

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Būvniecības fakultāte
Būvražošanas institūts

Mārtiņš Vīlnītis

Doktora studiju programmas “Būvniecība” doktorants

**JAUNĀS PAAUDZES GĀZBETONA
AR TILPUMMASU 350–400 kg/m³
SILTUMTEHNISKO ĪPAŠĪBU IZPĒTE**

Būvzinātnes nozare

Būvmateriālu un būvtehnoloģijas apakšnozare

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs

Dr.sc.ing., profesors

Juris Noviks

Rīga

2010

UDK 691.327.332+666.973.6.017](043.2)
Vi 517 j

Vilnītis M. Jaunās paaudzes gāzbetona
ar tilpummasu 350 – 400 kg/m³
siltumtehniko īpašību izpēte.
Promocijas darba kopsavilkums.-R.: RTU,
2010.- 23. lpp.

Iespiests saskaņā ar 2010. gada 22. oktobra
RTU Promocijas padomes P-06 lēmumu,
protokols Nr. 5-2010.



Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā «Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai».

ISBN

PROMOCIJAS DARBS
IZVIRZĪTS RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ
INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI

**Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski
aizstāvēts Rīgas Tehniskās universitātes Būvniecības fakultātes zālē, Āzenes ielā 16,
2011. gada. 4. februārī plkst. 14.15.**

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors, Dr. sc. ing. Juris Smirnovs, Rīgas Tehniskā universitāte

Profesors, Dr. sc. ing. Egils Dzelzītis, Rīgas Tehniskā universitāte

Dr. sc. ing. Genādijs Fareņuks, Kijevas Valsts būvkonstrukciju pētniecības institūts,
Būvniecības fizikas un enerģijas taupīšanas nodaļas vadītājs

APSTIPRINĀJUMS

**Apstiprinu, ka esmu izstrādājis doto promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai
Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai. Promocijas
darbs nav iesniegts nevienā citā universitātē zinātniskā grāda iegūšanai.**

Mārtiņš Vilnītis(paraksts)

Datums: 2010. gada 28. septembrī

**Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā. Tas satur ievadu, 5 nodaļas,
slēdzienu, bibliogrāfijas sarakstu, 52 zīmējumus un ilustrācijas, kopā 130 lappuses.
Bibliogrāfijas sarakstā ir 85 nosaukumi.**

DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Tēmas aktualitāte

Ņemot vērā straujos būvniecības attīstības tempus un piedāvāto materiālu klāstu Baltijas jūras valstu tirgū, ir radušies jautājumi par atsevišķu materiālu atbilstību būvniecības apstākļiem Baltijas klimatiskajā reģionā. Konkrēti tiek diskutēts par norobežojošo konstrukciju no jaunās paaudzes gāzbetona blokiem ar tilpummasu 350–400 kg/m³ žūšanas procesiem un to ietekmi uz konstrukcijas siltumtehnikajām īpašībām.

Līdz šim ir veikti diezgan daudz eksperimentālie pētījumi ārsienām no gāzbetona blokiem ar tilpummasu 500–700 kg/m³, tomēr pārsvarā tie neatbilst būvniecībai mitra klimata režīma apstākļos, kādi ir raksturīgi tieši Baltijas jūras valstu reģionā. Turklāt veiktajos eksperimentos nav pētīta apdares slāņu ietekme uz gāzbetona ārsienu siltumtehnikajiem procesiem. Var secināt, ka iepriekš veiktie pētījumi pārsvarā neatbilst reāliem apstākļiem, kādi ir raksturīgi būvniecības darbu veikšanas tehnoloģiskajai secībai. Tas nozīmē, ka, izmantojot iepriekš veikto pētījumu datus, var iegūt tikai daļēju priekšstatu par siltuma plūsmas un mitruma migrācijas procesiem jaunās paaudzes gāzbetona bloku ārsienās.

Darba mērķis un uzdevumi

Promocijas darba mērķis ir izstrādāt mitruma migrācijas un siltuma plūsmas procesu aprēķinu modeli jaunās paaudzes gāzbetona ārsienās un veikt piedāvātā aprēķinu modeļa eksperimentālu pārbaudi Baltijas klimatiskajā reģionā, ņemot vērā praktizēto būvniecības tehnoloģiju.

Ņemot vērā jau zināmo un izpētīto informācijas apjomu, tiek precizēti uzdevumi, lai sasniegtu promocijas darba mērķi. Uzstādītā mērķa realizācija paredz šādu uzdevumu risināšanu:

1. Savstarpējo mitruma migrācijas un siltuma plūsmas procesu analīze ēku un būvju ārsienu norobežojošajās konstrukcijās.
2. Veikt eksperimentālu pētījumu par mitruma migrācijas un siltuma plūsmas procesiem jaunās paaudzes gāzbetona ārsienās atbilstoši Baltijas jūras valstu klimata režīmam.
3. Iegūto eksperimentālo datu apstrāde, izvērtēšana un rezultātu interpretācija.
4. Mitruma migrācijas un siltuma plūsmas procesu modelēšanas metodoloģijas

- izstrādāšana gāzbetona ārsienām, pamatojoties uz fraktālo pieeju un difūziju gāzbetonā.
5. Programmas izstrādāšana, kas modelē mitruma migrācijas un siltuma plūsmas procesus gāzbetona ārsienās.
 6. Aprēķinu veikšana un iegūto rezultātu analīze, izmantojot eksperimentāli iegūtos datus.
 7. Rekomendāciju izstrādāšana jaunās paaudzes gāzbetona ar tilpummasu 350–400 kg/m³ izmantošanas efektivitātes paaugstināšanai.

Darba zinātniskā novitāte

Promocijas darba mērķis ir iegūt rezultātus, kuriem būtu zinātniska un praktiska pielietojamība, kā arī sniegt atbildes uz aktuāliem jautājumiem, kas saistīti ar jaunās paaudzes gāzbetona ar tilpummasu 350–400 kg/m³ izmantošanu ārsienas konstrukcijās. Atbilstošs ir pētījuma priekšmets – mitruma migrācijas un siltuma plūsmas procesi, ēku un būvju celtniecības un ekspluatācijas kvalitātes paaugstināšana, pamatojoties uz eksperimentālās būves no jaunās paaudzes gāzbetona blokiem ar tilpummasu 350–400 kg/m³ īpašību analīzes rezultātiem. Darba gaitā ir izstrādāts jaunās paaudzes gāzbetona bloku ārsienas mitruma migrācijas un siltuma plūsmas režīmu aprēķina modelis.

Izmantojot mitra materiāla līdzsvarota stāvokļa modeli, kas atkarīgs no apkārtējās vides relatīvā mitruma cikliski mainīgas temperatūras apstākļos (diennakts cikls), ir nepieciešams formulēt nelīdzsvarota stāvokļa modelēšanas metodoloģiju jaunās paaudzes gāzbetona blokā. Promocijas darbā jaunās paaudzes gāzbetona struktūra tiek apskatīta kā “slāņveida” kopums, kur slāņi ir salikti viens virs otra, turklāt katram no “slāņiem” atbilst noteikts poru izmērs un izkārtojums. Šajā gadījumā mitrumam, kas atrodas konkrētā “slānī” ar vismazākajām porām, lai tiktu materiāla virspusē un iztvaikotu, ir jāiziet secīgi cauri “slāņiem”, kuros ir aizvien lielākas poras, un, visbeidzot, virzoties jau pa vienlaidus savienotajām porām, ir jāsasniedz bloka virspuse. Tādējādi šādu “slāņu” sakopojums rada noteiktu strukturālo telpu, kas aprakstāma ar strukturālajiem mainīgajiem lielumiem.

