

Latvijas Lauksaimniecības universitāte
Latvia University of Agriculture



RAITIS BRENCIS

**PUTUĢIPŠA TEHNOĻĪJAS PILNVEIDOŠANA
SKAŅAS ABSORBCIJAS MATERIĀLU
IZGATAVOŠANAI**

**FOAM GYPSUM TECHNOLOGY
DEVELOPMENT FOR SOUND ABSORPTION
MATERIAL PRODUCTION**

Promocijas darba **KOPSAVILKUMS**
inženierzinātņu doktora (Dr.sc.ing.) zinātniskā grāda iegūšanai
Būvzinātnes nozarē, Būvmateriāli un būvtehnoloģija apakšnozarē

SUMMARY
of the Doctoral thesis for the scientific degree (Dr.sc.ing.)
in Civil Engineering Science branch, Building materials and construction
Technology subbranch

Jelgava, 2013

LATVIJAS LAUKSAIMNIECĪBAS UNIVERSITĀTE
LAUKU INŽENIERU FAKULTĀTE

LATVIA UNIVERSITY OF AGRICULTURE
FACULTY OF RURAL ENGINEERING



Mg.sc.ing. **RAITIS BRENCIS**

**Putūģipša tehnoloģijas pilnveidošana skaņas absorbcijas
materiālu izgatavošanai**

**Foam gypsum technology development for sound
absorption material production**

Promocijas darba
KOPSAVILKUMS

inženierzinātņu (Dr.sc.ing.) doktora zinātniskā grāda iegūšanai
Būvzinātnes nozarē, Būvmateriāli un būvtechnoloģija apakšnozarē

SUMMARY

of the Thesis for Doctoral Degree in Engineering Sciences (Dr.sc.ing.), in
Civil Engineering Science branch, Building materials and construction
Technology subbranch

paraksts / signature

Jelgava

2013

INFORMĀCIJA

Promocijas darbs izstrādāts Latvijas Lauksaimniecības universitātes, Lauku inženieru fakultātes Arhitektūras un būvniecības katedrā laika posmā no 2009. līdz 2013. gadam.

Promocijas darba izstrāde līdzfinansēta no Eiropas Savienības Sociālā fonda un ar Eiropas reģionālās attīstības fonda atbalstu.



Promocijas darba zinātniskais vadītājs: Dr.sc.ing. **Juris Skujāns**, Latvijas Lauksaimniecības universitātes profesors.

Promocijas darba konsultants: Dr.habil.sc.ing. **Uldis Iljins**, Latvijas Lauksaimniecības universitātes profesors.

Oficiālie recenzenti:

Dr.sc.ing. Diāna Bajāre, Rīgas Tehniskās universitātes asociētā profesore

*Dr.*Vincas Gurskis, Aleksandra Stulginska universitātes asociētais profesors

Dr.sc.ing. Jaan Miljan, Igaunijas Dabaszinātņu universitātes profesors

Promocijas padomes sastāvs:

Prof. *Dr.habil.sc.ing.* Jānis Brauns, padomes priekšsēdētājs

Prof. *Dr.habil.sc.ing.* Uldis Iljins, padomes priekšsēdētāja vietnieks

Prof. *Dr..sc.ing.* Modris Dobelis

Prof. *Dr.sc.ing.* Juris Skujāns

Asoc.prof. *Dr.sc.ing.* Dmitrijs Serdjuks

Asoc.prof. *Dr.sc.ing.* Diāna Bajāre

Promocijas darba aizstāvēšana notiks 2013. gada 27. jūnijā plkst. 10:00, Jelgavā, Akadēmijas ielā 19, LLU, Lauku inženieru fakultātes 117. telpā.

Ar promocijas darbu un kopsavilkumu var iepazīties LLU Fundamentālajā bibliotēkā, Jelgavā, Lielā iela 2 un tiešsaistē http://llufb.llu.lv/promoc_darbi.html

Atsauksmes sūtīt Promocijas padomes sekretārei, LLU Lauku inženieru fakultātes docentei Dr.paed. Inesei Bīmanei (Akadēmijas iela 19, LV-3001, Jelgava, Latvija, e-pasts: inese.bimane@llu.lv)

ISBN 978-9984-48-100-5 (print)

ISBN 978-9984-861-42-5 (online)

INFORMATION

The research was carried out at the Department of Architecture and Building, Faculty of Rural Engineering, Latvia University of Agriculture from 2009 up to 2013.

Doctoral thesis has been worked out by support of European Social Fund and European Regional Development Fund.



Scientific supervisor: Dr.sc.ing. **Juris Skujans**, Professor of Latvia University of Agriculture.

Scientific adviser: Dr.habil.sc.ing. **Uldis Iljins**, Professor of Latvia University of Agriculture.

Official reviewers:

Dr.sc.ing. Diāna Bajāre, associated professor of Riga Technical university

Dr. Vincas Gurskis, associated professor of Aleksandras Stulginskas university

Dr.sc.ing. Jaan Miljan, professor of Estonia university of Life science

Promotion Board:

Prof. *Dr.habil.sc.ing.* Jānis Brauns, chairman

Prof. *Dr.habil.sc.ing.* Uldis Iljins, vice-chairman

Prof. *Dr..sc.ing.* Modris Dobelis

Prof. *Dr.sc.ing.* Juris Skujāns

Asoc.prof. *Dr.sc.ing.* Dmitrijs Serdjuks

Asoc.prof. *Dr.sc.ing.* Diāna Bajāre

The thesis will be defended at a public session of the Promotion Board to be held at the Faculty of Rural Engineering on June 27th, 2013, at 10:00. Venue – 19 Akademijas Street, Jelgava, lecture room 117.

The thesis and the summary of thesis is available at the Fundamental Library of Latvia University of Agriculture, 2 Liela Street, Jelgava and online http://llufb.llu.lv/promoc_darbi.html

References should be addressed to the secretary of the Promotion Board, assistant Professor of the Faculty of Rural Engineering of the Latvia University of Agriculture Dr.paed. Inese Bimane (19 Akademijas Street, LV-3001, Jelgava, Latvia, e-mail: inese.bimane@llu.lv)

SATURS / CONTENTS

INFORMĀCIJA	2
INFORMATION	3
IEVADS	6
PROMOCIJAS DARBA REZULTĀTU APROBĀCIJA	9
MATERIĀLI UN METODES	11
1. AKUSTISKAS MATERIĀLU UZ MINERĀLO SAISTVIELU BĀZES IZGATAVOŠANA UN PIELIETOŠANA	12
1.1. Šūnu betonu klasifikācija un iegūšanas tehnoloģijas	12
1.2. Porainas struktūras ietekme uz fizikāli mehāniskajām īpašībām ...	13
2. PUTUĢIPŠA IZGATAVOŠANAS TEHNOLOĢIJAS IETEKME UN TĀS PILNVEIDOŠANA SKAŅAS ABSORBCIJAS MATERIĀLA IZGATAVOŠANAI	14
2.1. Putuģipša žūšanas modelis	15
2.2. Pielietotās tehnoloģijas ietekme uz poru struktūru	22
2.3. Stiprības pētījumi	25
2.4. Siltumplūsmas pētījumi	27
2.4. Poru ietekme uz putuģipša skaņas absorbciju	27
2.5. Skaņas absorbcijas īpašības pie dažādām frekvencēm un materiālu biezumiem	30
2.6. Skaņas absorbcijas īpašības pie dažādām putuģipša izgatavošanas tehnoloģijām	32
3. PUTUĢIPŠA EKSPERIMENTĀLO MODEĻU IZGATAVOŠANA UN PĀRBAUDES	36
4. PUTUĢIPŠA IZGATAVOŠANAS TEHNOLOĢIJAS PILNVEIDOŠANAS IESPĒJAS, PIELIETOJOT KAŅEPJU DISPERSO STIEGROJUMU	38
SECINĀJUMI	40
INTRODUCTION	41
APPROBATION OF RESULTS	44
MATERIALS AND METHODS	46
1. PRODUCTION AND APPLICATION OF MINERAL BINDERS- BASED ACOUSTIC MATERIALS	48
1.1. Classification and production technologies for cell concrete	48
1.2. Effect of porous structure on physico-mechanical properties	48

2. FOAM GYPSUM MANUFACTURING TECHNOLOGY EFFECT AND ITS IMPROVEMENT FOR SOUND ABSORPTION	
MATERIALS PRODUCTION	50
2.1. Drying model for foam gypsum	51
2.2. Effect of applied technology on pore structure	58
2.3. Researches on strength properties	61
2.4. Researches on heat flow	63
2.4. Effect of pores on foam gypsum sound absorption	64
2.5. Sound absorption properties at various frequencies and material thicknesses.....	66
2.6. Sound absorption properties for various foam gypsum technologies	68
3. PRODUCTION AND TESTING OF FOAM GYPSUM EXPERIMENTAL MODELS.....	72
4. FOAM GYPSUM MANUFACTURING TECHNOLOGY IMPROVEMENT OPTIONS WITH USE OF DISPERSE HEMP SHIVES REINFORCEMENT	74
CONCLUSIONS	76
IZMANTOTĀ LITERATŪRA/ BIBLIOGRAPHY	77

IEVADS

Ražošanas tempu palielināšanās un pakāpenisks mehanizācijas līmeņa pieaugums dažādās darba vietās, kā arī jauno tehnoloģiju ieviešana tādās darba vietās, kur kādreiz izmantoja roku darbu, ir novedis pie tā, ka šobrīd daudzviet ir paaugstināts fona troksnis. Šāda situācija novērojama ne tikai ražošanas uzņēmumos (darba galdi, dažādas virpas un preses u.c.), bet arī birojos, kur pieaudzis tehnikas īpatsvars un bieži vien darba vietas cita no citas ir atdalītas ar maza augstuma norobežojumiem, kā arī auditorijās, kur veidojas skaņu kropļojumi u.c.

Īpaši tiek izdalīta trokšņa negatīvā ietekme uz dzirdi, kam bieži ir neatgriezeniskas sekas. Troksnis nelabvēlīgi ietekmē arī tādas cilvēka organisma sistēmas kā nervu sistēmu, asinsrites sistēmu u.c. (Ar darba vides..., 2003).

Lai samazinātu trokšņu līmeni darba vietās un ne tikai darba vietās, jāveicina skaņas absorbēšana, izklājot telpas norobežojošās konstrukcijas ar šāda tipa materiāliem. Dažādās funkcionālajās vietās dažas skaņas frekvences ir dominējošās pār citām frekvencēm. Tādēļ, ka, izmantojot absorbējošos materiālus, ir iespējams absorbēt konkrētas frekvences skaņas, var iegūt cilvēkam atbilstošu komforta līmeni.

Ir pārliecība, teorētiski un praktiski pierādījumi, ka materiāla struktūra ietekmē skaņas absorbciju (Гаджилы, Меркин, 1981; Скуянс, Штакелберг, Кравинскис, 1984; Шильд, Кассельман, Дамен, 1982; Горлов, Меркин, 1984; Скуянс, 1987; Voronina, 1994; Voronina, 1996; Voronina, 1997; Olny, Atalla, 2005; Laukaitis, Fiks, 2006; Arenas, Crocker, 2010; Foret, Guigou-Carter, Chene, 2010; Sgard, Skinner, Peters, 2006). Īpaši tas attiecas uz materiāliem ar izteiktu porainību. Materiālu izgatavošanas tehnoloģijas nosaka poru struktūras veidošanos un, mainot tehnoloģiju, iespējams iegūt dažādu porainību. Pielietojot akustiskos materiālus, lai tos varētu ekspluatēt skaņas absorbēšanai, jānodrošina arī tādas pārējās nepieciešamās īpašības kā stiprība liecē, stiprība spiedē u.c. Tādēļ jāveic arī pārbaudes stiprības īpašībām. Vienlaicīgi pozitīvajām akustiskajām īpašībām (skaņas absorbcijai un izolācijai) poraini materiāli raksturojas ar labām siltumizolējošām īpašībām. Ideāls variants ir, ja materiālam sakrīt maksimālās vērtības skaņas absorbcijai, skaņas izolācijai un siltumizolācijai.

Enerģijas taupīšana mājokļu un būvmateriālu ražošanā ir svarīgs jautājums ne tikai Latvijā, bet arī citās valstīs. Milzīga primārās enerģijas patēriņa un CO₂ emisija ir raksturīga, ražojot dažādus mūsdienu izolācijas materiālus. Dabas resursi ir plaši izmantoti būvmateriālu ražošanā daudzās valstīs visā pasaulē (Mathur, 2005; Akthar, Evans, 2010). Latvijas vietējo materiālu izmantošana, piemēram, ģipša, celtniecības materiālu ražošanā

skaņas izolācijai ēkās un būvēs būtu nozīmīgs ieguldījums Latvijas tautsaimniecībā. Ģipšakmens ir vietējais resurss, un tā izmantošana Latvijas tautsaimniecībā ir ekonomiski izdevīga. Šobrīd Latvijā ir novērtēti 747336 tūkst. m³ un izpētīti ir 26821.5 m³ (Pielikums ziņojumam par..., 2005). Ģipšakmens krājumi galvenokārt izvietoti valsts centrālajā daļā, kas atvieglo to ražošanu un transportēšanu. Ģipsi iegūst, termiski apstrādājot ģipšakmeni 150÷180 °C temperatūrā, kas ir ļoti zema temperatūra, salīdzinot ar cementa iegūšanu vai akmens vates ražošanu. Šajā temperatūrā strauji notiek kalcija sulfāta dihidrāta (ģipšakmens) dehidratācija, veidojot saistvielu, kuru tālāk izmanto izstrādājumu ražošanā.

Putuģipša ražošana ir viens no iespējamajiem ģipša pielietojuma veidiem. Ir iespējams plaši mainīt tā tilpummasu, kas ir svarīgākais būvmateriālu un kompozītmateriālu parametrs, lai regulētu mehāniskās īpašības (Bruijn, Jepsson, 2009; Chen, Sucech 2010; Duval, Bormaud, 2011; Khan, Chen, 2010; Khan, Chen 2011; Le Troëdec, Rachini, 2010; Nilsson, Gustafsson, 2007; Sedan, Pagnoux, 2008; Tran Le, Maalouf, 2010; Yuanjian, Isaac, 2007), skaņas absorbciju (Grubliuskas, Butkus, 2009; Kubicki, 2007; Laukaitis, Fiks, 2006), siltuma vadītspēju (Kymäläinen, Sjöberg, 2008) u.c. Iepriekšējie pētījumi (Skujans, Vulans, 2007) par putuģipsi parādīja, ka putuģipsim var būt līdzīgas īpašības ar citiem labi zināmiem siltuma un skaņas izolācijas materiāliem – akmens vati, polistirolu, perlītu, u.c. Saskaņā ar Eiropas regulām (Ieteikumi par ģipša..., 2008), ģipsim piemīt augsta uguns izturība – uguns reakcijas klase (A1 (Fireboard plāksnēm) vai A2-s1,d0 pārējām ģipškartona plāksnēm).

Kā putuģipša trūkumu varētu minēt materiāla trauslumu, tāpēc nepieciešama tā pastiprināšana. Dabiskās šķiedras, kas aug mūsu reģionā, varētu tikt izmantotas stiprības paaugstināšanai. Kā materiālu stiegrojums dienvidu reģionos tiek izmantoti palmu augi (Bacellar; D'Almeida, 2009, D'Almeida, Mello Filho, 2009), bet Eiropā tās varētu būt kaņepju šķiedras (Allin, 2005). Šķiedru augi ir samērā plaši izmantoti celtniecības, transportlīdzekļu ražošanas sfērā, lauksaimniecībā un citur. Daudzi pētījumi ir veikti, izmantojot dažādas šķiedras, lai uzlabotu mehāniskās īpašības. Īpaša uzmanība tiek pievērsta kaņepju šķiedru izmantošanai arī būvniecības nozarēs. Par šo tēmu pētījumi veikti Vācijā, Francijā, Lielbritānijā (Ulme, Freivalde, 2009).

Pētījuma objekts putuģipša izgatavošanas tehnoloģija, lai iegūtu struktūru, kas nodrošinātu noteiktas nepieciešamās skaņas absorbcijas materiāla fizikāli mehāniskās īpašības.

Pētījuma priekšmets materiāla fizikāli mehānisko īpašību veidošanās, mainot putuģipša izgatavošanas tehnoloģiju. Putuģipša akustiskā materiāla

iespējas absorbēt nepieciešamās frekvences skaņu, vienlaikus nodrošinot nepieciešamās stiprības un siltumplūsmas īpašības. Darbā apskatītais skaņas frekvenču diapazons ir no 250 Hz līdz 4000 Hz.

Pētījuma hipotēzes:

- mainot putuģipša skaņas absorbcijas materiāla izgatavošanas tehnoloģiju, iespējams panākt dažādas izstrādājuma īpašības, kas nodrošinātu vidējo svērto skaņas absorbcijas koeficientu $\alpha_w \geq 0.60$ frekvenču diapazonā no 250÷4000 Hz, vienlaicīgi izpildot stiprības prasības ($R_{liece} > 0.08$ MPa, $R_{spiede} > 0.20$ MPa);
- putuģipša izgatavošanas tehnoloģija ar kaņepju spaļu dispersā stiegrojuma pielietošanu var uzlabot tā stiprības īpašības un skaņas absorbciju;
- putuģipša skaņas absorbcijas koeficienta atkarība no izstrādājuma biezuma ir analogiska kā minerālvatei.

Pētījuma mērķis: pamatojoties uz teorētiskiem un eksperimentāliem pētījumiem, izstrādāt priekšlikumus, kuru rezultātā, variējot ar putuģipša skaņas absorbcijas materiāla izgatavošanas tehnoloģiju, tiktu iegūtas izstrādājuma īpašības, kuras nodrošinātu vidējo svērto skaņas absorbcijas koeficientu $\alpha_w \geq 0.60$ frekvenču diapazonā no 250÷4000 Hz, vienlaicīgi izpildot stiprības prasības ($R_{liece} > 0.08$ MPa, $R_{spiede} > 0.20$ MPa).

Pētījuma mērķa sasniegšanai izvirzīti šādi uzdevumi:

- veikt šūnu betonu fizikālo (skaņas absorbcijas, porainības, tilpummasas u.c.), kā arī mehānisko (spiedes, lieces stiprības) literatūrā doto īpašību, normatīvo dokumentu un pētniecisko publikāciju datu apkopošanu un analīzi;
- tehnoloģijas pilnveidei izgatavot eksperimentālus paraugus ($\rho < 400$ kg m⁻³), pielietojot dažādas putuģipša izgatavošanas tehnoloģijas, noteikt to skaņas absorbciju un struktūras ietekmi uz materiāla fizikālajām un mehāniskajām īpašībām;
- izstrādāt putuģipša žūšanas modeli teorētiski eksperimentālām pārbaudēm, kur iespējams noteikt siltuma daudzumu, kas nepieciešams putuģipša žāvēšanai un eksperimentāli noteikt galvenos putuģipša paraugu žūšanas parametrus atkarībā no putuģipša tilpummasas;
- izstrādāt priekšlikumus izgatavošanas tehnoloģijai, lai iegūtu materiālu ar noteiktu materiāla struktūru, kas dod iespēju iegūt izstrādājuma īpašības, kuras nodrošinātu vidējo svērto skaņas absorbcijas koeficientu

$\alpha_w \geq 0.60$ frekvenču diapazonā no 250÷4000 Hz, vienlaicīgi izpildot stiprības prasības ($R_{liece} > 0.08$ MPa, $R_{spiede} > 0.20$ MPa);

- veikt pētījumu par putuģipša izgatavošanas tehnoloģijas pilnveidošanu, pielietojot disperso kaņepju spaļu stiegrojumu, variējot stiegrojuma garumu un daudzumu, noteikt tā fizikāli mehāniskās īpašības un salīdzināt rezultātus ar nestiegotu putuģipsi.

Promocijas darba zinātniskā novitāte:

- pirmo reizi veikta putuģipša skaņas absorbcijas materiāla izgatavošanas tehnoloģijas izstrādāšana, lai panāktu nepieciešamo materiāla struktūru un biežumu, kas nodrošina vidējo svērto skaņas absorbcijas koeficientu C klasei pēc LVS EN ISO 11654:2000 prasībām 250 Hz÷4000 Hz frekvenču diapazonā, kā arī vienlaicīgi nodrošinātu pietiekamas materiāla stiprības īpašības;
- izveidots adekvāts putuģipša mitruma žūšanas matemātiskais modelis, kurš dod iespēju noteikt efektīvo žūšanas dziļumu. Noteikta galveno putuģipša paraugu žūšanas parametru atkarība no putuģipša tilpummasas;
- noteikts, ka putuģipša skaņas absorbcijas materiālam un minerālvatei ir analogiska sakarība starp skaņas absorbcijas koeficientu un izstrādājuma biežumu;
- pirmo reizi noteikta kaņepju spaļu dispersā stiegrojuma ietekme uz putuģipša poru struktūru un tā fizikālajām un mehāniskajām īpašībām.

PROMOCIJAS DARBA REZULTĀTU APROBĀCIJA

Publikācijas par promocijas darba tēmu

Publicētas SCOPUS datu bāzē

Skujans J., Iljins U., Ziemelis I., Gross U., Ositis N., Brencis R., Veinbergs A., Kukuts O. (2010), Experimental research of foam gypsum acoustic absorption and heat flow. **In:** *Chemical engineering transactions*, 19, p.79-84. DOI:10.3303/CET 1019014

Brencis R., Skujans J., Iljins U., Ziemelis I., Osits N., (2011) Research on foam gypsum with hemp fibrous reinforcement. **In:** *Chemical Engineering Transactions*. Proceeding of international scientific Conference, 25, p. 159-164.

Brencis R., Skujans J., Iljins U., Preikss I. (2011) Research of hemp`s fibrous reinforcement effect to bending strenght and sound absorption of foam gypsum. **In:** *Civil Engineering`11*. Proceeding of international scientific conference Vol.3, ISSN 2255-7776, p. 32-37

Kakitis A., Berzins U., Berzins R., Brencis R. (2012) Cutting properties of the Hemp fibre. **In:** *11th International Conference Engineering for rural development, Jelgava, May 24-25, 2012, p.245-250. ISSN 1691-597*

Brencis R., Iljins U., Skujans J., Gross U. (2012) Research of foam gypsum drying process and heat flow transfer. **In:** *Chemical Engineering Transactions. Proceeding of international scientific Conference, 29, ISSN 1974-9791, p. 583-588.*

Publicētas konferenču materiālos un rakstu krājumos

Iljins U., Gross U., Gajevskis A., Skujans J., Brencis R. (2012) Experimental research on gypsum drying process. **In:** *5-th International Conference Applied Information and Communication Technology 2012, Jelgava April, 26-27, ISBN 978-9984-48-065-7, p. 150-152*

Brencis R., Skujans J., Iljins U., Ziemelis I., Navickas J. (2013) Hemp fibers reinforcement influence on thermal conductivity and physical-mechanical properties of foam gypsum. *Proceedings of the Latvia University of Agriculture. sagatavots*

Brencis R., Skujans J., Iljins U. (2013), Acoustic and mechanical properties of Foam gypsum decorative ceiling panels. **In:** *Civil Engineering`13. Proceeding of international scientific conference, May 16-17, 2013. (iesniegts publicēšanai)*

Piedalīšanās konferencēs promocijas darba rezultātu ziņošanai

Skujans J., Iljins U., Ziemelis I., Gross U., Ositis N., Brencis R., Veinbergs A. Kukuts O., Experimental research of foam gypsum acoustic absorption and heat flow, *4th International Conference on Safety & Environment in process Industry, 14.-17. Marts,2010, Florence, Italy.*

Brencis R., Skujans J., Iljins U., Ziemelis I., Ositis N., Research on Foam Gypsum with Hemp's Fibrous Reinforcement, *14th International Conference on Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction, 8-11 May 2011, Florence, Italy.*

Brencis R., Iljins U., Skujans J., Gross U. Drying kinetics processes in foam gypsum, *International scientific seminar Environment and building materials: Physical methods and investigation. Aleksandras Stulginskis University, 27 January 2012, Kauna, Lithuania.*

Kakitis A., Berzins U., Berzins R., Brencis R., Cutting properties of the Hemp fibre, *11th International Scientific Conference Engineering for Rural Development, 24 – 25 May, 2012, Jelgava, Latvia.*

Iljins U., Gross U., Gajevskis A., Skujans J., Brencis R., Experimental research on gypsum drying process, *5-th International Conference Applied*

Information and Communication Technology 2012, April, 26-27, Jelgava, Latvia.

