveiksle pateikti fasadų garso izoliacijos tyrimo rezultatai, fasadų, sudarytų iš 600 mm storio plytų mūro, iš vidinės pusės padengtų 5 cm storio akmens vatos sluoksniu ir apkaltų gipso kartonu. Tokia konstrukcija pasižymi ypač aukšta garso izoliacija, todėl tirti fasadai su skirtingo dydžio ir skirtingą garso izoliaciją turinčiais langais (3.9 a, c, d paveikslai). Žemuose garso dažniuose (nuo 50 iki 250 Hz), rezonansai susidarė esant 125 ir 200 Hz, tai nulėmė langų garso izoliavimo savybės. Rezonansas 125 ir 200 Hz dažniuose susidarė fasade (3.9 c pav.), kuriame sumontuoti nevienodo dydžio langai. Esant žemiems dažniams iki 400 Hz, garso izoliacija didėja iki 35–38 dB, toliau didėjant dažniams nuo 500 iki 8000 Hz, garso izoliacija didėja labai nežymiai, po 1–2 dB, oktavai. Tai įrodo, kad fasadų garso izoliacija tiesiogiai priklauso nuo langų garso izoliacijos. Prasčiausiomis garso izoliacinėmis savybėmis pasireiškė fasadas

(3.9 c pav.), kuriame langai užima 50% fasado ploto, o pačių langų garso izoliacija nepakankama.



3.6 pav. Fasadų standartizuoto garso slėgio lygio skirtumo $D_{ls,2m,nTw}$ tyrimo rezultatai: 1) – fasadas su langu (3.9 a pav.); 2) – fasadas su langu (3.9 c pav.); 3) – fasadas su langu (3.9 d pav.)

Fig. 3.6. Research results of standardised pressure level difference for airborne sound $D_{ls,2m,nTw}$: 1) – facade with window (Fig.3.9 a); 2) – facade with window (Fig.3.9 c); 3) – facade with window (Fig.3.9 d)

Fasadų garso izoliacija tiesiogiai priklauso nuo langų garso izoliacijos, jeigu fasaduose įstatyti keli skirtingo dydžio ar formos langai su nevienoda garso izoliacija ir įvairiais kritiniais dažniais. Tokiame fasade susidaro keli rezonansai, kurie žymiai sumažina fasado garso izoliaciją.

3.3. Langų akustinių savybių tyrimo rezultatai

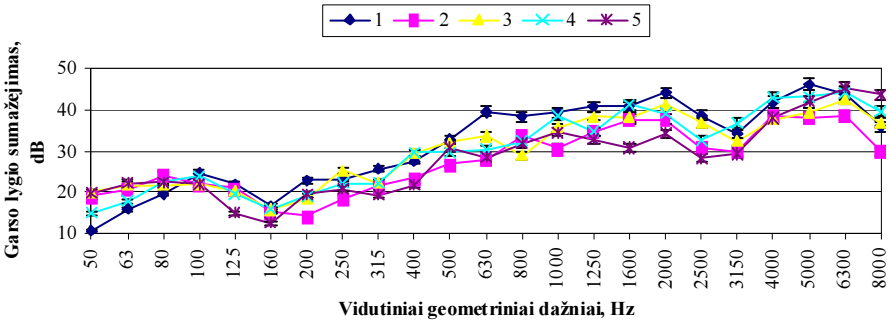
Kadangi namų fasadai susideda iš kelių dalių (sienų ir langų, turinčių skirtingą garso izoliaciją), todėl tikslinga išmatuoti silpniausios fasado garso izoliavimo atžvilgiu dalies, t. y. langų, garso izoliaciją, taikant elementinę garso izoliacijos matavimo metodiką, kuri įgalina atskirai nustatyti pastato langų garso izoliaciją.

Langų garso izoliacijos akustiniai tyrimai atlikti namams su skirtingos sandaros ir įvairių medžiagų plastikinių ar medinių rėmų langais. Garso banga, atsitrenkusi į langą, priverčia jį vibruoti, o vibruojantis langas išspinduliuoja garso bangas į pastato vidų. Taip garso bangos iš išorinės aplinkos perduodamos į vidaus aplinką. Kuri garso dalis pateks į pastatą priklauso nuo lango garso izoliavimo savybių. Kiekvienas langas turi savo rezonansinį dažnį. Tai yra lango laisvasis arba savasis vibracijos dažnis.

Rezonansinis dažnis priklauso nuo lango stiklų masės ir stiklo paketo oro kamerų tarpo. Kuo didesni pastarieji dydžiai, tuo žemesnis lango rezonansinis

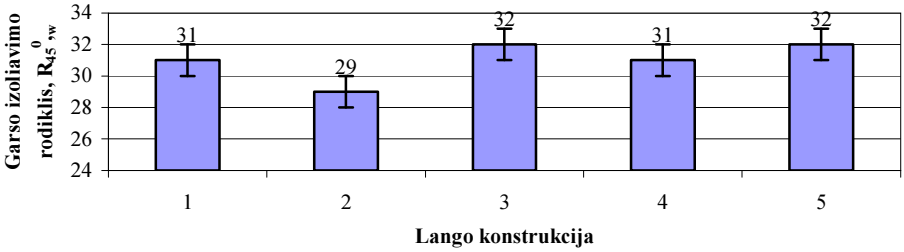
dažnis. 3.1 paveiksle pavaizduota, kaip atliekami tyrimai, garso šaltinį pakėlus nuo žemės, taip kad tarp tiriamojo lango ir garso šaltinio susidarytų 45° kampas. Garso šaltinį pakėlus aukštyn (3.1 pav.), išvengiama garso atspindžių, kurie susidaro garso bangoms atsispindėjus nuo žemės paviršiaus. Tirtų plastikinių langų rėmai buvo sudaryti iš penkių ir trijų oro kamerų, langų dydis siekė apie 2,5 m^2 ir 5 m^2, stiklo paketai sudaryti iš 4 mm storio stiklų ir 6 mm oro tarpo tarp jų. Tirti keli ir vienodi langai, siekiant nustatyti rezultatų patikimumą.

Kaip matyti iš 3.7 paveikslo duomenų, esant žemiems dažniams (nuo 50 Hz iki 400 Hz), garso lygis sumažintas nuo 10 dB, esant plastikiniam langui iš penkių oro kamerų – iki 20 dB. Esant vidutiniams dažniams (nuo 500 iki 1000 Hz), garso lygį plastikiniai langų rėmai sumažina nuo 30 dB iki 40 dB, o esant aukštiems dažniams, garso lygis sumažintas iki 40 dB. Atliekant tyrimus, garso bangų rezonansas visų tipų langams susidarė ties 160 Hz dažniu. Rezonansas susidaro, kada garso dažnis sutampa su lango savitaisiais svyravimais, nes tada konstrukcijos ar lango garso izoliacija labai sumažėja. Blogiausiomis garso izoliacinėmis savybėmis pasižymėjo plastikinio rėmo iš trijų oro kamerų langas su balkono durimis. Šis langas yra vientisas, gaunami mažesni stiklo įtempimai tarp rėmo ir garso bangos lengviau priverčia svyruoti patį stiklo paketą. Kaip matyti iš atliktų tyrimų, garso izoliavimo savybėms langų dydžiai didelės įtakos neturėjo, kadangi visi langai sudaryti iš dviejų arba trijų dalių.



3.7 pav. Langų garso lygio sumažėjimo tyrimų rezultatai: 1) – plastikinis 2,5 m^2 penkių oro kamerų rėmo langas; 2) – plastikinis 4 m^2 langas su balkono durimis ir trijų oro kamerų rėmu; 3) – 5 m^2 penkių oro kamerų rėmo plastikinis langas; 4) – 5 m^2 penkių oro kamerų rėmo plastikinis langas; 5) – 5 m^2 penkių oro kamerų rėmo plastikinis langas

Fig. 3.7. Research results of sound level reduction for windows: 1) – plastic window, 2.5 m^2, with a five-air-chamber frame; 2) – plastic window, 4 m^2, with balcony door and a three-air-chamber frame; 3) – 5 m^2 plastic window with a five-air-chamber frame; 4) – 5 m^2 plastic window with a five- air-chamber frame; 5) – 5 m^2 plastic window with a five-air-chamber frame



3.8 pav. Langų garso izoliacijos rodiklio $R'_{45°,w}$ tyrimų rezultatai: 1) – plastikinis 2,5 m^2 penkių oro kamerų langas; 2) – plastikinis 4 m^2 langas su balkono durimis ir trimis oro kameromis; 3) – 5 m^2 penkių oro kamerų plastikinis langas; 4) – 5 m^2 penkių oro kamerų plastikinis langas; 5) – 5 m^2 penkių oro kamerų plastikinis langas

Fig. 3.8. Research results of the sound reduction index $R'_{45°,w}$ for windows: 1) – 2.5 m^2 plastic window with a five-air-chamber frame; 2) – 4 m^2 plastic window with balcony door and three air chambers; 3) – 5 m^2 plastic window with five air chambers; 4) – 5 m^2 plastic window with five air chambers; 5) – 5 m^2 plastic window with five air chambers

Garso izoliacijos rodiklių reikšmės pateiktos 3.8 paveiksle. Iš čia akivaizdu, kad prasčiausiomis garso izoliacinėmis savybėmis pasižymėjo langas su balkono durimis.

a)

b)

c)

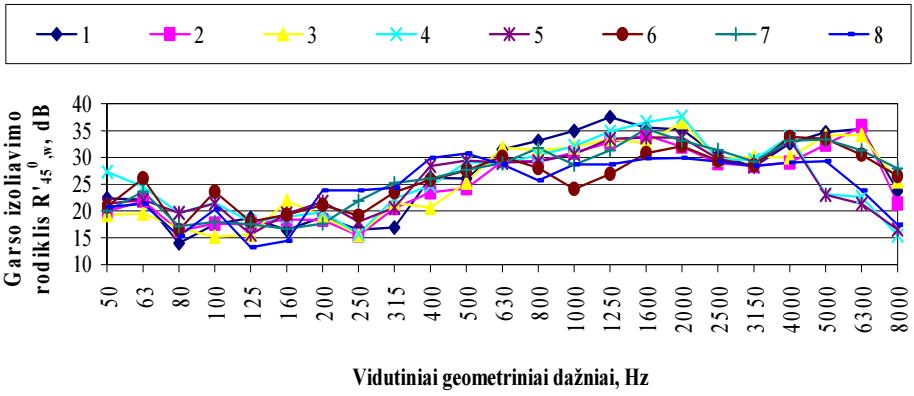
d)

3.9 pav. Klijuoto medžio balkono durys su stiklo paketais: a) ir c) varstomos 4 m^2 balkono durys su balkonu; b) varstomos 4 m^2 balkono durys su balkonu ir varstomos 3,2 m^2 balkono durys be balkono; d) varstomos 3,2 m^2 balkono durys be balkono

Fig. 3.9. Glued wood balcony door with glass packages: a) and c) 4 m^2 hinged balcony door with a balcony; b) 4 m^2 hinged balcony door with a balcony and 3.2 m^2 hinged balcony door without a balcony; d) 3.2 m^2 hinged balcony door without a balcony

Kiti langų tyrimai atlikti naujai pastatytuose namuose, kur įstatyti klijuoto medžio rėmų langai su stiklo paketais. Stiklo paketai sudaryti iš 4 mm storio stiklų ir 12 mm oro tarpo. Matuotas balkonų ir kambarių langų garso izoliavimas, langų pavyzdžiai pateikti 3.9 paveiksle.

3.10 paveiksle pateikti balkonų langų garso izoliavimo rodikliai, esant įvairiems šaltinio garso dažniams. Šie langai iš kitų išsiskiria tuo, kad jie yra varstomi ir tarnauja kaip durys. Esant žemiems dažniams (nuo 50 iki 400 Hz), garso izoliavimas siekė nuo 20 iki 28 dB, esant 50 Hz dažniui, ir nuo 20 iki 30 dB, esant 400 Hz dažniui. Skirtingų langų garso izoliacinės savybės, esant žemiems dažniams, skiriasi iki 10 dB. Tai priklauso nuo langų įtvirtinimo. Esant sąlyginai vidutiniams dažniams nuo 500 iki 1000 Hz, garsas izoliuojamas nuo 25 iki 35 dB. Esant aukštiems dažniams nuo 1250 iki 8000 Hz, apie 30 dB garsas sumažintas ties 2500–3150 Hz dažniais, esant visų langų konstrukcijoms.



3.10 pav. Langų garso izoliacijos rodiklio $R'_{45°,w}$ tyrimų rezultatai: 1 2 3 4 5 – 4 m^2 klijuoto medžio balkono durys su stiklo paketu ir balkonu; 6 7 8 – 3,2 m^2 klijuoto medžio balkono durys su stiklo paketu be balkono

Fig. 3.10. Research results of the sound reduction index $R'_{45°,w}$ for windows: 1 2 3 4 5 – 4 m^2 glued wood balcony door with glass package and balcony; 6 7 8 – 3.2 m^2 glued wood balcony door with glass package without a balcony

Fasaduose be balkono durų įstatyti ir skirtingo dydžio langai (3.11 pav.), kurie daro didelę įtaką fasadų garso izoliacijai. Todėl buvo atlikti langų (jie tarpusavyje skiriasi dydžiu) garso izoliacijos tyrimai, taikant elementinį metodą. Tyrimų rezultatai pateikti 3.12 pav.

Esant žemiems dažniams, nuo 50 iki 200 Hz, langai garso lygį sumažino nuo 10 iki 25 dB. Šie duomenys atitinka tiek literatūroje, tiek eksperimentiniais

tyrimais nustatytą faktą, kad plonos konstrukcijos blogai mažina žemo dažnio garsus. Prasčiausiai garsą, esant žemiems dažniams, izoliavo didesni langai, kadangi juos garso energija lengviau priverčia vibruoti ir perduoti ją iš triukšmingos aplinkos į vidaus patalpas. Esant žemiems dažniams (nuo 200 iki 400 Hz), garso izoliacija languose didėjo nuo 10–20 dB iki 25–32 dB, aukščiausia garso izoliacija išmatuota (3.11 c pav.) langui. Ties 200 Hz dažniu susidarė visų langų garso izoliacijos staigus sumažėjimas, kurį nulėmė languose susidarantis rezonansas. Tiriant plastikinio rėmo langus, garso rezonansas susidarė esant 160 Hz dažniui. Remiantis kitų tyrėjų (M-J. Kim.: H-G. Kim. 2007; C. Diaz.: A. Pedro. 2009) duomenimis, kritiniai dažniai languose susidaro esant 160–200 Hz dažniams. Esant vidutiniams dažniams (nuo 500–1000 Hz), langų garso izoliacija didėja iki 38 dB. Esant aukštiems (nuo 1250 iki 8000 Hz) dažniams, garso lygis mažiausiai susilpninamas ties 2500–3150 Hz dažniais, būtent visų tipų langų garso izoliacija siekė nuo 28 iki 33 dB.

a)

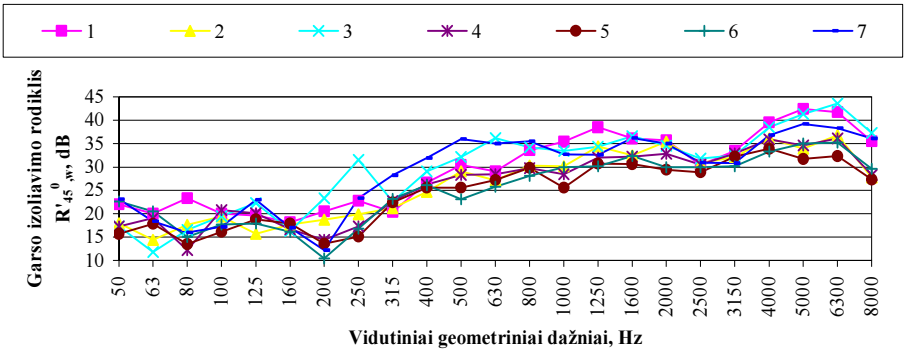
b)

c)

d)

3.11 pav. Klijuoto medžio langai su stiklo paketais: a) varstomas 0,6 m^2 langas iš dviejų dalių; b) varstomas 0,5 m^2 langas; c) trys 1 m^2 varstomi langai; d) du varstomi 1,7 m^2 langai, du 1 m^2 varstomi langai

Fig. 3.11. Glued wood windows with glass packages: a) 0.6 m^2 hinged two-sided window ; b) 0.5 m^2 hinged window; c) three hinged windows, 1 m^2; d) two hinged windows, 1.7 m^2 , two hinged windows, 1 m^2



3.12 pav. Langų garso izoliacijos rodiklio $R'_{45°,w}$ tyrimų rezultatai: 1) 2) – 0,5 m^2 varstomas langas; 3) – varstomas iš dviejų 0,6 m^2 dalių langas; 4) – du po 1 m^2 varstomi langai; 5) 6) – du po 1,7 m^2 varstomi langai 7) – trys po 1 m^2 varstomi langai

Fig. 3.12. Research results of the sound reduction index $R'_{45°,w}$ for windows: 1) 2) – 0.5 m^2 hinged window; 3) – hinged two-sided window, 0.6 m^2; 4) – two hinged windows of 1 m^2 each; 5) 6) – two hinged windows of 1.7 m^2 each 7) – three hinged windows of 1 m^2 each

3.3 lentelė. Langų garso izoliavimo tyrimų rezultatai
Table 3.3 Results of research on window sound insulation

Tiriamasis objektas, langas	Tiriamojo objekto plotas, m^2	Tiriamasis garso izoliavimo rodiklis, dB	Rezultatas, dB
Plastikinis	2,5	$R'_{45°,w}$	31
Plastikinis	4	$R'_{45°,w}$	29
Plastikinis	5	$R'_{45°,w}$	32
Plastikinis	5	$R'_{45°,w}$	31
Plastikinis	5	$R'_{45°,w}$	32
Klijuoto medžio	4	$R'_{45°,w}$	26–28
Klijuoto medžio	4	$R'_{45°,w}$	24
Klijuoto medžio	3,2	$R'_{45°,w}$	23
Klijuoto medžio	3,2	$R'_{45°,w}$	26–28
Klijuoto medžio	2x0,6	$R'_{45°,w}$	30
Klijuoto medžio	1	$R'_{45°,w}$	29–30

3.3 lentelės pabaiga

Klijuoto medžio	1,7	$R'_{45°,w}$	25–26
Klijuoto medžio	1	$R'_{45°,w}$	28–29

3.3 lentelėje pateikti langų garso izoliavimo rodiklio tyrimų apibendrinti rezultatai. Kaip matyti iš lentelės, geresniu garso izoliavimu pasižymėjo plastikinio rėmo langai, nors stiklo paketai įstatyti ir plastikiniuose, ir klijuoto medžio rėmuose. Didesnis garso izoliavimo efektas pasiekiamas esant mažesnių matmenų langams, kadangi mažesnis stiklo lakštas prasčiau pasiduoda garso bangų keliamiems svyravimams ir mažiau garso energijos iš aplinkos perduoda į vidaus patalpas. Nustatyta, kad geriausia langų garso izoliaciją matuoti triukšmo šaltinį keliant į viršų nuo žemės, nes tokiu būdu išvengiama garso atspindžių nuo žemės ir galima atlikti langų ar fasadų garso izoliacijos matavimus vietose, kur to negalima padaryti statant šaltinį ant žemės dėl aplinkos kliūčių ar pirmame aukšte, kur statant šaltinį ant žemės, nesudaromas 45° kampas tarp garso šaltinio ir fasado.

3. 4. Trečiojo skyriaus išvados

1. Ištyrus skirtingų sandarų fasadus, nustatyta, kad didžiausias 41 dB garso izoliacijos rodiklis išmatuotas fasado, kuris sudarytas iš akyto betono blokelių, apklijuotas polistirenu ir apkaltas lentelėmis bei įstatytas plastikinio rėmo 3 m^2 langas su stiklo paketu.
2. Langų garso izoliacija dažniausiai matuojama triukšmo slopinimo kamerose, tačiau lango sumontavimo ir garso izoliacijos tyrimo sąlygos skiriasi nuo natūrinėmis sąlygomis sumontuotų langų, todėl tikslinga langų garso izoliaciją matuoti jų sumontavimo vietoje, panaudojant elementinį metodą.
3. Atliktais tyrimais nustatyta, kad langų dydis ir garso izoliacijos savybės lemia bendrą fasado garso izoliaciją. Fasaduose, kuriuose sumontuoti keli skirtingi langai, su skirtinga garso izoliacija ir skirtingais garso rezonansiniais dažniais, sumažina fasado garso izoliacijos rodiklį.
4. Nustatyta, kad plastikinio rėmo langai su stiklo paketais pasižymi iki 5 dB geresnėmis garso izoliacinėmis savybėmis, negu klijuoto medžio rėmo langai su stiklo paketais.