Tieši pamatojoties uz poru izmēru un izkārtojumu jaunās paaudzes gāzbetona materiālā, ir izstrādāts piedāvātais mitruma migrācijas un siltuma plūsmas procesu aprēķinu modelis. Ņemot vērā promocijas darbā izstrādātā gāzbetona siltumtehniko īpašību aprēķina modeļa korigēšanas iespējas, var iegūt samērā precīzu rezultātu, kurš sakrīt ar eksperimentāli iegūtajiem pētījumu rezultātiem. Savukārt ar izstrādāto datorprogrammu ir iespējams modelēt

temperatūras sadalījumu jaunās paaudzes gāzbetona ārsienas biezumā, kā arī mitruma saturu un mitruma agregātstāvokli. Tas dod iespēju veikt aprēķinus dažādiem ēku tipiem atšķirīgās ekspluatācijas apstākļu stadijās.

Darba praktiskā vērtība

Galvenā promocijas darba praktiskā nozīme ir eksperimentu rezultātā iegūtā apjomīgā datubāze par jaunās paaudzes gāzbetona siltumtehnikajām īpašībām Baltijas klimatiskajā reģionā. Jāatzīmē, lai gan ir veikti līdzīgi pētījumi jau iepriekš, šajā gadījumā ir iegūtas trīs būtiskas atšķirības. Pirmkārt, izpētītās ārsienas ir veidotas no jaunās paaudzes gāzbetona blokiem ar tilpummasu 350–400 kg/m³, veidojot šuves ar līmjavu. Otrkārt, eksperiments ir veikts Tallinā, kur ir raksturīgi mitri klimatiskā režīma apstākļi. Un, treškārt, ārsienām ir izveidota gan iekšējās, gan ārējās apdares kārtas, kas ietekmē gan sienu žūšanas, gan arī siltumtehnikos rādītājus. Tieši visu šo trīs faktoru kopums piešķir veiktajiem eksperimentiem pievienoto vērtību no praktiskās pielietojamības aspekta.

Veiktā pētījuma rezultātus ir iespējams izmantot, papildinot Latvijas būvnormatīvu LBN 002-01 “Ēku norobežojošo konstrukciju siltumtehnika”. Tas dotu daudz precīzāku ieskatu gāzbetona ārsienu žūšanas un siltumtehnikajos procesos, kas raksturīgi būvniecībai Baltijas klimatiskajā reģionā.

Darba rezultātus ir iespējams izmantot, reālu objektu tehnikajā apsekošanā, pielietojot nesagraujošās pārbaudes metodes. Savukārt eksperimentāli iegūtos rezultātus par dažādu apdares materiālu ūdens tvaiku pretestības faktora ietekmi uz gāzbetona ārsienu žūšanas procesu var veiksmīgi izmantot dažādu siltumtehniko aprēķinu veikšanai.

Promocijas darba izstrādes gaitā izveidoto datorprogrammu var sekmīgi izmantot dažādu siltumtehniko aprēķinu veikšanai norobežojošās jaunās paaudzes gāzbetona bloku konstrukcijās.

Darba nozīmes vērtējumā ir izdalāmi trīs galvenie virzieni, kuros var sekmīgi izmantot iegūtos rezultātus:

- praktiskā nozīme – iegūta apjomīga datubāze par jaunās paaudzes gāzbetona ārsienu mitruma migrācijas un siltuma plūsmas procesiem un izstrādāti priekšlikumi izmaiņām Latvijas būvnormatīvā LBN 002-01 “Ēku norobežojošo konstrukciju siltumtehnika”;
- zinātniskā nozīme – izstrādāts un eksperimentāli pamatots jaunās paaudzes gāzbetona

bloku ārsienu mitruma migrācijas un siltuma plūsmas režīmu aprēķina modelis;

- pedagoģiskā nozīme – lekciju kursa par ārsienu norobežojošo konstrukciju siltumtehnikajām īpašībām papildināšanai.

Aizstāvēšanai tiek izvirzīti šādi pētījuma rezultāti

- Pirmo reizi iegūti apjomīgi eksperimentālie dati par mitruma migrācijas un siltuma plūsmas procesu mijiedarbību jaunās paaudzes gāzbetona bloku ar tilpummasu 350–400 kg/m³ ārsienās Baltijas valstu klimatiskajā zonā.
- Izpētīta dažādu apdares materiālu ūdens tvaika pretestības faktora ietekme uz jaunās paaudzes gāzbetona ārsienu žūšanas procesu un ekspluatācijas rādītājiem.
- Mitruma migrācijas procesu savstarpējā saistība ar siltumtehnikajiem procesiem jaunās paaudzes gāzbetona bloku ar tilpummasu 350–400 kg/m³ ārsienās, ņemot vērā fasādes orientāciju.
- Izveidots un eksperimentāli pamatots mitruma migrācijas un siltuma plūsmas procesu aprēķinu modelis jaunās paaudzes gāzbetona ārsienās.
- Izstrādāti priekšlikumi izmaiņām Latvijas būvnormatīvā LBN 002-01 “Ēku norobežojošo konstrukciju siltumtehnika”.

Darba sastāvs un apjoms

Promocijas darbs sastāv no 5 nodaļām, slēdziena un bibliogrāfijas saraksta.

Darba apjoms: 130 lappuses, 52 attēli, 4 tabulas, bibliogrāfijas saraksts satur 85 nosaukumus.

Promocijas darba rezultāti ir ziņoti un apspriesti 5 starptautiskās konferencēs:

- 4-я Международная научно-практическая конференция “Опыт производства и применения ячеистого бетона автоклавного твердения” (Minska, Baltkrievija, 2006. g. maijs)
- 2-я Международная научно-практическая конференция “Ячеистые бетоны и силикатный кирпич в современном строительстве технология производства, опыт использования” (Kijevas, Ukraina, 2007. g. marts)
- 48. RTU starptautiskā zinātniskā konference (Rīga, 2007. g. oktobris)
- 11th International Conference, Heat transfer 2010 (Tallina, Igaunija, 2010. g. 14.–16. jūlijs)

- 1st Central European Symposium on Building Physics (Krakova, Polija, 2010. g. 13.–15. septembris)

Pētījumu problēmas un rezultāti ir izklāstīti 6 publikācijās (sk. 22. lpp.).

DARBA SATURS

Pirmajā nodaļā ir apkopota bibliogrāfiskajos avotos atrodamā informācija par siltumtehnikajiem procesiem ēku norobežojošās konstrukcijās, veiktajiem pētījumiem, to rezultātiem un aktuālajām problēmām.

Eksperimentālā ceļā ir atklātas galvenās likumsakarības un mehānismi siltuma un mitruma pārnesei porainos materiālos. Praktiskā pieredze pierāda, ka porainos materiālos nav atdalāma mitruma difūzija no siltuma plūsmas un siltuma un mitruma plūsmas procesus ir nepieciešams aplūkot to nesaraujamā saiknē. Tādēļ mitruma migrācijas procesu aprakstam porainos materiālos tiek lietotas metodes un pieejas, kas ir izmantojamas arī siltuma pārnesei procesu pētījumos. Ir nepieciešams izsekot siltuma plūsmas un mitruma migrācijas procesu pētījumiem norobežojošajās konstrukcijās, lai atklātu galvenās likumsakarības, kas ir jāievēro būvniecībā tāda perspektīva būvmateriāla kā jaunās paaudzes gāzbetons optimālai izmantošanai.

