

Rīgas Tehniskā universitāte

Būvniecības fakultāte

Siltuma, gāzes un ūdens tehnoloģijas institūts

Baiba Gaujēna

Doktoru studijas programmas „Būvniecība” doktorante

**ĒKU NOROBEŽOJOŠO KONSTRUKCIJU
MATERIĀLU ĪPAŠĪBU IETEKME UZ
MIKROKLIMATU Telpās**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs

Dr. sc. ing., profesors

A. Borodiņecs

Rīga 2013

UDK 697.1(043.2)
Ga 862 ē

Gaujēna B. Ēku norobežojošo konstrukciju materiālu īpašību ietekme un mikroklimatu telpās. Promocijas darba kopsavilkums.-R.: RTU Izdevniecība, 2013.-27 lpp.

Iespiests saskaņā ar Promocijas padomes „RTU P-12” 2013. gada 18. septembra lēmumu, protokols Nr. 1/13.

Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā „Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai”.



ISBN 978-9934-10-487-9

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts promocijas padomē „RTU P-12” 2013. gada 13. decembrī 14:00 Rīgā, Āzenes ielā 16/20, Būvniecības fakultātes sēžu zālē.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors, Dr.habil.sc.ing. Voldemārs Barkāns (Latvijas Jūras akadēmija)

Profesors, Dr.habil.sc.ing. Aleksandrs Korjakins (Rīgas Tehniskā universitāte)

Profesors Teet.Andrus Kõiv (Tallinas Tehniskā universitāte)

APSTIPRINĀJUMS

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

Baiba Gaujēna(Paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, 6 nodaļas, un secinājumus, literatūras sarakstu, 63 zīmējumus un 24 tabulas, kopā 138 lappuses. Literatūras sarakstā ir 94 nosaukumi.

ANOTĀCIJA

Darbā tiek veikts plašs pētījums par siltumplūsma un gaiscaurlaidība ēku norobežojošajām konstrukcijām ar mērķi nodrošināt optimālu mikroklimatu telpās. Darbs sastāv no galvenajām 3 daļām – literatūras izpēte un aprēķina modeļa ārsienu konstrukciju īpašību procesu ietekmi uz telpas mikroklimatu, eksperimentāls pētījums un skaitliskā modeļa izstrāde. Promocijas darba pirmajā daļā tiek apskatīti iepriekš veiktie starptautiskie pētījumi par norobežojošām konstrukcijām un aprēķina metodoloģiju un esošie mitruma migrācijas un siltuma plūsmas aprēķina modeļi ārsienu norobežojošās konstrukcijās, kā arī veikta norobežojošo konstrukciju materiālu īpašību izpēte. Papildus tam tika veikts normatīvās dokumentācijas kritisks pārskats un tika definēts optimāla mikroklimata jēdziens. Pēc izpētītās informācijas tika precizēti uzdevumi, lai sasniegtu promocijas darba mērķi.

Balstoties uz promocijas darbā veiktajiem pētījumu rezultātiem un ņemot vērā eksperimentāli iegūtos rezultātus un zināmās siltumtehniko procesu aprēķinu metodes, tiek modelētas telpas ar galīgo elementu skaitliskās šķidrums dinamikas datorprogrammas palīdzību, par galveno parametru izvēloties optimālu mikroklimatu telpās.

Promocijas darba gaitā tika iegūti šādi rezultāti:

- Izveidots un eksperimentāli pamatots siltuma plūsmas procesu aprēķinu modelis norobežojošās konstrukcijās.
- Izstrādāti priekšlikumi izmaiņām Latvijas būvnormatīvā LBN 002–01 “Ēku norobežojošo konstrukciju siltumtehnika” un LBN 231 „Ēku apkure un ventilācija”.
- Izstrādāta un ar dinamiskās simulācijas programmu pierādīta norobežojošo konstrukciju pamatota būvmateriālu izmantošana dažāda tipa ēkās.

Promocijas darba mērķis ir iegūt rezultātus, kuriem būtu zinātniska un praktiska pielietojamība, kā arī sniegt atbildes uz aktuāliem jautājumiem saistītiem ar optimāla mikroklimata nodrošināšanu ņemot vērā norobežojošo konstrukciju īpašības. Pētījumu pamatā ir zinātniski tehniskā hipotēze par ēku celtniecības un ekspluatācijas kvalitātes paaugstināšanas iespējām izmantojot konstrukcijas masivitātes īpašības.

Pētījuma galvenie rezultāti ir ziņoti 12 starptautiskās konferencēs un 15 publikācijās. Promocijas darbs sastāv no 138 lapaspusēm, tai skaitā no 24 tabulām un 63 attēliem. Literatūras saraksts sastāv no 94 literatūras avotiem.

SATURS

ANOTĀCIJA.....	4
IEVADS	5
1. LATVIJAS KLIMATISKO APSTĀKĻU ANALĪZE	7
2. ĒKU SILDĪŠANAS REŽĪMA ĪPATNĪBAS	8
3. VENTILĀCIJAS IETEKME UZ GAISA APMAIŅAS ĀTRUMU UN TELPU GAISA KVALITĀTI DZĪVOJAMAJĀS ĒKĀS PRAKTISKAIS NOVĒRTĒJUMS	11
4. EKSPERIMENTĀLS PĒTĪJUMS PAR NOROBEŽOJOŠO KONSTRUKCIJU IETEKMI UZ DZĪVOJAMO ĒKU MIKROKLIMATU	15
5. FINANSIĀLĀS RENTABILITĀTES IZVĒRTĒJUMS	22
SECINĀJUMI.....	24
PUBLIKĀCIJU SARAKSTS	26

IEVADS

Arvien aktuālāks kļūst jautājums par jaunceltņu projektēšanu un būvniecību, pielietojot ne tikai modernākus energoefektīvus risinājumus, bet pievēršot lielāku uzmanību arī optimālā mikroklimata nodrošināšanai telpās.

Lai ēkās pareizi uzturētu siltumu un piemērotu mikroklimatu iekštelpās, jau projektēšanas procesā ir jāievēro pareiza konstrukciju izvēle un pielietojums. Dažāda tipa ēkās (dzīvojamās ēkās, publiskās ēkās vai noliktavās), materiālu un konstrukciju pielietojums jābūt atšķirīgam.

Promocijas darba tēma ir saistīta ar nepieciešamību izstrādāt metodi un rekomendācijas attiecībā uz moderno tehnisko risinājumu un materiālu pielietošanu būvniecībā, ar mērķi nodrošināt optimālo mikroklimatu telpā atkarībā no tās pielietošanas īpatnībām. Iepriekš veiktie pētījumi ir pierādījuši, ka konstrukciju masivitāte atstāj būtisku iespaidu uz ēku siltumbilanci, bet pētījumos iztrūkst konkrētu datu un mērījumu, kas atbilstu klimatiskajiem apstākļiem ar izteikti svārstīgu temperatūru apkures sezonas laikā.