4

Pastato pertvarų garso izoliavimo natūriniai eksperimentiniai tyrimai

Užtikrinant patalpų garso izoliavimą nuo kitų bendro naudojimo patalpų ar garažų, svarbu, kad pertvaros atitiktų reikalavimus garsui izoliuoti. Todėl buvo tiriama skirtingų konstrukcijų pertvarų garso izoliacija patalpose, kur jos sumontuotos. Tirtas pertvarų standartizuotas garso slėgio lygių skirtumas $D_{nT,W}$ ir tariamas oro garso izoliavimo rodiklis R'_w. Taip pat atlikta atitvarų garso izoliavimo dažninės charakteristikos analizė.

Šio skyriaus duomenys paskelbti straipsnyje *Januševičius ir Butkus 2010*.

4.1. Pastato pertvarų garso izoliavimo natūrinių tyrimų metodika

Atliekant natūrinius pastato atitvarų akustinius matavimus, griežtai laikytasi tam tikrų bandymų sąlygų. Matuotos tokios pat formos ir matmenų patalpos. Jeigu patalpos nevienodų dydžių, tada didesnė patalpa buvo naudota kaip siunčiamojo garso, o mažesnė – kaip priimamojo garso. Didesnėse patalpose, kad susidarytų difuzinis laukas, buvo įrengti sklaidytuvai, arba sklaidytuvų funkcijas atliko baldai. Matavimai atliekami trečdalio oktavos dažnių juostoje, tačiau gali būti atlik-

ti ir oktavos dažnių juostoje. Matavimams siunčiamojo garso patalpoje naudotas „baltas“ triukšmas. Prieš atliekant matavimus, patikrintas garso lauko difuziškumas, kur garso lygis trečdalio oktavos juostose negali skirtis daugiau kaip 6 dB.

Matavimų metu sukuriamas garsas turi būti toks galingas, kad priimamojo garso patalpoje garso slėgio lygis, būtų mažiausiai 10 dB didesnis nei fono lygis kiekvienoje dažnių juostoje.

Garsiakalbio vietos parinktos taip, kad sukuriamas garso laukas būtų, kiek galima, labiau difuziškas, nuo sienų išlaikyti mažiausiai 0,5 m atstumai, kad nevyrautų garso atspindžiai.

Matuojant garso slėgio lygį siunčiamojo garso patalpoje, nuolat keistos mikrofono ir garsiakalbio išdėstymo vietos. Tyrimo metodikose nurodoma, kad būtina panaudoti mažiausiai dvi garsiakalbio ir dešimt mikrofono skirtingų pozicijų, priklausomai nuo patalpos dydžio. Jeigu patalpos plotas iki 50 m^2, garsiakalbis statomas trijose pozicijose, o mikrofonas išdėstomas bent dešimtyje pozicijų, išlaikant atstumų reikalavimus.

Matuojant garso lygį priimamojo garso patalpoje, vidutinis garso slėgio lygis nustatytas pagal visų matavimų vidutinę reikšmę. Vidaus patalpoje išmatuojama garso aidėjimo trukmė, kuri tikrinama devynis kartus panaudojant skirtingas garsiakalbio pozicijas. Po to apskaičiuotas aritmetinis vidurkis, taip pat nustatytas pertvaros plotas bei priimamojo garso patalpos tūris. Mikrofonai turi būti išdėstyti mažiausiais atstumais:

- 0,7 m atstumu tarp mikrofonų;
- 0,5 m atstumu tarp bet kurios mikrofono vietos ir patalpos ribų arba sklaidytuvų;
- 1,0 m atstumu tarp bet kurios mikrofono vietos ir garso šaltinio.

Tariamas garso izoliavimo rodiklis R'_w apskaičiuotas pagal (4.1) formulę. Šis dydis žymimas R'_w ir išreiškiamas decibelais:

$$R'_w = L_1 - L_2 + 10\lg (S/A), \tag{4.1}$$

čia: L_1 – vidutinis garso slėgio lygis siunčiamojo garso patalpoje, dB; L_2 – vidutinis garso slėgio lygis priimamojo garso patalpoje, dB; S – tiriamosios sienos plotas, m^2;

$A = \left(\frac{0{,}163V}{T}\right)$ – lygiavertis garso sugerties plotas priimamojo garso patalpoje, m^2; T – priimamojo garso patalpos aidėjimo trukmė, s.

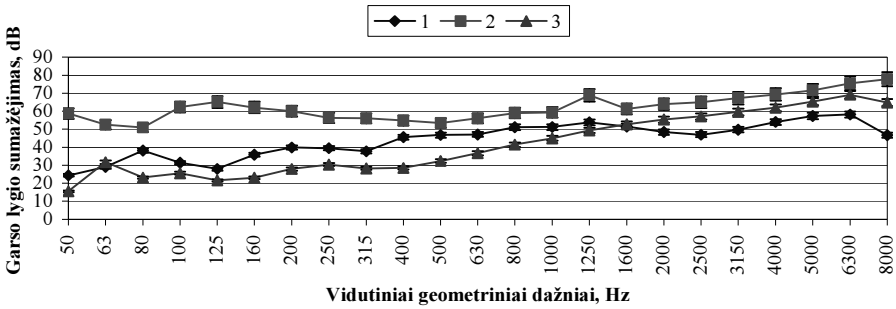
Standartizuotasis garso slėgio lygių skirtumas $D_{nT,W}$ decibelais apskaičiuojamas pagal (2.2) formulę.

4.2. Pertvarų akustinių natūrinių tyrimų rezultatai

Trijų skirtingų pertvarų garso izoliavimo vidutinių geometrinių dažnių juostose matavimų duomenys pavaizduoti 4.1 paveiksle. Didžiausias standartizuoto garso slėgio lygių skirtumas ($D_{nT,W}$ = 62 dB) išmatuotas restauruotame name, kurio pertvaros sudarytos iš 520 mm plytų mūro ir iš abiejų pusių nutinkuotos 10 mm tinku.

Žemesnis standartizuotas garso slėgio lygio skirtumas ($D_{nT,W}$ 42 dB) išmatuotas naujai pastatytame individualiame name, kuriame pertvara skiria miegamąjį kambarį nuo garažo. Pertvara sudaryta iš 250 mm molio blokelių ir iš abiejų pusių nutinkuota 10 mm tinko sluoksniu.

Be to nepakankamas standartizuotas garso slėgio lygio skirtumas ($D_{nT,W}$ = 49 dB) išmatuotas naujai pastatytame name, kuriame pertvaros sudarytos iš dvigubų 200 mm keramzitinių blokelių su oro tarpu (4.1 pav.).



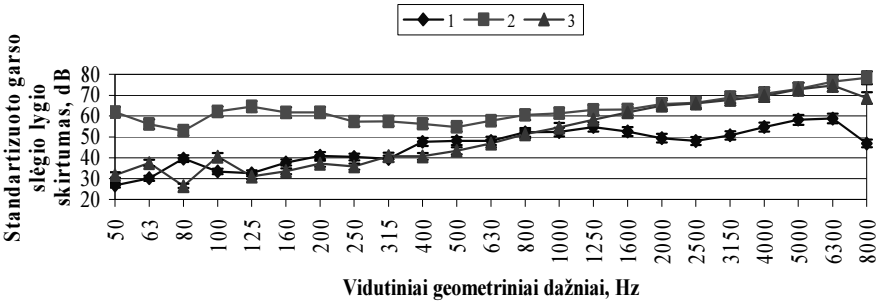
4.1 pav. Garso lygio sumažėjimas vidutinių geometrinių dažnių juostoje: 1 – pertvara, sudaryta iš molinių 250 mm blokelių; 2 – pertvara, sudaryta iš 520 mm plytų mūro ir iš abiejų pusių užtinkuota 10 mm tinko sluoksniu; 3 – pertvara, sudaryta iš 3 MPa keramzitinių blokelių

Fig. 4.1. Sound level reduction in the band of average geometrical frequencies: 1 – interior wall composed of clay blocks of 250 mm; 2 – interior wall composed of 520 mm brickwork plastered with 10 mm plaster layer from both sides; 3 – interior wall composed of 3 MPa expanded clay tiles

4.1 pav. pateikti garso lygio sumažėjimo rezultatai paaiškinami masės dėsniu, pagal kurį, sunkinant atitvarą, garso izoliacija didėja. Sudėtingiausia sumažinti žemus dažnius, nes jų bangos blogai sugeriamos, tačiau yra žinoma, kad, didinant konstrukcijos storį, gerinamas ir žemų dažnių sugėrimas. Tai pasiteisino plytų mūro konstrukcijai, kuri, esant žemiems dažniams nuo 50 iki 125 Hz, garso lygį sumažino nuo 50 iki 65 dB, esant dažniams nuo 160 iki 400 Hz, garso lygis sumažintas nuo 55 iki 65 dB. Tačiau dar geresnė garso izoliacija būtų pa-

siekta, jeigu tokia stora plytų mūro pertvara turėtų akmens vata užpildytą oro tarpą.

Pertvara, sudaryta iš molinių blokelių, garso lygį, esant žemiems dažniams nuo 50 iki 125 Hz, sumažino nuo 22 iki 38 dB, o esant žemiems dažniams nuo 160 iki 400 Hz garso lygis sumažintas nuo 30 iki 45 dB. Prasčiausiomis garso izoliavimo savybėmis, esant žemiems dažniams nuo 50 iki 400 Hz, pasižymėjo pertvara iš keramzitinių blokelių (4.1 paveikslo 3 kreivė). Ji garso lygį sumažino nuo 15 dB, esant 50 Hz dažniui, iki 30 dB, esant nuo 250 iki 400 Hz dažniui. Esant vidutiniams 400–1000 Hz dažniams geriausiomis garso izoliacijos savybėmis pasižymėjo plytų mūro pertvara, kuri garso lygį sumažino nuo 52 iki 60 dB. Molinių blokelių pertvara, esant vidutiniams 400–1000 Hz dažniams, garso lygį sumažino 48–52 dB, o pertvara iš keramzitinių blokelių, esant vidutiniams 400–1000 Hz dažniams, garso lygį sumažino 30–45 dB. Esant aukštiems dažniams (nuo 1250–8000 Hz), didžiausia garso sugertimi pasižymėjo pertvara iš plytų mūro, kuri garso lygį sumažino nuo 60 iki 80 dB, o pertvara iš keramzitinių blokelių, pasižymėjusi prastesnėmis garso izoliavimo savybėmis, esant žemiems ir vidutiniams dažniams, esant aukštiems dažniams nuo 1250–8000 Hz, garso lygį sumažino nuo 50 iki 70 dB. Pertvara iš molinių blokelių, esant aukštiems (nuo 1250–8000 Hz) dažniams, garso lygį sumažino nuo 48 iki 58 dB.



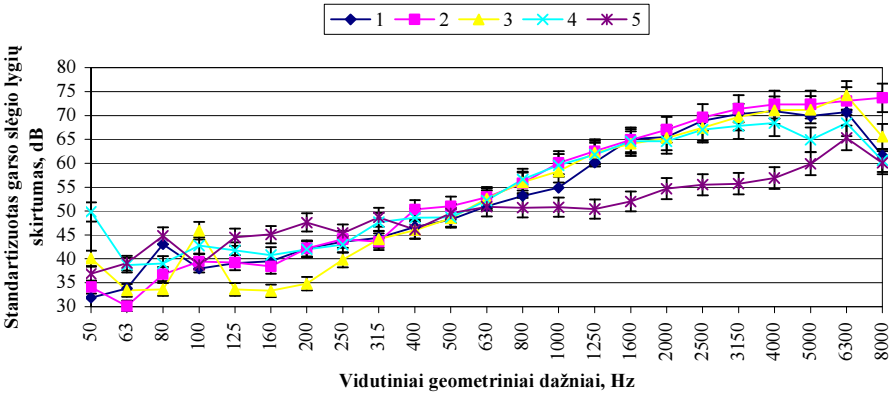
4.2 pav. Standartizuotas garso slėgio lygių skirtumas vidutinių geometrinių dažnių juostoje: 1 – molinių 250 mm blokelių pertvara; 2 – 520 mm plytų mūro ir iš abiejų pusių užtinkuota 10 mm tinko sluoksniu pertvara; 3 – 3 MPa keramzitinių blokelių pertvara

Fig. 4.2. Standardised pressure level difference for airborne sound in the band of average geometrical frequencies: 1 – interior wall of 250 mm clay blocks; 2 – 520 mm brickwork interior wall plastered with 10 mm plaster layer from both sides; 3 – 3 MPa interior wall of expanded clay tiles

Kaip matyti iš 4.2 paveikslo, esant žemiems dažniams, didžiausias standartizuotas garso slėgio lygių skirtumas išmatuotas 500 mm plytų mūro pertvarai. Perskaičiavus garso slėgio lygio sumažėjimą, esant skirtingiems dažniams, į

standartizuotą garso slėgio lygių skirtumą, esant molinių ir keramzitinių blokelių sienoms, standartizuotas garso slėgio lygių skirtumas, kintant garso dažniams nuo 50 iki 1250 Hz, išliko beveik vienodas abejoms konstrukcijoms. Tai nulėmė skirtinga aidėjimo trukmė patalpose. Esant dažniams nuo 1250 iki 6300 Hz, pertvarų iš plytų mūro ir keramzitinių blokelių standartizuotas garso slėgio lygių skirtumas vidutiniuose geometriniuose dažniuose susivienodino dėl reverberacijos laiko skirtumo patalpose.

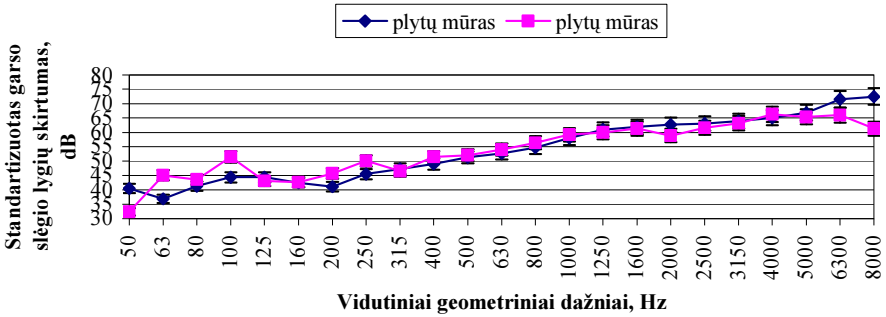
Pertvarų garso izoliavimo rodiklių ir garso sumažėjimo, esant skirtingiems dažniams, tyrimai atlikti Vilniuje, naujai pastatytuose daugiaaukščiuose namuose, kuriuose sumontuotos skirtingos tarpbutinės pertvaros, sudarytos iš plytų mūro, dujų silikato ar keramzitinių blokelių. Dalis pertvarų turėjo neužtaisytas oro vėdinimo ventiliacijos skyles. Todėl tyrimai atlikti su pertvaromis be ventiliacijos skylių ir su ventiliacijos skylėmis, siekiant ištirti garso perdavimą netiesioginiu keliu per pertvarą, o taip pat ir per ventiliacijos sistemą. Tyrimo rezultatai pateikti 4.3 ir 4.4 paveiksluose.



4.3 pav. Standartizuotas garso slėgio lygių skirtumas, vidutinių geometrinių dažnių juostoje: 1 – 250 mm pertvara, sudaryta iš silikatinių blokelių ir iš abiejų pusių užtinkuotos 20 mm tinko sluoksniu; 2 ir 4 – pertvaros, sudarytos iš 3 MPa keramzitinių blokelių ir iš abiejų pusių užtinkuota 20 mm tinko sluoksniu; 3 ir 5 – pertvaros su neužtaisytomis oro vėdinimo angomis, sudarytos iš 3 MPa keramzitinių blokelių ir iš abiejų pusių užtinkuotos 20 mm tinko sluoksniu

Fig. 4.3. Standardised pressure level difference for airborne sound in the band of average geometrical frequencies: 1 – 250 mm interior wall composed of silicate blocks plastered with 20 mm plaster layer from both sides; 2 and 4 – interior walls composed of 3 MPa expanded clay tiles and plastered with 20 mm plaster layer from both sides; 3 and 5 – interior walls with non-sealed air vents composed of 3 MPa expanded clay tiles and plastered with 20 mm plaster layer from both sides

Esant keramzitinėms pertvaroms (4.3 pav. 2 ir 4 kreivės) ir dujų silikato blokelių pertvaroms (1 kreivė), išmatuotas standartizuotas garso slėgio lygių skirtumas siekė 55 dB, ir atitiko tarpbutinėms pertvaroms keliamus reikalavimus. Tačiau keramzitinės pertvaros su neužtaisytomis oro vėdinimo angomis, pasižymėjo nepakankama garso izoliacija: išmatuotas standartizuotas garso slėgio lygių skirtumas siekė 52–53 dB. Esant žemiems dažniams nuo 50 iki 250 Hz, prasčiausiu standartizuotu garso slėgio lygių skirtumu pasižymėjo 3 pertvara, kuri standartizuotą garso slėgio lygį sumažino nuo 33 iki 40 dB, o pertvaros be vėdinimo angų standartizuotą garso slėgio lygį sumažino apie 5 dB geriau. Esant dažniams nuo 315 iki 630 Hz, pertvarų oro vėdinimo angos garso izoliavimui ypatingos reikšmės neturėjo. Esant aukštiems (nuo 1250 iki 8000 Hz) dažniams, keramzitinių ir silikatinių blokelių pertvaros pasižymėjo beveik identiškomis savybėmis, išskyrus pertvarą su oro vėdinimo anga, per kurią buvo perduodami aukštų dažnių garsai. Pastarieji ir nulėmė šios pertvaros nepakankamą garso izoliaciją.



4.4 pav. Standartizuotas garso slėgio lygių skirtumas vidutinių geometrinių dažnių juostoje, pertvaros, sudarytos iš plytų mūro, 50 mm akmens vatos tarp vertikalaus medinio karkaso ir 12 mm gipso kartono plokštės

Fig. 4.4. Standardised pressure level difference for airborne sound in the band of average geometrical frequencies, interior walls composed of brickwork, 50 mm rock wool between a vertical wooden frame and 12 mm gypsum cardboard

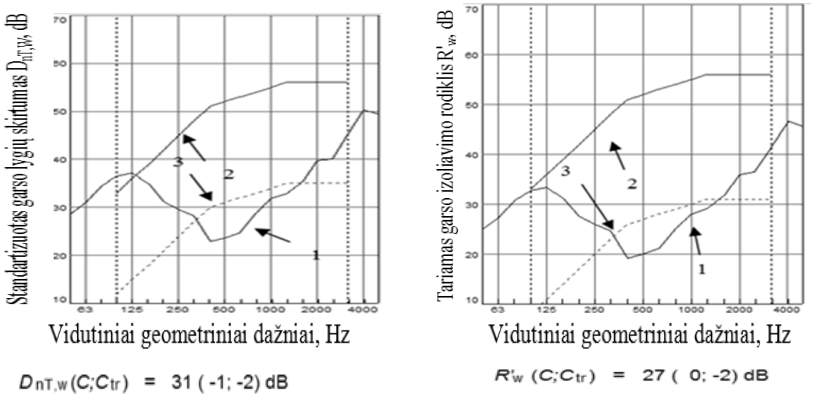
Kaip matyti iš 4.4 pav. duomenų, pertvarų, sudarytų iš plytų mūro, akmens vatos tarp vertikalaus 50 mm medinio karkaso ir 12 mm gipso kartono plokštės, standartizuotas garso slėgio lygių skirtumas siekė 55 ir 57 dB. Garso izoliavimas, esant įvairiems vidutiniams geometriniams dažniams, pavaizduotas 4.4 paveiksle. Esant žemiems dažniams nuo 50 iki 400 Hz, standartizuotas garso slėgio lygis sumažintas nuo 33 iki 52 dB, esant vidutiniams geometriniams dažniams nuo 500 iki 1000 Hz, standartizuoto garso slėgio lygis siekė iki 60 dB, o esant aukštiems dažniams nuo 1250 iki 8000 Hz, $D_{nT,W}$ vertės siekė nuo 60 iki 72 dB. Didžiausi (iki 10 dB) nesutapimai tarp abiejų konstrukcijų (4.4 pav.) gauti esant

žemiems dažniams nuo 50 iki 100 Hz, tačiau šita dažnių sritis nepatenka į absoliutinį standartizuoto garso slėgio lygio apskaičiavimą.