Brencis R., Iljins U., Skujans J., Gross U., Research of foam gypsum drying process and heat flow transfer. *Conference Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction 2012*, August 25 – 29, 2012, Prāga, Čehija.

Citas aktivitātes saistībā ar promocijas darba tēmu

H.Putāns, I.Ziemelis, U.Iljins, V.Zagorska, A.Norvaišs, R.Brencis. (2010) Ēku apsildes periodiskas kurināšanas paņēmieni. Latvijas patents LV 14190. Publicēts: Patenti un preču zīmes. Latvijas Republikas Patentu valdes oficiālais vēstnesis. 8/2010., 1213. lpp.

Piedalīšanās starptautiskā kongresa *39th International Congress on Noise Control Engineering Internoise 2010*, 13-16 June, Lisbon, Portugal

Dalība projektā Latvijas – Lietuvas pārrobežu sadarbības programmas 2007. – 2013. gadam projekts „Zinātnes un ražošanas sadarbības veidošana Jelgavā un Šauļos”, kura ietvaros strādāts pie e-studiju kursa „Aizsardzība pret troksni” izveides.

Dalība ERAF projekta „Jaunu kompozītbūvmateriālu izstrāde uz putuģipša bāzes ar šķiedraugu stiegrojumu un no tiem veidotu sistēmu pētījumi” 2010.gads.

MATERIĀLI UN METODES

Putuģipša izgatavošanai kā galvenā sastāvdaļa tika izmantots β $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ būvgipsis ar blīvumu 2550 kg m^{-3} , maluma smalkumu 3.86 g (7.72%) un saistīšanās laiku $18 \text{ min } 30\text{s}$. Kā virsmas aktīvā viela tika izmantota STAMEX F-15 FFFP 5% putu veidotājs. Doktora darba izstrādes ietvaros eksperimentālie paraugi tika izgatavoti ar sausās mineralizācijas metodi (Горлов, Меркин, 1984; Скуянс, 1987), kas ļauj samazināt ūdens/ģipša attiecību, tādējādi uzlabojot materiāla īpašības.

Žūšanas procesa laikā parauga vidējais mitrums tika noteikts, to sverot ar svariem, kuru maksimāli pieļaujamais svēršanas svars 16100.0 g , bet jutība ir $\pm 0.2 \text{ g}$. Lai pārbaudītu iegūtos teorētiskos rezultātus, putuģipša paraugiem tika veikti to žūšanas pētījumi velkmes skapī pie temperatūras 20°C , relatīvā gaisa mitruma $30\text{-}40\%$ un gaisa kustības ātruma 0.02 m s^{-1} parauga virsmas tuvumā.

Poru skaits un laukums tika noteikts ar digitālo mikroskopu VHX-100 50 reīzu lielā palielinājumā. Poru skaits un aizņemtais laukums tika noteikts uz laukuma vienību 1 mm^2 , pēc autora izstrādātas metodes šim mikroskopam.

Lieces stiprība tika noteikta ar iekārtu Zwick Roell 2.5 TS trīspunktu liecē sijiņām ar izmēriem 40×40×160mm un attālumu starp balstiem 100 mm pēc standarta metodes, bet putuģipša plākšņu lieces stiprība noteikta pēc standarta LVS EN 14246:2006 „Ģipša elementi piekārtajiem griestiem. Definīcijas, prasības un testēšanas metodes”.

Siltumplūsmas mērījumi tika veikti ar divkanālu bezvadu siltuma plūsmas un temperatūras elektronisko mērsistēmu, kā arī ar karstās plātes mēriekārtu saskaņā ar standartu LVS ISO 8302:2001 ”Siltuma izolācija - Siltuma pretestība un ar to saistīto īpašību noteikšana stacionārā režīmā - Norobežotās karstās plāksnes ierīce”.

Skaņas absorbcija noteikta akustiskajā caurulē ar Ø40 mm, frekvenču diapazonā no 250÷4000 Hz. Izsvērtais skaņas absorbcijas koeficients noteikts pēc standarta LVS EN ISO 11654:2000 „Akustika - Skaņas absorbtāji ēkās - Skaņas absorbcijas parametri”. Modeļu pārbaudēm absorbcija noteikta reverberācijas kamērā pēc standarta LVS EN ISO 354:2003 „Akustika. Skaņas absorbcijas mērīšana reverberācijas kamerā”.

Putuģipsim ar kaņepju spaļu srtiegrojumu papildus putuģipša izgatavošanai tika pievienoti kaņepju spaļi dažādās koncentrācijās. Kaņepju spaļu koncentrācija c, g kg⁻¹ ir spaļu daudzums gramos uz 1 kg sausa ģipša izejmateriāla. Spaļus sagatavo, tos sasmalcinot un sijājot ar attiecīga izmēra sietiem, lai iegūtu atšķirīgus garumus 2.5÷5.0 mm un 5÷10 mm.

1. AKUSTISKAS MATERIĀLU UZ MINERĀLO SAISTVIELU BĀZES IZGATAVOŠANA UN PIELIETOŠANA

Nodaļā apskatīta šūnubetonu klasifikācija, to priekšrocības un trūkumi saistībā ar akustisko jautājumu risināšanu, kā arī veikta analīze par putuģipša iepriekš veiktajiem pētījumiem pēc dažādām izgatavošanas metodēm un izvēlēta putuģipša izgatavošanas metode to pētījumiem.

Apskatīts poru sadalījums pēc to izmēriem, un sniegts apkopojums tā ietekmei uz materiāla skaņas absorbciju.

1.1. Šūnu betonu klasifikācija un iegūšanas tehnoloģijas

Putumateriāli uz minerālo saistvielu bāzes ir viens no šūnu betona veidiem. Šim betona paveidam raksturīga maza tilpummasa, sīkas, pa visu tilpumu vienmērīgi izvietotas, gaisu ieskaujošas poras, un tas ir izveidots, ražošanas tehnoloģijas procesā iesaistot gaisu šķidrā masā.

Promocijas darba ietvaros šūnu materiālus var iedalīt pēc to iegūšanas tehnoloģijas (iegūšanai izmantota gāze vai putas) un struktūras.

Mūsdienās, ražojot šūnu materiālus, izmanto visas pazīstamās saistvielas – cementu (gāzbetons, putubetoni), kaļķi (gāzsilikāti), ģipsi (gāzģipsis, putuģipsis), kā arī dažādas to kompozīcijas.

Putuģipsis ir materiāls uz ģipša saistvielu bāzes, kam iegūta porizēta struktūra, izmantojot putas veidojošas vielas. Viena no efektīvākajām metodēm – **sausās mineralizācijas metode** – ir izstrādāta MISI (*МИСИ*) (Горлов, Меркин, 1984; Скуянс, 1987). Ar šo paņēmieni iespējams izmantot sistēmai nepieciešamo ūdens daudzumu, kas ir tuvu teorētiski nepieciešamajam, lai notiktu hidratācija un tādējādi uzlabotu materiāla īpašības (Скуянс, Штакелберг, 1984 b). Mainot izgatavošanas tehnoloģiju – ū/ģ attiecību un virsmas aktīvās vielas (VAV) daudzumu – iespējams panākt dažādas tilpummasas un poru struktūras materiālus.

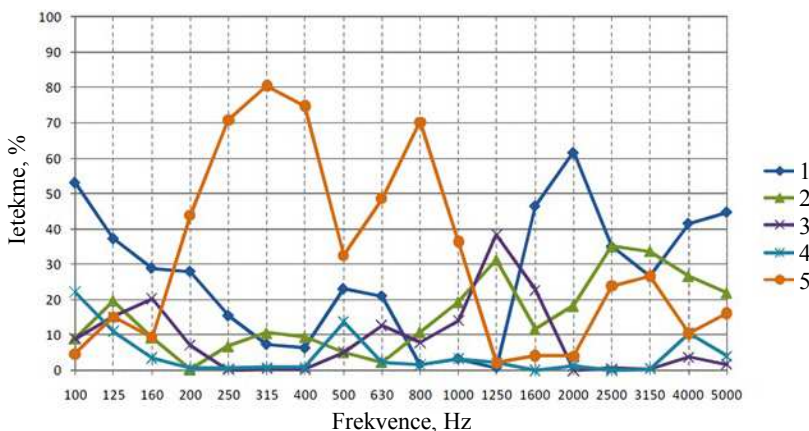
1.2. Porainas struktūras ietekme uz fizikāli mehāniskajām īpašībām

Poru ietekme uz fizikāli mehāniskajām īpašībām ir noliedzama un pašsaprotama, ko savos pētījumos apstiprinājuši vairāki zinātnieki un zinātnieku grupas (Laukaitis, Fiks, 2006; Voronina, 1994, 1996, 1997; Arenas, Crocker, 2010; Шейкин, Чеховский, 1979; Cox, Van Dijk, 2002; Yang, Chiang, 2001; Foret, Guigou-Carter, Chene, 2010; Sgard, Olny, Atalla, 2005). Šeikins, Čehovskijs un Brusers (Шейкин, Чеховский, 1979) savā darbā apkopjuši dažādu autoru veidotu poru iedalījumu pēc to nosaukumiem un izmēriem. Vismazākās poras <6 Å (ultramikroporas, iekšējās nelielās, starpkrisatālu, starpslāņu), klasifikācijas autori Brunauers, Mihails, Kondo, Feldmans. Nākamā izmēra poras 6÷15 Å (mikroporas, gēla poras, absorbcijas, iekšējās lielās, iekšēji kristāliskās), klasifikācijas autori Brunauers, Pauers, Mihails, Kondo, Feldmans. Mezoporas un poras starp gēla daļiņām ar izmēriem no 15÷1000 Å, klasifikācijas autori Brunauers, Mihails, Kondo, Feldmans. Vislielākās ir makroporas ar izmēriem >1000 Å, klasifikācijas autori Brunauers, Pauers, Mihails, Kondo, Feldmans. Putuģipša izpētē un promocijas darba ietvaros pēc šī sadalījuma tika pēfītas makroporas, kurām izmēri ir virs 1000 Å. Darbā apskatītais poru diapozons putuģipsim ir no 2500÷3100 Å, kas putuģipsim tika iegūts pie dotajām izgatavošanas tehnoloģijām.

Analizējot tipiskos absorbcijas materiālus un to spēju absorbēt skaņu pie dažādām frekvencēm, veidojas situācija, ka paneļa tipa absorbenti (darbojas kā paneļa plāksnes pretestība liecei un starpslāņu pretestība spiedei) efektīvi ir zemajās frekvencēs. Helmholca absorbenti vidējās frekvencēs ar ļoti izteiktu absorbciju šaurā frekvenču diapozonā un porainie absorbenti, kas ir efektīvi tieši augsto frekvenču slāpēšanai, kur jau pie 500 Hz absorbcijas koeficients ir 0.55. Putuģipsi pielietojot kā plāksņu materiālu, būtu iespējams iegūt visu šo materiālu labāko īpašību

apkopojumu, kā to savos pētījumos par akmens vati, to perforējot, ir veicis Sgard (Sgard, Olny, Atalla, 2005) un, mainot poru struktūru putubetoniem, Laukaitis un Fiks (Laukaitis, Fiks, 2006).

Poraini elastīgiem materiāliem skaņas absorbcijas koeficientu līdz 160 Hz ietekmē porainība. No 160 Hz līdz 1000 Hz dominējoša ietekme ir materiāla tilpummasai, pie 1250 Hz lielākā ietekme ir materiāla biežumam, bet no 1250 Hz līdz 5000 Hz atkal visu nosaka materiālu porainība (Foret, Guigou-Carter, Chene, 2010). Tādām materiāla īpašībām kā materiāla stiprība, biežums un elastības modulis ietekme uz skaņas absorbcijas īpašībām ir līdz 35% (1.1.att.) un galvenokārt uz frekvenču diapazoniem virs 1250 Hz.



Avots: (Foret, Guigou-Carter, Chene, 2010)

1.1. att. Fizikāli mehānisko īpašību ieguldījums poraini elastīga materiāla skaņas absorbcijas koeficienta veidošanā.

1- porainība; 2- stiprība; 3- biežumi; 4- elastības modulis; 5- tilpummasa.

2. PUTUĢIPŠA IZGATAVOŠANAS TEHNOLOĢIJAS IETEKME UN TĀS PILNVEIDOŠANA SKAŅAS ABSORBCIJAS MATERIĀLA IZGATAVOŠANAI

Detalizēti aprakstīta putuģipša izgatavošanas tehnoloģija visos tās etapos. Kā viens no galvenajiem un energo ietilpīgākajiem procesiem ir putuģipša žāvēšana. Šajā nodaļā aprakstīta līdz šim zināmā informācija par putuģipša žāvēšanu un izstrādāts putuģipša žūšanas modelis, ar kuru iespējams noteikt nepieciešamo siltuma daudzumu, lai izžāvētu putuģipsi līdz nemainīgai masai.

Aprakstīta autora veidota putuģipša poru skaitīšanas metodika ar digitālo mikroskopu VHX-100. Ar šo metodiku iegūtie rezultāti attēloti poru sadalījumos promocijas darbā izmantotajām putuģipša izgatavošanas tehnoloģijām. No poru struktūras izrietošie materiāla stiprības rādītāji noteikti visām pētījumā veidotajām tehnoloģijām. Izgatavošanas tehnoloģijām ar VAV 4 ml liecē tie ir līdz 2.9 reizes augstāki, bet spiedē līdz 3.5 reizes augstāki nekā izgatavošanas tehnoloģijām ar VAV 6 ml.

Veikta viena no galvenajiem parametriem – siltumvadītspējas koeficienta – noteikšana atkarībā no materiāla tilpummasas. Iegūtie rezultāti ir labāki, salīdzinot ar iepriekš zināmajiem (Скучанс, 1987) datiem alfa modifikācijas putuģipsim. Promocijas darbā iegūtajam beta putuģipsim pie tilpummasas 270 kg m^{-3} siltumvadītspējas koeficients ir $0.08 \text{ W (m K)}^{-1}$, bet pie 400 kg m^{-3} siltumvadītspējas koeficients ir $0.11 \text{ W (m K)}^{-1}$.

Izgatavošanas tehnoloģija, ietekmējot tilpummasu, ietekmē arī materiāla skaņas absorbcijas koeficientu. Šajā nodaļā aprakstīta skaņas absorbcijas koeficienta noteikšanas metodika un iegūtie rezultāti pie dažādām frekvencēm atkarībā no izgatavošanas tehnoloģijas un materiāla biezuma. Iegūtie rezultāti sasaucas ar akmens vates skaņas absorbcijas pētījumiem, ko veicis Šmits (Шмидт, 1969), kad plānākiem paraugiem pie augstajām frekvencēm ir labāki skaņas absorbcijas rādītāji nekā pie zemajām frekvencēm, bet biežākiem paraugiem skaņas absorbcijas koeficients ir augstāks pie zemajām frekvencēm. Secināts, ka putuģipsim skaņas absorbcijas koeficients ir augstāks, izgatavojot to ar tehnoloģiju, kas nodrošina lielāku poru un caurejošo poru laukumu uz 1 mm^2 . Kopējais poru laukums $0.44 \div 0.46 \text{ mm}^2$ uz 1 mm^2 dod skaņas absorbcijas koeficientu robežās no $0.41 \div 0.43$, bet poru laukums 0.48 mm^2 uz 1 mm^2 dod skaņas absorbcijas koeficientu 0.52 .

Pēc izgatavošanas tehnoloģijas iegūtie materiāli sadalīti 3 grupās pēc to tilpummasas un veikts to savstarpējais skaņas absorbcijas koeficienta salīdzinājums pie dažādām frekvencēm un materiāla biežumiem. Skaņas absorbcijas koeficientu pie materiāla biezuma 10 un 20 mm zemo frekvenču diapazonā maz ietekmē tilpummasa, bet pie materiāla biezuma 50 un 100 mm novērota būtiska atšķirība skaņas absorbcijas koeficienta vērtībām visiem trim tilpummasas apgabaliem pie visiem frekvenču diapazoniem.

2.1. Putuģipša žūšanas modelis

Žūšanas procesā vienlaicīgi darbojas masas un siltuma pārnese procesi, un tāpēc būtu nepieciešams iegūt vienkāršu, uz eksperimentāliem datiem balstītu, žūšanas modeli ar optimālu enerģijas patēriņu. Žūšanas process sastāv no divām daļām. Pirmajā daļā ir konstants žūšanas ātrums, bet otrajā ir krītošs žūšanas ātrums (Handbook of Industrial..., 2007).

Sākotnējā žūšanas stadijā tas ir atkarīgs no apkārtējās vides apstākļiem (mitruma, temperatūras un gaisa plūsmas ātruma) (Tang, Etzion, 2004; Dincer, Dost, 1995; Musielak, Kieca, 2009; Defraeye, Blocken et al., 2012). Starp šiem žūšanas procesiem pastāv kritiskais punkts (Iljins, Skujans, 2009), kurā mainās žūšanas process no ārējo faktoru ietekmes uz iekšējo faktoru ietekmi.

Līdz šim laikam pētījumus par putuģipša žūšanu veikuši Iljins un Skujāns (Iljins, Skujans, 2009). Apskatot žūšanu divos etapos, ir sagaidāms, ka sākotnēji iztvaikošana notiks ar konstantu ātrumu, kuru nosaka nevis parauga materiāla īpašības, bet gan apkārtējā gaisa temperatūra un relatīvais mitrums. Paraugam sākotnējais mitrumu uz apakšējās virsmas ($z=0$) noklāts ar tvaika barjeru, kā arī pārējās skaldnes, izņemot virsējo, noklātas ar mitruma izolējošu materiālu. Šo sistēmu apraksta nestacionārais difūzijas (Fika) vienādojums vienas koordinātas gadījumā ar otrā veida robežnosacījumiem.

Atrisinot matemātisko fizikas problēmu ar nestacionāro difūzijas vienādojumu vienas koordinātas sistēmā ar otrā veida robežnosacījumiem, izmantojot mainīgo atdalīšanas metodi pirmajā žūšanas etapā (2.1.a.att.), tika iegūts rezultāts (2.1) (Iljins, Skujans, 2009)

$$W_i(t; z) = W_s - \frac{\varphi \cdot t}{d} - \frac{W^*}{2} \left(\frac{z^2}{d^2} - \frac{1}{3} - \frac{4}{\pi^2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k^2} \cdot \cos \frac{\pi k z}{d} \cdot \exp \left(-\frac{\pi k^2}{d^2} D t \right) \right) \quad (2.1)$$

kur:

$$W^* = \frac{\varphi \cdot d}{D}, \text{ kg m}^{-3}.$$

Paraugam žūstot un saniedzot t_{cr} , beidzas pirmais žūšanas etaps. Uz parauga virsmas $z=d$, mitrums ir sasniedzis līdzsvara mitrumu W_0 . Sākot ar šo laiku t_{cr} , paraugs ir pārgājis otrajā žūšanas etapā, kurā žūšanas ātrums $\varphi(t)$ nosaka parauga materiāla fizikālie parametri un tas eksponenciāli samazinās atkarībā no laika (Iljins, Skujans, 2009) un ir mazāks nekā sākotnējais konstants žūšanas ātrums φ pirmajā etapā. Tas nozīmē, ka otrajā žūšanas etapā mainās sākuma nosacījums un robežnosacījums. Sākuma nosacījumam otrajam etapam pie t_{cr} tika izmantots matemātiskās fizikas problēmas atrisinājums pirmajam etapam (2.1) ar pirmā veida robežnosacījumiem.

Otrajā žūšanas etapā sistēmu aprakstošais difūzijas vienādojums paliek nemainīgs (Fika vienādojums) un, atrisinot problēmu ar jauno sākumnosacījumu un pirmā veida robežnosacījumu, izmantojot mainīgo atdalīšanas metodi, iegūst izteiksmi (2.2) (Iljins, Skujans, 2009):

$$W_{II}(t - t_{cr}; z) = W_0 + \sum_{n=0}^{\infty} A_n \cos \frac{\pi}{2d} (2n+1)z \cdot \exp\left(-\frac{\pi^2(2n+1)^2}{4d^2} D(t - t_{cr})\right) \quad (2.2)$$

kur:

$$A_n = \frac{(-1)^n}{\pi} \left(\left(W_s - W_0 - \frac{\varphi}{d} t_{cr} + \frac{W^*}{6} \right) \cdot \frac{4}{2n+1} - \frac{2W^*}{2n+1} \cdot \left(1 - \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{1}{(2n+1)^2} \right) - \frac{8W^*}{\pi^2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2n+1}{k^2} \cdot \frac{1}{(2k)^2 - (2n+1)^2} \cdot \exp\left(-\frac{\pi^2 k^2}{d^2} D t_{cr}\right) \right)$$

$W_{II}(t, z)$, $W_{II}(t, z)$ – parauga mitrums atkarībā no laika t un koordinātes z attiecīgi pirmajā un II žūšanas etapā, kg m^{-3} ;

d – parauga biezums, m ;

φ – žūšanas ātrums, $\text{kg (m}^2 \text{ s)}^{-1}$;

D – difūzijas koeficients, $\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$;

W_s , W_0 , W^* – attiecīgi sākuma, līdzsvara mitrumi, $W^* = \frac{\varphi \cdot d}{D}$, kg m^{-3} .

Izmantojot teorētisko izteiksmju (2.1 un 2.2) un eksperimentālo datu salīdzināšanu, ar mazāko kvadrātu metodi var aprēķināt modeļos nezināmos lielumus t_{cr} , φ , D . Līdzsvara mitrumu W_0 no šī modeļa nevar noteikt, tāpēc tas tika pieņemts vienāds ar nulli.

Aprakstītajā modelī tiek pieņemts, ka žūšana notiek no parauga virsmas, kuras biezums ir bezgalīgi mazs. Tomēr, ievērojot putuģipša paraugu augsto porainības pakāpi, ir sagaidāms, ka žūšana daļēji notiks arī no porām, kas atrodas parauga iekšienē. Pirmajā tuvinājumā pieņemot, ka šī žūšanas intensitāte eksponenciāli samazināsies virzienā uz parauga iekšieni. Attiecīgi žūšanai patērēto jaudas blīvumu atkarībā no koordinātes z var aprēķināt pēc formulas 2.3:

$$q(z) = q \cdot \exp\left(-\frac{d-z}{\delta}\right) \quad (2.3)$$

kur:

q – žūšanas procesā patērētais jaudas blīvums uz parauga virsmas $z=d$, W m^{-3} ;

δ – efektīvais žūšanas dziļums, m .

Tad atbilstoši žūšanas pirmajam etapam, kurā žūšanas ātrums tiek pieņemts konstants, var izveidot viendimensionālu stacionāru modeli, kas satur Puasona vienādojumu temperatūras aprēķinam parauga iekšienē.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{q(z)}{\lambda} \quad (2.4)$$

kur:

λ parauga siltumvadītspēja, W (m K)⁻¹.

Robežnosacījumu uz parauga apakšējās virsmas $z=0$:

$$\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} = \alpha_1 (T - T_0) \quad (2.5)$$

kur:

α_1 siltuma atdeves koeficients no parauga apakšējās virsmas, W (m² K)⁻¹;

T_0 apkārtējās vides temperatūra, °C.

Robežnosacījumu uz parauga augšējās virsmas $z=d$:

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=d} = \alpha_2 (T - T_0) \quad (2.6)$$

kur:

α_2 siltuma atdeves koeficients no parauga augšējās virsmas, W (m² K)⁻¹.

Atrisinot sistēmu (2.4÷2.6), iegūst atrisinājumu

$$T(z) = T_0 + Az + B + \frac{q}{\lambda} \delta^2 \exp\left(-\frac{d-z}{\delta}\right) \quad (2.7)$$

kur:

$$A = -\frac{q\delta}{R_T} \left(\frac{\delta}{\lambda} \left(1 - \exp\left(-\frac{d}{\delta}\right) \right) \right) + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{1}{\alpha_1} \exp\left(-\frac{d}{\delta}\right);$$

$$B = -\left(\frac{q\delta + \lambda A}{\alpha_2} + \frac{q\delta^2}{\lambda} + Ad \right);$$

$$R_T = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{d}{\lambda}.$$

Pieplūstošos siltuma daudzumus Q (W m²) var aprēķināt, izmantojot robežnosacījumus (2.5, 2.6 un 2.7):

$$Q_2 = -\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=d} = -q\delta - \lambda A \quad (2.8)$$

$$Q_1 = \lambda \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} = q\delta \exp\left(-\frac{d}{\delta}\right) + \lambda A \quad (2.9)$$

Kopējais patērētais siltuma daudzums:

$$Q = Q_1 + Q_2 = -q\delta \left(1 - \exp\left(-\frac{d}{\delta}\right)\right) = -\varphi L \quad (2.10)$$

kur:

L latentais siltums no putuģipša mitruma žūšanas, $J \text{ kg}^{-1}$.