Lietojot matemātisko modelēšanu, var veikt aprēķinus dažādās telpās, lai noteiktu iekšējā gaisa parametru stabilitāti. Gaisa plūsma telpā un tās intensitāte, ir atkarīga no objektu izvietojuma, kā arī no norobežojošo konstrukciju siltumtehnikajām īpašībām. Bet veicot modelēšanu ir iespējams prognozēt reālo situāciju, ja tā tiek veikta uz iepriekš eksperimentāli pamatotiem parametriem. Gendelis S. 2012. gadā pierādīja, ka ēku un būvju siltumtehnikie raksturlielumi, kas iegūti eksperimentāli un teorētiski var būtiski atšķirties.

Bet skaitliskās modelēšanas pamatā tiek ņemti vērā visu uz ēku vai būvju konstrukcijām attiecināmie elementi – tādējādi panākot to pielīdzināšanu un rezultātus reāliem apstākļiem dabā. Darbā izstrādā analīze ietver gan jau zināmas metodes, gan pilnīgi jaunas pieejas dinamiskās simulācijas programmas izmantošanā.

Darba *mērķis* ir atrast dzīvojamām ēkām piemērotus norobežojošo konstrukciju materiālus un ar pētījumu rezultātiem pierādīt to racionālo pielietojumu.

Uzdevumi:

- Veikt ārējā gaisa parametru izpēti – temperatūras svārstību un mitruma satura izmaiņas apkures periodā;
- Veikt dažādu tipa esošo ēku un jaunbūvju norobežojošo konstrukciju izpēti, kā arī norobežojošo konstrukcijas masivitātes ietekmi uz mikroklimatu telpā, to īpašību maiņu dažādos laika apstākļos;
- Izstrādāt rekomendācijas optimāla mikroklimata nodrošināšanai telpās.
- Izstrādāt skaitliskās modelēšanas metodiku, ar kuras palīdzību būtu iespējams noteikt plānoto uzlabojumu komforta apstākļiem telpās.
- Aprobēt izstrādāto eksperimentālo mērījumu un skaitliskās modelēšanas metodiku.
- Eksperimentālo rezultātu un teorētiski aprēķināto rezultātu analīze, un to atšķirību cēloņu analīze.
- Veikt norobežojošo konstrukciju ekonomisko rādītāju analīzi.

Promocijas darba pētījumi turpinās SGŪTI agrāk veiktos pētījumus par ēku norobežojošajām konstrukcijām ar regulējamu termisko pretestību un norobežojošo konstrukcijas masivitātes ietekmi uz mikroklimatu telpā.

Optimāla mikroklimata parametrus un ārējo norobežojošo konstrukciju materiālu ietekmi uz telpas gaisa un mitruma parametriem iepriekš ir pētījuši tādi zinātnieki, kā Prof., Dr.habil.sc.ing. A.Krēsliņš, Prof., Dr.habil.sc.ing. V.Zēbergs, Dr.habil.sc.ing. N.Zeltiņš, Prof., Dr.habil.sc.ing. K.F. Fokins, Doc., Dr.sc.ing. V.Vrubļevskis, Dr.sc.ing. A.Borodiņecs, inženierzinātņu doktori D. Pupeikis (Kaunas, 2010) un S. Gendelis (Rīga, 2012), kā arī Asoc. Prof., Dr.habil.sc.ing. A.Jakovičs un Prof., Dr.habil.sc.ing. V. Stankevičius. Matemātiskos modeļus siltuma vadīšanas procesa raksturošanai pētījis Prof., Dr.habil.sc.ing. V.Barkāns.

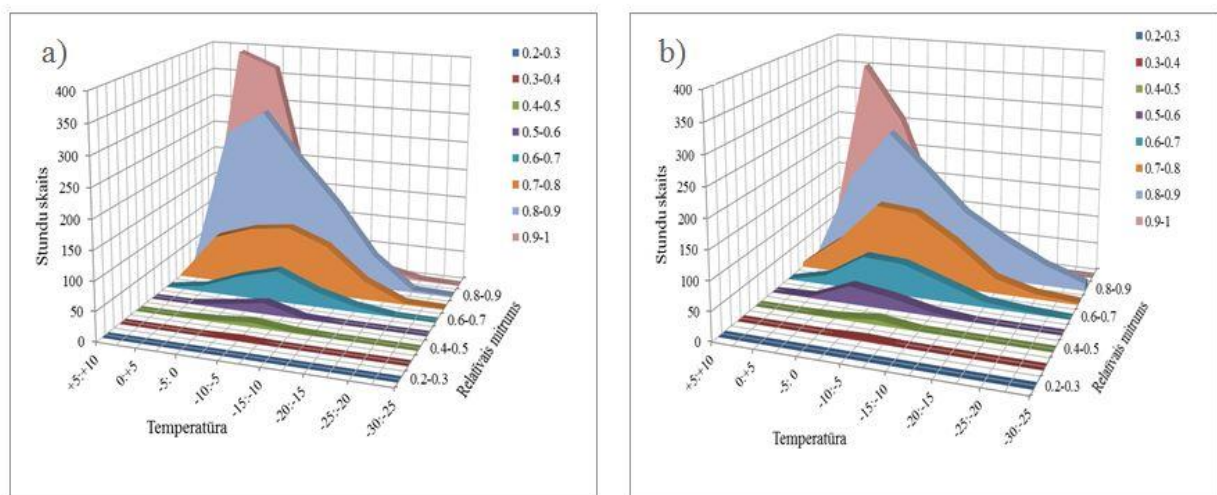
1. LATVIJAS KLIMATISKO APSTĀKĻU ANALĪZE

Latvija pilnībā ietilpst aukstajā klimatiskajā zonā, līdz ar to energoefektivitātes pasākumi ir ļoti aktuāli un šajā jomā ir iespējams ietaupīt ievērojamu siltumenerģijas daudzumu.

Izpētītajās apkures sezonas atšķiras – 2010./2011. apkures sezonas grādudienu skaits ir 4337,6, 2011./2012. apkures sezonas grādudienu skaits ir 3823,4, bet savukārt 2012./2013. apkures sezonas grādudienu skaits ir 4359,2.