Geriausiomis garso izoliavimo savybėmis išsiskyrė iš kitų plytų mūro pertvara su užpildytu oro tarpu akmens vatos sluoksniu, kuris sugeria garsą ir neleidžia jam sklisti per konstrukciją. Naudojant keramzito blokelius, kurie yra populiarūs dėl savo lengvumo ir paprasto mūrijimo, akustiniam komfortui užtikrinti būtina oro tarpą užpildyti akmens vata ir storai užtinkuoti iš abiejų pusių. Jeigu pertvarose paliekamos neužtaisytos oro vėdinimo angos, per kurias perduodamas garsas, tokia pertvara neužtikrina pakankamo garso izoliavimo.

4.3. Tariamo garso izoliavimo rodiklio R'_w ir standartizuoto garso slėgio lygių skirtumo $D_{nT,W}$ priklausomybės nuo patalpos tūrio tyrimo rezultatai

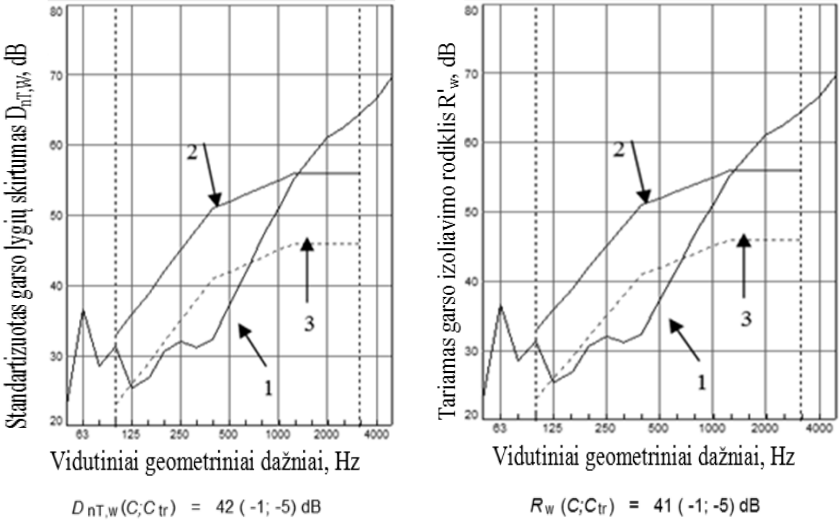
Garso izoliacijos rodikliai nustatomi dviem lygiaverčiais parametrais: tariamo garso izoliavimo rodikliu R'_w arba standartizuotu garso slėgio lygių skirtumu $D_{nT,W}$. Skirtingos šalys savo nacionalinėje teisinėje bazėje yra priėmusios arba standartizuotą garso slėgio lygio skirtumą $D_{nT,W}$, arba tariamą garso izoliavimo rodiklį R'_w, arba abu kartu. Tačiau, atliekant tyrimus pastebėta, kad šitie rodikliai priklauso nuo patalpos tūrio, o ypač tariamas garso izoliavimo rodiklis R'_w.



4.5 pav. Tariamas garso izoliavimo rodiklis R'_w ir standartizuotas garso slėgio lygių skirtumas $D_{nT,W}$ esant patalpos tūriui 192 m^3; 1) – tyrimų rezultatai; 2) – atskaita pagal ISO 717-1; 3 – atskaitos kreivė, perstumta pagal ISO 717-1

Fig. 4.5. Apparent sound reduction index R'_w and standardised pressure level difference for airborne sound $D_{nT,W}$ when room volume is 192 m^3; 1) – research results; 2) – reference according to ISO 717-1; 3 – reference curve shifted according to ISO 717-1

Kuo didesnis patalpos tūris, tuo didesnis skirtumas atsiranda tarp tariamo garso izoliavimo rodiklio R'_w ir standartizuoto garso slėgio lygio skirtumo $D_{nT,W}$. 4.5 paveiksle pavaizduoti matavimo rezultatai. 192 m^3 patalpoje skirtumas tarp tariamo garso izoliavimo rodiklio R'_w ir standartizuoto garso slėgio lygio skirtumo $D_{nT,W}$ yra 4 dB. Standartizuotas garso slėgio lygis $D_{nT,W}$ gautas didesnis už tariamą garso izoliavimo rodiklį R'_w. 4 dB skirtumas tarp garso izoliavimo rodiklių gali turėti lemiamos reikšmės, įvertinant sienos akustines charakteristikas ir suteikiant garso klasę.



4.6 pav. Tariamas garso izoliavimo rodiklis R'_w ir standartizuotas garso slėgio lygių skirtumas $D_{nT,W}$ esant patalpos tūriui 55 m^3; 1) – tyrimų rezultatai; 2) – atskaita pagal ISO 717-1; 3 – atskaitos kreivė, perstumta pagal ISO 717-1

Fig. 4.6. Apparent sound reduction index R'_w and standardised pressure level difference for airborne sound $D_{nT,W}$ at room volume of 55 m^3; 1) – research results; 2) – reference according to ISO 717-1; 3 – reference curve shifted according to ISO 717-1

4.6 paveiksle pateikti patalpos, kurios tūris buvo 55 m^3, tyrimo rezultatai. Skirtumas tarp tariamo garso izoliavimo rodiklio R'_w ir standartizuoto garso slėgio lygio skirtumo $D_{nT,W}$ tik 1 dB. Standartizuotas garso slėgio lygio skirtumas $D_{nT,W}$ yra didesnis už tariamą garso izoliavimo rodiklį R'_w.

Skirtumas tarp tariamo garso izoliavimo rodiklio ir standartizuoto garso slėgio lygių skirtumo atsirado dėl to, kad skaičiuojant tariamą oro garso izoliavimo rodiklį R'_w, įvertintas patalpos tūris.

4.4. Ketvirtojo skyriaus išvados

1. Siekiant, kad dvigubų keramzitinių blokelių pertvara atitiktų C garso izoliavimo rodiklį, būtina oro tarpą užpildyti mineraline ar stiklo vata, pertvarą iš abiejų pusių nutinkuoti maždaug 15–20 mm tinko sluoksniu. Visiškai garso izoliacijai užtikrinti būtina pertvarą padengti gipso kartono plokšte.
2. Nustatyta, kad C garso izoliavimo klasę atitinka 200 mm pytų mūro pertvaros su užpildytu oro tarpu garsą sugeriančia mineraline vata.
3. Geriausiomis garso izoliacinėmis savybėmis pasižymėjo ir B garso izoliavimo klasę atitiko pertvara iš 520 mm plytų mūro. Tokią pertvarą galima naudoti žemo dažnio garsams sumažinti, kadangi, esant žemiems dažniams, tokios konstrukcijos pertvara garso lygį sumažino 60 dB.
4. Nustatyta, kad pertvarose esančios vėdinimo angos garso izoliavimo rodiklį sumažina iki 3 dB.
5. Pertvarų garso izoliavimas atskirose šalyse apibrėžiamas nevienodai, Lietuvoje matuojamas standartizuotas garso slėgio lygių skirtumas $D_{nT,W}$ ir tariamas garso izoliavimo rodiklis R'_w. Tačiau šie rodikliai priklauso nuo patalpų tūrio: esant patalpoms didesnėms negu 50 m^3, tarp abiejų garso izoliavimo rodiklių susidaro iki 4 dB skirtumas. Todėl geriau matuoti standartizuotą garso slėgio lygio skirtumą, kadangi aidėjimo trukmė nepriklauso nuo patalpos tūrio.

5

Pastato perdangų garso izoliavimo natūriniai eksperimentiniai tyrimai

Šiame skyriuje aprašomi perdangų smūgio garso izoliacijos tyrimai. Smūgio garso izoliavimo rodiklis $L_{nT,w}$ tirtas naujai pastatytuose ar renovuotuose pastatuose. Perdangos sudarytos iš įvairių medžiagų su skirtingais sluoksniais. Tirtos perdangų smūgio garso izoliavimo savybės, esant daugiasluoksnėms perdangoms, kur garsą sugeriantis sluoksnis sudarytas iš akmens vatos ar polistireno.

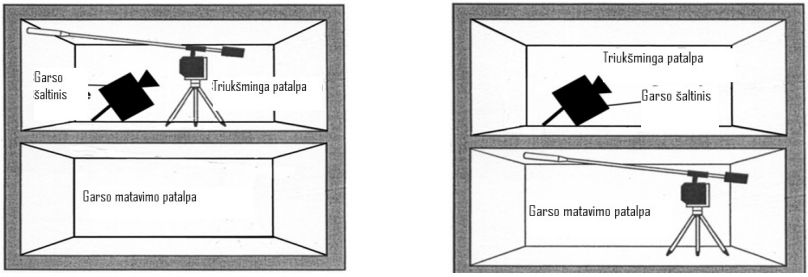
Šio skyriaus duomenys paskelbti straipsnyje *Butkus ir Januševičius 2010.*

5.1. Perdangų garso izoliavimo natūrinių tyrimų metodika

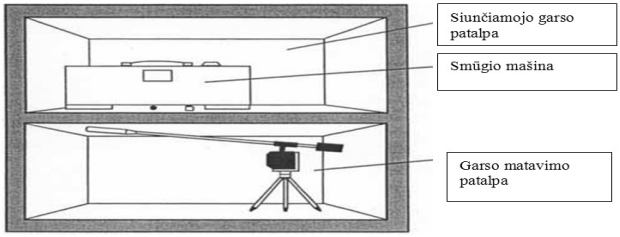
Perdangų garso izoliacija gali būti matuojama dviem skirtingais metodais, būtent: orine ir smūgine perdangų garso izoliacija. Orinė perdangų garso izoliacija matuojama panaudojant dvylikabriaunį visakryptį garsiakalbį, kuris statomas virš perdangos. Garso lygis matuojamas (5.2 pav.), siunčiamojo ir priimamojo garso patalpose, o aidėjimo trukmė – patalpoje, esančioje po perdanga (5.2 pav.). Perdangų smūginei garso izoliacijai matuoti naudojama smūginė – taptavimo mašina (5.1 pav.). Taptavimo mašina yra smūgius sukeliantis įrenginys „Bru-

el&Kjaer 2307“. Jį sudaro 5 darbiniai plaktukai, kurių svoris 500 g, o darbinis dažnis – 10 Hz; plaktukų kritimo aukštis 40 mm. Tai standartinė mašina, atitinkanti reikalavimus, keliamus taptavimo mašinoms naudojamoms perdangų smūgio tyrimams.

5.1 pav. Perdangų garso izoliacijai matuoti naudojama smūginė mašina
Fig. 5.1. Impact machine used to measure sound insulation of ceilings



5.2 pav. Perdangų garso izoliacijai matuoti naudojamas visakryptis garsiakalbis
Fig. 5.2. All-direction microphone used to measure sound insulation of ceilings



5.3 pav. Perdangų garso izoliacijai matuoti naudojama smūgio mašina
Fig. 5.3. Impact machine used to measure sound insulation of ceilings

Bandant smūgio garsą, taptavimo mašina išdėstoma bent keturiuose skirtinguose taškuose, kurie atsitiktinai pasiskirstę bandomosiose grindyse. Bandymo metu išlaikomi bent 0,5 m., atstumai nuo smūgio mašinos iki grindų kraštų. Kai grindų konstrukciją sudaro skirtingi elementai (tašai, gulekšniai ir t. t.), smūgio

mašinai parenkama daugiau išdėstymo taškų. Plaktukų linijos kryptis sudaro 45° kampą su tašų ar gulekšnių kryptimi.

Pradėjus veikti smūgio mašinai, garso lygiai gali priklausyti nuo veikimo trukmės. Tokiais atvejais matavimai pradedami tik nusistovėjus garso lygiui. Jeigu garso lygis nenusistovi per 5 min., matuojama kitame, geriau parinktame, matavimo intervale.

Normuotasis smūgio garso slėgio lygis L'_n, yra smūgio garso slėgio lygis L_i su pataisa. Pataisa yra išmatuoto priimamojo garso patalpoje lygiaverčio sugerties ploto A ir atskaitos lygiaverčio sugerties ploto A_0 santykio dešimteriopas dešimtainis logaritmas, kuris apskaičiuojamas pagal formulę:

$$L'_{n,} = L_i + 10\lg\frac{A}{A_0}, \qquad (5.1)$$

čia: A_0= atskaitos lygiavertis garso sugerties plotas, kuris priimamas kaip konstanta 10 m^2; A = (0,32 V) – lygiavertis garso sugerties plotas priimamojo garso patalpoje, m^2; L_i = smūgio garso slėgio lygis.

Standartizuotasis smūgio garso slėgio lygis L'_{nT}, yra smūgio garso slėgio lygis L_i, sumažintas pataisa. Pataisa yra išmatuotos priimamojo garso patalpoje aidėjimo trukmės T ir atskaitos aidėjimo trukmės T_0 santykio dešimteriopas dešimtainis logaritmas. Išreiškiamas decibelais ir apskaičiuojamas pagal formulę:

$$L'_{n,T\mathrm{w}} = L_i - 10\lg\frac{T}{T_0}, \qquad (5.2)$$

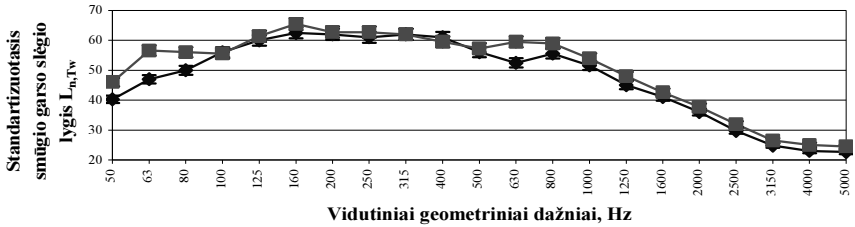
čia: T – priimamojo garso patalpos aidėjimo trukmė, s; T_0 – atskaitos aidėjimo trukmė; gyvenamosioms patalpoms T_0 = 0,5 s.

5.2. Perdangų garso izoliavimo natūrinių tyrimų rezultatai

Svarbų vaidmenį, užtikrinant pastatų garso izoliaciją, atlieka perdangos. Jeigu perdanga vienasluoksnė, tada labai gerai perduodami smūginiai garsai, kurie susidaro vaikštant, stumdant baldus ir esant kitai veiklai. Perdangų garso izoliacija matuota naujai pastatytuose ar rekonstruotuose pastatuose.

Rekonstruotame pastate, kurio pertvaros sudarytos iš plytų mūro, o perdangos – iš gelžbetoninių plokščių, dengtų linoleumu su „Amstrong“ pakabinamomis lubomis, matuotas standartizuotasis smūgio garso slėgio lygis $L_{n,T\mathrm{w}}$. Matavimai atlikti dviejuose skirtinguose aukštuose, skirtingo dydžio (56 ir 70 m^3) patalpose. Išmatuotas perdangos standartizuotas smūgio garso slėgio lygis $L_{n,T\mathrm{w}}$

siekė 55 ir 57 dB. Tyrimų rezultatai vidutiniuose geometriniuose dažniuose pateikti 5.4 paveiksle.

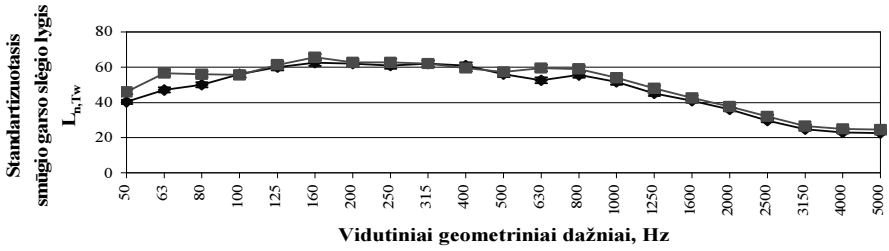


5.4 pav. Perdangos, sudarytos iš gelžbetoninių plokščių, dengtų linoleumu, su Amstrong pakabinamomis lubomis, standartizuotas smūgio garso slėgio lygis $L_{n,Tw}$: —◆— – 56 m^3 patalpa; —■— – 70 m^3 patalpa

Fig. 5.4. Standardised pressure level for impact sound $L_{n,Tw}$ for ceilings composed of reinforced concrete slabs, covered with linoleum, with suspended ceiling "Amstrong": —◆— – 56 m^3 room; —■— – 70 m^3 room

Perdangų standartizuotas smūgio slėgio lygis $L'_{n,Tw}$, matuotas rekonstruotame name, kurio pertvaros sudarytos iš tinko / plytų mūro (520 mm) / tinko, o perdanga – iš „Teriva" blokelių / sijos / grindų, grindys – iš medžio drožlių plokščių, dengtų garsą ir smūgius sugeriančia plėvele bei „plaukiojančiu" parketu.

Matavimo rezultatai pateikti 5.5 paveiksle. Nustatytas 45 ir 46 dB perdangos standartizuotas smūgio garso slėgio lygis $L'_{n,Tw}$, o perdangų linijinė koreliacija $R^2 = 0{,}8182$. Tai rodo pakankamai gerą matavimo rezultatų koreliaciją.



5.5 pav. Perdangos, sudarytos iš „Teriva" blokelių / sijos / grindų, standartizuoto smūgio garso slėgio lygis $L'_{n,Tw}$: —◆— – 60 m^3 patalpa; —■— – 85 m^3 patalpa

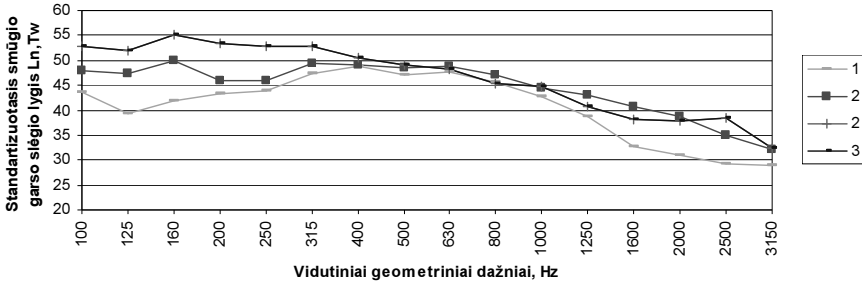
Fig. 5.5. Standardised pressure level for impact sound $L_{n,Tw}$ for ceilings composed of blocks "Teriva"/ beam / floor: —◆— – 60 m^3 room; —■— – 85 m^3 room

Kuo aukštesnis pertvaros garso izoliacijos rodiklis, tuo geresnėmis garso izoliavimo savybėmis pasižymi pertvara. Perdanga, atvirkščiai negu pertvara,

geresnėmis garso izoliavimo savybėmis pasižymi esant žemesniam standartizuoto smūgio garso slėgio lygiui. Išmatuotas pertvaros izoliacijos rodiklis tarp kambarių atitiko B klasę. Vadinasi, nustatytas padidinto komforto garso izoliavimas. Šiuo atveju perdanga, kaip ir pertvara, atitinka B klasę – padidinto komforto garso izoliavimo klasę.

Naujai pastatytuose namuose perdangų tyrimai atlikti esant trijų tipų perdangoms. Pirmo tipo perdangos sudarytos iš 220 mm armuotų gelžbetoninių plokščių, 40 mm garso izoliacinės akmens vatos, 50 mm išlyginamojo cemento smėlio skiedinio sluoksnio S 20 SL., antro tipo – iš 220 mm armuoto monolitinio betono, 40 mm garso izoliacinės akmens vatos, 50 mm išlyginamojo cemento smėlio skiedinio sluoksnio S 20 SL., ir trečio tipo – iš 80 mm armuotos monolitinės plokštės, 80 mm betono C25/30, 160 mm putų polistireno EPS – 100, 50 mm išlyginamojo cemento smėlio skiedinio SL. S 30.

Geriausiomis smūgio garso izoliavimo savybėmis išsiskyrė pirmo tipo perdanga, kurios smūgio garso slėgio lygis siekė 43 dB. Antro tipo perdangos smūgio garso slėgio lygis siekė 47–51 dB, o trečio tipo – smūgio garso slėgio lygis siekė 49 dB (5.6 pav.).



5.6 pav. Perdangų smūgio garso slėgio lygis: 1) – 220 mm armuotos gelžbetoninės plokštės, 40 mm garso izoliacinė akmens vata, 50 mm išlyginamasis cemento smėlio skiedinys S 20 SL.; 2) – 220 mm armuotas monolitinis betonas, 40 mm garso izoliacinė akmens vata, 50 mm išlyginamojo cemento smėlio skiedinys S 20 SL.; 3) – armuotos monolitinės plokštės, 80 mm betonas C25/30, 160 mm putų polistirenas EPS – 100, 50 mm išlyginamojo cemento smėlio skiedinys SL. S 30

Fig. 5.6. Impact sound pressure level for ceilings: 1) – 220 mm armed reinforced concrete slabs, 40 mm sound-insulating rock wool, 50 mm levelling cement sand grout S 20 SL.; 2) – 220 mm armed cast-in-place concrete, 40 mm sound-insulating rock wool, 50 mm levelling cement sand grout S 20 SL.; 3) – armed cast-in-place slabs, 80 mm concrete C25/30, 160 mm foam polystyrene EPS – 100, 50 mm levelling cement sand grout SL. S 30

Geriausiomis smūgio garso izoliavimo savybėmis, pasižymėjo perdanga, sudaryta iš 220 mm armuotos gelžbetoninės plokštės, 40 mm garso izoliacinės

akmens vatos, S 20 SL, 50 mm išlyginamojo cemento smėlio skiedinio. Šios perdangos smūgio garso slėgio lygis siekė 43 dB ir atitiko B garso izoliavimo klasę.