Otrajā nodaļā ir dots teorētiskais pamatojums siltuma plūsmas un mitruma migrācijas procesiem gāzbetona ārēsienu norobežojošās konstrukcijās. Šajā nodaļā ir apkopotas un analizētas gāzbetona norobežojošo konstrukciju siltuma un mitruma režīma aprēķina metodes.

Siltuma plūsmas un mitruma migrācijas procesu jautājumi gāzbetona norobežojošās konstrukcijās ir samērā plaši aplūkoti zinātniski tehniskajā literatūrā. Īpaša uzmanība šajos darbos ir veltīta porainās struktūras un šuvju materiāla kvalitātes ietekmei uz tehnoloģiskajām un siltumtehnikajām īpašībām, it īpaši uz materiālu salizturību.

Galvenie siltuma daudzuma izplatīšanās mehānismi ir trīs:

1. Siltuma vadīšana (siltuma daudzums vielā tiek pārnesti, molekulām saduroties to haotiskā termiskā kustībā). Siltuma vadīšanu apraksta Furjē vienādojums.
2. Konvekcija (siltuma daudzums tiek pārnesti ar masas plūsmu). To apraksta Ņūtona atdzišanas likums.
3. Termiskais starojums (siltuma daudzums tiek pārnesti elektromagnētiskā starojuma veidā). To apraksta Stefana-Bolcmana likums.

Savukārt pie mitruma pārnesei procesiem porainos materiālos tiek izdalīti dažādi atšķirīgi mehānismi: difūzija, termodifūzija, barodifūzija, virspusējā difūzija, mitruma

plēvītes tecēšana, termokapilārā tecēšana, kapilārā pārnese un tā tālāk. Jāņem vērā, ka ne visi mitruma pārneses mehānismi veido ievērojamu daļu no kopējās mitruma plūsmas materiālā. Pie neliela mitruma daudzuma materiālā pārnese pamatā notiek tvaika veidā. Turklāt noteicošais mitruma pārneses mehānisms ir difūzija. Difūzijas procesā ūdens tvaiks pārvietojas gaisā, aizpilda materiāla poras no apgabala ar augstu koncentrāciju uz apgabalu ar zemu mitruma koncentrāciju. Par mitruma pārneses potenciālu šajā gadījumā tiek pieņemta mitruma koncentrācija materiāla porās.

Galvenā loma mitruma pārneses procesu aprakstā ir diviem faktoriem: pirmkārt, atbilstoša mitruma pārneses potenciāla izvēle, kura gradients noteic procesa intensitāti, un, otrkārt, atbilstošo mitruma pārneses koeficientu izvēle, kas ir saistīti ar izvēlēto potenciālu un kuros ir aplēpta procesa fizika. Mūsdienās eksperimentālie mitruma pārneses pētījumi, tai skaitā arī pārneses koeficientu noteikšana, tiek reducēti uz mitruma satura un temperatūras lauka mērījumiem.

Nelīdzsvarotā termodinamika ļauj pētīt mitruma migrācijas un siltuma plūsmas procesus jaunās paaudzes gāzbetona norobežojošās konstrukcijās nestacionāros režīmos, kuru nestacionārums pakāpi var raksturot ar histerēzes cilpas laukumu. Turklāt histerēzes cilpu var izveidot, kombinējot dažādus lielumus, kā piemēram, mitrums un temperatūra vai siltuma plūsma un siltumvadītības koeficienta efektīvā vērtība utt.

Vienu no zināmākajām nestacionārām aprēķinu metodēm ir izstrādājis K. F. Fokins, un tā tiek saukta par "secīgās mitrināšanas metodi". V. N. Bogoslovskis ieviesa relatīvā mitruma potenciāla jēdzienu, kurš raksturo ne tikai materiāla, bet arī gaisa vides mitruma stāvokli. Pašreiz dotā metode tiek rekomendēta norobežojošo konstrukciju materiālu mitruma stāvokļa novērtēšanai. Mūsdienās norobežojošo konstrukciju siltuma un mitruma režīma aprēķina metodes, izmantojot mitruma potenciālu, tālāk attīsta A. G. Perehožencevs un S. V. Korņijenko. Eiropas Savienības valstīs izstrādāto aprēķina metožu vairākums kā galveno mitruma pārneses mehānismu izmanto ūdens tvaika difūziju. Kā vienu no mūsdienās plaši izmantojamām siltuma un mitruma režīma aprēķina metodēm var pieminēt Vācijas Būvniecības fizikas institūtā izstrādāto zinātnieka H. M. Kincela (*H. M. Künzel*) modeli. Piedāvātā aprēķinu metode apraksta mitruma pārnesi porainos būvmateriālos kā šķidra mitruma plūsmu un tvaikveida mitruma plūsmu. Pēdējā laikā aktīvi tiek izstrādāti pārneses koeficientu atjaunošanas algoritmi ar apgriezto uzdevumu risinājuma metodi. Aprēķiniem par izejošajiem datiem kalpo izmērītie temperatūru un mitruma lauki izpētāmajā materiāla paraugā.

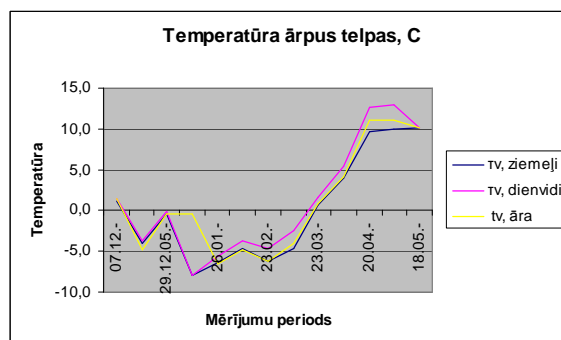
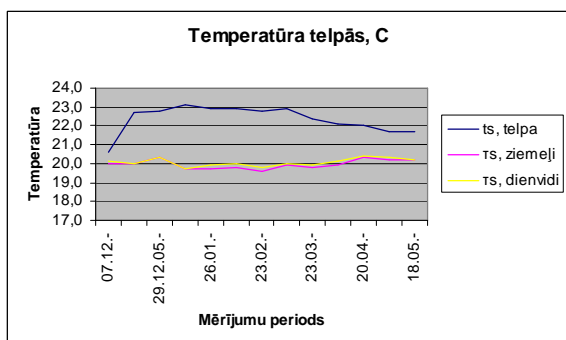
Trešajā nodaļā tiek aprakstīti promocijas darba izstrādāšanas laikā iegūtie eksperimentālie rezultāti par siltumtehnikai procesiem jaunās paaudzes gāzbetona bloku ārsienās.

Atšķirībā no iepriekšējiem eksperimentiem ir veikta jaunās paaudzes gāzbetona ārsienas, kas būvētas no blokiem ar tilpummasu 350–400 kg/m³, siltumtehniko procesu izpēte atbilstoši mitra klimata režīma būvniecības apstākļiem, kādi ir raksturīgi Baltijas jūras valstu reģionā. Tika izveidoti fasādes fragmenti (1. attēls) no gāzbetona blokiem ar tilpummasu ~380 kg/m³ ēkas dienvidu un ziemeļu pusē, kuros ~2,5 gadu garumā tika fiksēti mitruma migrācijas un siltuma plūsmas procesi. Šo sienu veidošanā ir izmantoti bloki, kuru mitrums ir līdzīgs praksē lietojamo bloku mitrumam, kā arī aptuveni pēc viena gada no ēkas būvniecības sākuma ir izveidota gan iekšējā, gan arī ārējā apdares kārtā. Ēkas iekšējai klimatiskais režīms ir uzturēts atbilstoši individuālajās dzīvojamās mājās pieņemtajām normām, un visi iegūtie mērījumu rezultāti ir apkopoti un uzglabāti elektroniskajos datu nesējos.