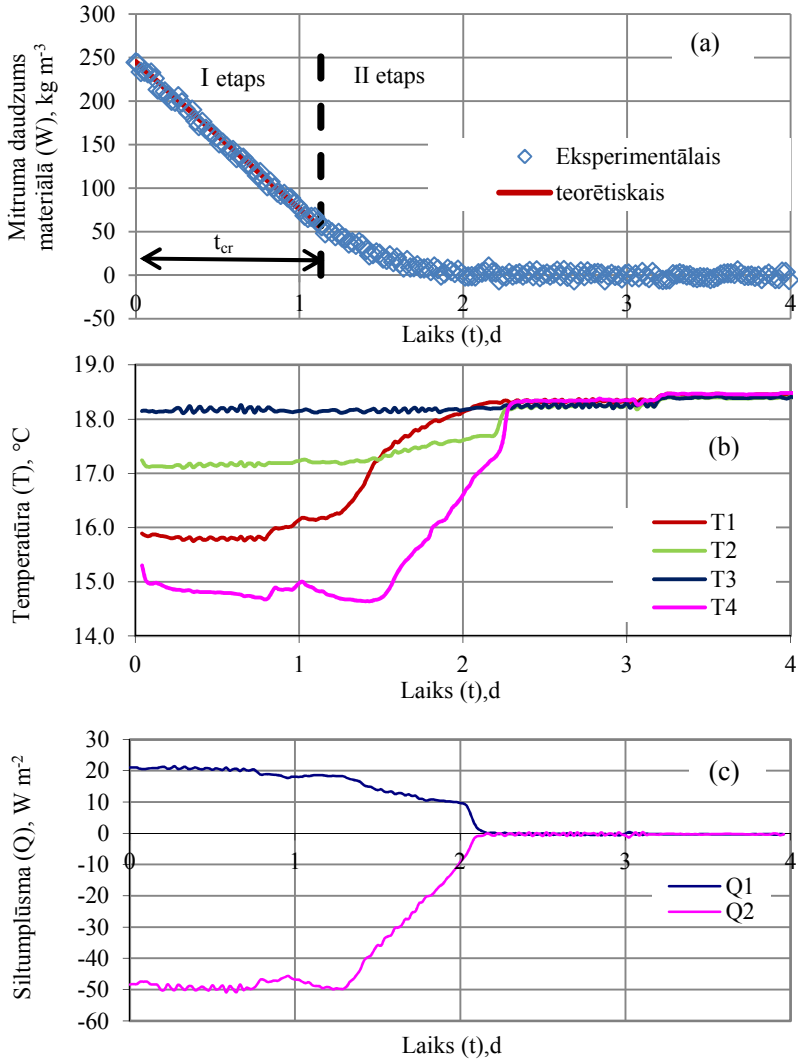
Teorētisko modeli salīdzinot ar eksperimentālajiem datiem, ar mazāko kvadrātu metodi var aprēķināt modeļa nezināmos lielumus δ un L .

Žūšanas patērētais siltuma daudzums tika mērīts ar siltuma plūsmas sensoriem, kas tika pielīmēti pie parauga augšējās un apakšējās virsmas. Parauga žūšanas laikā virsmu temperatūras un temperatūras parauga iekšienē 1 un 2 mm dziļumā, skaitot no parauga augšējās virsmas, tika mērītas ar K tipa termopāriem.

Detāli eksperimentu rezultāti parādīti vienam putuģipša paraugam ar biezumu 2 cm un tilpummasu sausā stāvoklī 345 kg m^{-3} . Minētā tilpummasa no putuģipša pielietojuma viedokļa kā siltumizolācijas un skaņas absorbcijas materiālam ir optimālajā diapazonā ($250 \div 450 \text{ kg m}^{-3}$).

Salīdzinot teorētiskos ar eksperimentālajiem parauga svēršanas datiem žūšanas procesā (2.1.a.att.), ir iegūta vidējā mitruma teorētiskā žūšanas līkne, kurai ir izteiktas divas žūšanas stadijas. Dotajam paraugam ir noteikti žūšanas parametri:

- difūzijas koeficients $D=4.79 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$;
- žūšanas ātrums $\varphi=3.91 \cdot 10^{-5} \text{ kg (m}^2 \text{ s}^{-1})^{-1}$;
- pirmā etapa garums $t_{gr}=1.13 \text{ d}$.



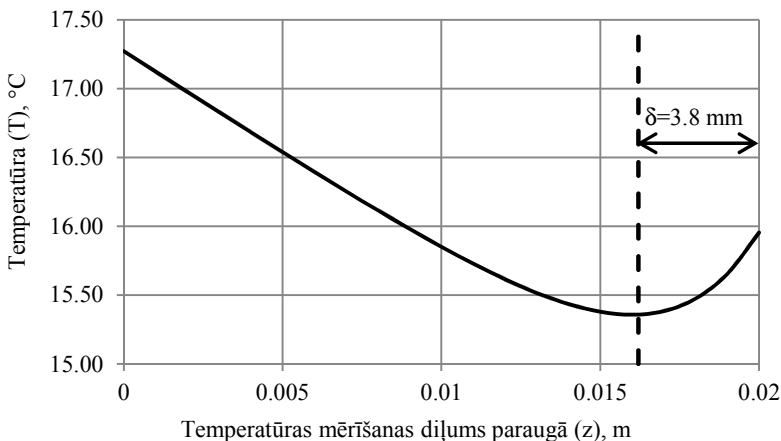
Avots: autora izstrādāts (Brencis, Iljins, Skujans, 2012)

2.1. att. Putuģipša žūšanas parametri atkarībā no laika.

(a) vidējais teorētiskais un eksperimentālais parauga mitruma daudzums,
 (b) parauga virsmu (T2 un T3) 1 mm (T1) un 2 mm (T4) dziļumā temperatūras,
 (c) siltuma plūsmas caur parauga virsmām (Q1 pie $z=0$, Q2 pie $z=d$) atkarībā no žūšanas laika.

Izmantojot parauga temperatūras un saņemtā siltuma mērījumus 2.1.b. un 2.1.c.att., kā arī aprēķināto žūšanas ātrumu ϕ , no izteiksmes (2.7) ar mazāko kvadrātu metodi var noteikt δ , kas reprezentē to slāņa biezumu, no kura efektīvi notiek žūšana. Savukārt no izteiksmes (2.10) var aprēķināt putuģipša žūšanas latentu siltumu L . Iegūtie rezultāti:

$\delta=3.8$ mm, $L=1.69 \cdot 10^6$ J kg^{-1} . Iegūtais latentais siltums ir mazāks par ūdens iztvaikošanas siltumu pie temperatūras 20°C ($2.45 \cdot 10^6$ J kg^{-1}), jo žūšana šeit notiek no putuģipša virsmas, kas atšķiras no parastās iztvaikošanas. Daudz blīvākam (mazāk porainam) putuģipša paraugam ($\rho=1055$ kg m^{-3} sausā stāvoklī) analogi rezultāti ir: $\delta=0.69$ mm; $L=2.02 \cdot 10^6$ J kg^{-1} . Tas parāda, ka šie aprēķinātie parametri ir atkarīgi no putuģipša paraugu tilpummasas. Putuģipša žūšanas latentais siltums ir svarīgs parametrs, lai varētu noteikt šī materiāla žūšanai nepieciešamo siltuma daudzumu un ar to saistītās žāvēšanas izmaksas.



Avots: autora izstrādāts (Brencis, Iljins, Skujans, 2012)

2.2. att. Teorētiski aprēķinātais temperatūras sadalījums putuģipša paraugā atkarībā no dziļuma.

Piedāvātajā teorētiskajā modelī izteiksme (2.7) dod temperatūras sadalījumu parauga iekšienē pa koordināti z . Eksperimentāli temperatūras mērījumi parauga iekšienē 1 un 2 mm dziļumā 2.1.b.att. T1 un T4 rāda, ka temperatūra parauga dziļumā, skaitot no parauga augšējās virsmas, samazinās. Teorētiski aprēķinātā temperatūras atkarība no dziļuma (koordinātas z) dod šim paraugam temperatūras minimumu, kas ir parādīts 2.2.att. Attēlā redzams, ka temperatūras minimums ir parauga augšējās virsmas tuvumā un aprēķinātās temperatūras uz parauga virsmām (apakšējās

$z=0$ $T=17.2$ °C; augšējās $z=d$ $T=18.3$ °C) ir tuvas eksperimentāli izmērītajām $T_3=18.2$ un $T_2=17.2$ °C pirmajā žūšanas etapā 2.1.b.att. Tas liecina, ka izveidotais matemātiskais modelis ir adekvāts un dod kvantitatīvu teorētisko pētījumu un eksperimentālo datu sakrišanu.

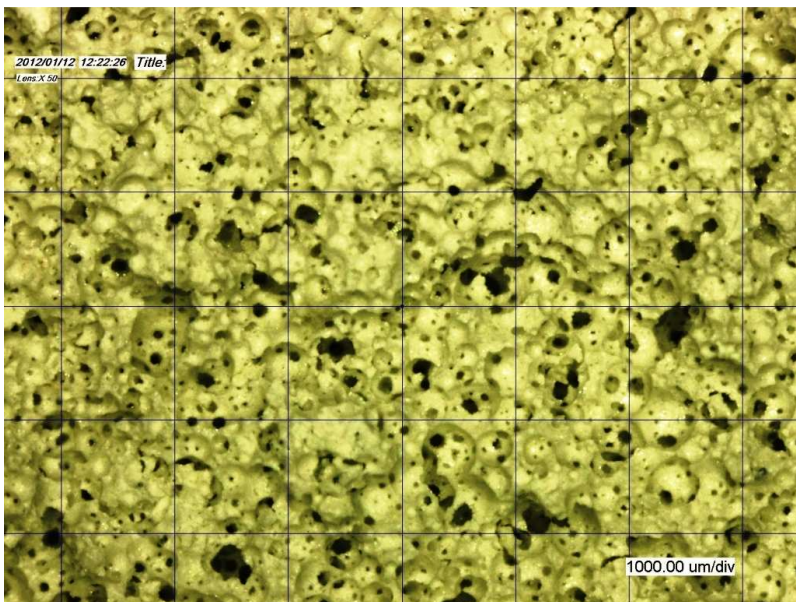
2.2. Pielietotās tehnoloģijas ietekme uz poru struktūru

Slēgto poru ietekmi uz skaņas absorbcijas īpašībām pētījuši pētnieki, nosakot to sadalījumu (Sgard, Olny, Atalla, 2005; Arenas, Crocker, 2010;), skaitu (Voronina, 1996; Voronina, 1997), izmēru (Voronina, 1996; Sgard, Olny, Atalla, 2005) un porainību (Voronina, 1996; Laukaitis, Fiks, 2006). Visos gadījumos kā viens no galvenajiem rādītājiem skaņas absorbcijas koeficienta ietekmē atzītas caurejošās poras. Laukaitis un Fiks (Laukaitis, Fiks, 2006) noteikuši caurejošo poru porainības attiecību pret kopējo porainību, kā arī saistījuši to ar materiāla gaisa plūsmas koeficientu. Putuģipsim, variējot dažādas tā izgatavošanas tehnoloģijas, iespējams panākt noteiktu poru struktūru, kam ir cieša sakarība ar materiāla tilpummasu un skaņas absorbciju.

Materiālu izgatavojot pēc tehnoloģijas ar ūdens ģipša attiecību (\bar{u}/\bar{g}) 0.6 un virsmas aktīvās vielas daudzumu (VAV) 4ml no sausa ģipša masas, tika iegūts materiāls ar tilpummasu 398 kg m^{-3} un porainību 85.21 %. Materiāla struktūra 50 reižu lielā palielinājumā parādīta 2.3. att.

Pēc šīs tehnoloģijas izgatavotajiem paraugiem vidējais poru skaits uz 1 mm^2 ir 7.64 ar poru laukumu 0.486 mm^2 . Caurejošo poru skaits šādam putuģipsim uz 1 mm^2 ir 11.60 un to laukums 0.0573 mm^2 . Poru skaita standartnovirze 2.25, savukārt caurejošajām porām standartnovirze 3.47.

Pēc putuģipša struktūras redzams, ka poru lielums un skaits izkārtots haotiski pa visu paraugu. Slēgtās poras daudzviet savienojušās ar blakus esošajām porām. Analizējot datu kopu pēc ekscesa (0.2 parastajām porām un -0.58 caurejošām porām) un asimetrijas (-0.16 parastajām porām un -.39 caurejošajām porām) koeficientu vērtībām. Pēc histogrammas var secināt, ka poras ir plašā diapazonā – gan caurejošajām porām, gan parastajām atvērtajām porām.



Avots: autora foto

2.3. att. Putuģipša struktūra 50x palielinājumā. \bar{u}/\bar{g} 0.6, VAV 4 ml, $\rho=398 \text{ kg m}^{-3}$.

Poru īpašību raksturojums tilpummasu diapazonā no $250\div 300 \text{ kg m}^{-3}$ un $350\div 400 \text{ kg m}^{-3}$ apkopots 2.1. un 2.2. tabulā. Apskatot putuģipša izgatavošanas tehnoloģijas ietekmi uz poru struktūras atsevišķajām komponentēm – poras un caurejošas poras – \bar{u}/\bar{g} attiecībai un VAV daudzumam nav novērota viennozīmīga ietekme, bet novērota ietekme uz kopējo poru un caurejošo poru laukumu uz 1 mm^2 . Netakarīgi no pielietotā VAV daudzuma kopējais poru laukums samazinās, pieaugot \bar{u}/\bar{g} attiecībai. Putuģipša izgatavošanas tehnoloģijai ar 6 ml VAV tas samazinās no 0.5652 mm^2 ar \bar{u}/\bar{g} attiecību 0.6 līdz 0.4851 mm^2 ar \bar{u}/\bar{g} attiecību 0.9 un izgatavošanas tehnoloģijai ar 4 ml VAV no 0.5433 ar \bar{u}/\bar{g} attiecību 0.6 līdz 0.4353 ar \bar{u}/\bar{g} attiecību 0.9. Atšķirība starp lielāko un mazāko kopējo poru laukumu ir 25% izgatavošanas tehnoloģijai ar 4 ml VAV un 17% izgatavošanas tehnoloģijai ar 6 ml VAV. Savukārt ar lielāku VAV daudzumu (6 ml) kopējais poru laukums pie dažādas \bar{u}/\bar{g} attiecības ir lielāks nekā ar 4 ml VAV daudzumu pie analogas \bar{u}/\bar{g} attiecības izgatavotajam putuģipsim.

2.1.tabula

Putuģipša ar tilpummasu 250÷300 kg m⁻³ poru īpašību raksturojums, izgatavojot to ar dažādām tehnoloģijām

Virsmas aktīvā viela 6 ml uz 1 kg ģipša				
Parametrs	Ūdens ģipša attiecība			
	0.6	0.7	0.8	0.9
Poru vidējais diametrs	0.301±0.018	0.277±0.019	0.275±0.026	0.0256±0.019
Poru skaits uz 1 mm ²	6÷7	7÷8	6÷7	7÷8
Poru laukums uz 1 mm ²	0.501±0.121	0.475±0.086	0.443±0.102	0.436±0.120
Caurejošo poru skaits uz 1 mm ²	10÷11	13÷14	13÷14	12÷13
Caurejošo poru laukums uz 1 mm ²	0.0642±0.025	0.0574±0.026	0.0542±0.025	0.0491±0.023
Kopējais poru un caurejošo poru laukums uz 1 mm ²	0.5652±0.090	0.5324±0.050	0.4972±0.062	0.4851±0.084

Avots: autora izstrādāts

2.2. tabula

Putuģipša ar tilpummasu 350÷400 kg m⁻³ poru īpašību raksturojums, izgatavojot to ar dažādām tehnoloģijām

Virsmas aktīvā viela 4 ml uz 1 kg ģipša				
Parametrs	Ūdens ģipša attiecība			
	0.6	0.7	0.8	0.9
Poru vidējais diametrs	0.274±0.050	0.264±0.044	0.252±0.029	0.0256±0.017
Poru skaits uz 1 mm ²	7÷8	7÷8	7÷8	6÷7

Virsmas aktivā viela 4 ml uz 1 kg ģipša				
Parametrs	Ūdens ģipša attiecība			
	0.6	0.7	0.8	0.9
Poru laukums uz 1 mm ²	0.486±0.099	0.440±0.108	0.416±0.095	0.401±0.090
Caurejošo poru skaits uz 1 mm ²	11÷12	10÷11	11÷12	10÷11
Caurejošo poru laukums uz 1 mm ²	0.0573±0.019	0.0375±0.029	0.0359±0.013	0.0343±0.029
Kopējais poru un caurejošo poru laukums uz 1 mm ²	0.5433±0.08	0.4775±0.06	0.4519±0.07	0.4353±0.12

Avots: autora izstrādāts

2.3. Stiprības pētījumi

Pieaugot tilpummasai, pieaug arī materiāla stiprības rādītāji gan spiedē, gan liecē, bet pēc iegūtajiem rezultātiem putuģipsim ar vienādām tilpummasām stiprības rādītāji atšķiras pat par 40% (skatīt 2.3. un 2.4. tabulu). Tas parāda, ka stiprības rādītājus bez tilpummasas ietekmē citi rādītāji, piemēram, mezoporas un mikroporas putuģipša poru sienīnās.

Izmantojot vienādu VAV daudzumu (6 ml) un variējot ar ū/ġ attiecību, tilpummasa mainās 30 kg m⁻³ robežās, bet stiprība liecē un spiedē pieaug, palielinoties ūdens daudzumam atbilstoši tilpummasas pieaugumam, bet lieces un spiedes pieaugumi nav proporcionāli tilpummasas pieaugumam. Stiprības rādītāju samazinājums novērojams pie izgatavošanas tehnoloģijas ū/ġ 0.9 VAV 6 ml. Pie šīs izgatavošanas tehnoloģijas putuģipsis ir ar nestabiliem rādītājiem.

2.3. tabula

**Putuģipša ar tilpummasu 250÷300 kg m⁻³ īpašību raksturojums,
izgatavojot to ar dažādām tehnoloģijām**

Izgatavošanas tehnoloģija	Tilpummasa kg m⁻³	Porainība %	Stiprība liecē, MPa	Stiprība spiedē, MPa
Ū/Ģ 0.6 VAV 6 ml	278±37	89.07	0.041±0.019	0.054±0.023
Ū/Ģ 0.7 VAV 6 ml	281±11	88.98	0.066±0.005	0.106±0.029
Ū/Ģ 0.8 VAV 6 ml	283±13	88.95	0.071±0.008	0.123±0.012
Ū/Ģ 0.9 VAV 6 ml	258±7	89.85	0.057±0.005	0.095±0.020

Avots: autora izstrādāts

Samazinoties VAV daudzumam (uz 4 ml), stiprības rādītājiem ir mazāka korelācija. Determinācijas koeficientu zemās vērtības parāda, ka pie izgatavošanas tehnoloģijas ar VAV daudzumu 4ml tilpummasai ir zema ietekme uz stiprību. Pēc veiktajiem putuģipša struktūras pētījumiem, ietekmējošais faktors varētu būt caurejošo poru un putuģipša poru sienīnās esošu poru ietekme. 2.4. tabulā apkopota informācija par stiprības vidējiem rādītājiem pie izgatavošanas tehnoloģijas 4 ml, un tur redzams, ka rezultāti līdzīgi kā pie izgatavošanas tehnoloģijas ar 6 ml VAV ir atbilstoši tilpummasai, bet tās ir neproporcionālas, kas apstiprina faktu, ka bez tilpummasas stiprību ietekmē vēl kāds rādītājs.

2.4. tabula

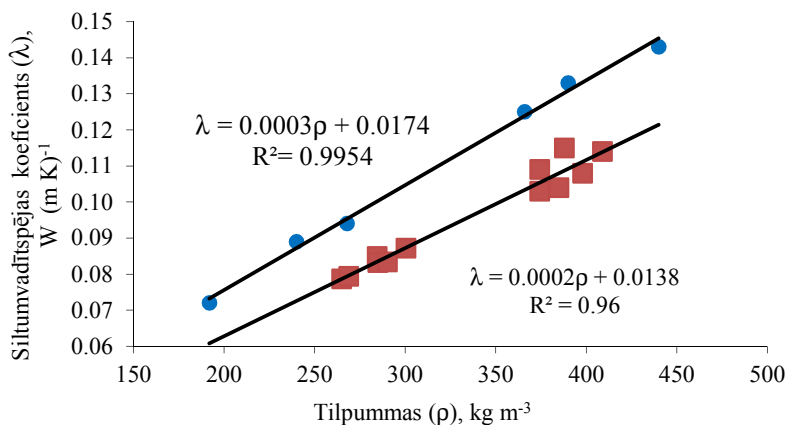
**Putuģipša ar tilpummasu 350÷400 kg m⁻³ raksturojums, izgatavojot to
ar dažādām tehnoloģijām**

Izgatavošanas tehnoloģija	Tilpummasa kg m⁻³	Porainība %	Stiprība liecē, MPa	Stiprība spiedē, MPa
Ū/Ģ 0.6 VAV 4 ml	377±33	85.21	0.132±0.055	0.210±0.084
Ū/Ģ 0.7 VAV 4 ml	378±16	85.17	0.176±0.028	0.311±0.037
Ū/Ģ 0.8 VAV 4 ml	352±11	86.19	0.141±0.010	0.271±0.036
Ū/Ģ 0.9 VAV 4 ml	366±34	85.65	0.150±0.026	0.250±0.036

Avots: autora izstrādāts

2.4. Siltumplūsmas pētījumi

Attēlā 2.4. parādītās putuģipša siltumvadītspējas koeficienta vērtības atkarībā no tilpummasas salīdzinātas ar Skujāna (Скуянс, 1987) datiem. Variējot putuģipša ražošanas tehnoloģiju (ūdens ģipša attiecību un virsmas aktīvo vielu, ml), ir iespējams iegūt putu ģipsi ar blīvumu no $250\div 1100\text{ kg m}^{-3}$, kas būtiski ietekmē putuģipša īpašības, tajā skaitā siltumvadītspēju. Attēlā 2.4. redzama siltuma vadītspēja atkarībā no tilpummasas attiecībā uz divu veidu putuģipšiem. Alfa ģipša dati ir iegūti no putuģipša, kas ražots no alfa kalcija sulfāta pushidrāta ($\alpha\text{ CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$) (Скуянс, 1987), bet otra mērījumu sērija ir promocijas darba izstrādes gaitā iegūta ar β kalcija sulfāta pushidrātu ($\beta\text{ CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$). Atšķirības starp mērījumu sērijām skaidrojama ar to, ka putuģipša izejvielās tiek izmantotas dažādas alfa un beta modifikācijas.



Avots: autora papildināta, izmantojot (Скуянс, 1987)

2.4. att. Putuģipša siltumvadītspējas koeficients atkarībā no putuģipša tilpummasas.

- - putuģipšis no alfa ģipša (Скуянс, 1987); ■ - putuģipšis no beta ģipša.

2.4. Poru ietekme uz putuģipša skaņas absorbciju

Akustiskos parametrus porainos materiālos regulē tādas īpašības kā materiāla porainība, līkumainība (*tortuosity*), gaisa plūsmas pretestība, (Allard, Attal, 2009; Foret, Guigou-Carter, Chene, 2010) un tilpummasa (Skinner, Peters, 2006). Poraini elastīgos materiālos ietekme uz skaņas absorbciju ir atšķirīga pie dažādām frekvencēm (Foret, Guigou-

Carter, Chene, 2010), izteiktāka tā ir frekvenču apgabālā līdz 250 Hz un virs 1600 Hz. Promocijas darbā noteiktā putuģipša porainība izriet no ģipša blīvuma un materiāla tilpummasas, bet poru skaits un to laukums uz 1 mm² ir mainīgs atkarībā no izgatavošanas tehnoloģijas. Poru vidējam diametram palielinoties, palielinās vidējais (izsvērtais) skaņas absorbcijas koeficients, kas noteikts saskaņā ar EN ISO 16545 standartu. 2.5. tabulā apkopotajā informācijā par putuģipša ar tilpummasu diapazonā no 250÷300 kg m⁻³ datu vidējās vērtības rāda, ka skaņas absorbciju ietekmējošais faktors ir poru un caurejošo poru kopējais laukums uz 1 mm².