5.3. Penktojo skyriaus išvados

1. Perdangos, kurios sudarytos iš gelžbetoninių plokščių, o garso izoliacinė medžiaga yra akmens vata, smūgio garso izoliavimo rodiklis nustatytas iki 6 dB didesnis negu perdangų sudarytų iš monolitinių plokščių su garso izoliaciniu polistireno sluoksniu.
2. Nustatyta, kad perdangų smūgio garso izoliacija nepriklauso nuo patalpos tūrio, kadangi patalpos aidėjimo trukmė, kuri tiesiogiai nulemia perdangos smūgio garso izoliavimo rodiklį, nepriklauso nuo patalpos tūrio.
3. Geriausiomis smūgio garso izoliavimo savybėmis, iš kitų išsiskyrė perdanga, sudaryta iš 220 mm armuotos gelžbetoninės plokštės, 40 mm garso izoliacinės akmens vatos, 50 mm išlyginamojo cemento smėlio skiedinio S 20 SL. Šios perdangos smūgio garso slėgio lygis siekė 43 dB ir atitiko B garso izoliavimo klasę.

6

Garso izoliavimo rodiklio R_W teorinis skaičiavimas

Šiame skyriuje pateikiami pertvarų garso izoliavimo rodiklių apskaičiavimų duomenys pagal masės dėsnį ir pagal tarptautinį standartą ISO 12354-1. Apskaičiavimų duomenys lyginami tarpusavyje ir analizuojamos apskaičiuotų ir matuotų duomenų nesutapimo priežastys. Tiriamos galimybės skaičiuoti garso izoliavimo rodiklius, esant plytų, keramzito ar molinių blokelių mūro ir rąstinių namų pertvaroms. Šio skyriaus duomenys paskelbti straipsnyje *Januševičius, Butkus 2010.*

6.1. Garso izoliavimo rodiklio R_w teorinio skaičiavimo metodika

Pertvaros izoliacijos rodiklis pagal masės dėsnį apskaičiuojamas pagal tris skirtingas (6.1), (6.2) ir (6.3) formules (Ballagh 2004; Stauskis 2007):

$$R = 20\lg(fm) - 47\,; \tag{6.1}$$

$$R = \left(20\lg \frac{\pi f m}{\rho c} - 3 \right); \tag{6.2}$$

$$R = 20\lg \frac{\pi m f}{\rho_o c}, \tag{6.3}$$

čia: f – garso dažnis, Hz; m – atitvaros ploto vieneto masė, kg/m^2; ρ – atitvaros medžiagos tankis, kg/m^3; c – garso sklidimo greitis ore, m/s; ρ_o – oro tankis, kg/m^3.

Teorinis garso izoliavimas taip pat gali būti skaičiuojamas pagal tarptautinį standartą ISO 12354-1. Skaičiavimai pagal standartą gali būti taikomi teoriniam garso izoliacijos rodiklio prognozavimui ir atliekami pagal (6.4) formulę:

$$R = -10\lg \tau . \tag{6.4}$$

Perdavos koeficientas τ apskaičiuojamas pagal (6.5), (6.6), (6.7) formules, kiekvienam atskaitos dažniui.

Kada dažnis didesnis už kritinį dažnį ($f > f_c$), tada τ skaičiuojamas pagal (6.5) formulę:

$$\tau = \left(\frac{2\rho_o c_o}{2\pi f m'} \right)^2 \frac{\pi f_c \sigma^2}{2 f \eta_{tot}} . \tag{6.5}$$

Jei skaičiuojami dažniai apytiksliai lygūs kritiniam dažniui ($f \approx f_c$), tada τ skaičiuojamas pagal (6.6) formulę:

$$\tau = \left(\frac{2\rho_o c_o}{2\pi f m'} \right)^2 \frac{\pi \sigma^2}{2\eta_{tot}} . \tag{6.6}$$

Kai dažnis mažesnis už kritinį dažnį ($f < f_c$), tada τ skaičiuojamas pagal (6.7) formulę:

$$\tau = \left(\frac{2\rho_o c_o}{2\pi f m'} \right)^2 \left(2\sigma_f + \frac{(l_1 + l_2)^2}{l_1^2 + l_2^2} \sqrt{\frac{f_c}{f}} \frac{\sigma^2}{\eta_{tot}} \right), \tag{6.7}$$

čia: τ – perdavos koeficientas; m' – elemento vienetinio ploto masė, kg/m^2;
f – dažnis, Hz;

f_c– kritinis dažnis, $f_c = c_o^2 / (1{,}8 c_L t))$, Hz;

f_c– kritinis dažnis. Kritinis dažnis apskaičiuojamas taikant formulę: $f_c = c_o^2/(1{,}8 c_L t)$, Hz; kur: η_{tot} – bendrasis silpninimo faktorius, nustatomas laboratorinėmis sąlygomis; σ – laisvųjų lenkimo bangų spinduliuotės faktorius;

σ_f – priverstinio perdavimo spinduliuotės faktorius, apskaičiuojamas pagal (6.8) formulę; l_1, l_2 – stačiakampio elemento ribų ilgiai, m.

Bendrasis silpninimo faktorius apskaičiuojamas laboratorinėmis sąlygomis.

Priverstinių bangų spinduliuotės faktorius, kai l_1 vertė yra didesnė nei l_2, apskaičiuojamas pagal (6.8) formulę:

$$\sigma_f = 0{,}5\left[\ln\left(k_o\sqrt{l_1 l_2}\right) - \Lambda\right]; \quad \sigma_f \le 2. \tag{6.8}$$

Λ – apskaičiuojamas pagal (6.9) formulę:

$$\Lambda = -0{,}964 - \left(0{,}5 + \frac{l_2}{\pi l_1}\right)\ln\frac{l_2}{l_1} + \frac{5 l_2}{2\pi l_1} - \frac{1}{4\pi l_1 l_2 k_o^2}, \tag{6.9}$$

čia $k_o = 2\pi f / c_o$ – bangų skaičius.

Laisvųjų bangų spinduliuotės faktorius apskaičiuojamas pagal Maidaniko lygtis, (6.10 ir 6.11) formules (Maidanik, 1962).

$$\sigma_1 = \frac{1}{\sqrt{1 - f_c/f}}; \quad \sigma_2 = 4 l_1 l_2 \left(\frac{f}{c_o}\right)^2; \quad \sigma_3 = \sqrt{\frac{2\pi f\left(l_1 + l_2\right)}{16 c_o}}, \tag{6.10}$$

$$f_{11} = \frac{c_o^2}{4 f_c}\left(\frac{1}{l_1^2} + \frac{1}{l_2^2}\right); \tag{6.11}$$

jeigu $f_{11} \le f_c/2$ tai: $f \ge f_c : \sigma = \sigma_1$; tai: $f < f_c$; tai: $\sigma = \frac{2\left(l_1 + l_2\right)}{l_1 l_2}\frac{c_o}{f_c}\delta_1 + \delta_2$;

$$\delta_1 = \left(\frac{\left(1 - \lambda^2\right)\ln\frac{1+\lambda}{1-\lambda} + 2\lambda}{4\pi^2\left(1 - \lambda^2\right)^{1,5}}\right), \text{ čia: } \lambda = \sqrt{\frac{f}{f_c}} \tag{6.12}$$

Jeigu $2f_{11} \le f_c < 2f$, tai: $\delta_2 = 0$; jeigu $f \le f_{11} < \frac{f_c}{2}$ ir $\sigma > \sigma_2$; tai $\sigma = \sigma_2$; tačiau $\sigma \le 2$; jeigu $2f_{11} > f_c > f$ ir $\sigma_2 < \sigma_3$, tai $\sigma = \sigma_2$; jeigu $2f_{11} > f_c$, $f_c > f$ ir $\sigma_1 < \sigma_3$, tai $\sigma = \sigma_1$; jeigu $2f_{11} > f_c$ ir $\sigma = \sigma_3$, tai $\sigma \le 2$, tai $\delta_2 = \frac{8c_o^2\left(1-2\lambda^2\right)}{f_c^2\pi^4 l_1 l_2 \lambda\sqrt{1-\lambda^2}}$.

Šios formulės tinka plokščių, įrėmintų begalinio ekrano sąlygomis (tai paprastai priimtina laboratorijose) spinduliuotės faktoriui apskaičiuoti. Tačiau statinių konstrukcijos elementai paprastai įrėminti stačiakampiais elementais, dėl to žymiai gali padidėti spinduliavimo efektyvumas žemesniu negu kritinis dažnis nuo 2 (kraštinė moda) iki 4 (kampinė moda) kartų.

Atsižvelgiant į kitus bangų tipus, atitinkančius plonas sienas ir / arba aukštesnius dažnius, skaičiavimui taikant aukštesnį nei kritinį dažnį, pastarasis dažnis keičiamas efektyviuoju kritiniu dažniu, taikant (6.13) formulę, kuri paremta Ljungryno darbu (Ljunggren, 1991):

$$f_{c,eff} = f_c\left(4{,}05\frac{tf}{c_L} + \sqrt{1+\left(4{,}05\frac{tf}{c_L}\right)}\right), \quad \text{kai} \quad f < f_p; \tag{6.13}$$

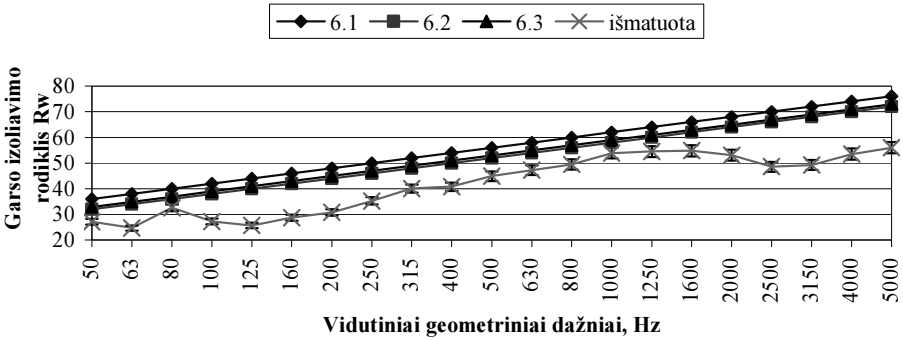
$$f_{c,eff} = 2f_c\left(\frac{f}{f_p}\right)^3, \text{ kai } f_p = \frac{c_L}{5{,}5t}, \qquad \text{kai} \quad f \ge f_p.$$

čia: t – elemento storis, m; c_L – išilginės bangos greitis medžiagoje, m/s.

6.2. Teoriškai apskaičiuoto ir eksperimentiškai nustatyto garso izoliavimo rodiklio R_w palyginimas

Pertvarų garso izoliavimo rodiklis skaičiuotas teoriškai pagal (6.1), (6.2) ir (6.3) formules ir palygintas su išmatuotu. Pertvaros sudarytos iš plytų mūro 120 mm ir iš abiejų pusių apklijuotos gipso kartono plokštėmis bei nutinkuotos. Tyrimų ir teorinių skaičiavimų rezultatai pateikti 6.1 paveiksle. Kaip matyti iš paveikslo, išmatuotas garso izoliavimo rodiklis yra mažesnis negu teoriškai apskaičiuotas. Labiausiai išmatuoto rodiklio neatitinka ir didžiausios reikšmės gautos skaičiuojant pagal (6.1) formulę. Mažiausi nesutapimai, skaičiuojant teoriškai ir matuojant garso izoliacijos rodiklį, nustatyti pritaikius (6.2) formulę. Skaičiuojant pa-

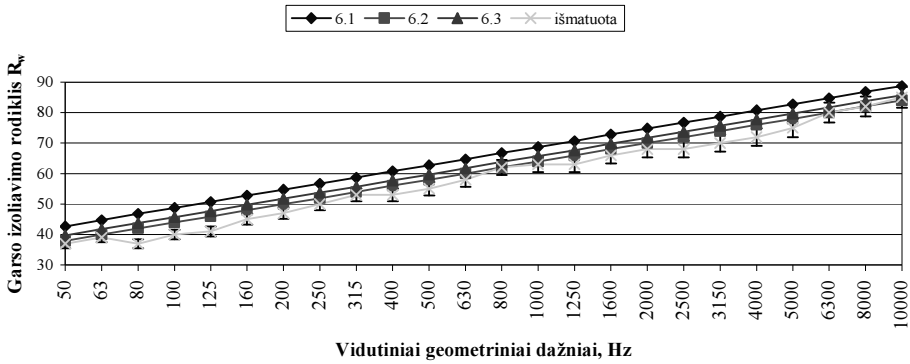
gal (6.2) formulę, rezultatas 1 dB mažesnis esant visiems dažniams negu skaičiuojant pagal (6.3) formulę. Tarp išmatuoto ir apskaičiuoto garso izoliavimo rodiklio nedidelis, iki 6 dB, skirtumas gautas esant žemiems dažniams nuo 50 iki 80 Hz. Esant žemiems nuo 100 iki 500 Hz dažniams, didžiausias, t.y. 15 dB, nesutapimas gautas esant 125 Hz dažniui, nes atitvaroje pasireiškė garso bangų rezonansas ir labai sumažėjo garso izoliavimo rodiklis. Esant dažniams nuo 630 iki 1600 Hz, apskaičiuotų ir išmatuotų rezultatų nesutapimai siekia iki 7 dB. Esant aukštiems dažniams, didžiausio (18 dB) nesutapimo būta esant 2500 Hz dažniui. Nesutapimai tarp matuotų ir teoriškai apskaičiuotų rezultatų galimi ir dėl garso perdavimo iš vienos patalpos į kitą aplinkiniais keliais, gretimomis sienomis ir perdangomis. Be to, nedideliu garso sumažėjimu konstrukcija pasižymi ir dėl struktūrinės sandaros. Konstrukcijoje nėra garsą absorbuojančių medžiagų, kaip akmens ar stiklo vata, kurios sugeria garso bangas ir paverčia jas šilumine energija. Gipso kartono plokštėms, prispaustoms tiesiogiai prie plytų mūro, būdinga prastesnė garso izoliacija. Tai padeda garsui tiesiogiai pereiti per konstrukciją, kadangi nėra oro tarpo.



6.1 pav. Pertvaros, sumūrytos iš 120 mm plytų mūro, garso izoliavimo rodikliai: 6.1 6.2 6.3 – garso izoliavimo rodikliai, apskaičiuoti pagal masės dėsnį; skaičius, šalia kreivės rodo formulės numerį, pagal kurią atlikti skaičiavimai; – garso izoliavimo rodiklis, išmatuotas natūrinėmis sąlygomis

Fig. 6.1. Sound reduction indices for the interior wall made of 120 mm brickwork: 6.1 6.2 6.3 – sound reduction indices calculated according to the law of mass; the figure beside the curve shows the number of the formula which was used for calculations; – sound reduction index measured under natural conditions

Pertvaros, sudarytos iš 320 mm plytų mūro ir iš abiejų pusių nutinkuotos, tyrimų ir teorinių skaičiavimo rezultatai pateikti 6.2 paveiksle.



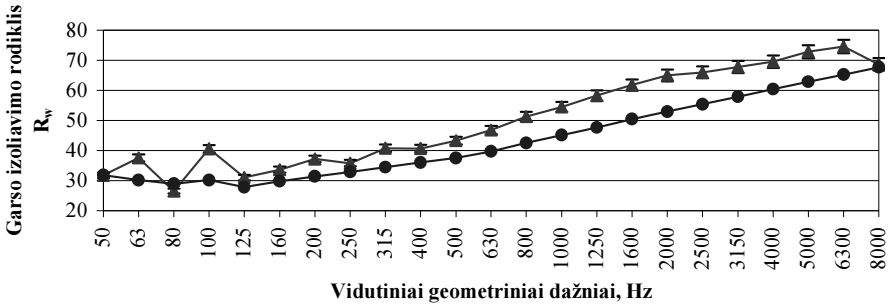
6.2 pav. Pertvaros, sumūrytos iš 320 mm plytų mūro, garso izoliavimo rodikliai: – garso izoliavimo rodikliai, apskaičiuoti pagal masės dėsnį; skaičius šalia kreivės rodo formulės numerį, pagal kurią atlikti skaičiavimai; – garso izoliavimo rodiklis, išmatuotas natūrinėmis sąlygomis

Fig. 6.2. Sound reduction indices for the interior wall made of 320 mm brickwork: – sound reduction indices calculated according to the law of mass; the figure beside the curve shows the number of the formula which was used for calculations; – sound reduction index measured under natural conditions

Išmatuotas garso izoliavimo rodiklis R'_w iki 6 dB mažesnis negu teoriškai apskaičiuotas. Didžiausi neatitikimai tarp išmatuoto ir apskaičiuoto garso izoliavimo rodiklio atskiruose dažniuose gauti skaičiuojant pagal (6.1) formulę; mažiausi – tarp išmatuoto ir apskaičiuoto pagal (6.2) formulę. Skaičiuojant pagal (6.2) formulę, rezultatas 1 dB mažesnis visuose dažniuose negu skaičiuojant pagal (6.3) formulę. Tarp išmatuoto ir apskaičiuoto pagal (6.2) formulę garso izoliavimo rodiklio 1 dB nesutapimas gautas esant žemiems 50 ir 63 Hz dažniams. Didžiausias nesutapimas, esant žemiems dažniams nuo 80 iki 500 Hz, nustatytas esant 80 Hz dažniui: nesutapimas tarp išmatuoto ir paskaičiuoto garso izoliacijos rodiklio siekė 5 dB, o kituose dažniuose nesutapimas svyruoja nuo 1 iki 3 dB oktavai. Esant vidutiniams nuo 630 iki 1000 Hz dažniams, nesutapimas prie 630 Hz siekė iki 2 dB, o esant 800 Hz dažniui, nesutapimų tarp skaičiuotų ir matuotų pagal (6.2) formulę nebuvo.

6.3 paveiksle pavaizduota garso izoliavimo rodiklio kaita pertvaroje, sudarytoje iš 10 cm storio keramzitinių blokelių. Garso izoliacijos rodiklis matuotas natūrinėmis sąlygomis ir palygintas su apskaičiuotu pagal tarptautinį standartą. Kaip matyti iš paveikslo duomenų, esant žemiems dažniams nuo 50 iki 100 Hz, nesutapimai tarp išmatuotų ir apskaičiuotų rezultatų siekė iki 10 dB. Esant žemiems dažniams, nuo 125 iki 500 Hz, gauti išmatuotų ir apskaičiuotų reikšmių nesutapimai siekė iki 5 dB. Esant aukštiems dažniams (nuo 1000 iki 8000 Hz),

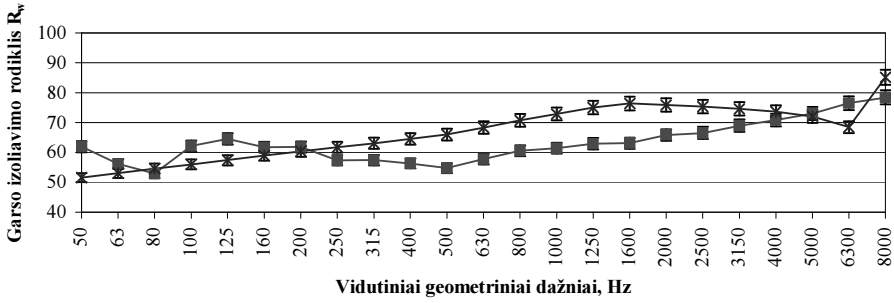
nustatyta nesutapimų iki 12 dB tarp išmatuotų ir apskaičiuotų rezultatų. Esant aukštiems dažniams (nuo 1250 iki 10000 Hz), nesutapimai siekė iki 4 dB.