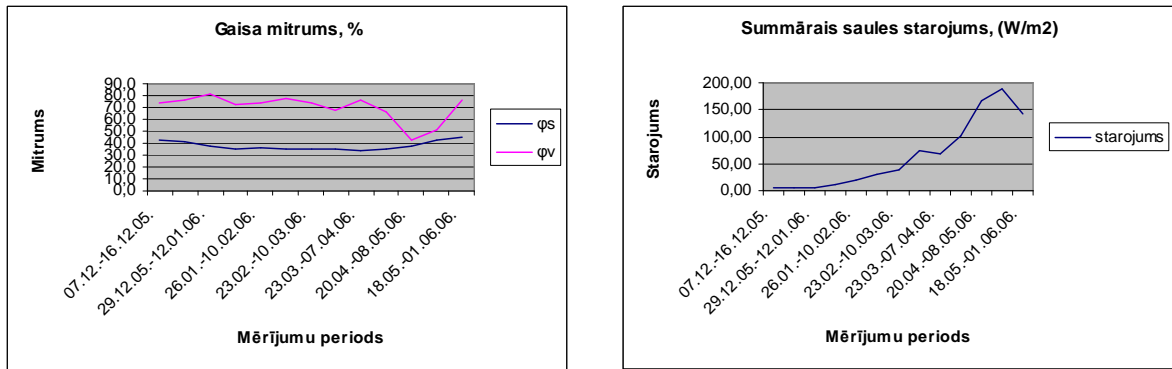


1. attēls. Jaunās paaudzes gāzbetona bloku sienas fragments

Eksperimenta laikā fiksētie laika apstākļi uzskatāmi ir parādīti 2. attēlā, kur ar simbolu “s” ir apzīmēti iekšējai rādītāji, savukārt ar simbolu “v” – rādītāji ārpus telpas.

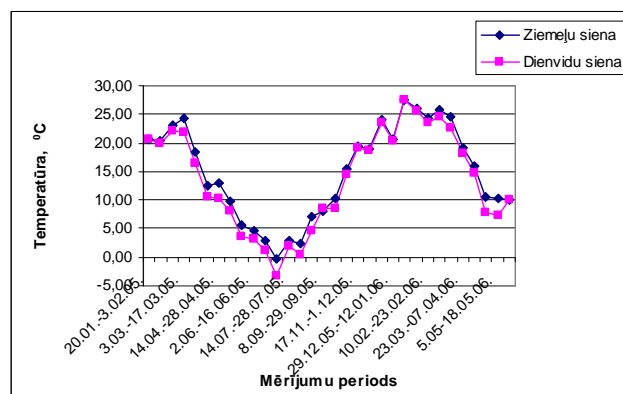


2. attēls. Detalizēts laika apstākļu raksturojums eksperimenta laikā



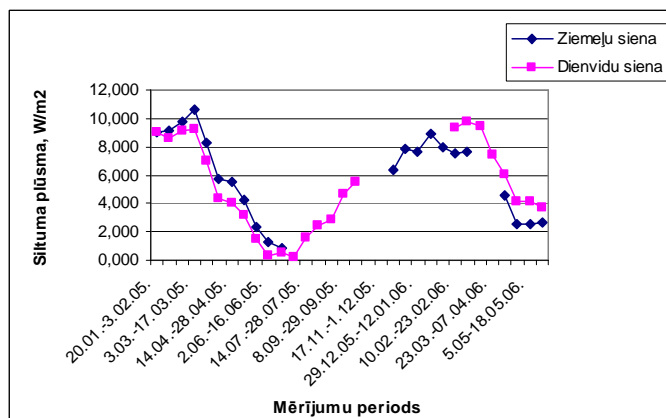
2. attēls. Detalizēts laika apstākļu raksturojums eksperimenta laikā

Siltuma plūsma tika mērīta, izmantojot ierīci ALMEMO – 2290 – 8 ar devējiem FQA017C un FQA019C. Tāpat tika mērīta arī abu eksperimentālo sienu virsmu temperatūra ar HOBO tipa logeriem. Veiktie sienas virsmu temperatūru mērījumi ir apkopoti un uzrādīti 3. attēlā. Ņemot vērā, ka iekštelpu virsmas temperatūras svārstības gada laikā nav ievērojamas, grafiski ir attēlotas tikai dienvidu un ziemeļu sienas virsmu temperatūru starpības.



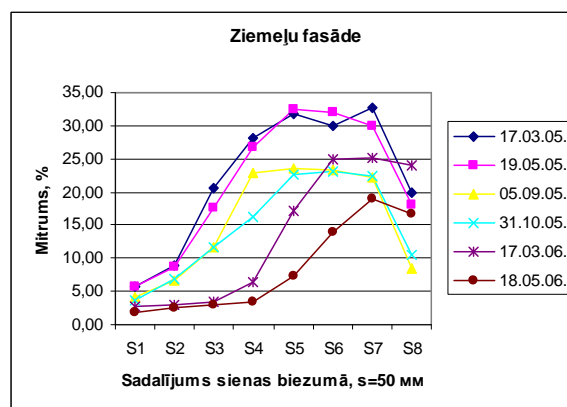
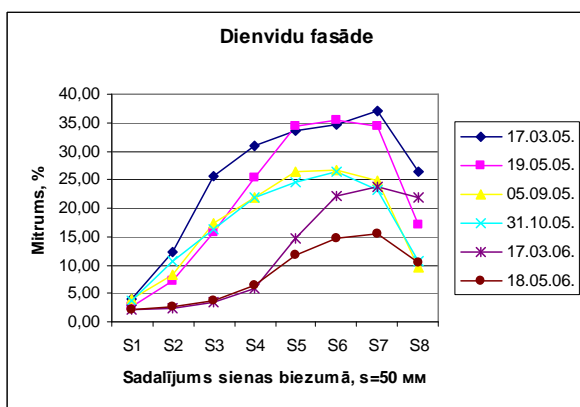
3. attēls. Gāzbetona ārējās ārējās virsmas temperatūra

Veiktie siltuma plūsmas mērījumi ir apkopoti un uzrādīti 4. attēlā. Analizējot iegūtos eksperimentālos datus, ir jāsecina, ka siltuma plūsmu ietekmē gan sienas mitrums, gan sienas virsmu temperatūras starpība, gan saules aktivitāte.



4. attēls. Siltuma plūsma gāzbetona ārsienā

Lai noteiktu mitruma sadalījumu sienas biezumā, no sienas tika izņemti paraugi, kuriem noteica mitrumu atbilstoši Eiropas standarta EN 1353 metodikai. Paraugi tika izurbti no sienas vidējās daļas ar soli (sienas biezumā) ~50 mm. Atbilstoši standarta prasībām paraugi tika nosvērti uzreiz pēc izņemšanas (mitrā stāvoklī) un uzreiz pēc izņemšanas no žāvēšanas kameras, kad tie bija sasnieguši konstantu svaru. Paraugi tika ņemti gan no dienvidu, gan no ziemeļu sienu fragmentiem, kopumā 6 reizes. Iegūto rezultātu dati ir apkopoti un attēloti 5. attēlā.



5. attēls. Mitruma sadalījums jaunās paaudzes gāzbetona sienā

Mitruma sadalījums dienvidu un ziemeļu sienā atšķiras, tomēr abām fasādēm vidējais mitrums ir ļoti līdzīgs. Tas ir izskaidrojams ar diviem faktoriem. Pirmais, aptuveni pēc gada tika izveidota gan sienas iekšējā, gan ārējā apdare, kas, protams, ietekmē mitruma kustību. Savukārt kā otro faktoru varētu minēt saules aktivitāti, kas paaugstina dienvidu sienas virsmas temperatūru un veicina tās žūšanas procesu lielākā mērā, nekā tas ir novērojams ziemeļu sienai.