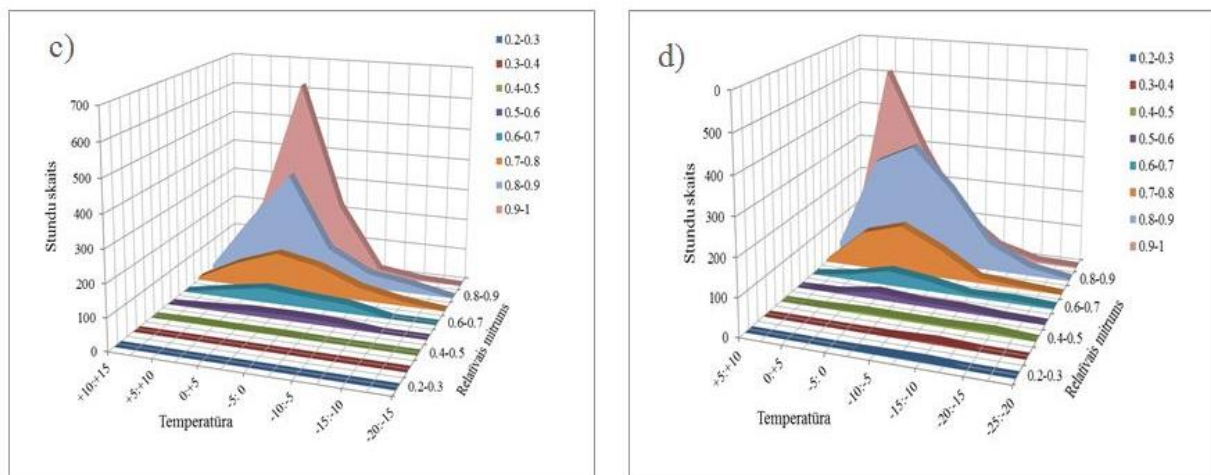
Šobrīd Latvijā tiek izmantota aprēķinos piecu dienu vidējā aukstākā temperatūra ar iespējamību 0.92 (-20.7 °C), bet tajā pašā laikā apkures sezonas vidējā temperatūra ir 0 °C.

Lai precīzāk noteiktu gaisa parametru specifiku Latvijā tika veikta analīze par temperatūru sadalījumu un attiecīgās relatīvā mitruma daudzumu procentuālās vērtības pa mēnešiem stundās. Iegūtie rezultāti atspoguļoti grafikos (1. un 2. att.). Izpētītie mēneši ir pa pēdējiem 3 ar pus gadiem sākot no novembra līdz februārim.



1. att. Stundu skaits novembrī (a) un decembrī (b) pie attiecīgās temperatūrām un relatīvā mitruma daudzuma laika posmā 2009. gada līdz 2013. gadam.

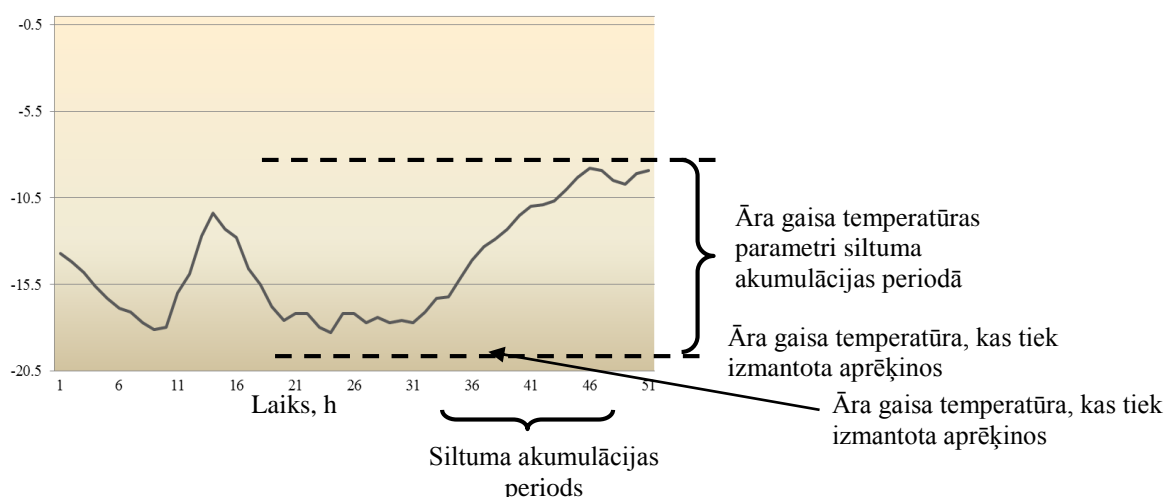
Kā var redzēt no 1. un 2. attēlā Latvijas gadījumā āra gaisa temperatūra bija zem apkures sistēmas projektētās temperatūras 150 stundas 5 gadu laika apstākļu novērošanas periodā – vidēji 30 stundas gadā. Ēkas īpašnieka uzdevums ir pareizi noteikt telpu gaisa parametru stabilitātes prasības, un projektētājam tādejādi jāizvēlas termiskās masas un apkures sistēmas maksimālās jaudas optimālā attiecība.



2. att. Stundu skaits janvārī (c) un februārī (d) pie attiecīgās temperatūrām un relatīvā mitruma daudzuma laika posmā 2009. gada līdz 2013. gadam.

2. ĒKU SILDĪŠANAS REŽĪMA ĪPATNĪBAS

Reālajos apstākļos ēku sildīšanas process ir samērā nestabils. Kaut gan tas ir balstīts uz reāliem aprēķiniem pēc stabilām aprēķina raksturlielņiem sildīšanas apmaiņas procesā. Par spīti visām modernajām mikroklimate sistēmas zināšanām, sekojot praktiskiem novērojumiem un teorētiskiem izmeklējumiem, iekštelpas sildot notiek nevēlamas svārstības temperatūras skalā. Šādām svārstībām ir negatīva ietekme uz iekštelpu komfortu un rada nepareizu iespaidu par ēkas enerģijas patēriņa prasībām.



3. att. Āra gaisa temperatūras svārstības 2013. gada janvārī.

3. attēls parāda āra gaisa svārstības ziemas mēneša periodā Latvijā, kad temperatūra svārstības pat dienas laikā var būt $\pm 10^{\circ}\text{C}$, bet nenoslīd pat līdz apkures sistēmas aprēķinu temperatūrai.

Nepareizas ēku ekspluatācijas laikā, tiek novērots nevajadzīgs ēku enerģijas patēriņš. Pārmērīgas siltuma plūsmas cēlonis, ir pārāk liela siltuma enerģijas jauda un ēkas pārkaršanās, kas saistīta ar nepareizu – pārāk mazu – siltuma jaudas iekārtu uzstādīšanu, kas attiecīgi atsaucas uz pārāk garu pirms sildīšanas procesu. Tāpēc rodas nepareiza ēku uzturēšana, jo iekštelpu klimats, kas atbilstu visām higiēnas prasībām ir grūti uzturams vienmērīgā stāvoklī. Šādu iemeslu dēļ, enerģijas taupība atsaucas uz cilvēka veselību.