6.3 pav. Pertvaros, sudarytos iš kerazitinių blokelių, garso izoliacijos rodikliai: —●— – garso izoliavimo rodiklis, apskaičiuotas pagal (6.4) formulę; —▲— – garso izoliavimo rodiklis, išmatuotas natūrinėmis sąlygomis

Fig. 6.3. Sound reduction indices for an interior wall made of expanded clay tiles: —●— – sound reduction index calculated according to formula (6.4); —▲— – sound reduction index measured under natural conditions

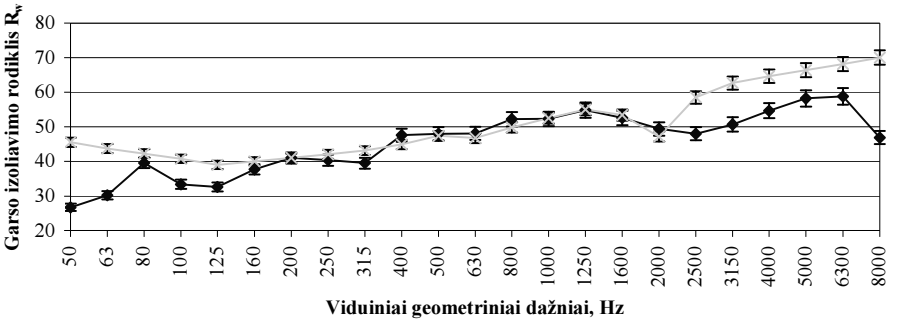
6.4 paveiksle pavaizduoti pertvaros, sudarytos iš 520 mm plytų mūro, garso izoliavimo rodiklio matavimų natūrinėmis sąlygomis ir skaičiavimų rezultatai. Esant žemiems dažniams (nuo 50 iki 500 Hz), nustatyta iki 12 dB, nesutapimų tarp apskaičiuotų ir išmatuotų rezultatų. Esant dažniams nuo 630 iki 2000 Hz, išmatuotos reikšmės iki 13 dB, mažesnės negu teoriškai apskaičiuotos. Esant dažniams nuo 2500 iki 8000 Hz, išmatuoti ir apskaičiuoti rezultatai nesutapo iki 8 dB.



6.4 pav. Plytų mūro pertvaros garso izoliavimo rodikliai: —■— 1) – garso izoliavimo rodiklis, išmatuotas natūrinėmis sąlygomis; —✳— 2) – garso izoliavimo rodiklis, apskaičiuotas pagal (6.4) formulę

Fig. 6.4. Sound reduction indices for a brickwork interior wall: —■— 1) – sound reduction index measured under natural conditions; —✳— 2) – sound reduction index calculated according to formula (6.4)

Pertvaros, sudarytos iš 25 cm molio keramikinių blokelių ir nutinkuotų iš abiejų pusių 10 mm tinko sluoksniu, natūrinių tyrimų ir teorinių garso izoliacijos rodiklių skaičiavimų rezultatai pavaizduoti 6.5 paveiksle. Didžiausi molinių blokelių pertvaros nesutapimai tarp matuotų ir apskaičiuotų rezultatų gauti esant žemiems dažniams, būtent nuo 50 iki 150 Hz. Skaičiuoti rezultatai nuo išmatuotų skyrėsi iki 20 dB. Tokius skirtumus lėmė žemi dažniai, kadangi juos geriausiai sumažina didelės masės ir storos konstrukcijos. Be to, žemo dažnio garsas natūrinėmis sąlygomis geriau pereina per aplinkines konstrukcijas, o tai sumažino išmatuotąsias vertes. Esant dažniams nuo 160 iki 2000 Hz, išmatuotų ir apskaičiuotų rezultatų nesutapimų būta tik iki 2 dB. Esant aukštiems dažniams (nuo 2500 iki 6300 Hz), rezultatų nesutapimai siekė iki 12 dB. Skaičiuotų ir išmatuotų rezultatų nesutapimai atsirado todėl, kad tiriamosios medžiagos nevisiškai atitinka savybes, kurios priimamos skaičiavimuose. Gali skirtis medžiagų masė, tankis, be to, natūrinėmis sąlygomis dalis garso gali sklisti aplinkinėmis konstrukcijomis.

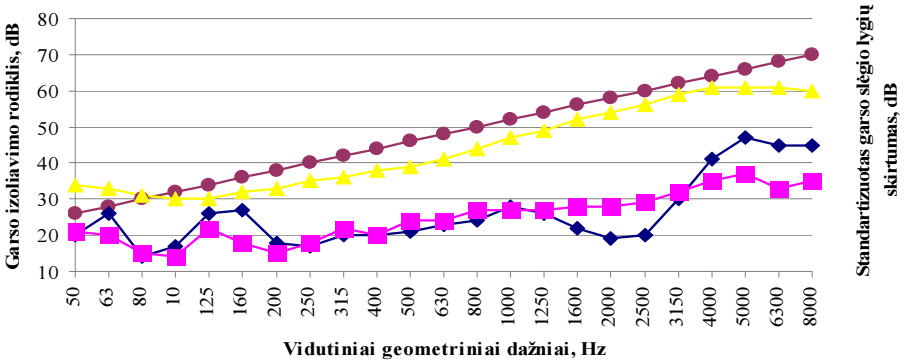


6.5 pav. Molio keramikinių blokelių pertvaros garso izoliavimo rodikliai: –×– garso izoliavimo rodiklis, apskaičiuotas pagal (6.4) formulę; –◆– garso izoliavimo rodiklis, išmatuotas natūrinėmis sąlygomis

Fig. 6.5. Sound reduction indices for an interior wall of clay ceramic blocks: –×– sound reduction index calculated according to formula (6.4); –◆– sound reduction index measured under natural conditions

15 cm storio medienos rąstų pertvaros standartizuoto garso slėgio lygių skirtumo $D_{nT,W}$ bei natūrinių ir kamerinių tyrimų ir teorinių garso izoliacijos rodiklių skaičiavimų rezultatai pavaizduoti 6.6 paveiksle. Išmatuoti ir apskaičiuoti rąstinės pertvaros garso izoliavimo rezultatai labiausiai nesutampa tarpusavyje. Galbūt taip yra todėl, kad rąstinių namų pertvaros nėra vienalytės, jos sudarytos iš atskirų nutašytų ir išfrezuotų 15 cm storio ir pločio stačiakampių pušinių rąstų, kurie tarpusavyje sujungiami suspaudžiant ir į tarpą įklojant pakulų. Tarp rąstų atsiranda įvairių tarpelių, į kuriuos teoriškai skaičiuojant neatsižvelgiama. Tačiau teoriškai apskaičiuotas garso izoliavimo rodiklis pagal masės dėsnį

(6.2 formulė), vidutiniškai apie 5 dB oktavai didesnis negu apskaičiuotas pagal (6.4) formulę.



6.6 pav. Rąstinės pertvaros garso izoliavimo rodikliai: – garso izoliavimo rodiklis, apskaičiuotas pagal (6.4) formulę; – garso izoliavimo rodiklis, apskaičiuotas pagal (6.1) formulę; – standartizuotas garso slėgio lygio skirtumas, išmatuotas natūrinėmis sąlygomis; – standartizuotas garso slėgio lygio skirtumas, išmatuotas triukšmo slopinimo kameroje

Fig. 6.6. Sound reduction indices for a log interior wall: – the sound reduction index was calculated according to formula (6.4); – the sound reduction index was calculated according to formula (6.1); – the standardised pressure level difference for airborne sound measured under natural conditions; – the standardised pressure level difference for airborne sound measured in a noise suppression chamber

Kaip matyti iš atliktų natūrinių tyrimų ir jų lyginimo su apskaičiuotaisiais pagal masės dėsnį ir tarptautinį standartą, ir vieni, ir kiti (matuoti ir apskaičiuoti) garso izoliavimo rodiklio rezultatai turi artimas reikšmes. Vadinasi, parenkant statybai medžiagas, galima prognozuoti jų garso izoliavimo savybes.

6.3. Šeštojo skyriaus išvados

1. Pertvarų teoriniai garso izoliacijos skaičiavimai gali būti atlikti dviem būdais: pagal masės dėsnį arba pagal tarptautinį standartą, tačiau skaičiavimai pagal standartą yra tikslesni, nes įvertinama daugiau medžiagos savybių.
2. Didžiausi nesutapimai tarp duomenų, apskaičiuotų pagal masės dėsnį ir išmatuotų, nustatyti 120 mm plytų mūro pervarai: esant žemiems dažniams, nesutapimas tarp skaičiuotų ir matuotų rezultatų siekė iki 15 dB; esant vidutiniams dažniams nesutapimų būta iki 7 dB, o esant aukštiems dažniams, matuoti ir skaičiuoti rezultatų nesutapimai sudarė iki 18 dB.

3. Esant 320 mm storio plytų mūro pertvarai, skaičiuotų teoriškai pagal masės dėsnį ir matuotų rezultatų nesutapimai buvo labai nežymūs ir daugiausia siekė iki 5 dB.
4. Atlikti 25 cm molinių blokelių pertvarų tyrimai leido nustatyti, kad, didžiausių nesutapimų tarp išmatuotų ir apskaičiuotų garso izoliavimo rodiklių gauta iki 20 dB žemuose nuo 50 iki 150 Hz dažniuose. Esant dažniams nuo 160 iki 2000 Hz, išmatuotų apskaičiuotų rezultatų nesutapimai gauti tik iki 2 dB. Esant aukštiems dažniams, nuo 2500 iki 6300 Hz, rezultatų nesutapimas siekė iki 12 dB.

7

Statybinių konstrukcijų garso izoliavimo skaitinis modeliavimas

Konstrukcijų, pagamintų iš skirtingų medžiagų su vienodomis akustinėmis savybėmis, garso izoliavimas tiriamas triukšmo slopinimo kamerose. Tokie tyrimai reikalauja daug laiko. Ypač sudėtinga atlikti natūrinius perdangų smūgio ir oro garso izoliavimo tyrimus.

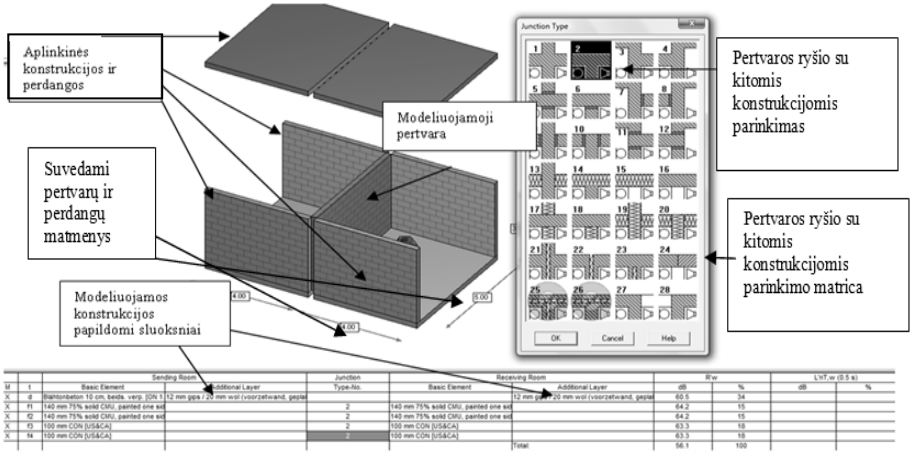
Kaip alternatyva eksperimentiniams tyrimams yra prognozavimas modeliuojant. Modeliavimo programa BASTIAN galima prognozuoti konstrukcijų garso izoliaciją. Ji taikoma reikiamai garso izoliacijai pastatuose pasiekti, esamoms konstrukcijoms parenkant papildomas garsą sugeriančias medžiagas. Modeliavimo programą BASTIAN galima panaudoti statybinių medžiagų garso izoliavimui prognozuoti planuojant statybas.

7.1. Garso izoliavimo pastatuose modeliavimo BASTIAN programa metodika

Garso izoliavimo modeliavimo programa BASTIAN apskaičiuojamas garso perdavimas per elementus ir sistemas, kuriomis garsas sklinda iš vienos patalpos į kitą. Šia programa galima sumodeliuoti ir apskaičiuoti garso sklidimą tiesiogi-

niais ir netiesioginiais keliais per atitvaras ir perdangas, per duris, langus ir pastato inžinerinius tinklus.

7.1 paveiksle pavaizduotas garso tarp atskirų pastato kambarių sklidimo atitvaromis modelis. Garso sklaida modeliuojama tik tiesioginiu keliu per atitvarą, kuri pažymėta pilka spalva. Į programą įvedami visų esančių pertvarų ilgiai ir aukščiai, parenkamos medžiagos, iš kurių padarytos pertvaros. Modeliuojant garso izoliaciją, galima pasirinkti, ar bus modeliuojamas tik tiesioginis garso perdavimas per tiriamą konstrukciją, ar kartu bus atsižvelgiama ir į garso sklidimą aplinkinėmis konstrukcijomis. Be to, modelyje parenkamas perdangos ar pertvaros susisiekimo su aplinkinėmis konstrukcijomis variantas (7.1 pav.). Būtina pabrėžti, kad modeliavimui parenkamas ir apskaičiavimo būdas: galima modeliuoti pagal tarptautinį standartą EN-ISO 12354, pagal Kraiką (Craik) arba pagal Fišerį ir kitus autorius (Fisher et al). Modeliuojant pertvarų garso izoliaciją, galima papildomai įvertinti ir pertvaroje esančių ortakių įtaką.

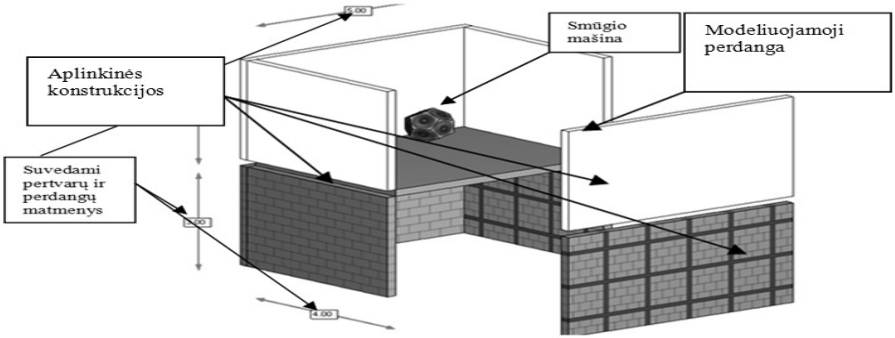


7.1 pav. Modelio sudarymas modeliavimo programa BASTIAN modeliuojant pertvarų garso izoliavimą

Fig. 7.1. Model formation when modelling sound insulation of interior walls with the modelling programme BASTIAN

Modeliavimo rezultatų duomenys, esant skirtingoms sienelėms, pateikiami pritaikius perstumtos norminės kreivės metodą, kaip apibrėžta ISO 717-1 standarte. Modeliuojant pertvarų garso izoliavimo rodiklius, pasirenkamas modeliuojamas garso izoliavimo rodiklis: standartizuotas garso slėgio lygio skirtumas $D_{nT,W}$, arba garso izoliavimo rodiklis R_w. Prieš modeliuojant pertvaros garso izoliavimo rodiklį, parenkamos aplinkinių pertvarų konstrukcijos.

Jei, sumodeliavus pertvarų garso izoliavimą, jos rodiklis pasirodo nepakankamas, galima pertvarą dengti garsą sugeriančiomis medžiagomis (akmens vata ar putų polistirenu) ir pagalbinėmis medžiagomis, pvz. gipso kartonu.



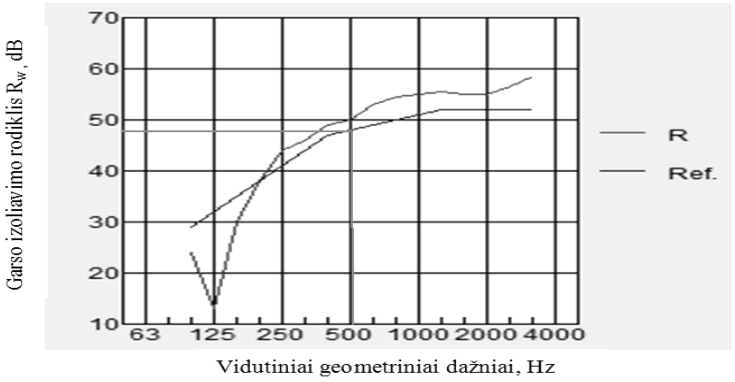
7.2 pav. Modelio sudarymas, modeliavimo programa BASTIAN, modeliuojant perdangų garso izoliavimą

Fig. 7.2. Model formation when modelling sound insulation of ceilings with the modelling programme BASTIAN

Modeliuojant perdangų garso izoliaciją, modeliuojamas tik tiesiogiai per perdangą sklindantis garsas arba įvertinamas ir aplinkinėmis konstrukcijomis sklindantis garsas. 7.2 paveiksle pavaizduotas modelio sudarymas, modeliuojant smūginio garso sklidimą per perdangas, įvertinant aplinkinėmis konstrukcijomis sklindantį garsą. Perdangom galima sumodeliuoti smūginį garso izoliavimo rodiklį $L'_{n,w}$ ir / arba orinio garso izoliavimo rodiklį R_w.

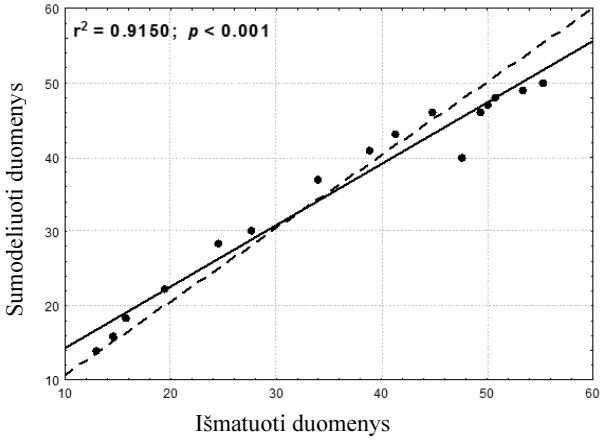
7.2. Pertvarų garso izoliacijos modeliavimo BASTIAN programa rezultatai

Naujai pastatytame pastate, kuriame butus skiria keramzitinių blokelių pertvaros, o perdangos iš gelžbetoninių plokščių, dengtų laminuota grindų danga, išmatuotas pertvarų tariamas garso izoliavimo rodiklis R'_w siekė 49 dB, kuris nepakankamas gyventojų apsaugai nuo triukšmo užtikrinti. Atliktas tokios pat pertvaros garso izoliacijos modeliavimas BASTIAN programa. Programoje sudarytos analogiškos sąlygos buvusioms pastate, parinktos analogiškos aplinkinės konstrukcijos ir perdangos, o sumodeliuotas tariamas garso izoliavimo rodiklis R'_w siekė 48 dB (7.3 pav.). Siekiant nustatyti, ar modeliavimo programa atitinka išmatuotus rezultatus, sumodeliuoti ir išmatuoti rezultatai buvo lyginami statistinės analizės būdu (7.4 pav.).



7.3 pav. Pertvaros, sudarytos iš keramzitinių blokelių, sumodeliuotas garso izoliacijos rodiklis R_w: ——— R – sumodeliuota garso izoliavimo rodiklio kreivė; ——— Ref – perstumta norminė garso izoliavimo rodiklio atskaitos kreivė; ——— – garso izoliavimo rodiklio nustatymo kreivė

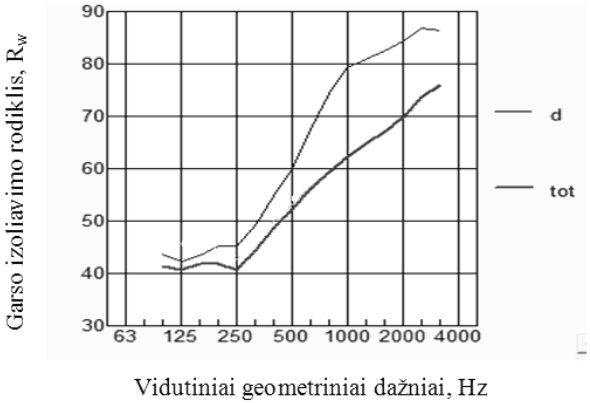
Fig. 7.3. the modelled sound reduction index R_w for an interior wall composed of expanded clay tiles: ——— R – modelled curve of the sound reduction index; ——— Ref – shifted standard curve of reference of the sound reduction index; ——— – curve for determining the sound reduction index



7.4 pav. Pertvaros, sudarytos iš keramzitinių blokelių, garso izoliacijos rodiklio R_w, išmatuoto natūrinėmis sąlygomis ir sumodeliuoto BASTIAN modeliavimo programa, koreliacija: ----- – ideali koreliacija; – išmatuotų ir sumodeliuotų duomenų koreliacijos kreivė

Fig. 7.4. correlation of the sound reduction index R_w for an interior wall composed of expanded clay tiles measured under natural conditions and modelled with the modelling programme BASTIAN: ----- – ideal correlation; – curve of correlation for measured and modelled data

Sugretinus modeliavimo ir matavimo duomenis, gauta tiesinė R^2 koreliacija 0,915. Tai rodo labai stiprų modeliavimo ir matavimo duomenų ryšį.