2.5. tabula

Putuģipša ar tilpummasu 250÷300 kg m⁻³ fizikālo īpašību poru raksturojums, izgatavojot to ar dažādām tehnoloģijām

Izgatavošanas tehnoloģija	Poru skaits	Poru laukums, mm ²	Caurejošo poru skaits	Caurejošo poru laukums, mm ²	Kopējais poru un caurejošo poru laukums uz 1 mm ²	Vidējais skaņas absorbcijas koeficients pie 100 mm biezuma, α_{AV}
Ū/G 0.6 VAV 6 ml	6÷7	0.501±0.12	10÷11	0.064±0.03	0.565±0.09	0.72
Ū/G 0.7 VAV 6 ml	7÷8	0.475±0.09	13÷14	0.057±0.03	0.532±0.05	0.62
Ū/G 0.8 VAV 6 ml	6÷7	0.443±0.10	13÷14	0.054±0.03	0.497±0.06	0.61
Ū/G 0.9 VAV 6 ml	7÷8	0.436±0.12	12÷13	0.049±0.02	0.485±0.08	0.61

Avots: autora izstrādāts

Putuģipsim tilpummasas diapazonā no 350÷400 kg m⁻³ novērojama līdzīga poru vidējā diametra ietekme uz skaņas absorbcijas koeficienta

vērtību. Šajā tilpummasu diapazonā izgatavotais putuģipsis ir ar konstantu VAV daudzumu (4 ml), kas dod mazāku materiāla porainību nekā ar VAV 6 ml izgatavotajam putuģipsis. Porainības koeficienti atšķiras par 3÷5 %, bet slēgto poru skaits un to laukumi uz 1 mm² būtiski neatšķiras. Atšķirīgie rādītāji ir caurejošo poru skaits un to laukumi uz 1 mm² (2.6. tabula), kas ir samazinājušies putuģipsis ar lielāku tilpummasu, bet skaņas absorbcijas koeficienta vidējās vērtības pie materiāla 100 mm biezuma neveido tiešu sakarību. Šī parādība skaidrojama ar to, ka, nosakot vidējo skaņas absorbcijas koeficienta vērtību pēc EN ISO 16545 standarta, skaņas absorbcijas koeficientu vērtības 1/3 oktāvas frekvenču diapazonā tiek noteiktas pēc standartlīknes, kas atšķiras no tiešiem mērījumiem konkrētajā frekvenču 1/3 oktāvā.

2.6. tabula

Putuģipša ar tilpummasu 350÷400 kg m⁻³ fizikālo īpašību poru raksturojums, izgatavojot to ar dažādām tehnoloģijām

Izgatavošanas tehnoloģija	Poru skaits	Poru laukums, mm ²	Caurejošo poru skaits	Caurejošo poru laukums, mm ²	Kopējais poru un caurejošo poru laukums uz 1 mm ²	Vidējais skaņas absorbcijas koeficients pie 100 mm biezuma, α_w
Ū/Ģ 0.6 VAV 4 ml	7÷8	0.486±0.10	11÷12	0.057±0.02	0.543±0.08	0.61
Ū/Ģ 0.7 VAV 4 ml	7÷8	0.444±0.11	10÷11	0.038±0.03	0.478±0.06	0.52
Ū/Ģ 0.8 VAV 4 ml	7÷8	0.416±0.10	11÷12	0.036±0.01	0.452±0.07	0.43
Ū/Ģ 0.9 VAV 4 ml	6÷7	0.401±0.09	10÷11	0.034±0.03	0.435±0.12	0.41

Avots: autora izstrādāts

Samazinoties materiāla porainībai, skaņas absorbcijas koeficienta vērtības 1/3 oktāvās veidojas ar izteiktākiem ekstrēmiem (Skinner, Peters, 2006). Ekstrēma punktu atrašanās vieta var ietekmēt vidējo skaņas absorbcijas koeficienta vērtību, novirzoties ekstrēma punktam uz 1/3 oktāvu, kur standartlīkne ir ar zemāku vērtību. Iegūtos rezultātus putuģipša skaņas absorbcijā iespējams sagrupēt pēc putuģipša poru struktūras, izejot no 2.5. un 2.6. tabulās apkopotās informācijas par poru struktūru un skaņas absorbciju. Kopējo poru laukums no $0.44 \div 0.46 \text{ mm}^2$ uz 1 mm^2 dod skaņas absorbcijas koeficientu robežās no $0.41 \div 0.43$, poru laukums 0.48 mm^2 uz 1 mm^2 dod skaņas absorbcijas koeficientu 0.52, savukārt putuģipsis ar poru laukumu no $0.50 \div 0.55 \text{ mm}^2$ uz 1 mm^2 ir ar skaņas absorbcijas koeficientu 0.61. Vislielāko absorbcijas koeficientu dod vislielākais kopējais poru laukums 0.57 mm^2 nodrošina absorbcijas koeficientu 0.72.

2.5. Skaņas absorbcijas īpašības pie dažādām frekvencēm un materiālu biezumiem

Paraugu izgatavošanas laikā, variējot ūdens ģipša attiecību un virsmas aktīvās vielas (VAV) daudzumu, iegūstami dažādas tilpummasas paraugi. Šiem paraugiem, mērot skaņas absorbcijas koeficientu pie noteikta absorbcējošā slāņa biezuma, redzama absorbcijas koeficienta izmaiņas atkarībā no materiāla biezuma un frekvences, pie kuras noteikts absorbcijas koeficients. Skinners (Skinner, Peters, 2006) ar saviem kolēģiem pētījumos par putu materiālu skaņas absorbcijas īpašībām izdalījuši četras pamatlīnijas. Skaņas absorbciju atkarībā no frekvences pie dažādas tilpummasas, materiāla biezuma, porainības un gaisa caurlaidības. Visiem šiem rādītājiem, pieaugot frekvencei, skaņas absorbcijas koeficients palielinās. Plānākiem materiāliem skaņas absorbcijas koeficienta vērtības ir mazākas pie zemajām frekvencēm, kas novērojams arī putuģipsim pie dažādām tilpummasām. Izteikti šis pieaugums novērojams ar virsmas aktīvās vielas (VAV) daudzumu 6 ml (2.7. tabula). Putuģipsim ar mazāku tilpummasu skaņas absorbcijas koeficienta maksimālās vērtības ir visplānākajam paraugam pie maksimālā frekvenču (4000 Hz) mērījuma, bet paraugiem ar VAV daudzumu 4 ml, kas ir ar lielāku tilpummasu, maksimālās vērtības tiek sasniegtas jau pie zemākām frekvencēm un nostabilizējas. Visizteiktāk tas redzams putuģipsim ar izgatavošanas tehnoloģiju ū/ģ 0.8 VAV 4 ml (skatīt 2.7. tabulu), kur maksimālās skaņas absorbcijas vērtības 500 Hz, 100 Hz un 2000 Hz diapazonā ir pie 30 mm biezuma.

Materiāla biezuma un frekvenču saistība skaņas absorbcijas plāksnēm uz minerālvates bāzes jau ir pētīta pagājušā gadsimta 60-tajos gados. Šmits (Шмитт, 1969) noteicis skaņas absorbcijas koeficientu akustiskajām plātnēm, un no tā secināts, ka, samazinoties materiāla biezumam,

maksimālā skaņas absorbcijas koeficienta vērtība pārvietojas uz augstāku frekvenču diapazonu. Pētījumos ar putuģipsi novērota tāda pati izturēšanās kā minerālvatei, kas ir šķiedrains materiāls. Paredzams, ka šāda izturēšanās uzskatāma par vispārēju sakarību, bet tam nepieciešami papildus pētījumi, kas ir turpmāko pētījumu objekts.

2.7. tabula

Putuģipša, izgatavota ar tehnoloģiju 0.6 VAV 4 ml, vidējā tilpummasa 377 kg m⁻³, skaņas absorbcijas koeficients atkarībā no parauga biezuma

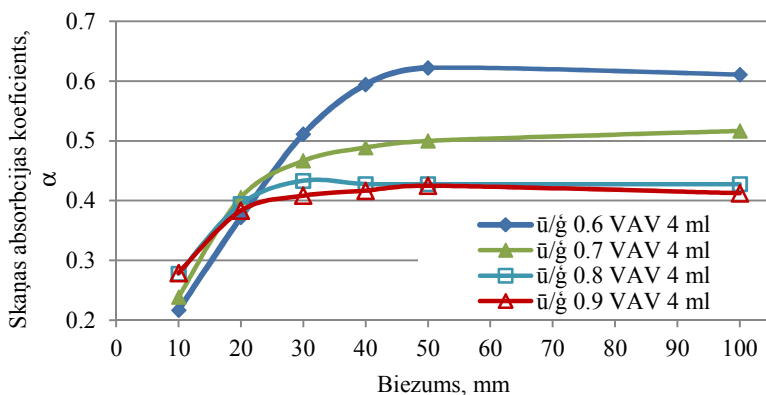
Biezums, mm	Skaņas absorbcijas koeficients vidējās vērtības oktāvu joslās, α					
	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	Vidējais
10	0.08	0.12	0.27	0.72	0.85	0.22
20	0.14	0.33	0.61	0.73	0.69	0.37
30	0.24	0.51	0.64	0.70	0.76	0.51
40	0.35	0.58	0.62	0.71	0.76	0.59
50	0.43	0.57	0.61	0.71	0.75	0.62
100	0.48	0.53	0.61	0.71	0.75	0.61

Avots: autora izstrādāts

Izceltie dati ir maksimālās skaņas absorbcijas vērtības katrā frekvenču diapazonā.

Savstarpēji salīdzinot putuģipša izgatavošanas tehnoloģijas ar VAV 4 ml un VAV 6 ml, redzams, ka putuģipša izgatavošanas tehnoloģijai, variējot ar ūdens daudzumu, vidējā skaņas absorbcijas koeficienta maksimālā vērtība ir atkarīga no ūdens ģipša attiecības (2.5.att.). Izgatavošanas tehnoloģijai ar 4 ml VAV ū/ģ attiecības ietekme ir jūtama izteiktāk, jo veidojas dažādāka poru struktūra, bet izgatavošanas tehnoloģijai ar 6 ml VAV caurejošo poru laukumi ir ar mazāku atšķirību un līdz ar to ū/ģ attiecība neietekmē tik daudz skaņas absorbcijas koeficientu. Putuģipšim tilpummasas diapazonā no 350÷400 kg m⁻³ skaņas absorbcijas koeficienta vērtība ir augoša, pieaugot biežumam, bet, materiālam pārsniedzot 20 mm biežumu, skaņas absorbcijas koeficientu ietekmē ū/ģ attiecība. Pieaugot ū/ģ attiecībai, samazinās putuģipša vidējās skaņas absorbcijas koeficienta vērtība. Savukārt tilpummasu diapazonā no

250÷300 kg m⁻³ šī parādība ir pretēja, bet ar nebūtisku ietekmi. Apskatot visas tehnoloģijas, secināms, ka maksimālā skaņas absorbcijas koeficienta vērtība sastopama pie 50 mm parauga biezuma, kas uzskatāms par optimālo materiāla biezumu skaņas absorbcēšanai. Izņēmums, kad skaņas absorbcijas koeficients būtiski pieaug arī pēc 50 mm biezuma, ir putuģipsim ar izgatavošanas tehnoloģiju ū/ģ 0.6 VAV 6 ml, kur maksimālā vērtība ir pie 100 mm.



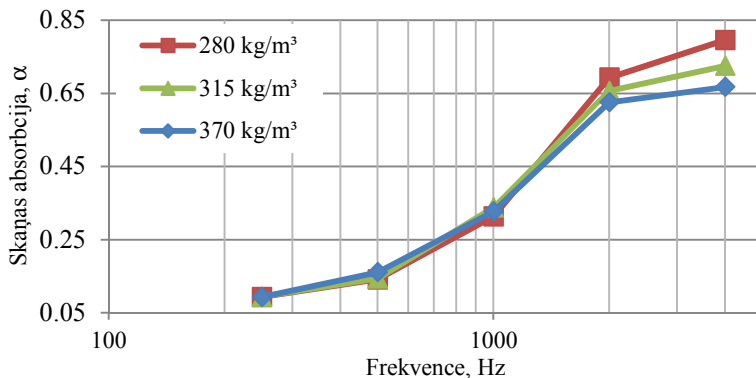
Avots: autora izstrādāts

2.5. att. Putuģipša oktāvu joslu izsvērtie vidējie skaņas absorbcijas koeficienti atkarībā no materiāla biezuma tilpummasas apgabalā no 350÷400 kg m⁻³.

2.6. Skaņas absorbcijas īpašības pie dažādām putuģipša izgatavošanas tehnoloģijām

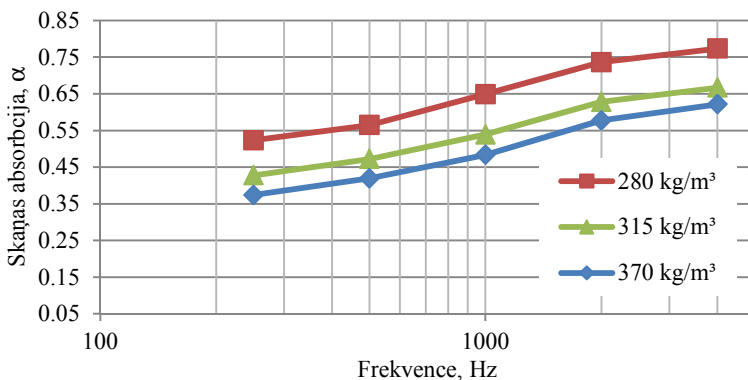
Materiāliem ar mazāku tilpummasu skaņas absorbcijas koeficienta vērtības ir augstākas pie visām frekvencēm attiecībā pret materiālu ar lielāku tilpummasu, šī sakarība novērojama arī putuģipšiem. Analizējot datus pie dažādām tilpummasām, neatkarīgi no putuģipša izgatavošanas tehnoloģijas var izdalīt trīs tilpummasu apgabalus – 280 kg m⁻³; 315 kg m⁻³ un 370 kg m⁻³. Skaņas absorbcijas koeficientu maksimālās vērtības sastopams pie 4000 Hz, neatkarīgi no materiāla biezuma (2.6.att. un 2.7.att.), kā tam būtu jābūt. Atšķirības novērojamas frekvenču diapazonā zem 1 kHz, kur novērojama tilpummasu ietekmes atšķirība. Putuģipsim ar mazu materiāla biezumu (10 mm) 2.5.att. šī ietekme nav novērojama, bet, pieaugot biezumam, putuģipsim ar zemāku tilpummasu (280 kg m⁻³) skaņas absorbcijas koeficienta vērtības pamazām palielinās attiecībā pret putuģipsi ar lielāku tilpummasu. Materiālam ar 20 mm biezumu strauji pieaug ne tikai

vidējās skaņas absorbcijas koeficienta vērtības, bet veidojas tilpummasas ietekme – palielinās skaņas absorbcijas koeficients pie 1 kHz, bet samazinās pie 500 Hz un 250 Hz attiecībā pret putuģipsi ar lielāku tilpummasu (2.6.att.). Palielinoties biežumam, šī tendence pārvietojas arvien vairāk uz zemo frekvenču diapazonu.



Avots: autora izstrādāts

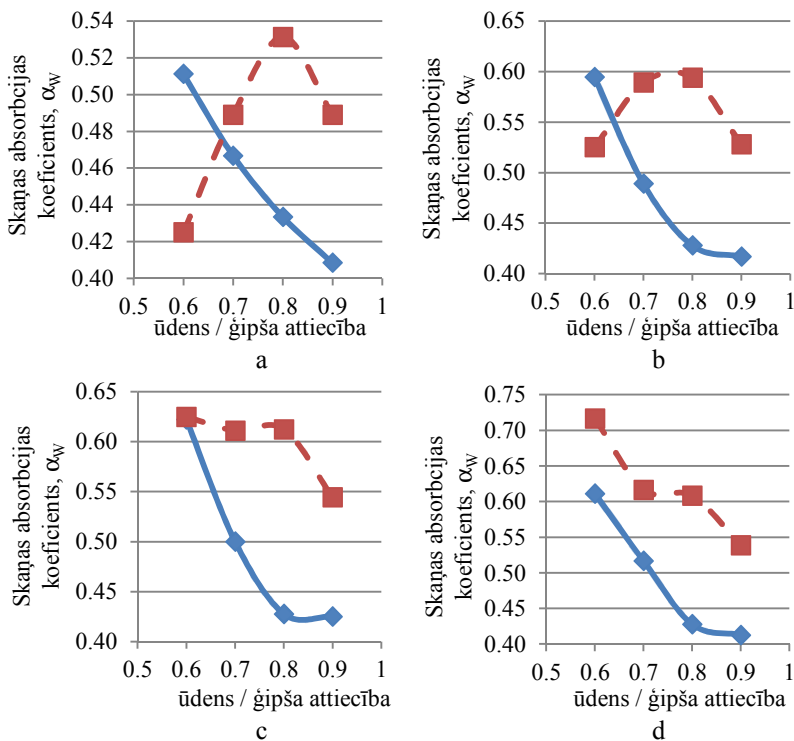
2.6.att. Putuģipša vidējie oktāvu joslu skaņas absorbcijas koeficienti atkarībā no putuģipša tilpummasas pie dažādām frekvencēm 10 mm biežam paraugam.



Avots: autora izstrādāts

2.7.att. Putuģipša vidējie oktāvu joslu skaņas absorbcijas koeficienti atkarībā no putuģipša tilpummasas pie dažādām frekvencēm 100 mm biežam paraugam.

Skaņas absorbcijas plāksnes iespējams ar dažādu biezumu atkarībā no to pielietojuma un nepieciešamības absorbēt noteiktu skaņu. Attēlā 2.8.a.b.c.d. redzamas vidējās skaņas absorbcijas vērtības pie dažādiem biezumiem atkarībā no izgatavošanas tehnoloģijas. Pēc stiprības rādītājiem, putuģipsis, kas ir izmantojams skaņas absorbcijas plāksnēm, ir ar izgatavošanas tehnoloģijām ū/ġ 0.6 VAV 4 ml un ū/ġ 0.7 VAV 4 ml. No šīm izgatavošanas tehnoloģijām labākās skaņas absorbcējošās īpašības ir ū/ġ 0.6 VAV 4 ml un pie materiāla biezuma 30 mm; 40 mm un 50 mm tā īpašības neatpaliek no izgatavošanas tehnoloģijām ar 6 ml VAV, kas dod labākās skaņas absorbcējošās īpašības. Ar materiāla biezumu 100 mm šai izgatavošanas tehnoloģijai ir zemāki rādītāji par 0.11, bet šāda skaņu absorbcējoša plāksne ir nepraktiska lietošanā.



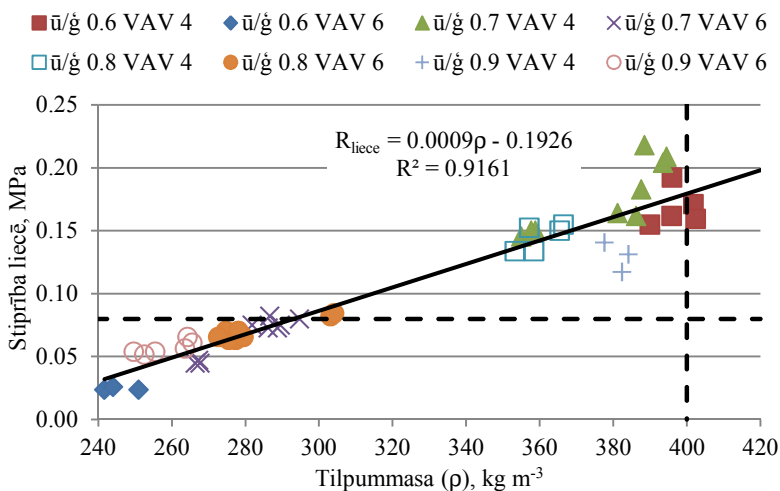
Avots: autora izstrādāts

2.8.att. Putuģipša vidējais izsvērtais skaņas absorbcijas koeficients pie dažādām izgatavošanas tehnoloģijām.

— VAV 4 ml; — VAV 6 ml. a- 30 mm biežam paraugam; b- 40 mm biežam paraugam; c- 50 mm biežam paraugam; d- 100 mm biežam paraugam.

Ņemot vērā būtiskuma rādītājus un skaņas absorbcijas koeficientu izsvērtās vidējās vērtības pie dažādām tehnoloģijām (2.8.a.b.c.d.att.), kā arī stiprības rādītājus liecē un spiedē, turpmākai materiāla pārbaudei tika izvēlēts putuģipsis ar izgatavošanas tehnoloģiju ū/ģ 0.6 un VAV 4 ml.

Lai putuģipsi varētu lietot kā skaņas absorbējošu paneli, tam ir nepieciešama noteikta stiprība. Ģipša griestu elementiem pēc standarta LVS EN 14246:2006 prasībām 600x600 mm lielai plāksnei ar laidumu 585 mm jāiztur 6 kg slodze. Zinot nepieciešamo slodzi un praktiski plānāko iespējamo putuģipša plāksnes biezumu (35 mm (Laukaitis, Fiks, 2006)), pēc teorētiski noteiktās materiāla minimālās pieļaujamās stiprība liecē, kas ar standartā izvirzītajām dimensijām ir 0.08 MPa. Stiprības rādītāju liecē analīze starp izgatavošanas tehnoloģijām, kas attēlota 4.1.att., redzams, ka rādītājam >0.08 MPa atbilst tikai putuģipsis ar izgatavošanas tehnoloģiju, kam izmantots 4 ml VAV. No šīm tehnoloģijām nav izmantojams putuģipsis ar izgatavošanas tehnoloģiju ū/ģ 0.9 VAV 4 ml un ū/ģ 0.8 VAV 4 ml, jo to skaņas absorbcijas koeficienti pie 100 mm biezuma ir zem 0.5.

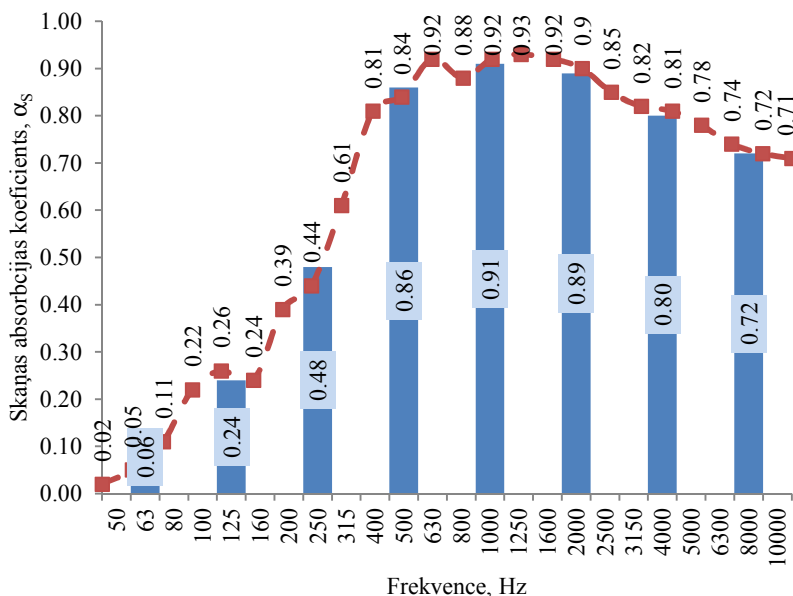


Avots: autora izstrādāts

4.1.att. Putuģipša lieces stiprība atkarībā no tilpummasas pie dažādām izgatavošanas tehnoloģijām.

3. PUTUĢIPŠA EKSPERIMENTĀLO MODEĻU IZGATAVOŠANA UN PĀRBAUDES

Absorbcijas koeficienta noteikšanai reverberācijas kamerā tika izgatavotas 300×300×40 mm lielas putuģipša plāksnes ar izgatavošanas tehnoloģiju ū/ġ 0,6, VAV 4 ml. Pēc standarta LVS EN ISO 354:2003 minimālais nepieciešamais absorbenta laukums reverberācijas kameras parametriem ir 6.0 m². Reverberācijas laika mērījumi un absorbcijas koeficienta aprēķini tika noteikti pēc standarta LVS EN ISO 354:2003 „Akustika. Skaņas absorbcijas mērīšana reverberācijas kamerā”. Skaņas absorbcijas koeficienta svērtā vidējā vērtība noteikta pēc standarta LVS EN ISO 11654:2000 „Akustika - Skaņas absorbētāji ēkās - Skaņas absorbcijas parametri”.