Siltuma inerces praktiskais novērtējums uz iekštelpu gaisa parametru stabilitāti.

Lai praksē novērtētu būvelementa siltuma inerces ietekmi uz iekštelpu gaisa parametru stabilitāti, tika izvēlēts vienkāršu ēkas modelis. Kopējā platība ir 100 m^2 , ēkas augstums ir 3 m un sienu platība ir 110 m^2 , savukārt logu platība – 20 m^2 . Gaisa infiltrācija šajā gadījumā netiek ņemta vērā. Eksperimentam tika izvēlētas 3 dažādi ārējo norobežojošo konstrukciju veidi. Visos 3 eksperimenta variantos papildus ārsienām, tika pieņemts, ka tā ir ēka, kuras grīdas konstrukcija balstās uz zemes ar siltumcaurlaidības koeficientu $U = 0,3\text{ W/m}^2\text{K}$ un ēkai ir plakanais jumts ar siltumcaurlaidības koeficientu ar $U = 0,2\text{ W/m}^2\text{K}$.

Sākotnējā āra gaisa temperatūra tiek pieņemta $-20,7^{\circ}\text{C}$, iekštelpu temperatūra $+22^{\circ}\text{C}$ un maksimālā siltumsūkņa jaudu, kas pietiekama $-20,7^{\circ}\text{C}$ zemai temperatūrai. Šādā gadījumā nepieciešamā siltumkatla jauda ir:

$$Q = H_T(t_i - t_e) = 145 \cdot (22 - (-20,7)) = 6174\text{W}$$

Gadījumā, ja āra gaisa temperatūra nokristos līdz $-34,9^{\circ}\text{C}$, nepieciešamā siltumkatla jauda būtu 8386 Wh . Pie pastāvīgai siltumplūsmas iekštelpu gaisa temperatūra pēc vienkāršota aritmētikas vienādojuma būtu:

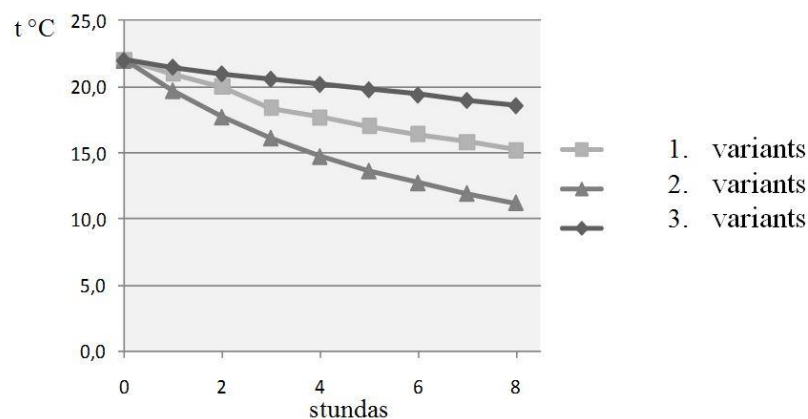
$$t_i = \frac{Q}{H_T} + t_e = \frac{6174}{145} + (-34,9) = 7,7 \approx 8^{\circ}\text{C}$$

Sienām, kuru konstruktīvais materiāls ir gāzbetons, siltumnerce ir 3 reizes lielākā kā sienām, kuru nesošais elements ir koka rāmis ar pildīto siltumizolāciju. Saprotams, ka iekštelpu gaisa temperatūra un virsmas temperatūra samazināsies lēnāk masīvo konstrukciju elementiem nekā koka karkasa konstrukcijai. Lai novērtētu atdzišanas laiku iekšējā gaisa temperatūrai, ir nepieciešams ņemt vērā konstrukcijas termālo masu. Temperatūras kritumu laikā var aprēķināt izmantojot pētījumu vienādojumu:

$$t = t_o e^{-\frac{H}{w}} + (t_e + \frac{Q}{H})(1 - e^{-\frac{H}{w}}), \quad (1)$$

kur H - ēkas siltumzudumi, W/K; Q – siltumkatla jauda, W; w – siltuma avoti no norobežojošām konstrukcijām un mēbelēm, kas atrodas telpā, W.

Lai novērtētu telpu temperatūras krišanās laiku ēkas teorētiskajā modelī trīs dažādām ēku ierobežojošajām konstrukcijām tika izmantots 1. vienādājums un materiālu īpašību dati no pētījumiem. Tiek pieņemts, ka apkures katla jauda ir paredzēta āra temperatūrai (-20,7 °C) un āra gaisa temperatūra krītas no (-20,7 °C) uz (-34,9 °C). Rezultāti ir redzami attēlā 4.



4. att. Telpas temperatūras krišana 3 dažāda tipa konstrukcijām, gadījumā kad āra gaisa temperatūra nokrītas līdz -34,9 °C.

Kā redzams diagrammā, telpu temperatūra pirmajās astoņās stundās krītas par 10,8 °C koka karkasa konstrukcijām, par 6,8 °C vieglbetona blokiem un par 3,4 °C ķieģeļu sienai ar izolāciju.

Kā bija gaidāms, temperatūras kritums ir bijis straujāks konstrukcijai ar mazāku termisko inerci. Tipiskā āra projektētā temperatūra nevar nodrošināt telpu gaisa parametru stabilitāti vieglajām ēku ierobežojošajām konstrukcijām. Tas ir sevišķi būtiski tādām specifiskām ēkām kā slimnīcas un muzeji, kur ir vitāli svarīgi nodrošināt telpu gaisa parametru stabilitāti jebkādos āra gaisa apstākļos.

Tajā pašā laikā absolūtās minimālās āra gaisa temperatūras izmantošana apkures sistēmu jaudas aprēķināšanai noved pie apkures sistēmu darbības efektivitātes mazināšanās visas apkures sezonas laikā. Ēkas termiskās masas un apkures sistēmu maksimālās jaudas pareizs līdzsvars sniedz iespēju nodrošināt telpu gaisa parametru stabilitāti sevišķi aukstās āra gaisa temperatūrās un uzlabot apkures sistēmu darbības efektivitāti.