7.5 pav. Pertvaros, sudarytos iš keramzitinių blokelių, garso izoliacijos rodiklis R_w: ------ tot – sumodeliuota garso izoliavimo rodiklio kreivė, įskaitant aplinkinėmis konstrukcijomis sklindantį garsą; ------ d – sumodeliuota garso izoliavimo rodiklio kreivė, garsui sklindant tik tiesiogiai per konstrukciją

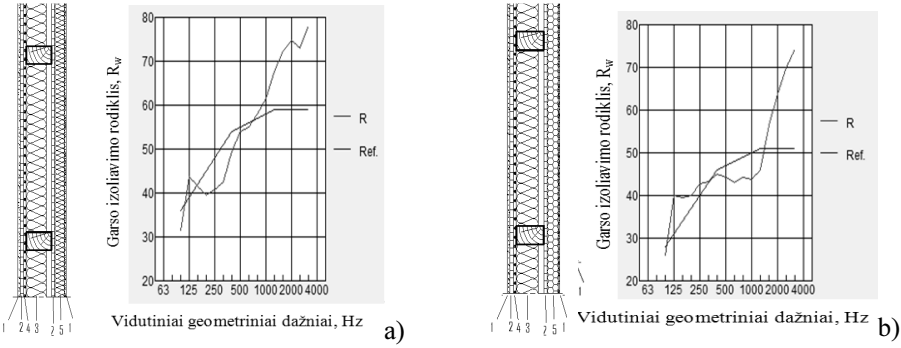
Fig. 7.5. Sound reduction index R_w for an interior wall composed of expanded clay tiles: ------ tot – modelled curve of sound reduction index including sound which is spreading via neighbouring structures; ------ d – modelled curve of sound reduction index when the sound is spreading only directly through the structure

Statistiškai sugretinus modeliavimo ir matavimo duomenis ir įsitikinus modeliavimo rezultatų patikimumu, prognozuotas pertvaros garso izoliavimo rodiklis, pertvarą apdengiant garsą sugeriančiomis ir izoliuojančiomis medžiagomis. Garso izoliacijai padidinti, pertvara iš vienos ar abiejų pusių dengiama garsą sugeriančiomis medžiagomis, tokiomis, kaip akmens vata arba polistirenas, bei papildomai aptaisoma gipso kartonu ar medžio drožlių plokšte.

Būtina atsižvelgti, kad, aptaisant papildomomis medžiagomis, padidėja pertvaros plotis ir dėl to sumažėja patalpos tūris, o tai nepageidaujama. Kad keramzitinių blokelių pertvara atitiktų C garso izoliavimo klasę ir kuo mažiau padidėtų pertvaros plotis, modeliuojamoji pertvara iš abiejų pusių aptaisoma 20 mm akmens vatos sluoksniu ir 12,5 mm gipso kartono plokšte. Garso izoliavimo rodiklis R_w, sklindantis tiesiogiai per pertvarą, siekė 60 dB, o tariamas garso izoliavimo rodiklis R'_w siekė 56 dB. Sumodeliuoti garso izoliavimo rodikliai pavaizduoti 7.5 paveiksle.

Laikino apgyvendinimo įstaigose, svečių namuose ir butuose dažnai įrengiamos lengvos pertvaros iš gipso kartono plokščių, oro tarpą užpildant garsą sugeriančia akmens vata ar polistirenu. Todėl atliktas tokios pertvaros garo izo-

liavimo rodiklio R_w modeliavimas, oro tarpą užpildant akmens vata arba polistirenu. Sumodeliuoti garso izoliavimo rodikliai pavaizduoti 7.6 paveiksle.



7.6 pav. Sumodeliuoti pertvarų sudarytų iš lengvų medžiagų, garso izoliacijos rodikliai R_w: a) pertvara, sudaryta iš: 1) – 10 mm storio tinko; 2) – 9,5 mm gipso kartono; 3) - 80 mm akustinės akmens vatos TP 1; 4) – 5 mm sintetinės dervos tinko; 5) – 40 mm akmens vatos Exporit PS; b) pertvara, sudaryta iš: 1) – 10 mm storio tinko; 2) – 9,5 mm gipso kartono; 3) – 80 mm akustinės akmens vatos TP 1; 4) – 5 mm sintetinės dervos tinko; 5) – 40 mm putų polistireno. ------ R – sumodeliuota garso izoliavimo rodiklio kreivė; ------ Ref – norminė garso izoliavimo rodiklio atskaitos kreivė

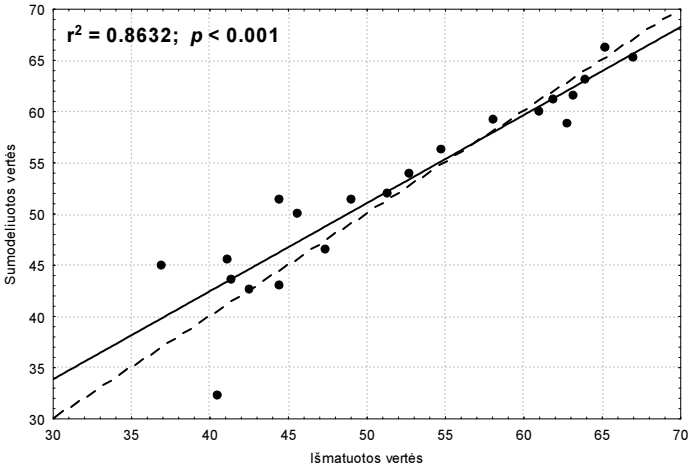
Fig. 7.6. Modelled sound reduction indices R_w for interior walls composed of light materials: a) interior walls made of: 1) – 10 mm thick plaster; 2) – 9.5 mm gypsum cardboard; 3) – 80 mm acoustic rock wool TP 1; 4) – 5 mm synthetic resin plaster; 5) – 40 mm rock wool Exporit PS; b) interior wall composed of: 1) – 10 mm thick plaster; 2) – 9.5 mm gypsum cardboard; 3) – 80 mm acoustic rock wool TP 1; 4) – 5 mm synthetic resin plaster; 5) – 40 mm foam polystyrene. ------ R – modelled curve of sound reduction index; ------ Ref – standard reference curve of sound reduction index

Pertvaros iš gipso kartono ir užpildytos akmens vata, garso izoliavimo rodiklis siekė 55 dB, o pertvaros, užpildytos polistirenu, garso izoliavimo rodiklis siekė 47 dB. Polistirenas mažiau porėtas ir kietesnis už akmens vatą, todėl pasižymi prastesne garso sugertimi.

7.3. Perdangų garso izoliacijos modeliavimo BASTIAN programa rezultatai

BASTIAN modeliavimo programa įgalina sumodeliuoti smūginę ir orinę perdangų garso izoliacijas, esant monolitinei ar daugiasluoksnei perdangai. Garso izoliacija planuojama atsižvelgiant į aplinkinėmis konstrukcijomis sklindantį garsą, perdangų sujungimus su aplinkinėmis sienomis. Naujai pastatytame pasta-

te, su perdangomis iš 220 mm gelžbetoninių plokščių, dengtų 40 mm garsą izoliuojančia akmens vata, 50 mm išlyginamojo smėlio ir cemento skiedinio S20 SL, natūrinėmis sąlygomis matuotas smūginis perdangų garso izoliavimo rodiklis $L_{n,Tw}$, siekė 55 dB. BASTIAN programa buvo sudarytas analogiškas modelis matuotajam pastate, o išmatuoti ir sumodeliuoti rezultatai sugretinti statistinės analizės būdu (7.7 pav.).



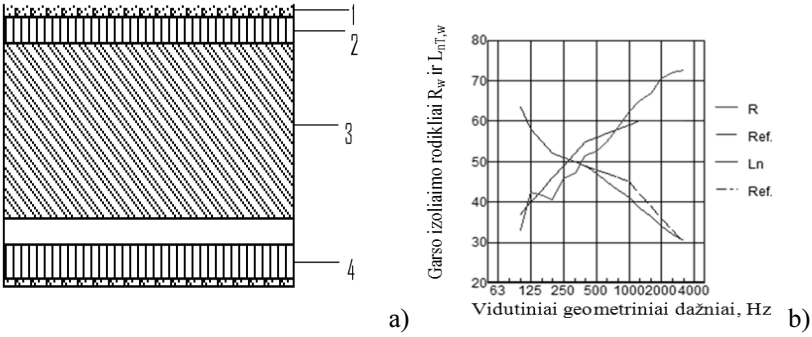
7.7 pav. Daugiasluoksnės perdangos smūgio garso izoliacijos rodiklio $L_{n,w}$, išmatuoto natūrinėmis sąlygomis ir sumodeliuoto BASTIAN modeliavimo programa, koreliacija: ----- – idealios koreliacijos kreivė; —— – išmatuotų ir sumodeliuotų duomenų koreliacijos kreivė

Fig. 7.7. Correlation of the impact sound insulation index $L_{n,w}$ for multi-layer ceiling measured under natural conditions and modelled with the modelling programme BASTIAN: ----- – curve of ideal correlation; —— – curve of correlation between measured and modelled data

Sugretinus modeliavimo ir matavimo duomenis, gauta 0,8632 tiesinė R^2 koreliacija. Tai rodo labai stiprų modeliavimo ir matavimo duomenų ryšį. Atlikus statistinį matavimo ir modeliavimo duomenų sugretinimą ir įsitikinus pastarojo rezultatų patikimumu, modeliuotas perdangos smūgio garso izoliavimo rodiklis, apdengiant ją papildomais sluoksniais, pvz., laminuotomis grindimis ir pakabinamomis lubomis.

Tyrimo metu panaudojus grindims dengti dažniausiai vartojamos laminuotos plokštės su 2 mm išlyginamuoju ir smūgio garsą sugeriančiu sluoksniu bei iš apačios įtvirtinus pakabinamas lubas, sumodeliuotas smūgio garso izoliacijos rodiklis $L'_{n,w}$, siekė 48 dB, o tariamas oro garso izoliavimo rodiklis R'_w siekė 56 dB (7.8 pav). Tokia perdanga pakankamai gerai izoliuoja oro ir smūgio garsą. Lietuvoje perdangų garso izoliacija normuojama tik pagal smūgio garso slėgio

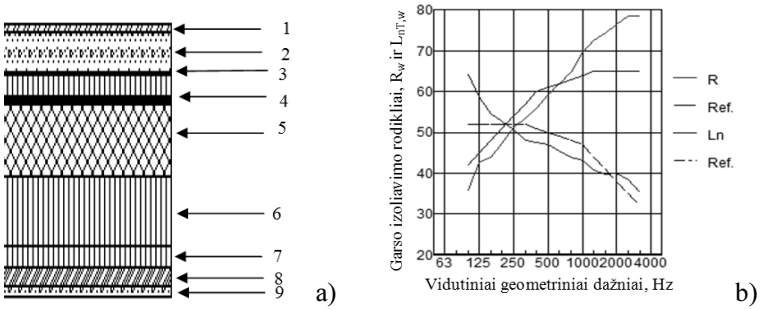
lygį, į oro garso izoliavimo rodiklį neatsižvelgiama. Perdangos gali puikiai izoliuoti garso smūgį, bet nepakankamai – oro garsą. Jeigu perdangos oro garso izoliavimo rodiklis nepakankamas, tai nepageidaujamas oro garsas sklis iš virš, ar po perdanga esančių patalpų. Perdanga, apdengta laminuotomis grindų plokštėmis ir pakabinamomis lubomis, atitinka naujai pastatytuose pastatuose privalomą C garso izoliavimo klasę apsaugai nuo smūgio garso.



7.8 pav. Oro ir smūgio garso izoliavimo rodiklių kreivės, esant daugiasluoksnei perdangai sumodeliuoti; a: 1) – laminuotos grindys; 2) – išlyginamasis ir garsą sugeriantis sluoksnis; 3) – gelžbetoninė plokštė; 4) – pakabinamos lubos; b: — R – sumodeliuoto oro garso izoliavimo rodiklio kreivė; —— Ref – norminė oro garso izoliavimo rodiklio, atskaitos kreivė; —— L_n– sumodeliuoto smūgio garso izoliavimo rodiklio kreivė; — - - Ref – norminė smūgio garso izoliavimo rodiklio, atskaitos kreivė

Fig. 7.8. Modelling curves of airborne and impact sound reduction indices for multi-layer ceiling; a: 1) – laminated floor; 2) – levelling and sound-absorbing layer; 3) – reinforced concrete slab; 4) – suspended ceiling; b: — R – curve of modelled airborne sound reduction index; —— Ref – standard reference curve of airborne sound reduction index; —— L_n– curve of modelled impact sound reduction index; — - - Ref – standard reference curve of impact sound reduction index

7.9 paveiksle pavaizduota daugiasluoksnė perdanga, papildomai apdengta 10 mm kilimine danga. Sumodeliuoti šios perdangos orinis ir smūgio garso izoliavimo rodikliai. Sumodeliuotas orinis garso izoliavimo rodiklis siekė 62 dB. Tai rodo, kad tokios konstrukcijos perdanga oro garsą izoliuoja ypač gerai, dėl konstrukcijos sluoksnių su skirtingomis orinio garso izoliavimo ir sugerties savybėmis. Sumodeliuotas perdangos smūginis garso izoliavimo rodiklis $L_{nT,w}$ siekė 50 dB. Tai atitinka C smūgio garso izoliavimo klasę gyvenamuosiuose pastatuose.



7.9 pav. Perdangos, uždengtos 10 mm kilimine danga oro ir smūgio garso izoliavimo rodikliai; a: 1) – 10 mm linoleumas; 2) – 45 mm anhidritinis, savaime išsilyginantis skiedinys; 3) – 1 mm plastikinė folija; 4) – 25 mm, garso izoliacinis sluoksnis; 5) – 80 mm betono sluoksnis; 6) – 80 mm celiuliozės pluoštas; 7) – 24 mm celiuliozės pluoštas; 8) – 20 mm gipso lubos; 9) – 12,5 mm gipso kartono plokštė; b: — R – sumodeliuoto oro garso izoliavimo rodiklio kreivė; —— Ref – norminė oro garso izoliavimo rodiklio, atskaitos kreivė; —— L_n– sumodeliuoto smūgio garso izoliavimo rodiklio kreivė; — - - Ref – norminė smūgio garso izoliavimo rodiklio, atskaitos kreivė

Fig. 7.9. Airborne and impact sound reduction indices for a ceiling covered with 10 mm carpeting; a: 1) – 10 mm linoleum; 2) – 45 mm self-levelling anhydrite grout; 3) – 1 mm plastic foil; 4) – 25 mm sound insulating layer; 5) – 80 mm concrete layer; 6) – 80 mm cellulose fibre; 7) – 24 mm cellulose fibre; 8) – 20 mm gypsum ceiling; 9) – 12,5 mm gypsum cardboard; b: — R – curve of the modelled airborne sound reduction index; —— Ref – standard reference curve of airborne sound reduction index; —— L_n– curve of the modelled impact sound reduction index; — - - Ref – standard reference curve of the impact sound reduction index

Kuo mažesnis smūgio garso slėgio lygio rodiklis, tuo geresnis perdangos smūgio garso izoliavimas. Daugiasluoksnės perdangos, parodytos 7.9 a) pav., sudarytos iš įvairių smūgio garsą sugeriančių medžiagų. Smūginis garso izoliavimo rodiklis siekė 50 dB ir atitinka C garso izoliavimo klasę, nes smūgio energija lengvai sklinda kietais kūnais ir sunkiai persiduoda per porėtas, minkštas medžiagas.

7.4. Septintojo skyriaus išvados

1. Dvigubos keramzitinių blokelių pertvaros išmatuotas tariamas garso izoliavimo rodiklis R'_w siekė 49, o sumodeliuotas – 48 dB. Statistikos programa palyginus sumodeliuotų ir išmatuotų garso izoliacijos rodiklio duomenis, jų korelia-

cija R^2 siekė 0,915. Tai rodo labai gerą modeliuotų ir matuotų duomenų sutapimą.

2. Modeliavimo būdu nustatyta, kad keramzitinių blokelių pertvaros, reikiamą garso izoliaciją galima pasiekti mažiausiai padidinant pertvaros storį. Tuo tikslu reikia pertvarą iš abiejų pusių apdengti 2 cm storio akmens vata ir gipso kartono plokštėmis.

3. Sumodeliavus perspektyvią lengvą daugiasluoksnę gipso kartono plokščių pertvarą su užpildytu akmens vata ar polistirenu oro tarpu, nustatyta, kad pertvaroje, kur polistirenas pakeistas į akmens vatą, garso izoliavimo rodiklis padidėjo 5 dB.

4. BASTIAN programa galima prognozuoti pertvarų, kurių garso izoliavimo rodiklis yra žemesnis negu reikiamas, smūgio ir oro garso izoliavimo rodiklius, esamą pertvarą papildomai apdengus garsą izoliuojančiomis medžiagomis.

8

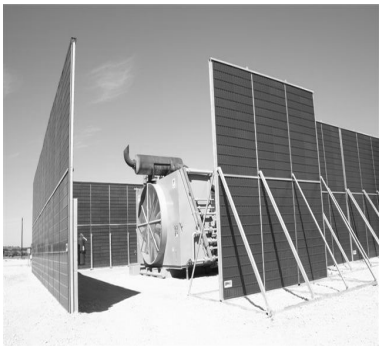
Inžineriniai sprendimai

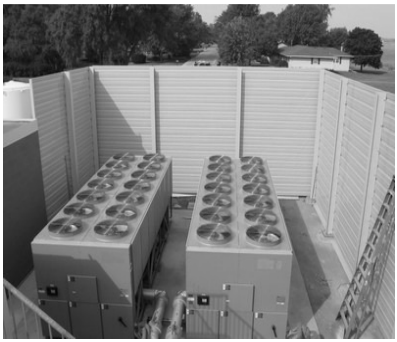
Darbo ir gyvenamosiose patalpose dažnai didele triukšmo problema tampa įrenginiai, kurie turi būti vėdinami. Jie negali būti aklinai apstatomi triukšmą mažinančiomis sienelėmis ar ekranais, kaip pavaizduota 8.1 paveiksle. Ypač didelių triukšmo mažinimo problemų atsiranda tada, kai ventiliuojami įrenginiai įtaisyti nišose ir nėra galimybės pastatyti triukšmo mažinimo sienelės. Todėl buvo sukurtos ir tiriamos akustinės triukšmą mažinančios žaliuzės.

Šiame skyriuje pateiktos medžiagos pagrindu paruošta paraiška ir pristatyta Lietuvos patentui gauti *(Butkus ir Januševičius 2011).*

8.1. Akustinių žaliuzių kūrimas ir tyrimai

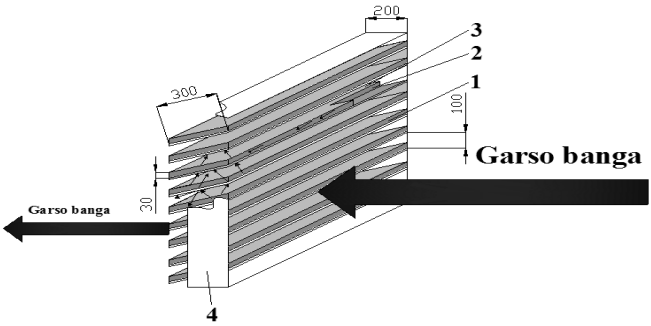
Žaliuzės sudarytos iš 200 mm pločio medžio drožlių plokštės stačiakampio rėmo, kuriame judamai sumontuotos horizontalios medžio drožlių 1000 mm ilgio, 300 mm pločio ir 15 mm storio plokštės lentelės (8.2 pav.). Tarp lentelių paliktas 100 mm tarpas praeiti orui. Žaliuzės sumontuotos triukšmo slopinimo kameroje. Prieš sumontuojant žaliuzes triukšmo slopinimo kameroje, priimamojo garso patalpoje buvo išmatuotas garso lygis be žaliuzių. Šis garso lygis priimamas kaip atskaitos garso lygis ir žymimas L_1. Triukšmo slopinimo kameroje sumontavus žaliuzes, leidžiamas garsas ir matuojamas garso lygio sumažėjimas.