Avots: autora izstrādāts pēc SIA „R&D Akustika” mērījumiem Nr.563-1

3.1. att. Skaņas absorbcijas koeficienta mērījumi reverberācijas kamerā. Frekvenču līkne 1/3 oktāvu joslās putuģipsim ar izgatavošanas tehnoloģiju ū/ġ attiecība 0,6, VAV 4 ml.

- - izmērīto α vērtību frekvenču raksturlīkne (1/3 oktāvu joslā);
- - Absorbcijas koeficienta, α , vidējā vērtība oktāvu joslās.

Skaņas absorbcijas koeficienta rezultāti putuģipsim, kas tika pārbaudīts reverberācijas kamerā 3.1.att. Šajā attēlā redzamas gan skaņas absorbcijas koeficienta vērtības 1/3 oktāvas frekvencēs, gan to vidus frekvencēs. Maksimālā skaņas absorbcijas koeficienta vērtība ir pie 1 kHz (0.91) un blakus esošajām 1/3 oktāvu vidus frekvencēm tā ir ļoti tuvu 500 Hz (0.860 un 2 kHz (0.89). Materiālam novērojamas absorbcijas koeficienta vērtības kritums zemajās frekvencēs, ko iespējams novērst, iebūvējot materiālu iekārto griestu sistēmā vai aiz materiāla novietojot akmens vati. Izsvērtais skaņas absorbcijas koeficients pēc standarta LVS EN ISO 11654:2000 ir 0.8, kas atbilst B klases absorbentam.

Iegūtais rezultāts ir par 0.2 augstāks nekā absorbcijas caurulē iegūtais skaņas absorbcijas koeficients, jo akustiskajā caurulē skaņa uz mērāmo paraugu krīt perpendikulāri tā virsmai, bet reverberācijas kamerā veidojas difūzs skaņas lauks un skaņa uz paraugu krīt dažādos leņķos, tādējādi uzlabojot absorbcijas spēju.

Lieces stiprības noteikšanai pēc LVS EN 14246:2006 „Ģipša elementi piekārtajiem griestiem. Definīcijas, prasības un testēšanas metodes” prasībām nepieciešams 600×600 mm lielas plāksnes. Plāksnes tika izgatavotas ar tādu pašu biezumu (40 mm) kā tās tika pārbaudītas reverberācijas kamerā.

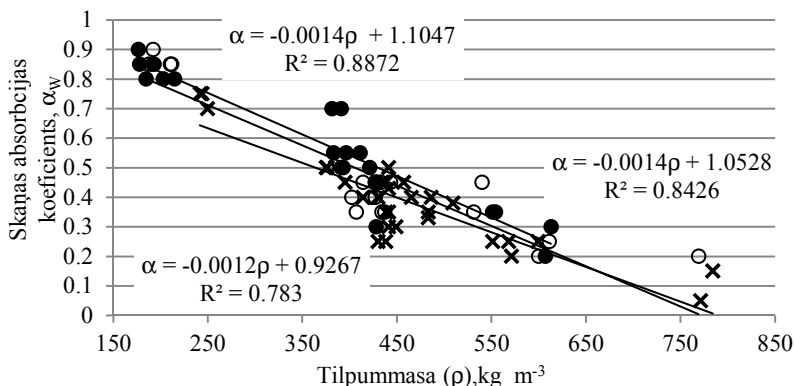
Ģipša izstrādājumu griestu plāksnes uz stiprību pārbauda pēc standarta LVS EN 14246:2006 „Ģipša elementi piekārtajiem griestiem. Definīcijas, prasības un testēšanas metodes”. Paraugu izžāvē un pārbauda pie 23 ± 2 °C un mitruma 50 ± 5 %. Pārbaudi veic 600×600 mm lielam paraugam, ko brīvi balsta uz balstiem ar laidumu 585 mm. Uz balstiem novietoto paraugu slogo ar 6000 ± 100 g apaļu slogu visa parauga garumā paralēli balstiem. Slogošanu veic 30 min, un pēc tam novērtē bojājumus (plaisas). Pārbaudes laikā paraugs nedrīkst sagrūt, un pēc pārbaudes tam nedrīkst parādīties plaisas.

Slogošanas pārbaudi ar 6 kg slodzi izturēja visi izgatavotie paraugi, un vizuālajā pārbaudē netika novērotas plaisas, tādēļ tie tika slogoti līdz sagraušanai, pakāpeniski palielinot slodzi par 400 g, līdz parauga sagrūšanai. Aprēķinātā materiāla lieces stiprība pie 6 kg slodzes ir 0.055 MPa, bet pēc stiprības pārbaudēm ar sijām (40×40×160 mm) trīspunktu liecē – pēc šīs tehnoloģijas izgatavotam putuģipsim stiprība liecē ir 0.13 MPa (skatīt 2.4. tabulu), kas ir 2 reizes lielāka, un slogotajai putuģipša plāksnei būtu jāiztur 2 reizes lielāka slodze. Putuģipša griestu plāksņu sagraušanai bija nepieciešama vidēji 15 kg liela slodze, kas teorētiski ir 0.137 MPa un ir 2.5 reizes lielāka lieces stiprība nekā noteikta standartā LVS EN 14246:2006 un par 5 % lielāka nekā stiprība pēc materiāla pārbaudes ar sijām uz trīspunktu lieci.

4. PUTUĢIPŠA IZGATAVOŠANAS TEHNOLOĢIJAS PILNVEIDOŠANAS IESPĒJAS, PIELIETOJOT KAŅEPJU DISPERSO STIEGROJUMU

Viens no variantiem, kā uzlabot putuģipša skaņas absorbcijas un stiprības īpašības, ir pievienojot tam lauksaimniecības kaņepju pārstrādes atlikumus (spaļus). Putuģipsim pievienojot īso (2.5÷5.0 mm) un garo (5.0÷10.0 mm) stiegrojumu dažādās koncentrācijās, iespējams variēt putuģipša struktūru un fizikāli mehāniskās īpašības. Kompozītmateriāls tika izgatavots ar sausās mineralizācijas metodi, sajaucot ūdeni, ģipsi, virsmas aktīvo vielu (VAV) un pievienojot kaņepju stiegrojumu. Kaņepju spaļu koncentrācija c , g kg^{-1} ir spaļu daudzums gramos uz 1 kg sausa ģipša izejmateriāla. Kaņepju spaļu koncentrācija tika mainīta robežās no 15÷50 g kg^{-1} .

Pievienojot spaļu stiegrojumu, poru skaits uz 1 mm^2 samazinās, bet samazinājums ir niecīgs, savukārt tas palielina poru laukumus. Modificētajam putuģipsim uzlabojas skaņas absorbcijas koeficients par 10÷15%. Kopējā tendence skaņas absorbcijas koeficientam α atkarībā no putuģipša blīvuma ir tāda, ka α pieaug, samazinoties putuģipša tilpummasai (Skujans, Iljins, 2010). Šī tendence ir novērojama arī, modificējot putuģipsi ar kaņepju stiegrojumu. Ar kaņepju spaļiem modificētajā putuģipša materiālā iespējams iegūt labāku skaņas absorbcijas koeficientu pie vienādām putuģipša tilpummasām (4.1. att.).



Avots: autora izstrādāts un papildināts no (Brencis, 2011b)

4.1. att. Ar kaņepju spaļu stiegrojumu modificēta putuģipša izsvērtais skaņas absorbcijas koeficients atkarībā no putuģipša tilpummasas.

- × - skaņas absorbcijas koeficients putuģipsim bez stiegrojuma;
- - skaņas absorbcijas koeficients putuģipsim ar garo spaļu stiegrojumu;
- - skaņas absorbcijas koeficients putuģipsim ar īso spaļu stiegrojumu.

Palielinot kaņepju spaļu garā stieģrojuma koncentrāciju, samazinās tilpummasa, kā arī lieces un spiedes stiprība, bet, palielinot īsā stieģrojuma koncentrāciju, palielinās materiāla tilpummasa, bet pieaugums stiprības rādītājiem nav proporcionāls koncentrācijas pieaugumam. Putuģipsim pievienojot kaņepju spaļu disperso stieģrojumu, ir iespējams paaugstināt tā lieces stiprību ≈ 1.5 reizes un uzlabot skaņas absorbciju par 10÷15 %. Tas ir viens no variantiem tehnoloģijas tālākai uzlabošanai.

SECINĀJUMI

1. Izstrādāti priekšlikumi putuģipša izgatavošanas tehnoloģijai, lai iegūtu materiālu ar noteiktu materiāla struktūru un biežumu, kas nodrošina vidējo svērto skaņas absorbcijas koeficientu C klasei pēc LVS EN ISO 11654:2000 prasībām 250 Hz÷4000 Hz frekvenču diapazonā, kā arī vienlaicīgi nodrošinātu pietiekamas materiāla stiprības īpašības. Pielietojot izgatavošanas tehnoloģiju ar sastāvu ū/ģ 0.6 un VAV 4 ml, iegūts putuģipšis ar tilpummasu 400 kg m^{-3} , stiprību liecē 0.13 MPa, kas putuģipša skaņas absorbcijas plāksnēm pārsniedz LVS EN 14246:2003 prasības 2.5 reizes un spiedē 0.21 MPa, skaņas absorbcijas koeficientu, mērītu impedances caurulē 0.62 (50 mm biežumā), atbilstošu C klases materiālam un reverberācijas kamerā 0.80 (40 mm biežumā), atbilstošu B klases materiālam.
2. Noteikts, ka putuģipša skaņas absorbcijas materiālam un minerālvatei ir analogiska izturēšanās attiecībā uz skaņas absorbcijas koeficientu un izstrādājuma biežumu. Skaņas absorbcijas koeficients pie 250 Hz ir labāks materiālam ar biežumu 100 mm, bet, pieaugot frekvencei, maksimālais skaņas absorbcijas koeficients tiek sasniegts ar plānākiem paraugiem.
3. Kopējais makroporu laukums putuģipsim no $0.44\div 0.46 \text{ mm}^2$ uz 1 mm^2 nodrošina skaņas absorbcijas koeficientu robežās no $0.41\div 0.43$, poru laukums 0.48 mm^2 uz 1 mm^2 nodrošina skaņas absorbcijas koeficientu 0.52, savukārt putuģipšis ar poru laukumu no $0.50\div 0.55 \text{ mm}^2$ uz 1 mm^2 ir ar skaņas absorbcijas koeficientu 0.61. Kopējais makroporu laukums 0.57 mm^2 nodrošina absorbcijas koeficientu 0.72.
4. Visām promocijas darbā apskatītajām putuģipša izgatavošanas tehnoloģijām vidējā skaņas absorbcijas koeficienta maksimālā vērtība pa visu apskatīto frekvenču diapazonu sasniegta pie 50 mm materiāla biežuma. Paraugi modeļu pārbaudēm tika izgatavoti 40 mm biežumā, jo, izmantojot tehnoloģiju ū/ģ 0.6 VAV 4 ml, starpība starp skaņas absorbcijas koeficientu α 50 un 40 mm paraugiem ir niecīga (0.03), dodot iespēju samazināt materiāla patēriņu.
5. Izveidots mitruma žūšanas matemātiskais modelis, kas adekvāti apraksta eksperimentālos pētījumus, un noteikta galveno putuģipša paraugu žūšanas parametru atkarība no putuģipša tilpummasas.
6. Putuģipsim pievienojot kaņepju spaļu disperso stiegrījumu ($2.5\div 5.0 \text{ mm}$ ar koncentrāciju $15\div 50 \text{ g kg}^{-1}$), paaugstinās tā lieces stiprība ≈ 1.5 reizes un uzlabojas skaņas absorbcijas koeficients par $10\div 15 \%$.

INTRODUCTION

The increase in production rates and a gradual increase in the level of mechanisation in different workplaces, as well as the introduction of new technologies in the workplaces, where previously only manual work was performed, have led to increased ambient noise levels in many places. This situation is observed not only in manufacturing companies (machine-tools, various lathes and presses, etc.), but also in offices, where the proportion of machinery has increased and often workplaces are separated only by small height barriers, as well as in study rooms, where sound distortion builds up, etc.

In particular, it should be noted that noise leaves impact on hearing and these effects often are irreversible. Noise also adversely affects the human body systems such as the nervous system, circulatory system, etc. (Ar darba vides..., 2003).

To reduce the noise level in workplaces and other places, sound absorption shall be supported by coating room enclosures with materials of this type. At various functional areas, some sound frequencies are dominant over other frequencies. Thanks to the use of absorbing materials, it is possible to absorb certain frequencies of sound and obtain a sufficient human comfort level.

There exist a belief as well as theoretical and practical evidence that structure of materials can affect sound absorption (Гаджилы, Меркин, 1981; Скуянс, Штакелберг, Кравинскис, 1984; Шильд, Кассельман, Дамен, 1982; Горлов, Меркин, 1984; Скуянс, 1987; Voronina, 1994; Voronina, 1996; Voronina, 1997; Olny, Atalla, 2005; Laukaitis, Fiks, 2006; Arenas, Crocker, 2010; Foret, Guigou-Carter, Chene, 2010; Sgard, Skinner, Peters, 2006). This is true particularly in the case of materials with strong porosity. Material manufacturing technology determines the pore structure formation and by varying technologies it is possible to obtain materials with various porosity levels. When using acoustic materials for sound absorption, all the necessary comprehensive qualities shall be provided such as bending strength, compressive strength, etc. Therefore, it is necessary to carry out material strength properties tests. In addition to positive acoustical properties (sound absorption and insulation), porous materials possess good thermal insulation properties. The ideal variant is where a material possesses the same maximum values of sound absorption, sound insulation and thermal insulation.

Energy saving in housing and in production of construction materials is an important issue not only in Latvia, but also in other countries. Vast consumption of primary energy and CO₂ emissions are characteristic for the production of a variety of modern insulation materials. Natural resources

are widely used in manufacturing of construction materials in many countries across the world (Mathur, 2005; Akthar, Evans, 2010). Use of local materials such as gypsum rock in production of construction materials for sound insulation in buildings and houses would be an important contribution to the national economy of Latvia. Gypsum rock is a local resource and its use is economically beneficial for the economy in Latvia. Currently in Latvia are evaluated 747336 thousand m³ and explored 26821.5 m³ of gypsum rock (Pielikums ziņojumam par..., 2005). Gypsum rock resources are mainly located in the central part of the country and this fact facilitates their production and transport. Gypsum is produced by processing gypsum rock at temperatures 150 ÷ 180 °C that are very low compared with cement or rock wool production. At these temperatures, rapid dehydration of calcium sulphate dihydrate (gypsum rock) takes place and a binder is formed, which is further used in the production of the product.

Production of foam gypsum is one of the options for gypsum use. Broad variations in volume mass are possible, which is the most important parameter of construction materials and composite materials ensuring possibility to adjust the mechanical properties (Bruijn, Jepsson, 2009; Chen, Sucech 2010; Duval, Bormaud, 2011; Khan, Chen, 2010; Khan, Chen 2011; Le Troëdec, Rachini, 2010; Nilsson, Gustafsson, 2007; Sedan, Pagnoux, 2008; Tran Le, Maalouf, 2010; Yuanjian, Isaac, 2007), sound absorption (Grubliauskas, Butkus, 2009; Kubicki, 2007; Laukaitis, Fiks, 2006), heat conductance (Kymäläinen, Sjöberg, 2008), etc. Previous studies on foam gypsum (Skujans, Vulans, 2007) showed that foam gypsum can possess similar characteristics with other well-known thermal and sound insulating materials such as rock wool, polystyrene, perlite, etc. In accordance with European Union regulations (Ieteikumi par ģipša..., 2008), gypsum possesses high fire resistance - fire reaction class A1 (for fireboard plates) or A2-s1,d (for other plasterboards).

One of its disadvantages is the fragility of the material, so material reinforcement is necessary. Natural fibrous plants that grow in our region could be used to increase the strength properties. As a material for reinforcement in southern regions palm plants are used (Bacellar; D'Almeida, 2009, D'Almeida, Mello Filho, 2009), but in Europe such material could be hemp fibers (Allin, 2005). Fibrous plants are relatively widely used in construction, vehicle manufacturing, agriculture and more. Several researches have been conducted using different fibers to improve mechanical properties. Special attention is paid to the use of hemp fibers in construction industry. Relevant studies on this topic have been carried out in Germany, France and Great Britain (Ulme, Freivalde, 2009).

The object of the study: foam gypsum manufacturing technology in order to obtain a structure that provides the physico-mechanical properties necessary for sound absorption material.

The subject matter of the study: formation of physico-mechanical properties of the material by varying foam gypsum manufacturing technologies. Ability of the acoustic material, foam gypsum, to absorb needed sound frequencies, while providing the necessary strength and heat-flow properties. In the thesis, the range of sound frequencies from 250 Hz to 4000 Hz is discussed.

Research hypotheses:

- by varying foam gypsum sound absorption material manufacturing technologies, it is possible to obtain various product properties that provide weighted average sound absorption ratio $\alpha_w \geq 0.60$ at frequency range 250÷4000 Hz, while complying with strength requirements ($R_{\text{bending}} > 0.08$ MPa, $R_{\text{compressive}} > 0.20$ Mpa);
- foam gypsum manufacturing technology with use of disperse hemp shives reinforcement can improve its strength properties and sound absorption;
- foam gypsum sound absorption ratio value dependence on product thickness is analogous with the mineral wool.

Research objectives: on the basis of theoretical and experimental studies, develop proposals that as a result of diversifying of sound absorption material, foam gypsum, manufacturing technology shall enable obtaining of such product properties, which ensure the weighted average sound absorption ratio $\alpha_w \geq 0.60$ at frequency range of 250÷4000 Hz, while complying with strength requirements ($R_{\text{bending}} > 0.08$ MPa, $R_{\text{compressive}} > 0.20$ MPa).

For achieving the research objectives, the following tasks have been set:

- to carry out data collection and analysis regarding cell concrete physical (sound absorption, porosity, volume density, etc.) and mechanical (compressive and bending strengths) properties described in literature, normative documents and research publications;
- for technological improvement, to produce experimental samples ($\rho < 400$ kg m⁻³), using different foam gypsum manufacturing technologies, to determine the structure and sound absorption effect on physico-mechanical properties of the material;

- to develop a foam gypsum drying model for theoretical-experimental tests that may enable determination of the amount of heat required for drying of foam gypsum and experimentally establish main foam gypsum samples drying parameters dependence on foam gypsum volume density;
- to develop proposals for manufacturing technologies that provide possibility to obtain a material of certain structure, which ensures the weighted average sound absorption ratio $\alpha_w \geq 0.60$ at frequency range of 250÷4000 Hz, while complying with strength requirements ($R_{\text{bending}} > 0.08$ MPa, $R_{\text{compressive}} > 0.20$ MPa);
- to carry out a study on foam gypsum manufacturing technology improvement by use of disperse hemp shives reinforcement, varying the length and quantity of reinforcement material, determine its physico-mechanical properties and compare the results with non-reinforced foam gypsum.

Thesis scientific novelty:

- for the first time, foam gypsum sound absorption material manufacturing technologies are developed to ensure necessary structure and thickness of material, which ensure the weighted average sound absorption ratio class C according to LVS EN ISO 11654:2000 requirements for frequency range of 250 Hz÷4000 Hz, while sufficiently complying with material strength properties requirements;
- an adequate mathematical model for foam gypsum moisture drying is developed that makes it possible to determine the depth of effective drying. Main foam gypsum samples drying parameters dependence on foam gypsum volume density has been established;
- it has been established that both the foam gypsum sound absorption material and mineral wool possess similar correlation between sound absorption ratio and product thickness;
- for the first time, the effect of disperse hemp shives reinforcement on foam gypsum pore structure and its physico-mechanical properties has been established.

APPROBATION OF RESULTS

Publications

Published in SCOPUS

Skujans J., Iljins U., Ziemelis I., Gross U., Ositis N., Brenčis R., Veinbergs A., Kukuts O. (2010), Experimental research of foam gypsum

acoustic absorption and heat flow. **In:** *Chemical engineering transactions*, 19, p.79-84.DOI:10.3303/CET 1019014

Brencis R., Skujans J., Iljins U., Ziemelis I., Osits N. (2011) Research on foam gypsum with hemp fibrous reinforcement. **In:** *Chemical Engineering Transactions*. Proceeding of international scientific Conference, 25, p. 159-164.

Brencis R., Skujans J., Iljins U., Preikss I. (2011) Research of hemp's fibrous reinforcement effect to bending strength and sound absorption of foam gypsum. **In:** *Civil Engineering`11*. Proceeding of international scientific conference Vol.3, ISSN 2255-7776, p. 32-37

Kakitis A., Berzins U., Berzins R., Brencis R. (2012) Cutting properties of the Hemp fibre. **In:** *11th International Conference Engineering for rural development, Jelgava, May 24-25, 2012, p.245-250. ISSN 1691-597*

Brencis R., Iljins U., Skujans J., Gross U. (2012) Research of foam gypsum drying process and heat flow transfer. **In:** *Chemical Engineering Transactions*. Proceeding of international scientific Conference, 29, ISSN 1974-9791, p. 583-588.

Other Scientific publications

Iljins U., Gross U., Gajevskis A., Skujans J., Brencis R. (2012) Experimental research on gypsum drying process. **In:** *5-th International Conference Applied Information and Communication Technology 2012, Jelgava April, 26-27, ISBN 978-9984-48-065-7, p. 150-152*

Brencis R., Skujans J., Iljins U., Ziemelis I., Navickas J. (2013) Hemp fibers reinforcement influence on thermal conductivity and physical-mechanical properties of foam gypsum. *Proceedings of the Latvia University of Agriculture. (prepared)*

Brencis R., Skujans J., Iljins U. (2013), Acoustic and mechanical properties of Foam gypsum decorative ceiling panels. **In:** *Civil Engineering`13. Proceeding of international scientific conference, May 16-17, 2013. (submitted for publication)*

Conferences

Skujans J., Iljins U., Ziemelis I., Gross U., Ositis N., Brencis R., Veinbergs A. Kukuts O., Experimental research of foam gypsum acoustic absorption and heat flow, *4th International Conference on Safety & Environment in process Industry*, 14.-17. Marts,2010, Florence, Italy.

Brencis R., Skujans J., Iljins U., Ziemelis I., Osits N., Research on Foam Gypsum with Hemp's Fibrous Reinforcement, *14th International*

Conference on Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction, 8-11 May 2011, Florence, Italy.

Brencis R., Iljins U., Skujans J., Gross U. Drying kinetics processes in foam gypsum, *International scientific seminar Environment and building materials: Physical methods and investigation*. Aleksandras Stulginskis University, 27 January 2012, Kauna, Lithuania.

Kakitis A., Berzins U., Berzins R., Brencis R., Cutting properties of the Hemp fibre, *11th International Scientific Conference Engineering for Rural Development*, 24 – 25 May, 2012, Jelgava, Latvia.

Iljins U., Gross U., Gajevskis A., Skujans J., Brencis R., Experimental research on gypsum drying process, *5-th International Conference Applied Information and Communication Technology 2012*, April, 26-27, Jelgava, Latvia.

Brencis R., Iljins U., Skujans J., Gross U., Research of foam gypsum drying process and heat flow transfer. *Conference Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction 2012*, August 25 – 29, 2012, Prague, Czech Republic.

Other activities and research projects

H.Putans, I.Ziemelis, U.Iljins, V.Zagorska, A.Norvaiss, R.Brencis. (2010) Building heating periodic firing technique. Latvian patent EN 14190th Published: Patents and Trademarks. Latvian Patent Office Official Journal. 8/2010., 1213 p.

Participation in an international congress *39th International Congress on Noise Control Engineering Internoise 2010*, 13-16 June, Lisabon, Portugal

Participation in the project - Latvian Lithuanian cross-border cooperation programs for 2007. - 2013. The project "Research and industrial cooperation in the Jelgava and Sauliai", within which the work on e-learning course "Protection against noise" create

Participation in ERDF project "Development of new composite building materials to foam gypsum base with fiber reinforcement and the build system studies" in 2010.

MATERIALS AND METHODS

For production of foam gypsum, the main ingredient used was gypsum β $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5 \text{H}_2\text{O}$ with density of 2550 kg m^{-3} , fineness of grinding of 3.86 g (7.72%) and binding time of 18 min 30 s. As a surface active substance the STAMEX F-15 5% FFFP foam maker was used. Within the framework of the doctor thesis elaboration, the experimental samples were

produced using the dry mineralization method (Горлов, Меркин, 1984; Скуянс, 1987) that provides decrease in water/gypsum ratio thereby improving material properties.