3. VENTILĀCIJAS IETEKME UZ GAISA APMAIŅAS ĀTRUMU UN TELPU GAISA KVALITĀTI DZĪVOJAMAJĀS ĒKĀS PRAKTISKAIS NOVĒRTĒJUMS

Dzīvojamo ēku ventilācijas sistēmu galvenais uzdevums ir nodrošināt optimāli ērtus apstākļus un telpu gaisa kvalitāti ēkas iemītniekiem. Lai gan temperatūra un mitruma līmenis ir būtiski cilvēku ērtību faktori, CO₂ koncentrācijai ir būtiska ietekme uz cilvēku veselību, kā jau iepriekš sadaļā par mikroklimatu telpās rakstīts. Gaisa apmaiņas ātrumu dzīvojamajās ēkās parasti aprēķina ar vienādām metodēm, neņemot vērā dzīvokļa līmeni. Šis eksperiments tika veikts CO₂ koncentrācijas modelēšanai telpu gaisā un gaisa sadalei daudzstāvu dzīvojamajās mājās. Ventilācijas šahtas efektu var novērot daudzstāvu ēkās ziemas laikā. Ja iekšējās sienas, griesti un ventilācijas kanāli nav hermētiski, papildus siltuma cirkulācijai notiek arī CO₂ un mitruma cirkulācija no ēkas zemākajiem līmeņiem uz augšējiem līmeņiem. Šādā gadījumā gaisa apmaiņas ātrumam un ventilācijas shēmai ēkas augšējos un apakšējos līmeņos vajadzētu atšķirties.

Mūsdienās jaunu ēku būvniecības un ēku renovācijas laikā Latvijā parasti izmanto mehānisko ventilāciju no virtuvēm un vannas istabām, un dabiskā gaisa padeve tiek iegūta caur vienkāršām gaisa atverēm guļamistabās, vai pat atverot logus. Dažos gadījumos dzīvojamajās ēkās tiek izmantota arī dabiskā ventilācija. Ziemas laikā caur ēkas zemākajiem līmeņiem neapšaubāmi notiek gaisa infiltrācija, un caur augšējiem līmeņiem notiek eksfiltrācija. Tādejādi infiltrācijas un eksfiltrācijas process sarežģīt dabiskās un mehāniskās/dabiskās ventilācijas sistēmu izmantošanu.

Pētījumi par telpu gaisa kvalitāti dzīvojamajās augstceltnēs ir parādījuši CO₂ koncentrācijas specifiku trīs dažādu veidu ventilācijas sistēmās. Šis pētījums ir parādījis, ka CO₂ koncentrācija augšējos līmeņos ir līdz 1,9 reizes augstāka nekā zemākajos. Šo efektu izskaidro mazākais gaisa infiltrācijas ātrums augšējos stāvos. Mērījumi tika veikti ar mērierīci Telaire 7001 Carbon Dioxide Monitor, kura mēra temperatūru un CO₂ koncentrāciju gaisā.

Ir veikts daudz darba, lai uzlabotu ēku ārējo ierobežojošo konstrukciju hermētiskumu. Tomēr nav izstrādātas vienotas metodoloģijas, kā novērtēt gaisa noplūdes ietekmi uz ēkas efektivitāti ēkas projektēšanas stadijā. Stingra gradācija pastāv tikai gaisa noplūdei caur logiem LVSEN (2001). Taču ārsienām un jumta konstrukcijām gaisa noplūdes teorētiskā novērtēšana ir problemātiska, jo trūkst informācijas par būvmateriālu gaisa caurlaidību. Iepriekšējie pētījumi un standarts CNIP sniedz datus tikai par ierobežotu skaitu būvmateriālu.

Papildus tam jānovērtē un jāaplēš ēku iekšējo elementu hermētiskums, lai samazinātu gaisa pārplūdi no zemākajiem līmeņiem uz augstākajiem.

Ekspērimētā izmantotās metodes:

Ēkas infiltrācijas un eksfiltrācijas līmenis ir atkarīgs no ventilācijas šahtas efekta un vēja spiediena. Šahtas efekta un vēja spiediena kopējo ietekmi uz ēkas stāviem var noteikt, izmantojot šādus datus:

$$\Delta P = 0.5H(\rho_e - \rho_i)g - h(\rho_e - \rho_i)g + 0.5\frac{v^2\rho_e}{2}K(c_h - c_z), \quad (2)$$

kur H – ēkas augstums, m; $\rho_e; \rho_i$ – āra un telpu gaisa blīvums, kg/m³; h – attālums no zemes līdz apskatītā elementa centram, m; v – vēja vidējais ātrums, m/s; K – vēja ātruma korekcijas faktors, kas atkarīgs no apvidus veida; c_h – aerodinamikas koeficientu vērtība vēja pusē, c_z – aerodinamikas koeficienta vērtība aizvēja pusē.

Teorētiskais modelis, lai novērtētu gaisa ventilācijas ātruma ietekmi uz CO₂ līmeni, tika izstrādāts, pamatojoties uz masas un enerģijas attiecību.

Tā rezultātā telpu gaisa CO₂ koncentrācijas līmeni var aprēķināt, izmantojot šādu formulu:

$$c_i(t) = c_e + (c_0 - c_e) * e^{-n*t} + (1 - e^{-n*t}) * \frac{n_{pers} * q}{n * V}, \quad (3)$$

kur V – telpas tilpums, m³; n – gaisa apmaiņas ātrums; c_e – āra gaisa CO₂ koncentrācija, kg/m³, n – cilvēku skaits telpā; q – viena cilvēka radītais CO₂, kg/h, c_i – telpu gaisa CO₂ koncentrācija, kg CO₂/m³, c_0 – sākotnējā telpu gaisa CO₂ koncentrācija, kg CO₂/m³.

Rezultāti:

Telpu gaisa kvalitātes praktiskas novērtēšanas nolūkos tika analizēti divi līdzīgi dzīvokļi vienas ēkas 1. un 9. stāvā (5. att.). Visu analizēto guļamistabu platība ir 14 m², tilpums – 36 m³. Ventilācijas sistēmu veido centrālas mehāniskas izplūdes no virtuvēm un dabiskā gaisa padeve guļamistabās caur regulējamām gaisa ieplūdes atverēm. Plūsmas līmeni caur gaisa atverēm regulē manuāli. Gaisa atveres diametrs ir 100 mm. Katrā guļamistabā naktī atrodas divi pieaugušie un viens zīdāinis. Jumta izplūdes ventilators pētījuma laikā naktīs netika darbināts. Visi guļamistabu logi atrodas ziemeļu fasādē. Deviņu stāvu daudzdzīvokļu ēkā gaisa spiediena atšķirība Latvijas klimatiskajos apstākļos ir parādīta 1. tabulā.

1. tabula. Gaisa spiediena atšķirība deviņstāvu daudzdzīvokļu ēkā, kas aprēķināta ar 2. vienādojumu, izmantojot vidējos Latvijas klimatiskos apstākļus, ΔP , Pa.