8.1 pav. Triukšmą mažinančių sienelių panaudojimo pavyzdžiai ventiliatorių triukšmui mažinti (http://www.soundfighter.com/content/IMG_7011.JPG; http://www.enoisecontrol.com/images/Barrier_Wall_pic400w.jpg)

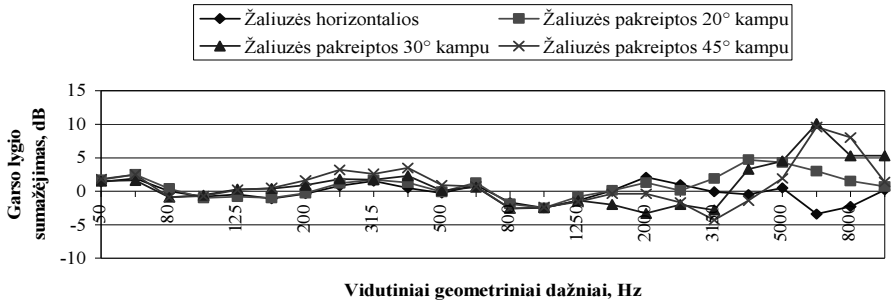
Fig. 8.1. Examples of using noise minimisation walls for the reduction of ventilator-generated noise (http://www.soundfighter.com/content/IMG_7011.JPG; http://www.enoisecontrol.com/images/Barrier_Wall_pic400w.jpg)



8.2 pav. Triukšmą mažinančios žaliuzės: 1) – keičiamu kampu sumontuotos horizontalios 30 cm pločio ir 1,2 cm storio medžio drožlių plokštės lentelės; 2) – 3 cm pločio akmens vatos sluoksnis; 3) – tekstilės audinys; 4) – karkasas iš medžio drožlių plokštės

Fig. 8.2. Noise minimisation jalousies: 1) – horizontal wood chipboards, assembled at a changeable angle 30 cm wide and 1.2 cm thick; 2) – 3 cm thick rock wool layer; 3) – textile fabric; 4) – wood chipboard frame

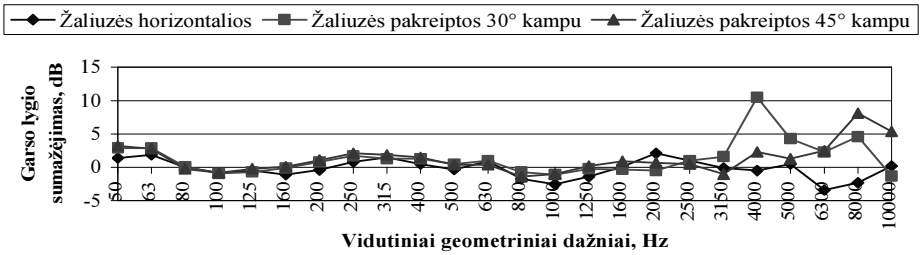
Teoriškai garso lygis turėtų sumažėti, kadangi garso bangos susiduria su kliūtimi ir susidaro garso bangos slėgis, dėl to garso bangų energija sukelia žaliuzių lentelių svyravimus. Įstačius žaliuzes į triukšmo slopinimo kameros tyrimo angą, žaliuzių lentelės buvo suverčiamos horizontaliai, po to buvo keičiamas plokštelių kampas nuo 20° iki 45° kampu į garso priimamosios kameros pusę. Tyrimų rezultatai pateikti 8.3 paveiksle.



8.3 pav. Garso lygio sumažėjimas triukšmą mažinančiose žaliuzėse, nedengtose akmens vata, plokšteles nukreipus skirtingais kampais į priimamo garso patalpą

Fig. 8.3. Reduction of noise level in noise minimisation jalousies, which are not covered with rock wool when slats are directed at different angles to the target room

Kaip matyti iš 8.3 paveikslo, garso lygis, esant horizontaliai žaliuzių padėčiai, sumažėjo iki 3 dB tik esant 315 Hz ir 2000 Hz dažniams, o esant 800, 1000 ir 6300 Hz dažniams garso lygis padidėjo iki 3 dB. Žaliuzes pavertus 45° kampu, esant žemiems dažniams (nuo 50 iki 500 Hz), labiausiai, t. y. iki 3 dB, garso lygis sumažėjo ties 250–400 Hz dažniais. Esant pasvirimo kampui 20° ir 30°, garso lygis sumažintas tik iki 2 dB. Esant vidutiniams dažniams (nuo 800 iki 1250 Hz), garso lygis padidėjo iki 3 dB visais trim pasvirimo kampų atvejais. Esant aukštiems dažniams (nuo 2000 iki 10000 Hz), labiausiai garso lygis (iki 10 dB) sumažintas esant 6300 Hz dažniams, žaliuzes suvertus 30° ir 45° laipsnių kampu. Tačiau panaudojus šitokią konstrukciją ekvivalentinis garso lygis padidėjo 4 dBA. Garso lygio padidėjimas gautas dėl susidarančios garso bangų atspindžio reiškinių esant žemiems dažniams (nuo 100 iki 160 Hz), esant vidutiniams dažniams (nuo 800 iki 1250 Hz) ir esant aukštiems dažniams ties 3150 Hz.

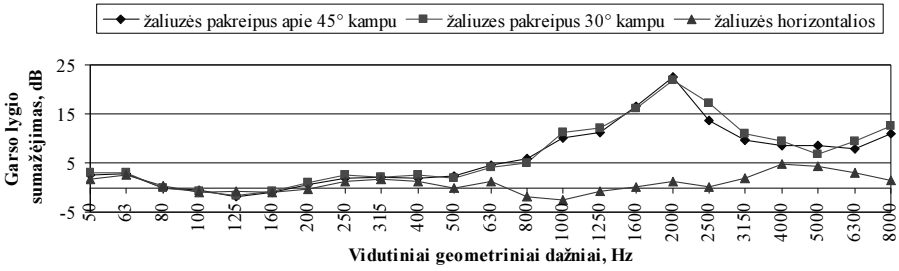


8.4 pav. Garso lygio sumažėjimas triukšmą mažinančiose žaliuzėse, nedengtose akmens vata; plokšteles skirtingais kampais nukreipus į siunčiamojo garso patalpą

Fig. 8.4. Reduction of noise level in noise minimisation jalousies, which are not covered with rock wool when slats are directed at different angles to the source room

8.4 paveiksle pavaizduoti tyrimo rezultatai, žaliuzes pakreipus į garso siunčiamąją pusę: garso bangų intensyvumo padidėjimas susidarė esant žemiems (nuo 100 iki 160 Hz) dažniams. Garso lygis šiuo atveju padidėjo iki 1 dB oktavai. Didesnis efektas susidarė esant aukštiems dažniams ir garso lygį padidino iki 4 dB. Tačiau geriau garsas izoliuotas esant 4000 Hz dažniui ir 30° pasvirimo kampui garso lygis sumažėjo iki 10 dB. Bendras garso ekvivalentinio lygio sumažėjimas gautas iki 2 dBA.

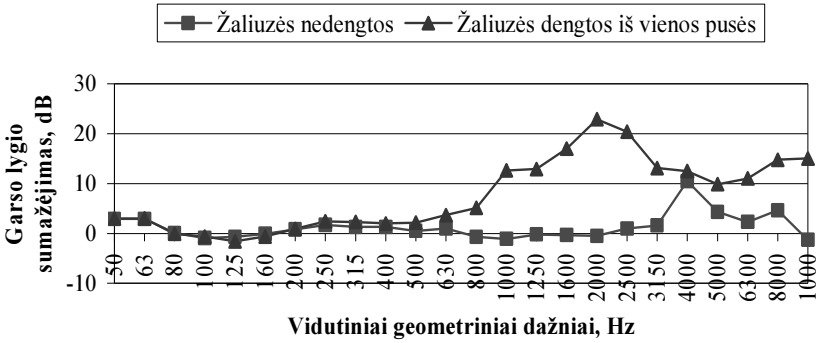
Kadangi nepadengus žaliuzių garsą sugeriančiomis medžiagomis, ekvivalentinis garso lygis, lyginant su pradiniu, padidėjo per 4 dBA, žaliuzės iš vienos pusės buvo padengtos 30 mm akmens vata. Jos paskirtis – sugerti kritusias į žaliuzių plokšteles garso bangas ir sumažinti jų atspindį. Reikia pasakyti, kad ir akmens vatos sluoksnis sumažina pačios konstrukcijos savituosius svyravimus, kurie susidaro garso bangoms krintant į konstrukciją. Tyrimų rezultatai su žaliuzėmis, dengtomis akmens vata, pateikti 8.5 paveiksle. Garso bangų interferencija ir garso galios padidėjimas gautas esant visiems pasvirimo kampams, tik esant žemiems (nuo 80 iki 160 Hz) dažniams, kur garso lygis padidėjo iki 2 dB. Tačiau esant žemiems (nuo 200 iki 500 Hz) dažniams, garso lygis sumažėjo iki 2,5 dB.



8.5 pav. Garso lygio sumažinimas triukšmą mažinančiose žaliuzėse, iš vienos pusės padengtose 30 mm storio akmens vata, plokšteles skirtingais kampais nukreipus į priimamojo garso patalpą

Fig. 8.5. Reduction of noise level in noise minimisation jalousies upon covering with 30 mm thick rock wool from one side and directing slats at different angles to the target room

Aukštu garso lygio sumažinimu žaliuzės pasireiškia esant vidutiniams (nuo 1000 iki 2000 Hz) dažniams, kur garso sumažėjimas gautas nuo 10 iki 23 dB esant 30° ir 40° laipsnių pasvirimo kampams. Tačiau esant aukštiems (nuo 2500 iki 5000 Hz) dažniams, garso lygis mažėjo nuo 18 iki 8 dB. Konstrukcija, padengta akmens vata, ekvivalentinį garso lygį sumažino iki 14 dB.



8.6 pav. Garso lygio sumažėjimas triukšmą mažinančiose žaliuzėse, nedengtose akmens vata ir iš vienos pusės padengtose 30 mm storio akmens vata, plokštelės nukreiptos į priimamojo garso patalpą

Fig. 8.6. Reduction of noise level in noise minimisation jalousies which are covered with 30 mm thick rock wool from one side upon directing slats to the target room

8.6 paveiksle palygintos žaliuzės, dengtos akmens vata ir žaliuzės, nedengtos akmens vata, esant 45° pasvirimo kampui ir žemiems dažniams iki 500 Hz. Dengtos ir nedengtos akmens vata žaliuzės garso lygį sumažina tik iki 3 dB. Tačiau nustatyta, kad konstrukciją padengus akmens vata, garso izoliacija, lyginant su nedengta, išauga dažniams didėjant iki 3150 Hz.

8.2. Aštuntojo skyriaus išvados

1. Įrenginių, kuriems būtinas vėdinimas ir kurie negali būti apdengti garsą mažinančiais uždarais ekranais ar gaubtais, skleidžiamam triukšmui susilpninti sukurtos garsą mažinančios žaliuzės.
2. Jei žaliuzių plokštelės nedengtos garsą sugeriančia medžiaga, tai garso lygis padidėja dėl tarp lentelių susidarančio daugkartinio atspindžio, kuris sustiprina garso emisiją.
3. Garsą mažinančių žaliuzių lenteles apdengus akmens vatos sluoksniu ir pavertus žaliuzes 45° kampu, gaunamas ekvivalentinio garso lygio sumažinimas 14 dBA.

Bendrosios išvados

1. Rąstinę pertvarą apdengiant iš vienos pusės 10 cm akmens vata ir 1,2 cm medžio drožlių plokšte ar 2 cm dailylentėmis, garso izoliavimo rodiklis nuo 29 dB padidinamas iki 53 dB. Rąstinę pertvarą iš abiejų pusių apdengiant 10 cm akmens vata bei 1,2 cm medžio drožlių plokšte ar 2 cm dailylentėmis, garso izoliavimo rodiklis padidinamas iki 60 dB, tokia pertvara atitinka pagerinto akustinio komforto klasę B.
2. Šiaudų sienų, sudarytų iš 400 mm storio presuotų šiaudų, kurių tankis 90–110 kg/m^3, ir nutinkuotos iš abiejų pusių 10 mm storio molio tinko sluoksniu, garso izoliavimo rodiklis R_w siekė 40 dB. Vadinasi, šiaudų pertvaros tinka fasadų garso izoliacijai, kaip ir plytų mūro, keraminių blokelių ar porėto betono blokelių su klijuoto medžio ar plastiko rėmų langais fasadinės sienos.
3. Nustatyta, kad C garso izoliavimo klasę atitinka pertvaros, sudarytos iš 200 mm plytų mūro, su užpildytu oro tarpu garsą sugeriančia mineraline vata; pertvara, sudaryta iš 200 mm keramzitinių blokelių su užpildytu oro tarpu ir iš abiejų pusių nutinkuota 10 mm storio tinko sluoksniu bei iš vienos pusės uždengta gipso kartono plokšte; pertvara, sudaryta iš dujų silikato blokelių su užpildytu oro tarpu ir nutinkuota iš abiejų pusių 10 mm storio tinko sluoksniu.

4. Geriausiomis garso izoliacinėmis savybėmis ir B garso izoliavimo klasę atitiko pertvara iš 520 mm plytų mūro. Tokią pertvarą galima naudoti norint sumažinti žemo dažnio garsus, kadangi, esant žemiems dažniams, tokios konstrukcijos pertvara garso lygį sumažino 60 dB.
5. Sudaryta akustiniu požiūriu perspektyvi pertvaros konstrukcija iš lengvų medžiagų – gipso kartono, akmens vatos ir polistireno. Konstrukcijos garso izoliavimo rodiklis R_w ištirtas triukšmo slopinimo kameroje. BASTIAN modeliavimo programa prognozuota, kad, panaudojus du 80 ir 40 mm storio akmens vatos sluoksnius, garso izoliavimo rodiklis būtų 8 dB didesnis negu konstrukcijos, kurioje garso sugerčiai panaudota 80 mm storio akmens vatos ir 40 mm polistireno vienasluoksnė sistema.
6. Iš 80 mm storio betono sluoksnio, 45 mm storio savaime išsilyginančio anhidritinio skiedinio, 25 mm garso izoliacinio sluoksnio, 80 mm ir 24 mm celiuliozės pluošto, 20 mm gipso lubų sudarytas daugiasluoksnes perdangas, klotas linoleumu bei 10 mm kilimine danga, garso izoliavimo rodiklis R_w (sumodeliuotas BASTIAN modeliavimo programa) pasiekė net 62 dB oro garso ir 50 dB smūgio garso izoliacijų lygį.
7. Nesutapimai tarp garso izoliavimo duomenų, apskaičiuotų pagal masės dėsnį ir išmatuotų natūrinėmis sąlygomis, 120 mm plytų mūro pertvarai, esant žemiems dažniams, siekė iki 15 dB, esant vidutiniams dažniams – iki 7 dB, aukštiems dažniams – iki 18 dB. Esant 320 mm storio plytų mūro pertvarai, nesutapimai tarp skaičiuotų teoriškai pagal masės dėsnį ir matuotų rezultatų neviršijo 5 dB. Tai rodo, kad pagal masės dėsnį galima skaičiuoti storų ir sunkių vienalyčių pertvarų garso izoliaciją.
8. Nesutapimai tarp garso izoliavimo duomenų, apskaičiuotų pagal tarptautinį standartą EN ISO 12354-1 ir išmatuotų natūrinėmis sąlygomis, 250 mm storio molinių blokelių pertvarai, esant žemiems 50–150 Hz dažniams, siekė iki 20 dB, o esant 160–2000 Hz dažniams, apskaičiuoti ir išmatuoti rezultatai skyrėsi iki 2 dB.
9. Patalpoms, kurių paviršiai dengti garsą absorbuojančiomis medžiagomis ir kurių aidėjimo trukmė mažesnė negu 0,4 s, matuojant standartizuotą garso slėgio lygių skirtumą, atskaitos aidėjimo trukmę T_0 reikia priimti kaip patalpos aidėjimo trukmių, nustatytų skirtingiems dažniams, vidurkį.

Rekomendacijos

1. Patalpų, kurių tūris didesnis negu 50 m^3, pertvarų garso izoliacijai nustatyti, siūloma naudoti standartizuotą garso slėgio lygių skirtumo rodiklį $D_{nT,W}$, kadangi nustatyta jog aidėjimo trukmė nepriklauso nuo patalpos tūrio.
2. Pastatuose, kurie yra didesnio triukšmo zonose, rekomenduotina naudoti plastikinio rėmo langus, kadangi tokių langų garso izoliacijos rodiklis buvo didesnis nuo 3 iki 10 dB, lyginant su klijuoto medžio rėmo langais. Taip pat rekomenduotina vietoje vieno didelio lango naudoti langus, sudarytus iš kelių dalių.
3. Triukšmingiems įrenginiams, kuriems būtinas vėdinimas, triukšmo lygiui sumažinti rekomenduojama naudoti sukurtas triukšmo mažinimo žaliuzes, kurios yra atviros, bet ekvivalentinį triukšmo lygį sumažina iki 14 dB.
4. Pastatuose, kur reikia sumažinti žemo dažnio garsus, rekomenduotina naudoti pvz. 55 cm plytų mūro pertvarą, kuri esant žemiems dažniams nuo 50 iki 200 Hz, garso lygį sumažino iki 60 dB, ko negalima padaryti su jokiomis kitomis tirtomis konstrukcijomis.

Literatūra ir šaltiniai

Adomaitis, L. 2007. *Namai iš šiaudų – šilti, ekologiški*. *Meisteris 6: 8–15.*

Arai, T.; Kinoshita, K.; Hodoshima, N.; Kusumoto, A.; Kitamura, T. 2002. Effects of suppressing steady – state portions of speech on intelligibility in reverberant environments. *Acoustical Science and Technology* 23: 229–232.

Architektūros ir aplinkos darna: šiaudinis namas [interaktyvus] 2007. [Žiūrėta 2010 m. spalio 12 d.]. Prieiga per internetą: ttp://www.downloads.fasba.de/TahaAshour-2003-complete.pdf

Asdrubali, F.; Horoshenkov, K. 2002. On the acoustic properties of expanded clay granulates. *Building Acoustics* 9(2): 85–98.

Ašmenskas, J.; Baubinas, A.; Obelenis, V.; Šimkūnienė, B. 1997. *Aplinkos medicina*. Vilnius: Avicena. 487 p.

Attenborough, K. 1983. Acoustical characteristics of rigid fibrous absorbents and granular materials. *Journal of the Acoustical Society of America* 73(3): 785–99.

Ballagh, J.H. 2004. Accuracy of Prediction Methods for Sound Transmission Loss. *The 33rd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering.* 1–8.

Bainbridge, D. A. 2000. Straw bales stack up for buildings. A lost art resurfaces in the modern world. *Resource, Engineering&Technology for a Sustainable World* 7(3): 9–10.

Bainbridge, D. A. 1986. High performance low cost buildings of straw. *Agriculture, Ecosystems&Environment* 16(3): 281–284.

Bao, C.; Pan, J. 1997. Experimental study of different approaches for active control of sound transmission through double walls. *Journal of the Acoustical Society of America* 102 (3): 1664–1670.

Bao, A.; Pan, J. 1998. Active acoustic control of noise transmission through double walls: effect of mechanical paths. *Journal of Sound and Vibration* 215: 395–398.

Barron, M. 1993. *Auditorium Acoustics and Architectural Design* London: E&FN Spon. 443 p.

Beranek, L. L.; Ver (Eds), I. L. 1992. *Noise and Vibration Control Engineering: Principles and Application* New York: Wiley. 818 p.

Berry, A.; Guyander, J. L.; Nicholas, J. 1990. A general formulation for the sound radiation from rectangular, baffed plates with arbitrary boundary conditions. *Journal of the Acoustical Society of America* 88 (6): 2792–2802.

Bullmore, AJ.; Nelson, PA.; Curtis, ARD.; Elliot, SJ. 1987. The active minimization of harmonic enclosed sound fields, Part II: a computer simulation. *Journal of Sound and Vibration* 117(1):15–33.

Bies, D. A.; Hansen, C. H. 2003. Engineering Noise Control: Theory and Practice, third edition. London. 405 p.

Carneal, J. P.; Fuller, C. R. 2004. An analytical and experimental investigation of active structural acoustic control of noise transmission through double panel systems. *Journal of Sound and Vibration* 272: 749–771.

Carneal, J. P.; Fuller, C. R. 1995. Active structural acoustic control of noise transmission through double panel systems. *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal* 33 (4): 618–623.

Cameal, J. P.; Fuller, C.R. 1993. Active structural acoustic control of noise transmission through double panel systems. 15 *AIAA Aeroacoustic Conference AIAA*-93-4421.

Cheng, L.; Li, Y. Y.; Gao, J. X. 2005. Energy transmission in a mechanically linked double – wall structure coupled to an acoustic enclosure. *Journal of Acoustical Soviety of American* 117: 2742–2751.