During the drying process, the average moisture of samples was determined by weighing the sample on scales, which maximum allowable weight is 16100.0 g and sensitivity ± 0.2 g. To verify the theoretical results obtained, foam gypsum samples were dried in a fume cupboard at temperature of 20 °C, relative air humidity 30-40% and air flow velocity of 0.02 m s⁻¹ near the sample surface.

Number of pores and pore area were determined by digital microscope VHX-100 with 50 times magnification. Number of pores and pore area were determined per area unit of 1 mm² using the method developed for this microscope by the author.

Bending strength was determined on device Zwick Roell 2.5 TS with applying three-point bending to beams with size of 40×40×160mm and distance between supports of 100 mm by standard method, but foam gypsum plate bending strength was determined in accordance with the standard LVS EN 14246:2006 “Gypsum Elements for Suspended Ceilings. Definitions, Requirements and Test Methods”.

Heat flow measurements were conducted by two-channel wireless heat flow and temperature electronic measuring system as well as by hot plate apparatus according to standard LVS ISO 8302:2001 „ Thermal Insulation - Determination of Steady-State Thermal Resistance and Related Properties - Guarded Hot Plate Apparatus”.

Sound absorption measurements were carried out in impedance tube with Ø40 mm at frequency range of 250÷4000 Hz. Weighted sound absorption ratio was determined according to standard LVS EN ISO 11654:2000 “Acoustics. Sound Absorbers for Use in Buildings. Rating of Sound Absorption”. Sound absorption for model samples was measured in reverberation chamber according to the standard LVS EN ISO 354:2003 “Acoustics - Measurement of Sound Absorption in a Reverberation Chamber”.

Foam gypsum with hemp shives reinforcement: to foam gypsum hemp shives in various concentrations were added. Hemp shives concentration c , g kg⁻¹ is the amount of shives in grams per kg of dry gypsum material. Shives are prepared by crushing and sifting through mesh of various sizes in order to obtain different lengths of 2.5÷5.0 mm and 5÷10 mm.

1. PRODUCTION AND APPLICATION OF MINERAL BINDERS-BASED ACOUSTIC MATERIALS

The chapter discusses the classification of cell concrete; their advantages and disadvantages in relation to the acoustic issues as well as analysis of previously studies on foam gypsum carried out by various methods of production and selects the foam gypsum manufacturing methods usable for study on foam gypsum.

Pore distribution according to their dimensions is discussed, as well as the effects of pores on sound absorption properties of the material are summarized.

1.1. Classification and production technologies for cell concrete

Mineral binder-based foam materials are a type of cell concrete. This variety of concrete is characterized by low volume density, small air-filled pores evenly spaced all over the volume and has been developed in manufacturing technology process by enclosing air in a liquid mass.

Within the framework of this thesis, cell materials can be categorized by their production technology (by gas or foam) and structures. Today, for production of cell materials all the well-known binders are used, e.g., concrete (aerated concrete, foam concrete), lime (aerated silicates), gypsum (aerated gypsum, foam gypsum) as well as different compositions.

Foam gypsum is gypsum binder-based material with porous structure obtained due to use of foam-forming substances. One of the most effective methods, i.e., **Dry Mineralization Method**, has been developed by MISI (*МИСИ*) (Горлов, Меркин, 1984; Скуянс, 1987). With this technique, the necessary amount of water needed for the system can be used, which is close to the theoretically required, in order to initiate hydration and thus improve the material properties (Скуянс, Штакелберг, 1984 b). By varying manufacturing technology - w/g ratio and surface active substances (SAS) quantity, it is possible to obtain materials with various volume densities and pore structures.

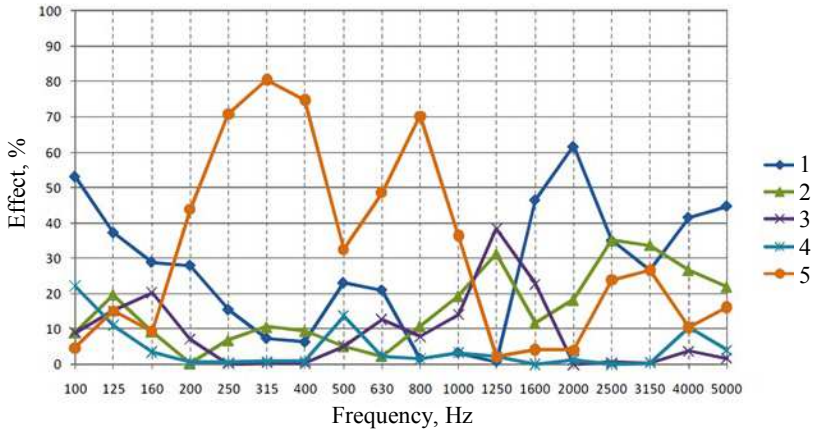
1.2. Effect of porous structure on physico-mechanical properties

Effect of pores on physico-mechanical properties is undeniable and obvious, and this fact is certified by various scientists and teams of scientists (Laukaitis, Fiks, 2006; Voronina, 1994, 1996, 1997; Arenas, Crocker, 2010; Шейкин, Чеховский, 1979; Сох, Van Dijk, 2002; Yang, Chiang, 2001; Foret, Guigou-Carter, Chene, 2010; Sgard, Oluy, Atalla, 2005). Sheikin, Chehovskij and Bruser (Шейкин, Чеховский, 1979) in

their paper have summarized various pore ratings according to their names and sizes made by various authors. The smallest pores are $<6 \text{ \AA}$ (ultramicropores, internal small pores, intercrystalline pores, interlayer pores); classification authors (Brunauers, Mihails, Kondo, Feldmans). Next pore size is $6\div 15 \text{ \AA}$ (micropores, gel pores, absorption, large internal pores, intercrystalline pores); classification authors (Brunauers, Pauers, Mihails, Kondo, Feldmans), mesopores and the pores between the gel particles with sizes of $15 \div 1000 \text{ \AA}$; classification authors (Brunauers, Mihails, Kondo, Feldmans). The largest are macropores with size $> 1000 \text{ \AA}$; classification authors (Brunauers, Pauers, Mihails, Kondo, Feldmans). In the study on foam gypsum and within this thesis, the investigated pore size range is $2500\div 3100 \text{ \AA}$, obtained for foam gypsum with given manufacturing technologies.

Analysis of typical absorption materials and their ability to absorb sound at different frequencies show that the panel-type absorbers (acting as dashboard plates buckling strength and the interlayer resistance to pressure) are effective at low frequencies. Helmholtz absorbers are effective at medium frequencies with a very strong absorption at a narrow frequency range, and porous absorbents, which are effective for high-frequency damping, where already at 500 Hz absorption ratio is 0.55. When using foam gypsum as sheet material, it would be possible to obtain a summary of all the best material properties as has been obtained by Sgard (Sgard, Olney, Atalla, 2005) in his research on rockwool with material perforation, as well as by varying pore structure by Laukaitis and Fiks (Laukaitis, Fiks, 2006).

For porous flexible materials, sound absorption ratio up to 160 Hz depends on porosity. From 160 Hz to 1000 Hz the dominant effect has the volume density of material, at 1250 Hz the largest effect has material thickness and from 1250 Hz to 5000 Hz the dominant is material porosity (Foret Guigou-Carter, Chen, 2010). Material properties such as material strength, thickness and elastic modulus effect on the sound absorption properties is up to 35% (Figure 1.1.) and mainly at frequency range above 1250 Hz.



Source: (Foret, Guigou-Carter, Chene, 2010)

Figure 1.1. Role of physico-mechanical properties in formation of sound absorption ratio for porous flexible materials.

1- porosity; 2- strength; 3- thickness; 4- elastic modulus; 5- volume density.

2. FOAM GYPSUM MANUFACTURING TECHNOLOGY EFFECT AND ITS IMPROVEMENT FOR SOUND ABSORPTION MATERIALS PRODUCTION

Detailed description of foam gypsum manufacturing technology in all its stages. One of the major energy consuming processes is foam gypsum drying. This section describes the information on the foam gypsum drying known to date and foam gypsum drying model is developed that allows to determine the required amount of heat to dry foam gypsum to a constant weight.

The section describes foam gypsum pore counting method with a digital microscope VHX-100 created by the author. The results obtained with this methodology are reflected in pore classification applied to foam gypsum manufacturing technologies described in the thesis. Material strength indicators arising from pore structure have been determined for all technologies created during the study. For manufacturing technologies with 4 ml of SAS, bending strength indicators are up to 2.9 times higher and compressive strength indicators up to 3.5 times higher than for manufacturing technologies with 6 ml of SAS.

One of the main parameters, heat conductance factor, depending on material volume density has been established. The results obtained are

better compared to the previously known (Скуянс, 1987) for alpha modification of foam gypsum. For beta foam gypsum obtained during the study, at volume density of 270 kg m^{-3} heat conductance factor is $0.16 \text{ W (m K)}^{-1}$, but at 400 kg m^{-3} heat conductance factor is $0.11 \text{ W (m K)}^{-1}$.

Manufacturing technology affects volume density as well as material sound absorption ratio. This section describes methodology for sound absorption ratio establishing and results obtained at various frequencies depending on manufacturing technology and material thickness. The results obtained are in tune with rock wool sound absorption studies conducted by Schmidt (Шмидт, 1969), where the thinner samples at high frequencies have better sound absorption indicators than at low frequencies, but for thicker samples sound absorption ratio is higher at low frequencies. It has been concluded that foam gypsum sound absorption ratio is higher when it is produced with technology that provides greater pore- and straight-through pores sizes per 1 mm^2 . The total pore area of $0.44 \div 0.46 \text{ mm}$ per 1 mm^2 gives sound absorption ratio of $0.43 \div 0.41$, but pore area of 0.48 mm^2 per 1 mm^2 gives sound absorption ratio of 0.52. Materials obtained with a manufacturing technology are divided into 3 groups according to their volume density, and their sound absorption ratio comparison has been made at various frequencies and material thicknesses. Sound absorption ratio at material thickness of 10 un 20 mm at low frequency range leaves little effect on volume density, but at material thickness of 50 and 100 mm significant difference in sound absorption ratio values for all three areas of the volume density at all frequency ranges has been observed.

2.1. Drying model for foam gypsum

During drying process, mass and heat transfer processes run simultaneously, so it would be desirable to get a simple experimental data-based drying model with optimal energy consumption. Drying process consists of two phases. During the first phase, drying rate is constant but during the second part it is falling (Handbook of Industrial..., 2007). During the initial drying phase, it depends on ambient conditions (humidity, temperature and air flow velocity) (Tang, Etzion, 2004; Dincer, Dost, 1995; Musielak, Kieca, 2009; Defraeye, Blocken et al., 2012). Between these drying processes a critical point exists (Iljins, Skujans, 2009), where external factors effect on drying process are replaced by inner factors effect.

Up to now, studies on foam gypsum drying has been conducted by Iljins and Skujans (Iljins, Skujans, 2009). Observing the two phases of drying, it can be expected that the evaporation originally shall take place with constant rate that is determined not by the characteristics of the sample material, but by the ambient air temperature and relative humidity. The

initial moisture of the model is covered by a vapour barrier on the bottom surface ($z=0$) but other surfaces excluding top one are covered with a moisture-proof material. This system is described by stationary diffusion equation (Fick) with one coordinate-system and borderline conditions of second type.

By solving the mathematical physics problem with the variable separation equation with one coordinate-system and borderline conditions of second type and applying variables separation method in the first phase (Figure 2.1.a), the following result was obtained (2.1) (Iljins, Skujans, 2009):

$$W_I(t; z) = W_s - \frac{\varphi \cdot t}{d} - \frac{W^*}{2} \left(\frac{z^2}{d^2} - \frac{1}{3} - \frac{4}{\pi^2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k^2} \cdot \cos \frac{\pi k z}{d} \cdot \exp \left(-\frac{\pi k^2}{d^2} D t \right) \right) \quad (2.1)$$

where:

$$W^* = \frac{\varphi \cdot d}{D}, \text{ kg m}^{-3}.$$

The sample is drying and with reaching t_{cr} the first drying phase is completed. On the surface of the sample $z=d$, the moisture has reached equilibrium moisture W_0 . From this time point t_{cr} the sample enters into the second phase of drying, where drying rate $\square \varphi(t)$ is determined by the physical parameters of the sample material and exponentially decreases depending on time (Iljins, Skujans, 2009) and is lower than the initial constant drying rate φ in the first stage. It means that in the second stage of drying, the initial condition and borderline condition change. The initial condition for the second phase at t_{cr} is the mathematical physics problem solution for the first phase (2.1), with borderline condition of the first type.

In the second phase of drying, the system describing diffusion equation (Fick equation) remains unchanged and by solving the problem with the new initial condition and borderline condition of the first type the following expression (2.2) is obtained (Iljins, Skujans, 2009):

$$W_{II}(t - t_{cr}; z) = W_0 + \sum_{n=0}^{\infty} A_n \cos \frac{\pi}{2d} (2n+1)z \cdot \exp \left(-\frac{\pi^2 (2n+1)^2}{4d^2} D (t - t_{cr}) \right) \quad (2.2)$$

where:

$$A_n = \frac{(-1)^n}{\pi} \left(\left(W_s - W_0 - \frac{\varphi}{d} t_{cr} + \frac{W^*}{6} \right) \cdot \frac{4}{2n+1} - \frac{2W^*}{2n+1} \cdot \left(1 - \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{1}{(2n+1)^2} \right) - \frac{8W^*}{\pi^2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2n+1}{k^2} \cdot \frac{1}{(2k)^2 - (2n+1)^2} \cdot \exp \left(-\frac{\pi^2 k^2}{d^2} D t_{cr} \right) \right)$$

$W_{I}(t, z), W_{II}(t, z)$ – dependence of sample moisture on time t and coordinate z in the first and second drying phases, respectively, kg m^{-3} ;

d sample thickness, m ;

φ drying rate, $\text{kg (m}^2 \text{ s)}^{-1}$;

D diffusion coefficient, $\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$;

W_s, W_0, W^* - initial and equilibrium moisture, respectively,

$$W^* = \frac{\varphi \cdot d}{D}, \text{ kg m}^{-3}.$$

By applying comparison of theoretical expressions (2.1 and 2.2) with experimental data, it is possible, with method of the least square, to calculate the unknown values of the model t_{cr}, φ, D . Equilibrium moisture W_0 cannot be determined from this model, therefore it shall be accepted as equal to zero.

For the described model, it was assumed that the drying takes place from the surface of the sample, the thickness of which is infinitesimal. However, taking into consideration high porosity of foam gypsum samples, we can expect that a partial drying will occur also from the pores located inside of the sample. At first approximation, it is assumed that the drying intensity will decrease exponentially toward the inside of the sample. Accordingly, the power density consumed for the drying depending on the coordinate z can be calculated by the formula 2.3:

$$q(z) = q \cdot \exp\left(-\frac{d-z}{\delta}\right) \quad (2.3)$$

where:

q power density consumed during the drying process on the surface of the sample $z=d$, W m^{-3} ;

δ effective drying depth, m .

Then, in accordance with the first drying phase, where the drying rate is assumed to be constant, it is possible to create a 1-D shape stationary model that contains Poisson's equation for the calculation of the temperature inside the sample.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{q(z)}{\lambda} \quad (2.4)$$

where:

λ sample heat conductance, W (m K)^{-1} .

Borderline condition on bottom surface of the sample $z=0$:

$$\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} = \alpha_1 (T - T_0) \quad (2.5)$$

where:

α_1 heat dissipation ratio from bottom surface of the sample, $W (m^2 K)^{-1}$;

T_0 ambient temperature, °C.

Borderline condition on top surface of the sample $z=d$:

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=d} = \alpha_2 (T - T_0) \quad (2.6)$$

where:

α_2 heat dissipation ratio from top surface of the sample, $W (m^2 K)^{-1}$.

Solving the system (2.4÷2.6) the solution is obtained

$$T(z) = T_0 + Az + B + \frac{q}{\lambda} \delta^2 \exp\left(-\frac{d-z}{\delta}\right) \quad (2.7)$$

where:

$$A = -\frac{q\delta}{R_T} \left(\frac{\delta}{\lambda} \left(1 - \exp\left(-\frac{d}{\delta}\right) \right) \right) + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{1}{\alpha_1} \exp\left(-\frac{d}{\delta}\right);$$

$$B = -\left(\frac{q\delta + \lambda A}{\alpha_2} + \frac{q\delta^2}{\lambda} + Ad \right);$$

$$R_T = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{d}{\lambda}.$$

Inflowing quantity of heat Q ($W m^{-2}$) can be calculated by applying the borderline conditions (2.5, 2.6 and 2.7)

$$Q_2 = -\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=d} = -q\delta - \lambda A \quad (2.8)$$

$$Q_1 = \lambda \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} = q\delta \exp\left(-\frac{d}{\delta}\right) + \lambda A \quad (2.9)$$

Total quantity of the consumed heat:

$$Q = Q_1 + Q_2 = -q\delta \left(1 - \exp\left(-\frac{d}{\delta}\right) \right) = -\phi L \quad (2.10)$$

where:

L latent heat produced by foam gypsum moisture drying, J kg^{-1} .

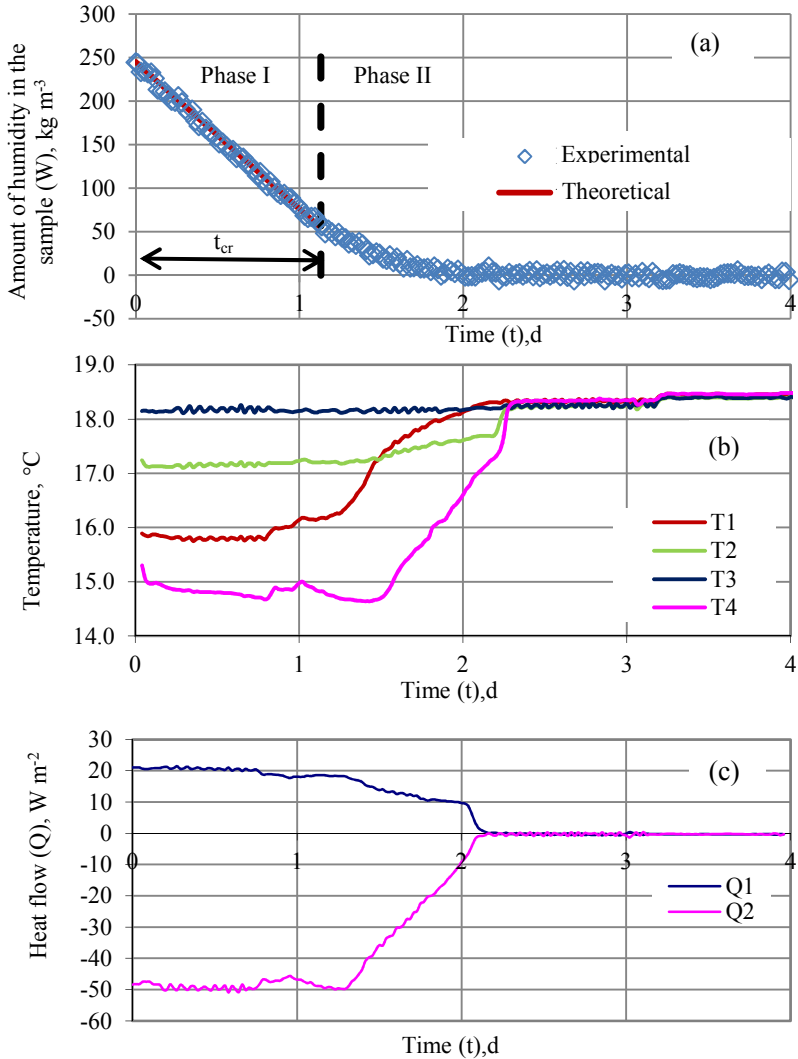
By comparing the theoretical model with experimental data and applying the method of least squares, it is possible to estimate the unknown parameters of the model δ un L .

Heat consumption for drying was measured with heat flux sensors that were glued to the top and bottom surfaces of the sample. During sample drying, surface temperatures and the temperature inside the sample at depth of 1 and 2 mm from the top surface of the sample were measured with K-type thermocouples.

Detailed experiment results are shown for one foam gypsum sample with thickness of 2 cm and volume density 345 kg m^{-3} in the dry state. The volume density, from foam gypsum application aspect as thermal insulation and sound absorption material, is in the optimum range ($250\text{--}450 \text{ kg m}^{-3}$).

By comparing the theoretical data with the experimental data obtained by weighing during the drying process (Figure 2.1.a), theoretical average moisture drying curve has been obtained with two expressed drying phases. Drying parameters for the given sample have been established:

- diffusion coefficient $D=4.79 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$;
- drying rate $\phi=3.91 \cdot 10^{-5} \text{ kg (m}^2 \text{ s}^{-1})^{-1}$;
- duration of the first phase $t_{cr}=1.13 \text{ d}$.



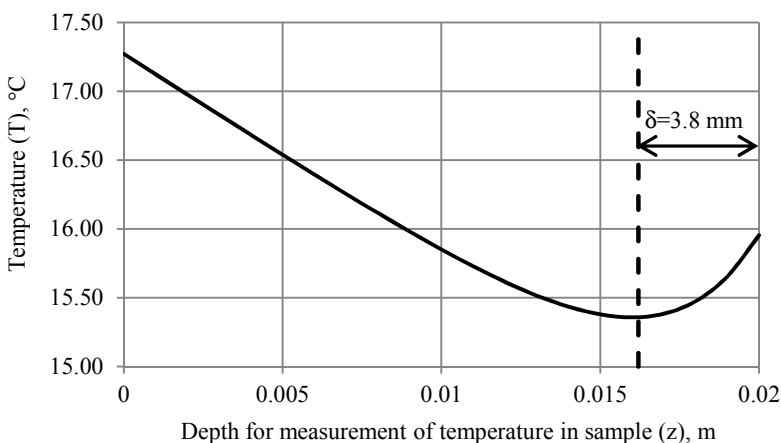
Source: developed by the author (Brencis, Iljins, Skujans, 2012)

Figure 2.1. Foam gypsum drying parameters depending on time.

- (a) average theoretical and experimental amount of moisture in the sample,
- (b) temperatures of sample surfaces (T2 and T3) at the depth of 1 mm (T1) and 2 mm (T4),
- (c) heat flows through sample surfaces (Q1 at $z=0$, Q2 at $z=d$) depending on drying time.

By applying sample temperature and obtained heat measurements, see Figures 2.1.b. and 2.1.c., as well as the calculated drying rate ϕ , it is possible from the expression (2.7) with least squares method determine δ that represents thickness of layer, which is effectively drying. In turn, foam gypsum drying-produced latent heat L can be calculated from expression (2.10). The results obtained:

$\delta=3.8$ mm, $L=1.69 \cdot 10^6$ J kg⁻¹. The latent heat obtained is less than the heat of evaporation of water at temperature of 20 °C ($2.45 \cdot 10^6$ J kg⁻¹), because drying in this case occurs from foam gypsum surface that differs from the ordinary evaporation. For a much denser (with less porosity) foam gypsum sample ($\rho=1055$ kg m⁻³ in dry state), analogous results are: $\delta=0.69$ mm; $L=2.02 \cdot 10^6$ J kg⁻¹. It shows that these calculated parameters are dependent on volume density of the foam gypsum samples. Latent heat produced by foam gypsum drying is an important parameter for identifying the amount of heat needed to dry the material and related drying costs.



Source: developed by the author (Brencis, Iljins, Skujans, 2012)

Figure 2.2. Theoretically calculated distribution of moisture inside the foam gypsum sample dependent on depth.

For the theoretical model proposed, the expression (2.7) describes distribution of temperature inside the sample along the coordinate z . Experimental temperature measurements inside the sample at a depth of 1 and 2 mm, T1 and T4 Figure 2.1.b., shows that the temperature inside the sample, down from the top surface, decreases. Theoretically calculated temperature dependence on depth (coordinate z) gives the minimum

temperature for the sample shown in Figure 2.2. The Figure shows that the minimum temperature is observed close to the top surface of the sample and the calculated temperatures on sample surfaces (bottom $z=0$ $T=17.2$ °C; top $z=d$ $T=18.3$ °C) are close to the experimentally measured $T_3=18.2$ and $T_2=17.2$ °C during the first drying phase, Figure 2.1.b. This shows that the developed mathematical model is adequate and ensures convergence of data obtained during a quantitative theoretical study and experimental data.