1. tabula

Stāvs Mēn.	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1.st.	23	21	19	15	11	9	7	8	12	16	21	23
9.st.	-1	-3	-1	1	2	4	4	4	4	4	3	1

Tipiskas dzīvojamās ēkas līdz 16 stāvu augstumam būvē no betona paneļiem ar akmens vates (vai stikla vates) siltumizolāciju un betona ārējo apdari. Pamatojoties uz datiem, kuri pieejami standartā, var aprēķināt izturību pret infiltrāciju, ieviešot šādu vienādojumu:

$$R_{\text{inf}} = R_{\text{inf}}^{\text{betons}} + R_{\text{inf}}^{\text{izolāzola}} + R_{\text{inf}}^{\text{ārējaislāis}}, m^2 hPa / kg, \quad (4)$$

kur $R_{\text{inf}}^{\text{betons}}$; $R_{\text{inf}}^{\text{izolāzola}}$, $R_{\text{inf}}^{\text{ārējaislāis}}$ – betona paneļa, izolācijas un ārējās apdares izturība pret infiltrāciju, $m^2 hPa / kg$ (infiltrācijas izturības vērtības citai ēkai).

Ārsienas izturība pret infiltrāciju: $R_{\text{inf}} = 39242 m^2 hPa / kg$. Tik augstai izturībai pret infiltrāciju nav nekādas ietekmes uz ēkas kopējo energoefektivitāti un telpu gaisa kvalitāti. Logu hermētiskums joprojām ir jāņem vērā. Latvijas tirgū dzīvojamo ēku būvniecībai parasti izmanto logus ar izturību pret gaisa noplūdi $R_{\text{inf}} = 0,65 kg / (m^2 h)$.

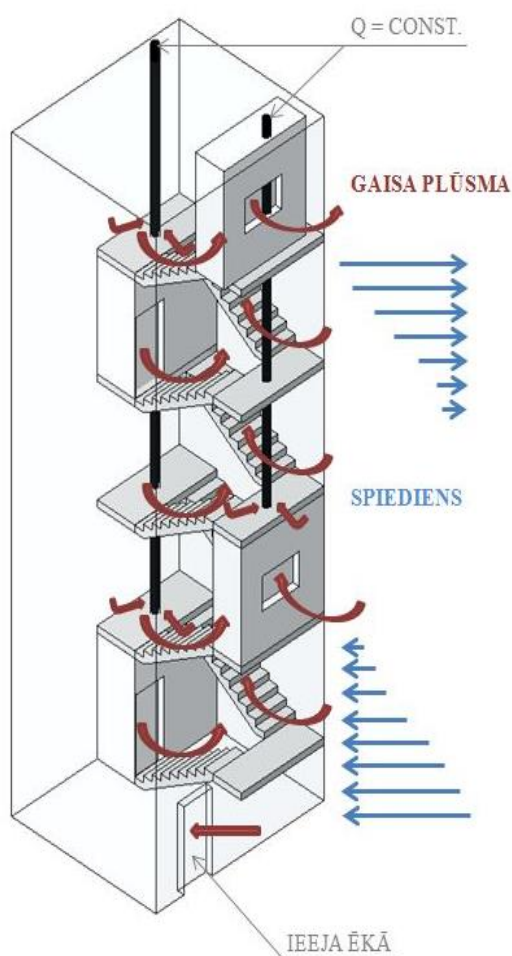
Gaisa infiltrācijas līmenis caur logiem ir $2,68 kg / (m^2 h)$ pirmajā stāvā un $0,33 kg / (m^2 h)$ devītajā stāvā. Tādejādi infiltrācijas līmenis pirmajā stāvā ir astoņas reizes lielāks nekā devītajā stāvā.

Kopējo gaisa infiltrācijas apjomu naktī istabā vai dzīvoklī var izteikt balstoties uz infiltrācijas līmeni un gaisa apmaiņu:

$$L = G_0 F + L_{a,i}, m^3 / h, \quad (5)$$

kur $L_{a,i}$ – gaisa ieplūdes apjoms caur gaisa atverēm, m^3 / h ; G_0 – loga infiltrācijas līmenis, $kg / m^2 h$; F – loga lielums, m^2 .

Gaisa infiltrācijas apjoms vienā istabā pirmajā stāvā caur vienu logu un vienu gaisa ieplūdes atveri ir $L = 62 m^3 / h$. Gaisa infiltrācijas apjoms devītajā stāvā ir $L = 2,50 m^3 / h$.

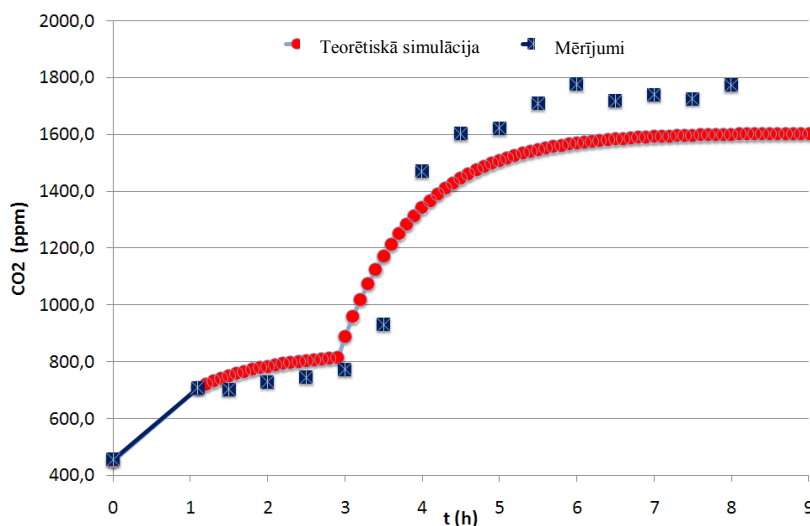


5. att. Gaisa sadalījums deviņu stāvu daudzdzīvokļu ēkā un viena dzīvokļa mezgls.

Teorētiskā gaisa padeve devītajam stāvam ir 25 reizes mazāka nekā pirmajam stāvam. Izplūdes ventilatora jauda pirmajā un devītajā stāvā ir $50\text{m}^3/\text{h}$. Gaisa infiltrācijas apjoms pirmā stāva guļamistabā ir $62\text{m}^3/\text{h}$. Starpība starp infiltrācijas un izplūdes gaisa apjomu istabā pirmajā stāvā ir $12\text{m}^3/\text{h}$. Tas nozīmē, ka $12\text{m}^3/\text{h}$ no pirmā stāva izplūst caur durvīm uz kāpņu telpu un plaisām komunikāciju kanālos, skursteņa efekta ietekmē nokļūstot augstākajos stāvos.

Mērījumi ir parādījuši, ka CO_2 līmenis pirmajā stāvā ir būtiski zemāks nekā devītajā stāvā un nepārsniedz 1700 ppm . CO_2 līmeņa mērījumu laikā naktī tas bija līdz 2500 ppm devītajā stāvā. Relatīvais mitrums pirmajā stāvā svārstījās no 30% līdz 50% . Arī CO_2 koncentrācija devītajā stāvā naktī bija daudz augstāka un kritās pēc loga atvēršanas. Taču ventilācijai ar loga atvēršanu ir būtiski trūkumi aukstā āra gaisa ieplūšanas dēļ, kas var izraisīt saaukstēšanos. CO_2 koncentrācijas teorētiska simulācija tika veikta, izmantojot 5. vienādojumu. CO_2 9 stundu mērīto un teorētisko svārstību salīdzinājums pirmajā stāvā ir parādīts 2. diagrammā.