Iegūtie eksperimentālie dati ļauj izdarīt secinājumus par gāzbetona ārsienu siltumtehnikajiem rādītājiem apstākļos, kuri ir ļoti tuvi reālajai būvniecībai. Tā rezultātā

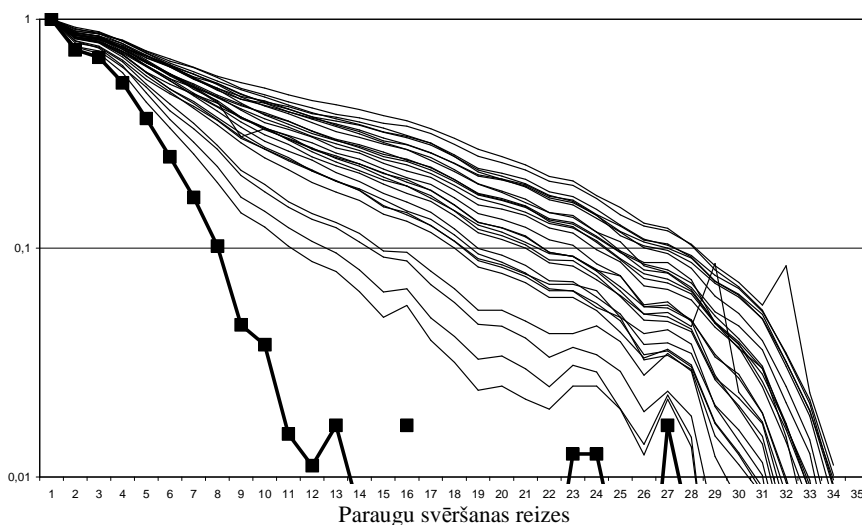
ir iegūta apjomīga mērījumu datubāze, kura sniedz pilnīgāku priekšstatu par gāzbetona norobežojošo konstrukciju siltumtehnikajām īpašībām Baltijas jūras valstu reģionam raksturīgos ekspluatācijas apstākļos.

Lai noskaidrotu tieši ārējās apdares ietekmi uz mitruma migrācijas procesu gāzbetona ārsienās, tika veikts eksperiments ar 15 paraugu pāriem, kuriem bija atšķirīgas apdares (6. attēls). Viens no sagatavotajiem paraugu pāriem bija bez apdares, savukārt pārējiem paraugu pāriem tikai izveidotas dažādas apdares kombinācijas no firmas “Sakret” materiāliem – KAM, BG, CLR, BAK, PG, LH, silikāta grunts, silikāta krāsa, SBR2 un MRP2. Sagatavotie paraugi tika nosvērti pirms apdares kārtas uzklāšanas, pēc apdares kārtas uzklāšanas un žāvēti četru mēnešu garumā dabiskos apstākļos laika periodā no 2007. gada 18. maija līdz 2007. gada 24. septembrim. Eksperimenta laikā sagatavotie paraugi vidēji zaudēja 0,64 kg no sākotnējā svara, un faktiski tika sasniegts līdzsvara mitrums katrā no gāzbetona paraugiem.



6. attēls. Jaunās paaudzes gāzbetona bloku paraugi

Sagatavoto gāzbetona bloku paraugu ar dažādu ārējo apdari žūšanas dinamika uzskatāmi ir parādīta 7. attēlā. Starpība starp bloka svaru eksperimenta sākumā un eksperimenta beigās (mitruma svars) tika salīdzināta ar viens un attēlota logaritmiskā mērogā. Ir redzams, ka paraugu žūšanas procesu var samērā labi aprakstīt ar eksponenciāliem funkcijas grafikiem. Pēc eksperimenta rezultātiem var secināt, ka apdares materiāla ietekme uz gāzbetona ārsienas žūšanas procesu ir ievērojama, jo atšķirība starp parauga bez apdares un ar visneizdevīgāko apdares kombināciju žūšanas laiku ir aptuveni 2,5 reizes. Savukārt analizējot dažādu apdares materiālu kombināciju ietekmi uz mitruma migrāciju konkrētajā eksperimentā, var secināt, ka tā nav būtiska, jo izmaiņas no vidējā lieluma ir aptuveni 10 procentu robežās.



7. attēls. Gāzbetona bloku paraugu ar dažādu apdari žūšanas dinamika starp svēršanas reizēm

No apskatītā eksperimenta rezultātiem var izdarīt secinājumu, ka ārsienas apdari ir vēlams veikt pēc pirmās apkures sezonas ar tādiem apdares materiāliem, kuriem ūdens tvaika pretestības faktora μ vērtība ir tuva jaunās paaudzes gāzbetona ūdens tvaika pretestības faktora μ vērtībai.

Ceturtajā nodaļā ir aprakstīts promocijas darbā izstrādātais siltuma plūsmas un mitruma migrācijas procesu aprēķina modelis.

Aprēķinu modelis tiek veidots uz iepriekšējās nodaļās pamatotā “daudzkārtu” modeļa materiāla bāzes, kad visas vērā ņemamās “kārtas” atrodas telpiski vienā un tajā pašā jaunās paaudzes gāzbetona apgabalā. Par ārējo kārtu, kas apmainās ar mitrumu apkārtējā vidē, var uzskatīt savienoto, atvērto poru sistēmu, ko aizpilda mitrs gaiss. Mitruma pārnese šajā kārtā notiek uz ūdens tvaika difūzijas rēķina gaisā un uz poru ventilācijas rēķina, kuras ir samērojamas pēc savstarpējās iedarbības. Turklāt pirmā kārtā apmainās ar mitrumu ar nākamo kārtu – poru sistēmu, kuras ir tikai daļēji atvērtas. Šajā otrajā kārtā notiek sorbcija un mitruma desorbcija saskaņā ar sorbcijas-desorbcijas līkni. Tādējādi otrā kārtā, kas sastāv no sīku, daļēji atvērtu, neventilējamu poru sistēmas, atrodoties līdzsvarā ar mitro gaisu, kas aizpilda pirmās kārtas savienotās poras, uzņem mitrumu robežās no 3,5% līdz 6%.

Mitruma pārnese procesa pilnvērtīgam aprakstam ir nepieciešams izmantot arī trešo kārtu modeli, jo jaunās paaudzes gāzbetona mitrums tieši pēc tā izgatavošanas var sasniegt līdz pat 40% no svara mitruma, kas pārsniedz sorbcijas-desorbcijas līknē uzrādītās robežas. Tas ir jāņem vērā laika intervālos, kas ir būtiski mazāki nekā jaunās paaudzes gāzbetona žūšanas pilnais laiks. Nosacīti var uzskatīt, ka trešā kārtā sastāv no noslēgtām porām, kas

nodalītas no otrās kārtas porām ar vienlaidu vielas kārtu. Noslēgtās poras, kuras pēc jaunās paaudzes gāzbetona izgatavošanas daļēji aizpilda mitrums, pēc tam pārnes mitrumu otrās kārtas porās ar ātrumu, kas ir proporcionāls relatīvā gaisa mitruma atšķirībai otrajā kārtā no trešās kārtas relatīvā mitruma.