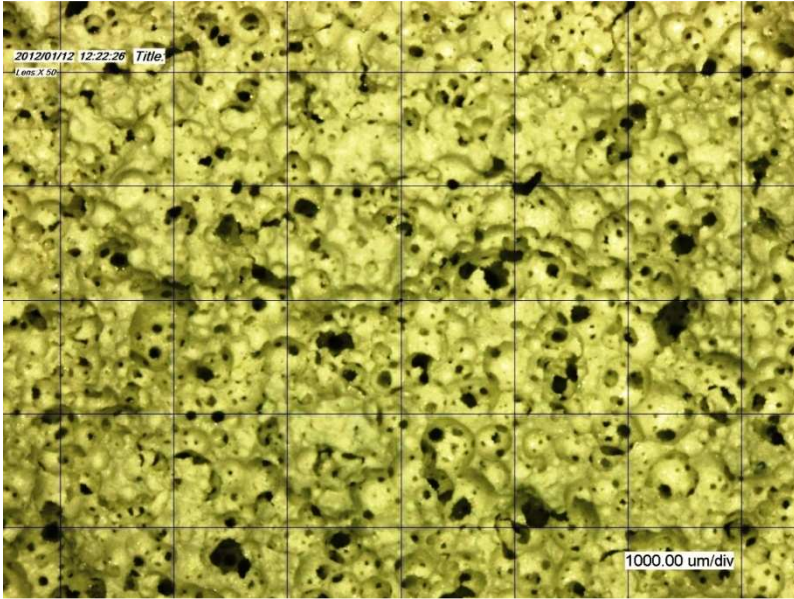
2.2. Effect of applied technology on pore structure

The effect of closed pores on sound absorption properties has been investigated by several researchers, who determined their distribution (Sgard, Olny, Atalla, 2005; Arenas, Crocker, 2010;), number (Voronina, 1996; Voronina, 1997), size (Voronina, 1996; Sgard, Olny, Atalla, 2005) and porosity levels (Voronina, 1996; Laukaitis, Fiks, 2006). In all cases, straight-through pores have been recognized as one of the main factors that affects absorption ratio. Laukaitis and Fiks (Laukaitis, Fiks, 2006) have established straight-through pores porosity ratio against the total porosity and linked them with air flow factor for the material. By varying various foam gypsum manufacturing technologies, it is possible to obtain a certain pore structure that has close relation with volume density of the material and sound absorption.

Applying the technology with water/gypsum ratio (w/g) of 0.6 and surface active substance (SAS) amount of 4ml per dry mass of the gypsum, the material with volume density of 398 kg m^{-3} and porosity of 85.21 % was obtained. The structure of the material at 50 times magnification is shown in Figure 2.3.

For samples made with this technology, the average number of pores per 1 mm^2 is 7.64 with pore area of 0.486 mm^2 . For this foam gypsum, the number of straight-through pores per 1 mm^2 is 11.60 and pore area is 0.0573 mm^2 . Standard deviation for number of pores is 2.25, while standard deviation for straight-through pores is 3.47.

Foam gypsum structure shows that pore sizes and numbers are arranged randomly all over the sample. In many places, closed pores are linked to adjacent pores. The data set was analyzed by values of excess (0.2 for ordinary pores and -0.58 for straight-through pores) and asymmetry ratio (-0.16 for ordinary pores and -0.39 for straight-through pores). The histogram shows that both straight-through pores and ordinary open pores are present in a broad range.



Source: photo by the author

Figure 2.3. Foam gypsum structure at 50 times magnification. w/g 0.6, 4 ml of SAS, $\rho=398 \text{ kg m}^{-3}$.

The profile of pore properties at volume density ranges of $250\div 300 \text{ kg m}^{-3}$ and $350\div 400 \text{ kg m}^{-3}$ is given in Tables 2.1 and 2.2. Analyzing foam gypsum manufacturing technology effect on separate components of pore structure – pores and straight-through pores – we can observe no unambiguous effect of w/g ratio and amount of SAS but effect on total pore and straight-through pores area per 1 mm^2 has been observed. Irrespective of SAS amount used the total pore area decreases when w/g ratio increases. Using gypsum manufacturing technology with 6 ml of SAS it decreases from 0.5652 mm^2 with w/g ratio of 0.6 to 0.4851 mm^2 with w/g ratio of 0.9 and, for manufacturing technology with 4 ml of SAS, from 0.5433 with w/g ratio of 0.6 to 0.4353 with w/g ratio of 0.9. The difference between the highest and the lowest total pore area is 25% for manufacturing technology with 4 ml of SAS and 17 % for manufacturing technology with 6 ml of SAS.

Table 2.1

**Profile of foam gypsum pore properties at volume density of
250÷300 kg m⁻³ for various manufacturing technologies**

6 ml of surface active substance per kg of gypsum				
Parameter	Water/gypsum ratio			
	0.6	0.7	0.8	0.9
Average diameter of pores	0.301±0.018	0.277±0.019	0.275±0.026	0.0256±0.019
Number of pores per mm ²	6÷7	7÷8	6÷7	7÷8
Pore area per mm ²	0.501±0.121	0.475±0.086	0.443±0.102	0.436±0.120
Number of straight-through pores per mm ²	10÷11	13÷14	13÷14	12÷13
Straight-through pore area per mm ²	0.0642±0.025	0.0574±0.026	0.0542±0.025	0.0491±0.023
Total pore- and straight-through pore area per mm ²	0.5652±0.090	0.5324±0.050	0.4972±0.062	0.4851±0.084

Source: developed by the author

Table 2.2

**Profile of foam gypsum pore properties at volume density of
350÷400 kg m⁻³ for various manufacturing technologies**

4 ml of surface active substance per kg of gypsum				
Parameter	Water/gypsum ratio			
	0.6	0.7	0.8	0.9
Average diameter of pores	0.274±0.050	0.264±0.044	0.252±0.029	0.0256±0.017

Continued Table 2.2

4 ml of surface active substance per kg of gypsum				
Parameter	Water/gypsum ratio			
	0.6	0.7	0.8	0.9
Number of pores per mm ²	7÷8	7÷8	7÷8	6÷7
Pore area per 1 mm ²	0.486±0.099	0.440±0.108	0.416±0.095	0.401±0.090
Number of straight-through pores per 1 mm ²	11÷12	10÷11	11÷12	10÷11
Straight-through pore area per mm ²	0.0573±0.019	0.0375±0.029	0.0359±0.013	0.0343±0.029
Total pore- and straight-through pore area per mm ²	0.5433±0.08	0.4775±0.06	0.4519±0.07	0.4353±0.12

Source: developed by the author

2.3. Researches on strength properties

During increase in volume density, the material strength indicators regarding both bending and compressive increase too and according to results obtained for foam gypsum with equal volume density strength parameters vary by as much as 40% (see Tables 2.3 and 2.4). This shows that the strength indicators, in addition to the volume density, are influenced also by other indicators, such as mesopores and micropores in walls of pores of foam gypsum.

At equal amount of SAS (6 ml) and various w/g ratios, volume density changes within the limits of 30 kg m⁻³, but the bending strength and compressive strength increase with increase in water quantity according to the volume density gain, but increase in bending strength and compressive strength is not proportional to volume density gain. Decrease in strength indicators is observed in case of manufacturing technology with w/g ratio of 0.9 and 6 ml of SAS. In case of this manufacturing technology foam gypsum indicators are unstable.

Table 2.3

**Profile of foam gypsum properties at volume density of 250÷300 kg m⁻³
for various manufacturing technologies**

Manufacturing technology	Volume density, kg m⁻³	Porosity, %	Bending strength, MPa	Compressive strength, MPa
W/G 0.6 SAS 6 ml	278±37	89.07	0.041±0.019	0.054±0.023
W/G 0.7 SAS 6 ml	281±11	88.98	0.066±0.005	0.106±0.029
W/G 0.8 SAS 6 ml	283±13	88.95	0.071±0.008	0.123±0.012
W/G 0.9 SAS 6 ml	258±7	89.85	0.057±0.005	0.095±0.020

Source: developed by the author

In case of a reduced amount of SAS (to 4 ml), strength indicators display a lower correlation. Low values of determination coefficient show that, for manufacturing technology with the amount of 4 ml of SAS, volume density has a low effect on strength properties. Foam gypsum structure researches show that the dominant factor could be the effect of straight-through pores and existing pores in walls of foam gypsum pores. In Table 2.4, data on average strength indicators for manufacturing technology with 4 ml of SAS are shown and here we can see that the results, as for manufacturing technology with 6 ml of SAS, correspond to the volume density, but they are disproportionate, which confirms the fact that, in addition to the volume density, the strength is affected by some other factor.

Table 2.4

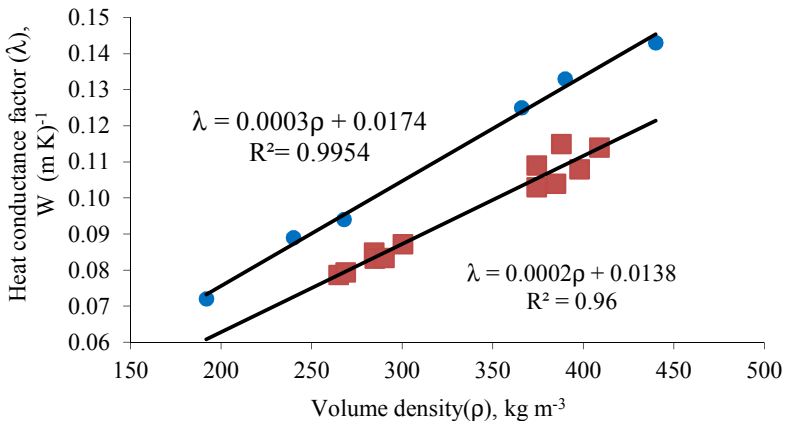
**Profile of foam gypsum properties at volume density of 350÷400 kg m⁻³
for various manufacturing technologies**

Manufacturing technology	Volume density, kg m⁻³	Porosity, %	Bending strength, MPa	Compressive strength, MPa
W/G 0.6 SAS 4 ml	377±33	85.21	0.132±0.055	0.210±0.084
W/G 0.7 SAS 4 ml	378±16	85.17	0.176±0.028	0.311±0.037
W/G 0.8 SAS 4 ml	352±11	86.19	0.141±0.010	0.271±0.036
W/G 0.9 SAS 4 ml	366±34	85.65	0.150±0.026	0.250±0.036

Source: developed by the author

2.4. Researches on heat flow

Foam gypsum heat conductance factor values depending on volume density shown in Figure 2.4. have been compared with data obtained by Skujans (Скуянс, 1987). By varying foam gypsum manufacturing technologies (water/gypsum ratio and amount of surface active substance, ml), it is possible to obtain foam gypsum with volume density of 250÷1100 kg m⁻³ that leaves a material effect on foam gypsum properties, including heat conductance properties. In Figure 2.4. we see heat conductance depending on volume density regarding two types of foam gypsum. Data on alpha gypsum are obtained for foam gypsum manufactured from alpha calcium sulphate hemihydrate (α CaSO₄ · 0.5H₂O) (Скуянс, 1987), but the second series of measurements are obtained, during the development of the thesis, from beta calcium sulphate hemihydrate (β CaSO₄ · 0.5H₂O). The differences between the measurement series can be explained by the fact that as the foam gypsum raw materials various alpha and beta modifications are used.



Source: complemented by the author with the use of (Скуянс, 1987)

Figure 2.4. Foam gypsum heat conductance factor depending on foam gypsum volume density.

● - foam gypsum from alpha gypsum (Скуянс, 1987); ■ - foam gypsum from beta gypsum.

2.4. Effect of pores on foam gypsum sound absorption

The acoustic parameters of porous materials are governed by such properties as material porosity, tortuosity, air flow resistance (Allard, Attal, 2009; Foret, Guigou-Carter, Chene, 2010) and volume density (Skinner, Peters, 2006). For porous flexible materials, effect on sound absorption varies at various frequencies (Foret, Guigou-Carter, Chene, 2010), it is more pronounced at the frequency region up to 250 Hz and above 1600 Hz. In the thesis, determined porosity of foam gypsum arises from gypsum density and volume density of the material, but the number of pores and their area per 1 mm² varies depending on manufacturing technology. Increase in diameter of pores causes increase in the average (weighted) sound absorption ratio determined in accordance with standard EN ISO 16545. Information presented in Table 2.5 regarding average data of foam gypsum with volume density in range of 250÷300 kg m⁻³ show that sound absorption determining factor is the total area of pores and straight-through pores per 1 mm².

Table 2.5

Profile of physical properties of pores for foam gypsum with volume density of 250÷300 kg m⁻³ for various manufacturing technologies

Manufacturing technology	Number of pores	Pore area, mm ²	Number of straight-through pores	Straight-through pore area, mm ²	Total pore- and straight-through pore area per mm ²	Average sound absorption ratio at thickness of 100 mm, α_w
W/G 0.6 SAS 6 ml	6÷7	0.501±0.12	10÷11	0.064±0.03	0.565±0.09	0.72
W/G 0.7 SAS 6 ml	7÷8	0.475±0.09	13÷14	0.057±0.03	0.532±0.05	0.62
W/G 0.8 SAS 6 ml	6÷7	0.443±0.10	13÷14	0.054±0.03	0.497±0.06	0.61
W/G 0.9 SAS 6 ml	7÷8	0.436±0.12	12÷13	0.049±0.02	0.485±0.08	0.61

Source: developed by the author

For foam gypsum volume density in the range of 350÷400 kg m⁻³, a similar effect of average diameter of pores on sound absorption ratio value can be observed. Foam gypsum made within the said volume density range possesses a constant amount of SAS (4 ml) that gives a lower porosity of material than in case of foam gypsum with 6 ml of SAS. Porosity ratios vary by 3÷5%, but the number of closed pores and their areas per mm² do not differ in any fundamental respect. The different indicators are the number of straight-through pores and their areas per mm² (Table 2.6) that are lower for foam gypsum with a larger volume density, but average values of sound absorption ratio at material thickness of 100 mm do not display a direct link. This phenomenon is due to the fact that by determining the average sound absorption ratio value according to the standard EN ISO 16545 standard sound absorption ratio values within 1/3 octave frequency range are determined by the standard curve, which is different from direct measurements in a given 1/3 octave frequency range.

Table 2.6

Profile of physical properties of pores for foam gypsum with volume density of 350÷400 kg m⁻³ for various manufacturing technologies

Manufacturing technology	Number of pores	Pore area, mm ²	Number of straight-through pores	Size of straight-through pores, mm ²	Total pore- and straight-through pore area per mm ²	Average sound absorption ratio at thickness of 100 mm, α_W
W/G 0.6 SAS 4 ml	7÷8	0.486±0.10	11÷12	0.057±0.02	0.543±0.08	0.61
W/G 0.7 SAS 4 ml	7÷8	0.444±0.11	10÷11	0.038±0.03	0.478±0.06	0.52
W/G 0.8 SAS 4 ml	7÷8	0.416±0.10	11÷12	0.036±0.01	0.452±0.07	0.43
W/G 0.9 SAS 4 ml	6÷7	0.401±0.09	10÷11	0.034±0.03	0.435±0.12	0.41

Source: developed by the author

With decrease in porosity of material, sound absorption ratio value at 1/3 octaves is formed with more prominent extremes (Skinner, Peters, 2006). Extreme points location can affect the average sound absorption ratio value with transverse of an extreme point to the 1/3 octave, where the standard curve has a lower value. The results obtained for foam gypsum sound absorption can be grouped according to foam gypsum pore structures based on information summarized in Tables 2.5 and 2.6 regarding pore structure and sound absorption. The total pore area of $0.44\div 0.46$ mm² per mm² gives a sound absorption ratio within limits of $0.41\div 0.43$, pore area of 0.48 mm² per mm² gives a sound absorption ratio of 0.52 , while for foam gypsum with pore area of $0.50\div 0.55$ mm² per mm² sound absorption ratio is 0.61 . The largest absorption ratio of 0.72 is ensured by total pore area of 0.57 mm².

2.5. Sound absorption properties at various frequencies and material thicknesses

By varying water/gypsum ratio and surface active substance (SAS) amounts during sample production, we can obtain samples with various volume density parameters. By measuring sound absorption ratios at a certain thickness of the absorbing layer, can observe changes in absorption ratio depending on the material thickness and frequency at which the absorption ratio was established. Skinners (Skinner, Peters, 2006) and his colleagues during researches on sound absorption properties of foam materials have established four basic parameters: sound absorption dependence on frequency at various volume densities, material thickness, porosity and air permeability. For all these indicators, sound absorption ratio increases together with increase in frequency. For thinner materials, sound absorption ratio values are smaller at low frequencies. This correlation was observed also for foam gypsum at various volume densities. Very strong increase can be observed when the amount of surface active substance (SAS) is 6 ml (Table 2.7). For foam gypsum with a smaller volume density, maximum sound absorption ratio value can be observed for the thinnest sample at maximum frequency (4000 Hz), but, for samples with the amount of 4 ml of SAS with a larger volume density, maximum values are obtained and stabilize at lower frequencies. This phenomenon can best be observed for foam gypsum in case of manufacturing technology with w/g 0.8 and SAS 4 ml (see Table 2.7), where maximum sound absorption values within the range of 500 Hz, 100 Hz and 2000 Hz can be observed at the thickness of 30 mm.

Correlation between material thickness and frequencies for sound absorption plates has been investigated already in 1960-ies. Smith

(Шмидт, 1969) has identified sound absorption ratio for acoustic plates and has come to the conclusion that with decrease in material thickness maximum sound absorption ratio value moves to higher frequency range. Studies show that foam gypsum follows the observed behaviour of mineral wool, which is a fibrous material. It is expected that such behaviour constitutes a general correlation, but it requires additional studies, which are the subject of further researches.

Table 2.7

Sound absorption ratio dependent on sample thickness for foam gypsum in case of technology with 0.6 4 ml of SAS with average volume density of 377 kg m⁻³,

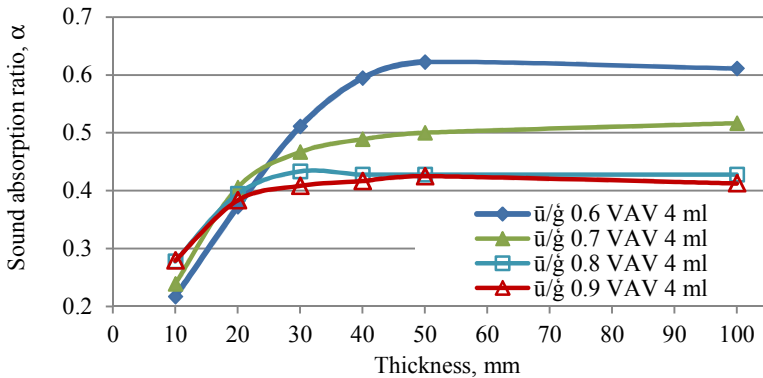
Thickness, mm	Average values of sound absorption ratio within octave bands, α					
	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	Average
10	0.08	0.12	0.27	0.72	0.85	0.22
20	0.14	0.33	0.61	0.73	0.69	0.37
30	0.24	0.51	0.64	0.70	0.76	0.51
40	0.35	0.58	0.62	0.71	0.76	0.59
50	0.43	0.57	0.61	0.71	0.75	0.62
100	0.48	0.53	0.61	0.71	0.75	0.61

Source: developed by the author

Highlighted data are maximum sound absorption values for each frequency range.

Comparing both foam gypsum manufacturing technologies, with 4 ml of SAS and 6 ml of SAS, can see that in the case of foam gypsum manufacturing technology with variable amount of water the maximum average value of sound absorption ratio depends on water/gypsum ratio (Figure 2.5). In the case of manufacturing technology with 4 ml of SAS, the effect of w/g ratio is stronger because more various pore structure is observed but in the case of manufacturing technology with 6 ml of SAS straight-through pore sizes differ less and w/g ratio leaves less effect on sound absorption ratio. For foam gypsum with volume density within the range of 350÷400 kg m⁻³, sound absorption ratio value increases together with increase in thickness, but when thickness of the material exceeds

20 mm sound absorption ratio is influenced by w/g ratio. In the case of increase in w/g ratio, the value of sound absorption ratio decreases. For volume density range of $250\div 300\text{ kg m}^{-3}$ this phenomenon is reversed but with negligent effect. After review of all technologies, it can be concluded that the maximum value of the ratio of sound absorption occurs at sample thickness of 50 mm, which is considered the optimum thickness of the material for sound absorption. The exception, where the sound absorption ratio significantly increases after the thickness of 50 mm, is foam gypsum in the case of manufacturing technology with w/g 0.6 and SAS 6 ml, when maximum value occurs at 100 mm.



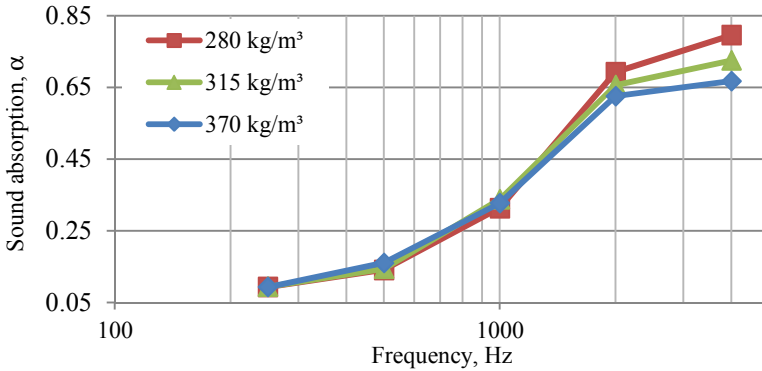
Source: developed by the author

Figure 2.5. Foam gypsum octave bands weighted average sound absorption ratios depending on material thickness within volume density range of $350\div 400\text{ kg m}^{-3}$.

2.6. Sound absorption properties for various foam gypsum technologies

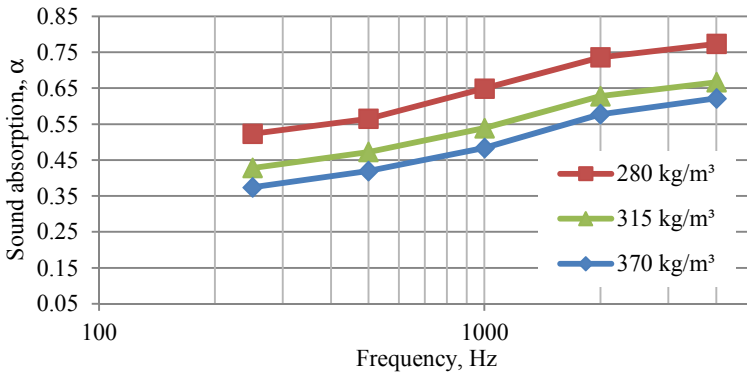
For materials with smaller volume density parameters, sound absorption ratio values are higher at all frequencies in comparison with materials with larger volume density; this correlation has also been observed for foam gypsum. Analyzing data at various volume density parameters irrespectively of foam gypsum manufacturing technologies, it is possible to determine three volume density regions – 280 kg m^{-3} ; 315 kg m^{-3} and 370 kg m^{-3} . Maximum values of sound absorption ratio are observed at 4000 Hz irrespectively of material thickness (Figure 2.6. and 2.7.) as it would be. Differences are observed at the frequency range below 1 kHz, where difference in volume density effect is observed. For foam gypsum with small material thickness (10 mm) (Figure 2.5.), this effect has not been

observed but in case of increase in thickness of foam gypsum with a lower volume density (280 kg/m^3) sound absorption ratio value gradually increases in comparison with foam gypsum with a larger volume density. For material with thickness of 20 mm, not only rapid increase in average sound absorption ratio values is observed but also volume density effect, i.e., sound absorption ratio increases at 1 kHz and decreases at 500 Hz and 250 Hz). If the thickness increases, the trend is increasingly moving towards the low-frequency range.