Diagramma (6. att.) parāda daļu no mērījumiem guļamistabā, kurā atrodas divi pieaugušie un bērns no plkst. 22.00. Mērījumu laikā CO₂ koncentrācija āra gaisā bija 640 ppm.



6. att. CO₂ mērīto un teorētisko 9 stundu svārstību salīdzinājums pirmajā stāvā.

4. EKSPERIMENTĀLS PĒTĪJUMS PAR NOROBEŽOJOŠO KONSTRUKCIJU IETEKMI UZ DZĪVOJAMO ĒKU MIKROKLIMATU

Veiktajam eksperimentam tika izvēlētas 50 ēkas, tās tika iedalītas divās grupās - vieglās konstrukcijas ēkas un masīvās konstrukciju ēkas. Katrai no ēkām tika veikti mērījumi ziemas periodā laika posmā no 2009. gada līdz 2013. gada ziemas mēnešiem. Darba laikā tika novērtēts ēku siltumpatēriņš. Pētījuma mērķiem no siltumenerģijas piegādes organizācijām tika iegūti dati par apkures sezonā patērēto siltumenerģiju, bet ēku īpašnieki un citas valsts instances sniedza informāciju par iedzīvotāju skaitu un tehnisko informāciju par ēkas norobežojošām konstrukcijām. Analizējot katras ēku grupas iegūtos datus, tika veikti norobežojošo konstrukciju mērījumi un telpas gaisa temperatūras un mitruma mērījumi katrai ēkai tika uzstādot divus mērāparātus, attiecīgi, Testo 635-2 pie norobežojošām konstrukcijām un Testo 175-H2 telpas vidū.

Aprakstāmo vieglo konstrukciju ēku kopējā platība ir 235,8 m² un masīvo ēku kopējā platība ir 8684,3 m².

Lai analizētu mērījumu datus reālos apstākļos, darba procesā tika izmantota simulācijas programmatūra Computational Fluid Dynamics (CFD) Autodesk Simulation CFD 2013, kas balstīta uz procesu, kas kombinē reālos apstākļus kopsummā ar matemātiskiem aprēķiniem. Programma ļauj novērtēt darbību izmantojot modelēšanu. Simulācijas programmatūra izmanto plašus aprēķinus, lai gala rezultāts būtu maksimāli tuvs reāliem apstākļiem.

Viegla konstrukcijas ēkas piemērs:

Viegla konstrukcijas dzīvojamās ēkas norobežojošā konstrukcija ir renovēta ar siltinājuma iestrādi. Ēkas nesošās sienas konstrukcijas ir 180 mm biezas koka brusas ar ekovates pildījumu un ar 50 mm akmens vates siltinājuma slāni uz 5 cm biezu dēļu karkasa ārpusē. Iekšējā apdare ir riģipša apšuvums vienā kārtā, bet ārpusē krāsots apmetums uz sieta. Telpā, kurā tiek novietotas mērierīces ikdienā uzturas trīs cilvēki.

Veiktā pētījuma dati pa diennakts laikā veiktajiem mērījumiem apkopoti tabulās un grafikos, kuros attēlotas iegūtās mērījumu vērtības ik pa 10 minūtēm.

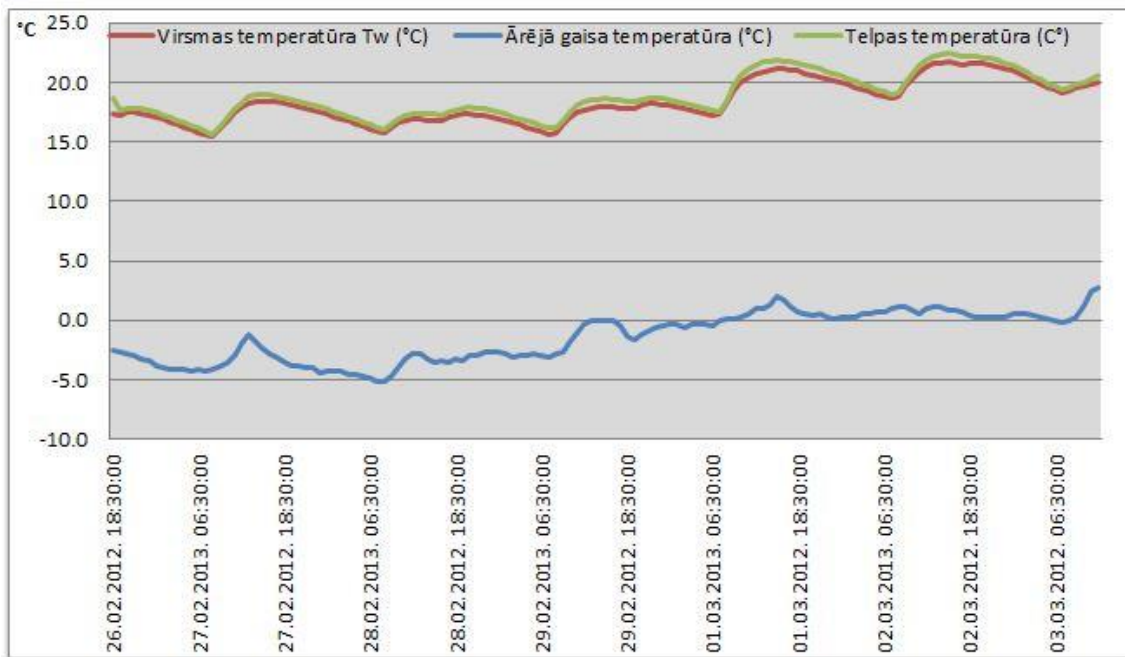
Pēc iegūtajiem rezultātiem var izrēķināt, ka ārējās norobežojošās konstrukcijas siltuma caurlaidības vidējā vērtība pētījuma laikā ir $0,285 \text{ W/m}^2\text{K}$, kas pēc LBN 002-01 14. punktu atbilst normatīvam.

Pēc aprēķina sienas siltumpretestība ir $R_t = 5,089 \text{ m}^2\text{K/W}$, bet tās siltumcaurlaidības koeficients $U = 0,196 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. Savukārt, pēc eksperimentālajiem datiem tas atšķiras.