Jaunās paaudzes gāzbetona materiāla elementārā apgabala mitruma migrācijas vienādojumu sistēmu var pierakstīt šādi:

$$\frac{\partial}{\partial t} \omega_3 = -D_{32}(\omega_{20} - \omega_2), \text{ ja } \omega_3 > 0, \frac{\partial}{\partial t} \omega_3 = 0 \text{ ja } \omega_3 = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \omega_2 = -\frac{\partial}{\partial t} \omega_3 - P_{10}^{-1} D_{21}(p_{10} - p_1) \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} p_1 = D_{11} \frac{\partial^2}{\partial x^2} p_1 - V_x \frac{\partial}{\partial x} p_1 - D_{21}(p_1 - p_{10}) \quad (3)$$

kur t – laiks, $\omega_3(\bar{x})$ – materiāla apjoma mitrums izteikts %, $D_{32}(T)$ – koeficients, kas nosaka mitruma difūziju starp gāzbetona 2. un 3. kārtu, $\omega_{20}(T)$ – 2. kārtas galējais mitruma piesātinājums (aptuveni 10%), $\omega_2(\bar{x})$ – materiāla apjoma mitrums izteikts %, P_{10} [Pa] – koeficients, kurš atkarīgs no atvērto, savienoto poru daudzuma gāzbetona materiāla elementārā apgabalā, $D_{21}(T)$ – koeficients, kas nosaka iztvaikošanas ātrumu otrās kārtas porās, $p_{10}(\omega_2, T)$ – piesātināta ūdens tvaika spiediens, kas attiecināms uz atvērtajām neventilējamām porām, $p_1(\bar{x})$ – ūdens tvaiku spiediens, kas attiecas uz atvērtajām savienotajām (ventilējamām) porām, $D_{11}(T)$ – koeficients mitruma difūzijai gaisā no atvērtajām, savienotajām porām, V_x – gaisa plūsmas ātrums atvērtajās, savienotajās porās sienas virsmas virzienā, $T(\bar{x})$ – temperatūra.

Neņemot vērā sarežģīto un atšķirīgo jaunās paaudzes gāzbetona poru struktūru,

lielumu $P_{10}(\bar{x}, T)$ var izteikt šādā veidā:

$$P_{10}(\bar{x}, T) = \frac{p_1}{\omega_2} \frac{p_{10}(T)}{\omega_2} \left(\frac{RT}{m_u} \right) \rho_u K_1^{-1} = \frac{m_g \rho_u}{m_u \rho_g K_1} P_0 \approx 6000 P_0, \quad (4)$$

ja $K_1 \approx 0,2$

kur R – universālā gāzes konstante, $m_u = 18$ – ūdens molekulas molārais svars, ρ_u – ūdens blīvums šķidrā stāvoklī, $m_g = 29$ – gaisa molārais svars, ρ_g – gaisa blīvums, P_0 – atmosfēras spiediens, $K_1 \approx 0,2$ – aptuvenis atvērto, savienoto poru daudzums gāzbetona materiāla elementārā apgabalā.

Mitruma migrācijas vienādojumi (1) – (3) ir jāpapildina ar sākuma nosacījumiem un robežnoteikumiem, kā arī siltuma plūsmas vienādojumiem. Sastādot siltuma plūsmas vienādojumus, nav jāņem vērā siltums, kurš rodas mitruma iztvaikošanas rezultātā. Tas ir iespējams, ņemot vērā faktu, ka jaunās paaudzes gāzbetona ārsienas žūšanas process notiek vairāku gadu garumā, savukārt temperatūras svārstības ārsienas biezumā izlīdzinās dažu dienu laikā. Tomēr, sastādot šos vienādojumus, ir jāņem vērā siltums, kurš rodas kūstot sasalušam ūdenim, jo ātrums, kādā ūdens pārvēršas par ledu (pāriet citā agregātstāvoklī), nav aprobežots ar mitruma migrācijas ātrumu jaunās paaudzes gāzbetona bloka porās.

Ņemot vērā augstāk minēto, siltuma plūsmas vienādojumus jaunās paaudzes gāzbetona ārsienās var pierakstīt šādi:

$$\frac{\partial}{\partial t} q(T, \omega) = \vec{\nabla} [L(T, \omega) \vec{\nabla} T] \quad (5)$$

$$L(T, \omega) = L_0 + L_T(T - T_0) + L_\omega \omega \quad (6)$$

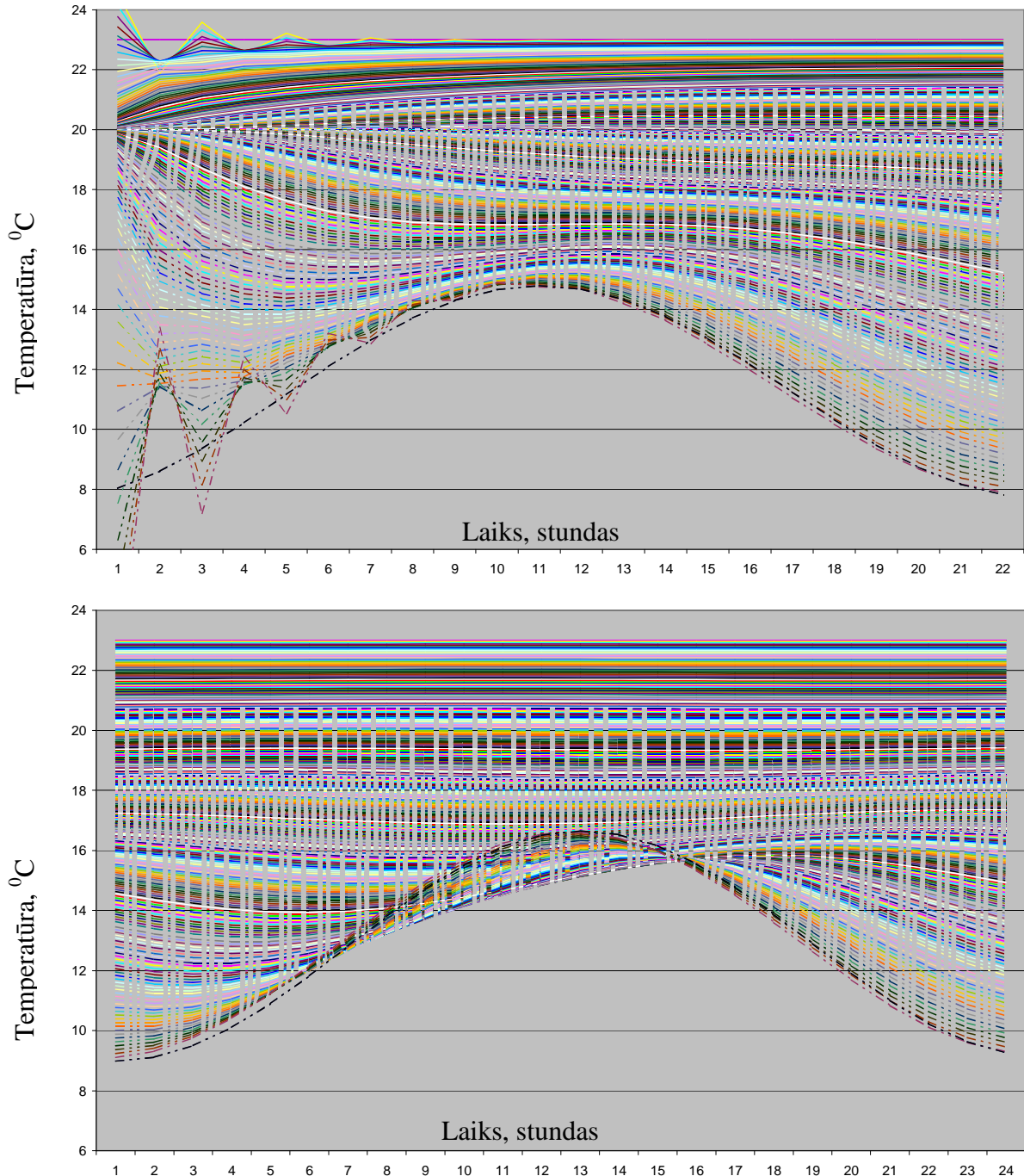
$$q(T, \omega) = (T - T_0)(q_T + q_\omega \omega) + q_\lambda \omega \Phi(T - T_0), \quad \Phi(x) = \begin{cases} 0 & , x < 0 \\ 1 & , x \geq 0 \end{cases} \quad (7)$$

kur $\omega = \omega_2 + \omega_3$ – gāzbetona apjoma mitrums, $q(T, \omega)$ – siltuma enerģijas blīvums, $L(T, \omega)$ – siltumcaurlaidība, T_0 – ūdens sasalušanas temperatūra (0°C), L_T , L_ω , q_T , q_ω – lineārie tuvinājuma koeficienti, bet ar q_λ – ievērtē siltumu, kurš rodas sasalušā mitruma kušanas rezultātā.