Clark, W. W. 2000. Vibration Control with State-Switched Piezoelectric Materials. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 11(4): 263–271.

Clark, RL.; Fuller, CR. 1992. Optimal placement of piezoelectric actuators and polyvynidilene fluoride error sensors in active structural acoustic control approaches. *Journal of the Acoustic Society of America* 92(3): 573–583.

Craik, RJM. 1996. Sound transmission through buildings using statistical energy analysis UK: Gower. 261 p.

Cremer, L.; Heckl, M.; Ungar, E. E. 1998. Structure – Borne Sound edition, Springer, Berlin 324 p.

Czachor, H. 2002. Application of straw bales to construction of farm building walls. *Problemy Inzynierii Rolniczej* 10(4): 85–92.

Demirel, F. 2006. Noise caused by the usage of water piping in apartment building structures Building and Environment 41: 512–519.

Díaz, C.; Pedrero, A. 2009. An experimental study on the effect of rolling shutters and shutter boxes on the airborne sound insulation of windows. *Applied Acoustics* 70: 369–377.

Drack, M.; Wimmer, R.; Hohensinner, H. 2004. Treeplast Screw – a device for mounthing various items to straw bale constructions. *The Journal of Sustainable Product Design* 4(1-4): 33–41.

Fahy, F.; 2001. Foundations of Engineering Acoustics. Academic Press 435 p.

Fahy, F. 1985. Sound and structural vibration: radiation, transmission and response. London, San Diego, New York, Berkeley, Boston, Sydne, Tokyo, Toronto: Academic Press 1238 p.

Ferreira, JA.; Diniz, FB.; Ferreira, A.; Zannin, PHT. 2004. Evaluation of acoustical parameters of a Brazilian popular housing model. *Arch Acoust* 29(1):123–130.

Fischer, H.M.; Schneider, M.; Blessing, S. 2008. Einheitliches Konzept zur Berucksichtigung des Verlustfaktors bei Messung und Berechnung der Schalldammung massiver Wande, Fortschritte der Akustik, Hamburg, Hrsg.: *Deutsche Gesellschaft fur Akustik DEGA* 33(6): 453–462.

Fuller, C. R.; Nelson, P. A.; Elloitt, S. J. 1996. *Active Control of Vibration*. New York: *Academic Press* 49 (4): 419–427.

Gagliardini, L.; Bouvet, P. 1993. DAP: the active controlled double wall. *Proceedings, of Inter-noise* 107–110.

Gardonio, P.; Elliott, S. J. 1999. Active control of structure – borne and airborne sound transmission through double panel. *Journal of Aircraft* 36: 1023–1032.

Gardonio, P.; Johnson, M. E.; Elliott, S. J. 1997. Active control of sound transmission through a double panel using structural and acoustic sources. *Proceedings of Active* 97: 993–1006.

Gerretsen, E. 1993. Estimation of air-borne and structure-borne sound transmission from machinery in buildings. *Applied Acoustics* 40(3): 255–265.

Gerretsen, E. 2006. Estimation methods for sound levels and reverberation time in a room with irregular shape or absorption distribution. *Acta Acustica united with Acustica 92*(5): 797–806.

Gerretsen E. 1979. Calculation of the sound transmission between dwellings by partitions and flankingstructures. *Applied Acoustics* 12:413–433.

Goodhew, S.; Grifftihs, R.; Wooley, T. 2004. An investigation of the moisture content in the walls of a straw-bale building. *Building and Environment* 39(12): 1443–1451.

Grubliauskas, R.; Butkus, D. 2009 .Chamber research on acoustic properties of materials and their evaluation. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management* 17(2): 97–105.

Grubliauskas, R. 2009. Aplinkos triukšmo ir jo mažinimo, taikant lengvas konstrukcijas, tyrimai bei skaitinis modeliavimas. Daktaro disertacija. Vilnius, Technika 152 p.

Guigou, C.; Li, Z.; Fuller, C. R. 1996. The relationship between volume velocity and far – field radiated pressure of a planar structure. *Journal of Sound and Vibration* 197 (2): 252–254.

Haas, H. 1972. The influence of a single echo on the audibility of speech. *Journal of the Audio. Engineering Society* 20: 145–159.

Hall, FL.; Papakyriakou, MJ.; Quirt, JD. 1984. Comparison of outdoor microphone locations for measuring sound insulation of building facades. *Journal of Sound and Vibration* 92: 559–67.

Heckl, M. 1980. The tenth Sir Richard Fairey memorial lecture: sound transmission in buildings. *Sound and Vibration* 70: 137–53.

Henderson, K. Ethics. 2006. Culture and Structure in the Negotiation of Straw Bale Building Codes. *Science, Technology&Human* 31(3): 261–288.

Hongisto, V.; Keraenen, J.; Lindgren, M. 2000. Sound insulation of doors – part 2: comparison between measurement results and predictions. *Journal of Sound and Vibration* 230(1): 149–70.

Hongisto, V. 2001. A case study of flanking transmission through double structures. *Applied Acoustics* 62: 589–599.

Horoshenkov, KV.; Swift, MJ. 2001. The effect of consolidation on the acoustic properties of loose rubber granulates. *Applied Acoustics* 62(6): 665–90.

Ismail, MR.; Oldham, DJ. 2005. A scale model investigation of sound from building facades. *Applied Acoustics* 66: 123–47.

Yap, S. H.; Gibbs, B. M. 1999. Structure-borne sound transmission from machines in buildings, part 1: indirect measurement of force at the machine-receiver interface of a single and multi-point connected system by a reciprocal method. *Journal of Sound and Vibration* 222(1): 85–98.

Yang, H.S.; Kim, DJ. Lee YK.; Kim HJ.; Jeon JY.; Kang CW. 2004. Possibility of using waster tire composites reinforced with rice straw as construction materials. *Bioresource Technology* 95: 61–65.

Jagniatinskis, A.; Fiks, B.; Girnius, V. 2009. Airborne sound insulation performance of lightweight partitions for dwellings Interaktyvus. Prieiga per internetą: www.vgtu.lt/leidiniai/leidykla/MBM_2007/6pdf/Jagniatinskis_Fiks_Girnius.pdf&ei=73jrTJ2YO8SSswaviu2ADw&sa=X&oi=translate&ct=result&resnum=2&ved=0CCcQ7gEwAQ&prev=/search%3Fq%3DAIRBORNE%2BSOUND%2BINSULATION%2BPERFORMANCE%2BOF%2BLIGHTWEIGHT%2BPARTITIONS%2BFOR%2BDWELLINGS%26hl%3Dlt%26sa%3DG%26biw%3D1296%26bih%3D622. žiūrėta 2010. rugpjūčio. 11

Jones, R. D. 1976. A new laboratory facility for the determination of airborne sound insulation of party walls. *Applied Acoustics* 9: 119–30.

Kaiser, OI.; Pietrzko, SJ.; Morari, M. 2003. Feedback control of sound transmission through a double glazed window. *Journal of Sound and Vibration* 263: 775–95.

Kernen, U. 2005. Airborne sound insulation of Single and Double Plate Constructions, KTH Architecture and the Built Environment. Doctoral Thesis in Building Technology Stockholm, Sweden.

Kihlman, T. 1970. Sound transmission in building structures of concrete. *Journal of Sound and Vibration* 11(4): 435–44.

Kim, M. J.; Kim, H. S.; John, J. Y. 2001. Prediction and evaluation of impact sound transmission in apartment building structures by statistical energy analysis (SEA). *Applied Acoustics (UK)* 62 (6): 601–16.

Knudsen, V. O. 1929. The hearing of speech in auditoriums. *The Journal of the Acoustical Society of America* (1): 56–82.

Kruger, E. L.; Zannin, PHT. 2004. Acoustic, thermal and luminous comfort in classrooms. *Building and Environment* 39: 1055–1063.

Kuttruff, H. 1991. *Room Acoustics* New York: Elsevier. 343 p.

Laukaitis, A. 1997. The influence of water temperature on porous concrete mass warm-up and blowing. *Chem Technol* 5: 46–50.

Laukaitis, A. 1997. Porous concrete production factors and mechanical processing influence on sound absorption. *Chem Technol* 4: 58–62.

Leclaire, P.; Swift, MJ.; Horoshenkov, KV. 1998. Determining the specific area of porous acoustic materials from water extraction data. *Journal of Applied Physics* 84: 6886–90.

Legault, J.; Atalla, N. 2009. Numerical and experimental investigation of the effect of structural links on the sound transmission of a lightweight double panel structure. *Journal of Sound and Vibration* 324: 712–732.

Leissa, A. 1993. Vibrations of Plates. *Acoustical Society of America* 103: 408–413.

Licitra, G.; Cerchiai, M.; Chiari, C.; Boccini, L. 2000. Comparison between Italian and recommended European noise indicators. In Proceedings of INTERNOISE. 1884–1886.

Ljunggren, S. 1991. Airborne sound insulation of thick walls. *Acoustical Society of America* 89: 2338–2345.

Makarewicz, R.; Kokowski, P. 1994. Reflection of noise from a building's facade. *Applied Acoustics* 43: 149–57.

Matsumoto, T.; Uchida, M.; Sugaya, H.; Tachibana, H. 2006. Development of multiple drywall with high sound insulation performance. *Applied Acoustics* 67: 595–608.

Matsumoto, G.; Fujiwara, K.; Omoto, A. 1999. A study on the insertion loss of a noise barrier for a directional sound source. *Journal of Acoustic Society of Japanese* 20: 325.

Memoli, G.; Paviotti, M.; Kephalopoulos, S.; Licitra, G. 2008. Testing the acoustical corrections for reflections on a façade. *Applied Acoustics* 69: 479–495.

Nabelek, A. V.; Pickett, J. M. 1974. Monaural and binaural speech perception through hearing aids under noise and reverberation with normal and hearing – impaired listeners. *Journal of Speech, Language and Hearing Research* 17: 724–739.

Nelson, P. A.; Elliot, S. J. 1992. *Active Control of Sound.* New York: Academic Press. 436 p.

Obelenis, V.; Bagdonienė, T.; Mačionis, A.; Raškevičienė, R.; Vėbrienė, J. 2002. *Darbo medicina* Kaunas. 172 p.

Oral, G. K.; Yener, A. K.; Bayazit, N. T. 2004. Building envelope design with the objective to ensure thermal, visual and acoustic comfort conditions. *Building and Environment* 39: 281–7.

Pan, J.; Bao, C. 1998. Analytical study of different approaches for active control of sound transmission through double walls. *Journal of the Acoustical Society of America* 103 (2): 1916–1922.

Paslawski, J. 2009. Flexiblity in highwai noise management. *Transport* 24(1): 66–75.

Promoting health and safety in European. Small and Medium – sized Enterprises (SMEs). European Agency for Safety and Health at Work. 2004. 94 p.

Paurobally, R.; Pan, J.; Bao, C. 1999. Feedback control of noice transmission through a double – panel partition. *Proceedings of Active* 99. 1: 375–386.

Pietrzko, S. J.; Kaiser, O. E. 1999. Experiments on active control of air – borne sound transmission through a double wall cavity. *Proceedings of Active*, 355–362.

Rasmussen, B. 2010. Sound insulation between dwellings – Requirements in building regulations in Europe. *Applied Acoustics* 71: 373–385.

Rasmussen, B.; Rindel, J. H. 2005. Concepts for evaluation of sound insulation of dwellings - from chaos to consensus. *Forum Acusticum*, 2081–2092.

Rasmussen, B.; Rindel, J, H.; 2010. Sound insulation between dwellings – Descriptors applied in building regulations in Europe. *Applied Acoustics* 71: 171–180.

Rindel, J.H.; Rasmussen, B. 2005. Concepts for evaluation of sound insulation in dwellings-from chaos to consensus, *Forum Acusticum Budapest* 2081–2092.

Santos, P.; Tadeu, A. 2003. A note on the acoustic insulation between two-dimensional acoustic spaces at low frequencies. *Journal of Sound and Vibration* 261: 185–191.

Sas, P.; Bao, C.; Augusztinoviecz, F.; Desmet, W. 1995. Active control of sound transmission through a double panel partition. *Journal of Sound and Vibration* 180 (4): 609–625.

Sas, P.; Bao, C. 1993. Active control of sound transmission through double-panel partitions: experimental results. *Proceedings of Inter-noise* 101–106.

Simonsen, J. 1996. Utilizing straw as a filler in thermoplastic building materials. *Construction and Building Materials* 10(6): 435–440.

Stansfeld, SA.; Haines, MM.; Burr, M.; Berry, B.; Lercher, P. 2000. A review of environmental noise and mental health. *Noise and Health, A Quarterly Inter – disciplinary International Juornal* 2(8):1–8.

Stauskis, V. J. 2007. *Statybinė akustika*. Vilnius: technika. 266 p.

Stauskis, V. J. Dviguba garsą izoliuojanti atitvara. Lietuvos patentas Nr. 5270. 2005 10 25.

Stauskis, V. J. Triguba garsą izoliuojanti atitvara. Lietuvos patentas Nr. 5306. 2005.03.16.

Stauskis, V. J. Dviguba atitvara su kintama garso izoliacija. Lietuvos patentas Nr. 5308. 2005.04.15.

Stauskis, V. J.; Kunigėlis, V. 1998. Įvairių garso šaltinių akustinės charakteristikos. *Statyba* 4 (4): 311–315.

Steponaitis, L. 2007. Akustinės medžiagų savybės, jų panaudojimas startybinėse konstrukcijose, iš *10 – osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“, įvykusios Vilniuje 2007 m. kovo 29 – 30 d., pranešimų medžiagos: Statyba.* Vilnius: Technika, 108–113.

Taylor, B.; Vardy, S.; MacDougall, C. 2006. Compressive Strenght Testing of Earthen Plasters For Straw Bale Wall Application. Solid Mechanics and Its Applications, *Advances in Engineering Structures, Mechanics&Construtcion* 140: 175–183.

Trevathan, J. W.; Pearse, J. R. 2008. The effect of workmanship on the transmission of airborne sound through light framed walls. *Applied Acoustics* 69: 127–131.

Uris, A.; Sinisterra, J.; Bravo, J, M.; Llinares. J.; Estelles, H. 2002. Influence of screw spacings on sound reduction index in lightweight partitions. *Applied Acoustics* 63: 813–818

Vašina, M.; Hughes, D. C.; Horoshenkov, K. V.; Lapčik, L. 2006. The acoustical properties of consolidated expanded clay granulates. *Applied Acoustics* 67: 787–796.

Vigran, T. E. 2010. Sound insulation of double-leaf walls – Allowing for studs of finite stiffness in a transfer matrix scheme. *Applied Acoustics* 71: 616–621

Vigran T. E. 2010. Sound transmission in multilayered structures – introducing finite structural connections in the transfer matrix method. *Applied Acoustics* 71: 39–44.

Vigran T. E. 2009. Predicting the sound reduction index of finite size specimen by a simplified spatial windowing technique. *Journal of Sound and Vibration* 325: 507–512.

Zavadskas, E. K.; Kaklauskas, A.; Kaklauskienė, J. 2007. Modelling and forecasting of a rational and sustainable development of Vilnius: emphasis on pollution. *International Journal of Environment and Pollution* 30(3/4): 485–500.

Zannin, P. H. T.; Ferreira, J. A. C. 2007. In situ acoustic performance of materials used in Brazilian. *Construction and Building Materials* 21: 1820–1824.

Wieland, H.; Ashour, T.; Bockisch, F. J. 2002. Straw – renaissance for an old building material. *Landtechnik* 57(4): 222–223.

Willich, S. N.; Wegscheider, K.; Stallmann, M.; Keil, T. 2006. Noise burden and the risk of myocardial infarction. *European Heart Juornal* 27(3): 276–282.

Wilson, R. 1992. Sound transmission through double walls. PhD thesis, Edinburgh, UK: Heriot-Watt University.

Ягнятинскис, А., Фикс, Б. 2002. К вопросу декларирования шума, излучаемого техническими средствами. *Техническая акустика* (2) 12.1–12.10.

LST EN ISO 140-3:1999. Statinių atitvarų ir statinio dalių garso izoliavimo matavimas. 3 dalis. Laboratoriniai statinio dalių oro garso izoliavimo matavimai (ISO 140-3:1999).

LST EN ISO 140-4:2001. Akustika. Statinio atitvarų ir jo dalių garso izoliavimo matavimas. 4 dalis. Natūriniai ore sklindančio garso izoliavimo tarp patalpų matavimai (ISO 140-4:1998).

LST EN ISO 140-5:2001. Akustika. Statinio atitvarų ir jo dalių garso izoliavimo matavimas. 5 dalis. Natūriniai fasado ir jo dalių ore sklindančio garso izoliavimo matavimai (ISO 140-5:1998).

LST EN ISO 140-7:2001. Akustika. Statinių atitvarų ir jo dalių garso izoliavimo matavimas. 7 dalis. Natūriniai grindų smūgio garso izoliavimo matavimai (ISO 140-7:1998).

LST EN ISO 717-1:1999. Akustika. Statinių atitvarų ir statinio dalių garso izoliavimo įvertinimas. 1-oji dalis. Oro garso izoliavimas (ISO 717-1:1996).

LST EN ISO 717-2:2002. Akustika. Statinių atitvarų ir jo dalių garso izoliavime įvertinimas. 2 dalis. Smūgio garso izoliavimas (ISO 717-2:1996).

Autoriaus publikacijos disertacijos tema

Straipsniai mokslo recenzuojamuose žurnaluose

Butkus, D.; Januševičius, T. 2011. Acoustic investigations of the exterior and interior wall of a log house, *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management* 3(2):33-33 (ISI Web of Science) IF =1,508 ISSN 1648-6897 print, ISSN 1822-4199 online

Baltrėnas, P.; Petraitis, E.; Januševičius, T. 2010. Noise level study and assessment in the southern part of Panevėžys, *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management* 18(4): 271–280 (ISI Web of Science) IF = 1,508 ISSN 1648-6897 print, ISSN 1822-4199 online

Baltrėnas, P.; Petraitis, E.; Januševičius, T. 2010. Research and modelling of noise of the central park of the Panevėžys city, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 5(2): 76–82 (ISI Web of Science) IF = 2,056 ISSN 1822-427X print, ISSN 1822-4288 online

Vaišis, V.; Januševičius, T. 2009. Investigation and evaliution of noise level in the northern part of Klaipėda city, *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management* 17(3): 181–188 (ISI Web of Science) IF = 1,508 ISSN 1648-6897 print, ISSN 1822-4199 online

Straipsniai kituose leidiniuose

Butkus, D.; Januševičius, T.; Grubliauskas. R. 2008. Experimental test of internal wall construction elements, in *The 7th International Conference Environmental Engineering*: *Selected Papers (22–23 May 2008, Vilnius, Lithuania)* 1: 78–85. ISBN 978-9955-28-263-1 (Thomson ISI Proceedings).

Petraitis, E.; Januševičius, T**.** 2008. Study and assessment of noise level in Panevėžys town, in *The 7th International Conference Environmental Engineering*: *Selected Papers (22–23 May 2008, Vilnius, Lithuania)* 1: 282–290. ISBN 978-9955-28-263-1 (Thomson ISI Proceedings).

Tomas, Januševičius.; Donatas, Butkus. 2010. Renovuoto pastato akustinių savybių tyrimas, *Mokslas – Lietuvos ateitis* 2(5): 23–29. ISSN 2029-2341 (Index Copernicus).

Januševičius, T.; Butkus, D. 2008. Konstrukcijos iš perforuotos skardos akustinių savybių tyrimas [CD], iš *11–osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis" įvykusios Vilniuje 2008 m. balandžio 3 d., pranešimų medžiaga. Aplinkos apsaugos inžinerija.* Vilnius, 394–401. ISBN 978-9955-28-385.

PATENTAI

Butkus, D.; Januševičius, T. *Triukšmą mažinančios žaliuzės.* (Patentinė paraiška įteikta LR valstybiniam patentų biurui.

Tomas JANUŠEVIČIUS

STATYBINIŲ MEDŽIAGŲ IR KONSTRUKCIJŲ AKUSTINIŲ SAVYBIŲ TYRIMAS IR PANAUDOJIMAS TRIUKŠMUI MAŽINTI PATALPOSE

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
aplinkos inžinerija ir kraštotvarka (04T)

Tomas JANUŠEVIČIUS

RESEARCH ON THE ACOUSTIC QUALITIES OF BUILDING MATERIALS AND STRUCTURES AND THEIR USE FOR NOISE REDUCTION IN PREMISES

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Environmental Engineering (04T)

2011 05 11. 12, 75 sp. l. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
http://leidykla.vgtu.lt
Spausdino UAB „Ciklonas“
J. Jasinskio g. 15, 01111 Vilnius