Source: developed by the author

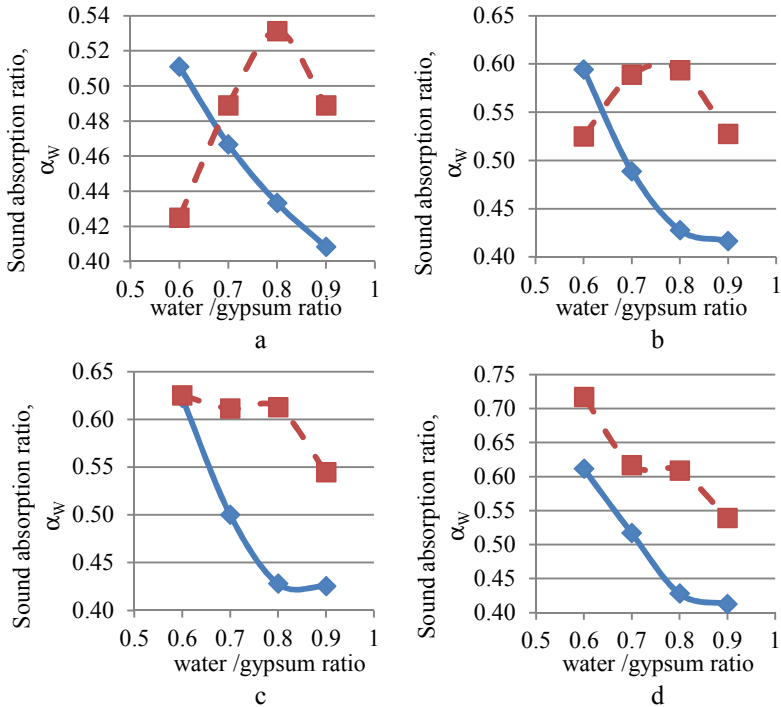
Figure 2.6. Foam gypsum average octave bands sound absorption ratios depending on foam gypsum volume density at various frequencies for sample with thickness of 10 mm.



Source: developed by the author

Figure 2.7. Foam gypsum average octave bands sound absorption ratios depending on foam gypsum volume density at various frequencies for sample with thickness of 100 mm.

Sound absorption plates may be of various thicknesses depending on their use and necessity to absorb a specific sound. In Figure 2.8.a.b.c.d we see average sound absorption values at various thicknesses depending on manufacturing technology. In the sense of strength indicators, foam gypsum that can be used for production of sound absorption plates must be produced using manufacturing technologies with w/g 0.6 and 4 ml of SAS, and w/g 0.7 and 4 ml of SAS. From these manufacturing technologies the best sound absorption properties has w/g 0.6 and 4 ml of SAS and at material thickness of 30 mm; 40 mm and 50 mm its properties are close to those of manufacturing technologies with 6 ml of SAS, which sound absorption properties are better. At material thickness of 100 mm, this manufacturing technology indicators are lower than 0.11, but such a sound absorption plate is impractical for use.



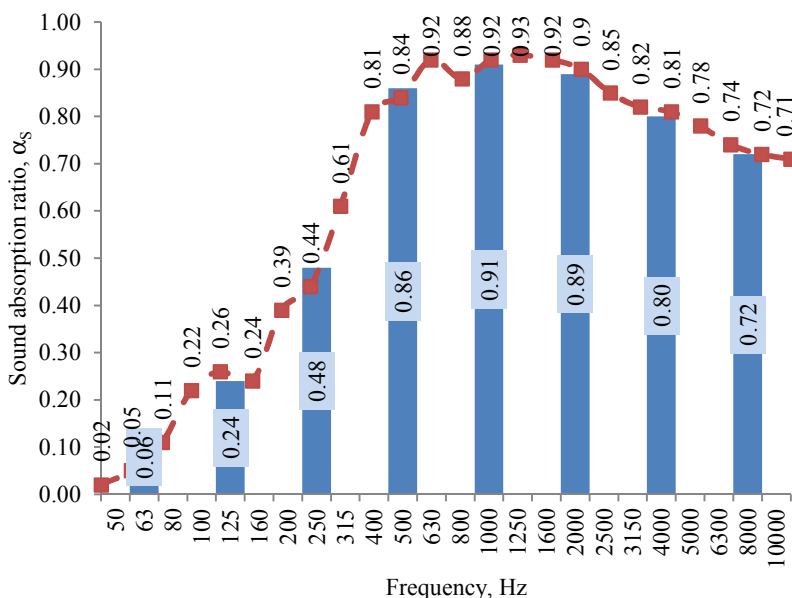
Source: developed by the author

Figure 2.8. Weighted average foam gypsum sound absorption ratio for various manufacturing technologies.

— 4 ml of SAS; - - 6 ml of SAS. a- for sample thickness of 30 mm; b- for sample thickness of 40 mm; c- for sample thickness of 50 mm; d- for sample thickness of 100 mm.

3. PRODUCTION AND TESTING OF FOAM GYPSUM EXPERIMENTAL MODELS

For determination of absorption ratio in a reverberation chamber, foam gypsum plates with manufacturing technology w/g 0.6 and 4 ml of SAS and size of 300×300×40 mm were produced. In accordance with the standard LVS EN ISO 354:2003 minimum permissible absorbent area for parameters of a reverberation chamber is 6.0 m². Measurements of duration of reverberation and calculations of absorption ratio were carried out according the standard LVS EN ISO 354:2003 “Acoustics - Measurement of Sound Absorption in a Reverberation Chamber”. Weighted average value of sound absorption ratio was determined according the standard LVS EN ISO 11654:2000 “Acoustics. Sound Absorbers for Use in Buildings. Rating of Sound Absorption”.



Source: developed by the author on basis of measurements No. 563-1 conducted by SIA “R&D Akustika”.

Figure 3.1. Sound absorption ratio measurements in reverberation chamber. Frequency curve in 1/3 octave bands for foam gypsum with manufacturing technology with w/g ratio of 0.6, 4 ml of SAS.

- — - frequency characteristic curve of measured α values (in 1/3 octave band);
- - Average value of absorption ratio α in octave bands.

Sound absorption ratio measurement results for foam gypsum carried out in reverberation chamber are shown in Figure 3.1. This Figure displays sound absorption ratio values both in 1/3 octave frequencies and middle frequencies. The maximum sound absorption ratio value was observed at 1 kHz (0.91) and for adjacent 1/3 octave middle frequencies it is very close to maximum at 500 Hz (0.86) and 2 kHz (0.89). Fall in absorption ratio values for the material is observed at low frequencies that can be prevented by including the material into a suspended ceiling system or by installation rockwool behind the material. Weighted average sound absorption ratio calculated in accordance with the standard LVS EN ISO 11654:2000 is 0.8 that corresponds to absorber class B.

The result obtained is by 0.2 greater than sound absorption ratio obtained in impedance tube because in an impedance tube sound falls perpendicularly to the surface of the sample but in a reverberation chamber a diffuse sound field is created and sound falls at different angles, thus improving absorption capacity.

In accordance with requirements laid down in the standard LVS EN 14246:2006 “Gypsum Elements for Suspended Ceilings. Definitions, Requirements and Test Methods” bending strength must be determined for plate size of 600×600 mm. The plates were of the same thickness (40 mm) as for testing in the reverberation chamber.

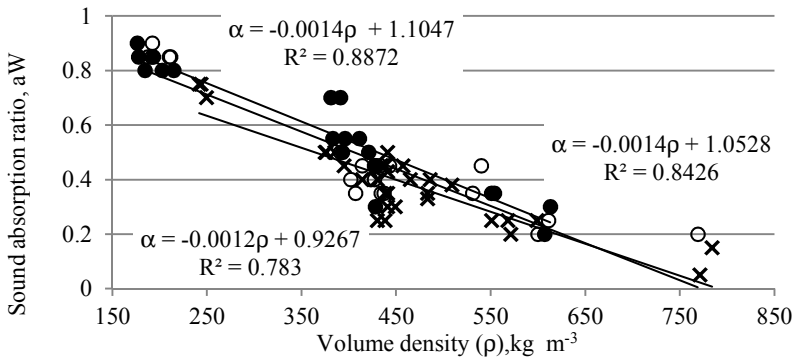
Strength tests of gypsum ceiling plate products are carried out in accordance with the standard LVS EN 14246:2006 “Gypsum Elements for Suspended Ceilings. Definitions, Requirements and Test Methods”. The sample shall be dried and tested at temperature of 23 ± 2 °C and humidity of 50 ± 5 %. The test shall be carried out with sample of 600×600 mm loosely placed on supports with a span of 585 mm. A round load of 6000 ± 100 g shall be applied to the sample placed on supports over entire length of the sample parallel to supports. The load shall be applied for 30 min and then the damages (cracks) shall be assessed. During the test, the sample must not break down and after the test no cracks must appear.

All samples passed the loading test with the load of 6 kg and during a visual inspection no cracks were observed, therefore, they were loaded until failure by gradually increase in the load by 400 g until failure of the sample. Calculated material bending strength at load of 6 kg is 0.055 MPa, but strength test with beams (40×40×160 mm) at three-point bending shows that bending strength of foam gypsum manufactured with use of this technology is 0.13 MPa (see Table 2.4), i.e., 2 times greater than calculated strength and the loaded foam gypsum plate should endure a load 2 times greater. An average load of 15 kg was needed for failure of the foam gypsum ceiling plates, which theoretically is bending strength of 0.137 MPa and 2.5 times greater than the bending strength laid down in the standard LVS EN 14246:2006 and by 5 % greater than the strength specified for test on beams with three-point bending.

4. FOAM GYPSUM MANUFACTURING TECHNOLOGY IMPROVEMENT OPTIONS WITH USE OF DISPERSE HEMP SHIVES REINFORCEMENT

One of the options to improve foam gypsum sound absorption and strength properties is adding residues of agricultural hemp processing (shives). By adding to foam gypsum short (2.5÷5.0 mm) and long (5.0÷10.0 mm) reinforcement in various concentrations, we can diversify foam gypsum structure and physico-mechanical properties. The composite material was produced by dry mineralization method with mixing water, gypsum, surface active substance (SAS) and adding hemp reinforcement. Hemp shives concentration c , g kg^{-1} is the amount of shives in grams per kg of dry gypsum material. Hemp shives concentration was varied within limits of 15÷50 g kg^{-1} .

With adding shives reinforcement, number of pores per 1 mm^2 decreases but the decrease is negligible, while it increases the pore area. Sound absorption ratio of modified foam gypsum improves by 10÷15%. The common tendency of sound absorption ratio α depending on foam gypsum density is that α increases when foam gypsum volume density decreases (Skujans, Iljins, 2010). This trend is also observed when modifying the gypsum foam with hemp reinforcement. Modifying foam gypsum material with hemp shives gives a possibility to obtain better sound absorption ratio at equal foam gypsum volume density properties (Figure 4.1.).



Source: developed and supplemented by the author from (Brencis, 2011b)

Figure 4.1. Weighted sound absorption ratio for hemp shives reinforcement-modified foam gypsum depending on foam gypsum volume density.

- × - sound absorption ratio of foam gypsum without reinforcement;
- - sound absorption ratio of foam gypsum with long shives reinforcement;
- - sound absorption of foam gypsum with short shives reinforcement.

Increase in long hemp heaves reinforcement concentration decreases the volume density as well as bending and compressive strength, but increase in short hemp shives reinforcement concentration increases the material volume density, but strength indicators growth is not proportional to concentration growth. Adding disperse hemp shives reinforcement to foam gypsum enables increase in bending strength by ≈ 1.5 times and improvement of sound absorption by 10÷15 %. This is an option for further improvement of the technology.

CONCLUSIONS

1. Proposals have been developed for foam gypsum manufacturing technology that provides a possibility to obtain the material with the specified material structure and thickness complying with requirements for weighted average sound absorption ratio class C at frequency range of 250 Hz÷4000 Hz laid down in the standard LVS EN ISO 11654:2000, and at the same time provides sufficient material strength properties. By use of manufacturing technology with the composition w/g of 0.6 and 4 ml of SAS, foam gypsum with volume density of 400 kg m^{-3} and bending strength of 0.13 MPa was obtained that is 2.5 times greater than the requirements for foam gypsum sound absorption plate bending strength laid down in LVS EN 14246:2003, and compressive strength of 0.21 MPa, with sound absorption ratio of 0.62 obtained in impedance tube (thickness of 50 mm) corresponding to material class C and absorption ratio of 0.80 obtained in reverberation chamber (thickness of 40 mm) corresponding to material class B.
2. It has been established that foam gypsum sound absorption material and mineral wool display analogous behaviour regarding sound absorption ratio and product thickness. Sound absorption ratio at 250 Hz is better with material thickness of 100 mm, but with increase in frequency the maximum sound absorption ratio is achieved with thinner samples.
3. Total macropore area in foam gypsum of $0.44\div 0.46 \text{ mm}^2$ per mm^2 ensures sound absorption ratio of $0.41\div 0.43$, pore area of 0.48 mm^2 per mm^2 ensures sound absorption ratio of 0.52 and foam gypsum with pore area of $0.50\div 0.55 \text{ mm}^2$ per mm^2 ensures sound absorption ratio of 0.61. Total macropore area of 0.57 mm^2 ensures sound absorption ratio of 0.72.
4. For all foam gypsum manufacturing technologies discussed in the thesis, the average maximum value of sound absorption ratio at the entire analyzed frequency range was obtained at material thickness of 50 mm. Samples for model testing were produced with thickness of 40 mm because in case of use of technology with w/g 0.6 and 4 ml of SAS the difference between the sound absorption ratio α for 50 and 40 mm samples is negligent (0.03), making it possible to reduce the material consumption.
5. A mathematical model of moisture drying has been created that adequately describes experimental researches and main foam gypsum samples drying parameters dependence on foam gypsum volume density has been established.
6. Adding disperse hemp shives reinforcement ($2.5\div 5.0 \text{ mm}$ concentration $15\div 50 \text{ g kg}^{-1}$) to foam gypsum increasing bending strength ≈ 1.5 times and improves sound absorption coefficient by $10\div 15 \%$.

IZMANTOTĀ LITERATŪRA/ BIBLIOGRAPHY

1. Akthar F.K., Evans J.R.G. (2010) High porosity (> 90%) cementitious foams. *Cement and Concrete Research*, Vol. 40, No. 2, p. 352-358.
2. Allard J.F., Attala N. (2009) *Propagation of Sound in Porous Media: Modelling Sound Absorbing Materials*. United Kingdom: John Wiley & Sons, Chichester. 358 p.
3. Allin S. (2005) *Building with Hemp*. Ireland: Seed Press Rusheens, Kenmare, Co. Kerry. 151 p.
4. *Ar darba vides troksni saistīto risku novērtēšanas un novēršanas vadlīnijas* [tiešsaiste], Rīga, 2003. [Skatīts 2011.12.12.]. Pieejams: http://osha.lv/lv/publications/docs/troksnis_vadlinijas.pdf
5. Arenas J.P., Crocker M.J. (2010) Recent Trends in Porous Sound-Absorbing Materials, *Sound & Vibration*, Vol. 7, p. 12-17.
6. Bacellar R.S., D'Almeida J.R.M. (2009) Mechanical Properties of Pupunha (*Bactris gasipaes*) Palm. *Chemical Engineering Transactions*, Vol. 17, p. 1771-1776.
7. Brencis R., Iljins U., Skujans J., Gross U. (2012) Research of foam gypsum drying process and heat flow transfer. **In:** *Chemical Engineering Transactions*. Proceeding of international scientific conference. Vol. 29, p. 583-588.
8. Brencis R., Skujans J., Iljins U., Ziemeļis I., Osits N. (2011b) Research on foam gypsum with hemp fibrous reinforcement. *Chemical Engineering Transactions*. Proceeding of international scientific Conference, Vol. 25, p. 159-164.
9. Bruijn P.B., Jeppsson K.H., Sandin K., Nilsson C. (2009) Mechanical properties of lime-hemp concrete containing shives and fibres. *Biosystems Engineering*, Vol. 103, p. 474-479.
10. Chen Z., Sucech S., Faber K.T. (2010) A hierarchical study of the mechanical properties of gypsum. *Journal of Materials Science*, Vol. 45, p. 4444-4453.
11. Cox L., Van Dijk S. (2002) Foam concrete: a different kind of mix. *Concrete*, Vol. 36, No. 2, p. 54-55.
12. D'Almeida A., Mello Filho J., Toledo Filho R. (2009) Use of curaua fibers as reinforcement in cement composites. *Chemical Engineering Transactions*, Vol. 17, p. 1717 – 1722. DOI: 10.3303/CET0917287.
13. Defraeye T., Blocken B., Carmeliet J. (2012) Analysis of convective heat and mass transfer coefficients for convective drying of a porous flat plate by conjugate modeling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 55, p. 112-124.
14. Dincer I., Dost S. (1995) An analytical model for moisture diffusion in solid objects during drying. *Drying Technology*, Vol. 13, p. 425-435.

15. Duval A., Bourmaud A., Augier L., Baley C. (2011) Influence of the sampling area of the stem on the mechanical properties of hemp fibers. *Materials Letters*, Vol. 65, No. 4, p. 797-800.
16. Foret R., Guigou-Carter C., Chene J.B. (2010) Porous material parameters influencing the acoustic performances of building construction systems. **In:** *International scientific conference „Internoise 2010, noise and sustainability”*, 13-16 June 2010 Lisbon Portugal, p. 1-10. CD
17. Grubliauskas R., Butkus D. (2009) Chamber investigation and evaluation of acoustic properties of materials. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, Vol. 17, p. 97-105.
18. *Handbook of Industrial Drying* (2007). Editor A.S. Mujumdar. London: Taylor & Francis Group. 1280 p.
19. *Ieteikumi par ģipša plākšņu, konstrukciju, ģipša apmetumu un plātņu lietošanu ugunsizsardzības konstrukcijās [tiešsaiste]* (2008). Latvijas republikas Ekonomikas ministrija. [Skatīts 2011.03.02.]. Pieejams: <http://www.em.gov.lv/images/modules/items/iet280710.pdf>
20. Iljins U., Skujans J., Ziemelis I., Gross U., Veinbergs A. (2009) Theoretical and experimental research on foam gypsum drying process, **In:** *Chemical Engineering Transactions*. Proceeding of international scientific Conference, Vol. 17, p. 1735-1740.
21. Khan M.R., Chen Y., Belsham T., Laguë C., Landry H., Peng Q., Zhong W. (2011) Fineness and tensile properties of hemp (*Cannabis sativa* L.) fibres. *Biosystems Engineering*, Vol. 108, p. 9-17.
22. Khan M.R., Chen Y., Laguë C., Landry H., Peng O., Zhong W. (2010) Compressive properties of Hemp (*Cannabis sativa* L.) stalks. *Biosystems Engineering*, Vol. 106, p. 315-323.
23. Kubicki B. (2007), Same old sounds new technology for long standing acoustic problems. *Construction Specifier*, Vol. 60, p. 54-60.
24. Kymäläinen H.R., Sjöberg A.M. (2008) Flax and hemp fibres as raw materials for thermal insulation. *Building and Environmental*, Vol. 43, p. 1261-1269.
25. Laukaitis A., Fiks B. (2006) Acoustical properties of aerated autoclaved concrete. *Applied Acoustics*, Vol. 67, p. 284-296.
26. Le Troëdec M., Rachini A., Peyratout C., Rossignol S., Max E., Kaftan O., Fery A., Smith A. (2010) Influence of chemical treatments on adhesion properties of hemp fibres. *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 356, p. 303-310.
27. LVS EN 14246:2006. *Ģipša elementi piekārtajiem griestiem. Definīcijas, prasības un testēšanas metodes*. Rīga: Latvijas Valsts Standarts, 2006.

28. LVS EN ISO 11654:2000. *Akustika - Skaņas absorbētāji ēkās - Skaņas absorbcijas parametri*. Rīga: Latvijas Valsts Standarts, 2000.
29. LVS EN ISO 354:2003. *Akustika. Skaņas absorbcijas mērīšana reverberācijas kamerā*. Rīga: Latvijas Valsts Standarts, 2003.
30. Mathur V.K. (2006) Composite materials from local resources. *Construction and Building Materials*, Vol. 20, p. 470-477.
31. Musielak G., Kieca A. (2009) Temperature dependence of the moisture diffusion coefficient in a high moisture content material. *Chemical and Process Engineering*, Vol. 30, p. 231-242.
32. Nilsson T., Gustafsson P.J. (2007) Influence of dislocations and plasticity on the tensile behaviour of flax and hemp fibres. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 38, p. 1722-1728.
33. Pielikums ziņojumam par kaļķakmens resursu pieejamību Latvijā un iespējām izsludināt starptautisku tenderi jaunas cementa rūpnīcas izveidei. LR ekonomikas ministrija 2005. gada 21. oktobrī [tiešsaiste] [skatīts 2012.09.07.]. Pieejams: <http://www.portalslv.lv/preses-relizes.php?id=119732>
34. Sedan D., Pagnoux C., Smith A., Chotard T. (2008) Mechanical properties of hemp fibre reinforced cement: Influence of the fibre/matrix interaction.. *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 28, p. 183-192.
35. Sgard F.C., Olny X., Atalla N., Castel F. (2005) On the use of perforations to improve the sound absorption of porous materiāls. *Applied Acoustics*, Vol. 66, p.625–651.
36. Skinner C., Peters J., Vandenbroeck J. (2006) Acoustic Absorbers: A third way for the management of sound in automobiles. **In:** *UTECH 2006*. Maastricht, The Netherland, p. 1-14.
37. Skujans J., Iljins U., Ziemeļis I., Gross U., Ositis N., Brencis R., Veinbergs A., Kukuts O. (2010) Experimental research of foam gypsum acoustic absorption and heat flow, **In:** *Chemical Engineering Transactions*, Vol. 19, p.79-84.
38. Skujans J., Vulans A., Iljins U., Aboltins A. (2007) Measurements of Heat Transfer of Multi-Layered Wall Construction with Foam Gypsum. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 27, No. 7, p. 1219-1224.
39. Tang R., Etzion Y. (2004) Comparative studies on the water evaporation rate from a wetted surface and that from a free water surface. *Building and Environment*, Vol. 39, p. 77-86.
40. *Timber Buildings. Low-Energy Constructions* (2010). C.Bene (ed.). Bozen: Bolzano University Press. 175 p.

41. Tran Le A.D., Maalouf C., Mai T.H., Wurtz E., Collet F. (2010) Transient hygrothermal behaviour of a hemp concrete building envelope. *Energy and Buildings*, Vol. 42, p. 1797-1806.
42. Ulme A., Freivalde L. (2009) Atjaunojamo izejvielu attīstība Latvijas teritorijā, *RTU zinātniskie raksti*, 9. sēr., Materiālzinātne, 4. sēj., lpp. 63-67.
43. Voronina N. (1994) Acoustic properties of fibrous materiāls. *Applied Acoustics*, Vol. 42, p. 165-174.
44. Voronina N. (1997) An empirical model for Rigid frame porous materials with high porosity. *Applied Acoustics*, Vol. 51, No. 2, p. 181-198.
45. Voronina N. (1996) Improved empirical model of sound propagation through a fibrous material. *Applied Acoustics*, Vol. 48, p. 121-132.
46. Yang T.L., Chiang D.M., Chen R. (2001) Development of a novel porous laminated composite material for high sound absorption. *Journal of Vibration and Control*, Vol. 7, No. 5, p. 675-698.
47. Yuanjian T., Isaac D.H. (2007) Impact and fatigue behaviour of hemp fibre composites. *Composites Science and Technology*, Vol. 67, p. 3300-3307.
48. Гаджилы Р.А., Меркин А.П. (1981) *Поверхностно-активные вещества в строительстве*. Баку: Азернешр. 131 с.
49. Горлов Ю.П., Меркин А.П., Румянцев Б.М., Кобидзе Т.Е. (1984) Технология облегченных пеногипсовых материалов. **В кн.:** *Высокопрочный гипс в индустриальном строительстве: Тезисы докл.* Рига: ЛатНИИСтроительства, с. 118-121.
50. Скуянс Ю.Р. (1987) *Технологические способы изготовления пеногипса вспениванием на сетках*. Автореф. дис на соиск.канд.техн.наук. 05.23.05. Красково: Строительные материалы и изделия. 24 с.
51. Скуянс Ю.Р., Чучуев А.С., Хоромецкий В.Г. (1984) Исследование реологических свойств гипсовых смесей с добавками ПАВ. **В кн.:** *Технологическая механика бетона*. Рига: Риж.политехн. ин-т, с. 25-32.
52. Шейкин А.Е., Чеховский Ю.В., Бруссер М.И. (1979) *Структура и свойства цементных бетонов*. Москва: Стройиздат. 344 с.
53. Шильд.Е., Кассельман Х.Ф., Дамен.Г., Поленц Р. (1982) *Строительная физика*. Москва: Стройиздат. 293 с.
54. Шмидт Л.М. (1969) *Производство акустических материалов*. Москва: Стройиздат. 175 с.