Promocijas darbā izstrādāto nelineāro vienādojumu sistēma (5) – (7) ir atšķirīga no jau zināmo lineāro siltuma plūsmas vienādojumu sistēmām tieši ar to, ka piedāvātajos vienādojumos var ievērtēt faktu, ka robeža starp sasalušo un šķidro mitrumu gāzbetona materiālā mainās atkarībā no āra gaisa temperatūras. Faktiski ir iespējams vienlaikus risināt divus siltuma plūsmas vienādojumus, kad mitrums gāzbetona porās atrodas šķidrā un sasalušā agregātstāvoklī, kā arī ņemt vērā to, ka robeža starp šiem agregātstāvokļiem mainās telpā un laikā. Savukārt katrā no iepriekš minētajām materiāla kārtām ir iespējams risināt lineārus siltuma plūsmas vienādojumus atbilstoši nelieliem laika intervāliem. Ir jāņem vērā, ka katrā no materiāla kārtām ir jālieto savi atšķirīgi koeficienti atkarībā no šķidrums agregātstāvokļa un uz kārtu robežas ir jāņem vērā gan mitruma, gan ledus kušanas ietekme.

Pamatā izmantojot jau zināmos difūzijas un siltuma plūsmas vienādojumus, pētījumu rezultātā ir radīts modelis, kurā jaunās paaudzes gāzbetona ārsiena tiek aplūkota kā viendabīga konstrukcija, kas veidota no atsevišķām neviendabīgām kārtām. Katra no šīm neviendabīgajām kārtām ir ar atšķirīgām īpašībām, kuras nosaka gāzveida poru struktūra un sākotnējais materiāla mitrums. Atšķirībā no iepriekš veidotajiem gāzbetona ārsienu

siltumtehniko īpašību aprēķinu modeļiem, šajā gadījumā tiek izmantots materiāla strukturālais (iekšējais) mainīgais, kurš ievērtē augstāk minēto jaunās paaudzes gāzbetona materiāla nevienmīgo kārtu savstarpējo mijiedarbību, ņemot vērā atšķirīgos mitruma migrācijas procesus katrā no kārtām.



8. attēls. Temperatūras aprēķins pirmās dienas laikā (augšā) un desmitās dienas laikā (lejā) pēc bloka uzstādīšanas sienā. Bloka sākuma temperatūra ir 20°C, temperatūra telpā ir 23°C, bloka biezums izvēlēts vienāds ar 375 mm. Aprēķins ir veikts pēc Kranka-Nikolsona shēmas ar parametru $\theta=0,6$, ar laika soli 3600 sekundes un ar soli dziļumā 1,5 mm.

Nemot vērā visu augstāk minēto, promocijas darbā izstrādāto jaunās paaudzes gāzbetona ārsienu siltumtehniko īpašību aprēķina modeli var uzskatīt kā analītiski empīrisku, kurā tiek veidoti analītiski vienādojumi atsevišķām materiāla kārtām, savukārt šo kārtu mijiedarbība (gan telpā, gan arī laikā) tiek ievērtēta ar skaitliskām metodēm.

8. attēlā uzrādītajām gāzbetona bloka kārtām, kas viena no otras atrodas 1 mm attālumā, ir veikts temperatūras izmaiņas laikā aprēķins, izmantojot netiešas Kranka-Nikolsona shēmas. Gaisa temperatūra ārā ir modelējama ar pakāpienveida funkciju – soļa izmaiņa ir 1 stunda, solis, risinot siltuma vadītspējas vienādojumu, ir izvēlēts vienlīdzīgs 1 sekunde. Aprēķina pieļaujamā kļūda, ko izraisa sākuma temperatūras krišanās, praktiski pilnībā izzūd ātrāk nekā 12 stundu laikā.



9. attēls. Mitruma sadalījums gāzbetona ārsienā. Uz abscisu ass ir attālums no iekšējās līdz ārējai sienas virsmai. Uz ordinātu ass ir laiks no ārsienas izbūves brīža līdz 2 gadu termiņam.

Interesanti, ka apakšējā 8. attēlā (starplaikā no piecpadsmitās līdz sešpadsmitajai stundai) ir vērojama pastāvīgas temperatūras zonas formēšanās, kuras platumš ir vairāk nekā 150 mm. Temperatūru viļņi, ņemot vērā to fāzes un amplitūdas, var izveidot tādu interesantu zonu, kas pielietojuma ziņā nav būtiska, jo neattiecas uz konkrētā aplūkojamā uzdevumu risinājumu.

9. attēlā ir parādīts modelēšanas rezultāts – mitruma sadalījums jaunās paaudzes gāzbetona ārsienas biezumā. Pustoņu attēls ļauj vienlaikus pārskatāmi redzēt telpā un laikā mitruma žūšanas gaitu gāzbetona ārsienā. Spilgtums raksturo mitruma līmeni, balts – maksimāls mitrums, melns – sauss materiāls.

Piedāvātajā aprēķinu modelī ir ievērtētas gāzbetona kā poraina materiāla īpašības, lai pēc iespējas precīzāk aprakstītu siltuma pārneses un mitruma migrācijas procesus jaunās paaudzes gāzbetona ārsienas norobežojošās konstrukcijās dažādos ekspluatācijas apstākļos. Veicot aprēķinus, ir iespējams ievērtēt atšķirīgos difūzijas procesus ārsienas biezumā, klimatisko apstākļu ietekmi, kā arī faktoru savstarpējo mijiedarbību ārsienas žūšanas procesā.

Vienādojumi (1) – (7) un sakarības $D_{11}(T)$, $D_{21}(T)$, $D_{32}(T)$, $\omega_{20}(T)$, $p_{10}(\omega_2, T)$, $L(T, \omega)$, $c(T, \omega)$ veido sarežģītu nelineāru vienādojumu sistēmu, kuru var sekmīgi lietot jaunās paaudzes gāzbetona siltumtehniko procesu prognozēšanai gan laikā, gan telpā, atšķirīgas funkcijas ēkās, izmantojot dažādus apdares materiālus un modelējot klimatiskos nosacījumus.

Piektajā nodaļā ir apkopotas rekomendācijas promocijas darba rezultātu praktiskai izmantošanai.

Iegūto eksperimentālo un modelēšanas rezultātu analīze ļauj izdarīt secinājumu, ka tie ir kvalitatīvi un kvantitatīvi savstarpēji salīdzināmi. Ņemot vērā promocijas darbā izstrādātā gāzbetona siltumtehniko īpašību aprēķina modeļa koriģēšanas iespējas, ir iespējams iegūt samērā precīzu rezultātu, kurš sakrīt ar eksperimentāli iegūtajiem pētījumu rezultātiem.

Izstrādātā datorprogramma ir izmantojama dažādām ekspluatācijas stadijām – sākot no gāzbetona bloka izgatavošanas un beidzot ar līdzsvara mitruma sasniegšanu norobežojošajā konstrukcijā. Visā šajā periodā ir iespējams modelēt temperatūras sadalījumu jaunās paaudzes gāzbetona ārsienas biezumā, kā arī mitruma saturu un mitruma agregātstāvokli. Ir iespējams veikt aprēķinus dažādiem ēku tipiem – gan dzīvojamās telpās, gan noliktavu telpās, gan arī telpās ar paaugstinātu mitruma saturu.

Eksperimentāli iegūtie pētījumu rezultāti pierāda, ka jaunās paaudzes gāzbetona

ārsienās svara mitrums (w , %) Baltijas valstu klimatiskajā zonā ir robežās no 4 līdz 6%. Latvijas būvnormatīvā LBN 002-01 ir uzrādīts dažādu būvmateriālu un siltumizolācijas materiālu svara mitrums “ w ” procentos siltuma inerces aprēķināšanai tieši gāzbetona materiālam 12%. Ņemot vērā disertācijas izstrādes gaitā iegūtos rezultātus, veikt izmaiņas LBN 002-01 un paredzēt jaunās paaudzes gāzbetonam ar tilpumsvāru 350–400 kg/m³ svara mitrumu “ w ” kā 5%.

Eksperimentāli ir konstatēts, ka, savienojot jaunās paaudzes gāzbetona blokus vienotā ārsienas norobežojošā konstrukcijā ar līmjavas palīdzību, neveidojas tā saucamie “aukstuma tiltiņi” šuvju vietās. Tāpēc šajā gadījumā, veicot ārsienas siltumtehnikos aprēķinus, nav nepieciešams ņemt vērā labojuma koeficientu $\Delta\lambda_w$, kurš ievērtē šuvju ietekmi atkarībā no siltumizolācijas darba apstākļiem saskaņā ar LBN 002-01.

Vēlams jaunās paaudzes gāzbetona ārsienas izbūves darbus uzsākt vēlā pavasarī. Vasaras periodā gāzbetona ārsienas strauji žūst, un, ja līdz rudenis lietavu iestāšanās periodam ēkai ir izveidota jumta konstrukcija ar segumu, tās ir pietiekami pasargātas no iespējamās samirkšanas. Līdz pirmā apkures perioda sākumam ir vēlams uzstādīt ēkā apkures sistēmu, lai būtu iespējams ziemas laikā telpās uzturēt pozitīvu temperatūras režīmu. Būtu vēlams pirmās apkures sezonas laikā gāzbetona ārsienām neveidot ārējo apdari, jo ārsienas vēl turpina intensīvi žūt. Jaunās paaudzes gāzbetona ārsienas apdarei ir jāizmanto tādi materiāli, kuriem ūdens tvaika pretestības faktora μ vērtība nepārsniedz 15.

SLĒDZIENS

Promocijas darba rezultātā ir iegūti šādi galvenie secinājumi:

1. Izveidots un eksperimentāli pamatots mitruma migrācijas un siltuma plūsmas procesu aprēķinu modelis jaunās paaudzes gāzbetona ārsienās Baltijas valstu reģionam raksturīgos ekspluatācijas apstākļos.
2. Piedāvātajā aprēķinu modelī ir ievērtēta gāzbetona atšķirīgā poru struktūra, lai pēc iespējas precīzāk aprakstītu mitruma un siltuma pārnese procesu ārsienas norobežojošās konstrukcijās dažādos ekspluatācijas apstākļos. Tādā veidā ir iespējams ievērtēt atšķirīgos difūzijas procesus ārsienas biezumā, ārējo apstākļu ietekmi, kā arī faktoru savstarpējo mijiedarbību ārsienas žūšanas procesā.
3. Gāzbetona sienu mitruma monitoringu precīzi var veikt, izgriežot paraugus un sverot tos. Savukārt mitruma tarēšanas līknes, izmantojot devējus FH 646-1, nedod precīzus rezultātus gadījumā, ja materiāla mitrums ir vairāk par 10%.

4. Izveidojot sienas ārējo un iekšējo apdari, gāzbetona sienu žūšanas process palēninās, tāpēc ir ieteicams ārējo apdari izveidot ar materiāliem, kuriem ūdens tvaiku pretestības faktora μ vērtība ir tuva jaunās paaudzes gāzbetona ūdens tvaiku pretestības faktora vērtībai $\mu = 6$.
5. Gāzbetona ārsienu ārējo apdari ir vēlams izveidot īsi pirms otrās apkures sezonas sākuma, jo tad mitrums no slēgtajām porām ir gandrīz pilnībā pārvietojies uz daļēji atvērtajām porām un mitrums slēgtajās porās vairs nenonāk atpakaļ.
6. Eksperimentāli ir konstatēts, ka, savienojot jaunās paaudzes gāzbetona blokus vienotā ārsienas norobežojošā konstrukcijā ar līmjavas palīdzību, neveidojas tā saucamie “aukstuma tiltiņi” šuvju vietās. Tāpēc šajā gadījumā, veicot ārsienas siltumtehnikos aprēķinus gāzbetonam ar tilpummasu $< 400 \text{ kg/m}^3$, nav nepieciešams ņemt vērā labojuma koeficientu $\Delta\lambda_w$, kurš ievērtē šuvju ietekmi neventilētam elementam saskaņā ar LBN 002-01 pielikuma 2. tabulu.
7. Eksperimentāli iegūtie pētījumu rezultāti pierāda, ka jaunās paaudzes gāzbetona ārsienās svara mitrums ($w, \%$) Baltijas valstu klimatiskajā zonā ir robežās no 4 līdz 6%. Papildināt LBN 002-01 pielikuma 5. tabulu ar jaunu pozīciju - gāzbetonam ar tilpummasu $350\text{--}400 \text{ kg/m}^3$ svara mitruma $w, \%$ vērtība ir 5%.

PUBLIKĀCIJU SARAKSTS

1. Вилнитис. М. Я. и др. Исследование теплотехнических качеств газобетона AEROC. Строительный рынок. – № 9–10, с. 34.–37., 2006.
2. Вилнитис. М. Я. и др. Исследование процессов высыхания и теплового потока стен из газобетона AEROC. Строительные материалы и изделия. – Выпуск 24, с. 101.–105., 2007.
3. Vilnītis M., Noviks J. Jaunās paaudzes gāzbetona sienu žūšanas procesa pētījumi. // krājumā RTU zinātniskie raksti “Arhitektūra un būvzinātne”. – Rīga, RTU, 88.–95. lpp., 2007.
4. Vilnītis M., Noviks J. Research of heat transfer proceses in walls made from new generation autoclaved aerated concrete. // krājumā RTU zinātniskie raksti “Arhitektūra un būvzinātne”. – Rīga, RTU, 96.–103. lpp., 2007.
5. Vilnītis M., Noviks J., Gaujēna B., Paplavskis J. Impact of external factors on humidity migration processes in walls made from autoclaved aerated concrete. – Proc. Heat transfer 2010, June 14–16, Tallinn, Estonia, p. 279.–290., 2010.
6. Vilnītis M., Noviks J., Gaujēna B. Heat and moisture transfer processes modelling in walls made from autoclaved aerated concrete. – Proc. First Central European Symposium on Building Physics, September 13–15, 2010, Cracow, Poland, p. 113–120.