Pētījuma laikā ārējā gaisa temperatūra svārstījās robežās no $-5,2 \text{ }^\circ\text{C}$ līdz $+2,7 \text{ }^\circ\text{C}$, kā arī starpība starp sienas iekšējās virsmas temperatūru un iekšējo gaisa temperatūru ir $0,68$ jeb $3,7\%$. Relatīvais mitrums telpā svārstījās no $35,1 \%$ līdz $42,08 \%$, kas ir pieļaujamas svārstības priekš cilvēka komforta stāvokļa.

Iekšējā gaisa temperatūra pētījuma laikā svārstās par $5,8 \text{ }^\circ\text{C}$, kas ir salīdzinoši liela amplitūda un svārstību periods ir biežs, kas atkarīgs no āra gaisa temperatūras un var radīt diskomfortu cilvēkam, kas uzturas šajā telpā.

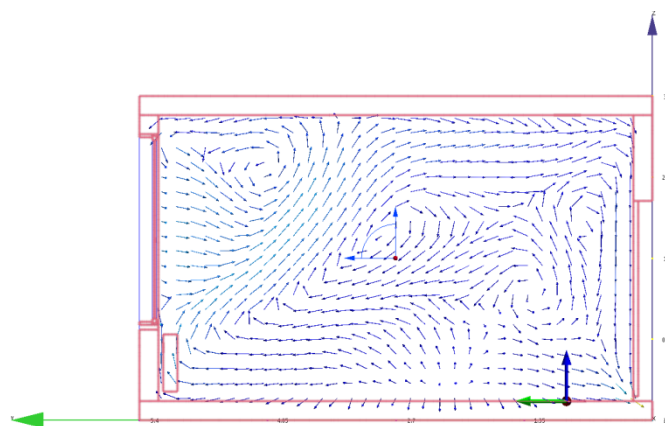
Pēc 7. attēlā esošo rezultātu grafika, var redzēt, ka paaugstinoties ārējai gaisa temperatūrai, paaugstinās arī iekšējā gaisa temperatūra. Tāpat esošo rezultātu grafikā, var redzēt, ka paaugstinoties ārējai gaisa temperatūrai, paaugstinās arī virsmas temperatūras un arī atkarībā no āra gaisa temperatūras svārstībām – virsmas temperatūras proporcionāli dara to pašu.



7. att. Virsmas temperatūras un telpas gaisa temperatūras svārstības atkarībā no āra gaisa temperatūras.

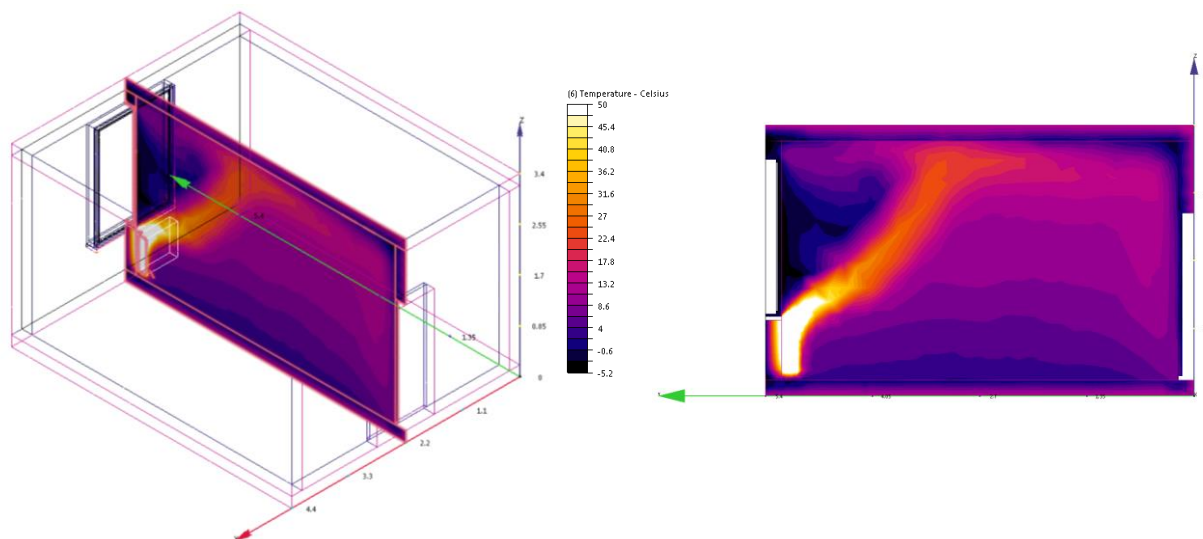
Salīdzinot praktiski iegūtos datus pētījuma laikā ar datiem, kas iegūti pēc aprēķina, var secināt, ka iegūtās U vērtības atšķiras. Pētījumā iegūtais siltuma caurlaidības koeficients $U = 0,285 \text{ W/m}^2\text{K}$, bet aprēķinā $U = 0,196 \text{ W/m}^2\text{K}$ (atšķirība 31%). To varētu skaidrot ar iespējamiem tukšumiem ēkas sienās, kas radušies nekvalitatīvi iepildot ekovates siltinājumu ēkas renovācijas laikā, kas tika veikta 2009. gadā.

Programmatūrā Autodesk Simulation CFD 2013 ar eksperimentāli iegūtajiem datiem un pēc iepriekš aprakstītā telpas modeļa izvēles, tika simulēts modelis, kas atbilstu šīs ēkas raksturlielumiem.



8. att. Gaisa plūsmas pārvietošanās virziens telpā.

Kā redzams, gaisa plūsma ēkā tiek parādīta ar vektoru palīdzību un atbilst reālai telpas gaisa plūsmas apmaiņai.



9. att. Temperatūras sadalījums telpas 3D formā un 2D plaknē.

Masīvas konstrukcijas ēkas piemērs:

Masīvas konstrukcijas dzīvojamās ēkas norobežojošā konstrukcija ir monolītais dzelzsbetons ar siltumizolācijas slāni. Ēkas nesošās sienas konstrukcijas ir 300 mm bieza monolītā dzelzsbetona siena ar akmens vates izolācijas slāni 100 mm biežumā. Iekšējā apdare ir apmetums vienā kārtā, bet ārpusē krāsots apmetums uz sieta. Telpā, kurā tiek novietotas mērierīces ikdienā uzturas trīs cilvēki.

Veiktā pētījuma dati pa diennakts laikā veiktajiem mērījumiem apkopoti tabulās un grafikos, kuros attēlotas iegūtās mērījumu vērtības ik pa 10 minūtēm.

Pēc iegūtajiem rezultātiem var izrēķināt, ka ārējās norobežojošās konstrukcijas siltuma caurlaidības vidējā vērtība pētījuma laikā ir $0,211 \text{ W/m}^2\text{K}$, kas saskaņā ar LBN 002-01 14. punktu atbilsts normatīvam.

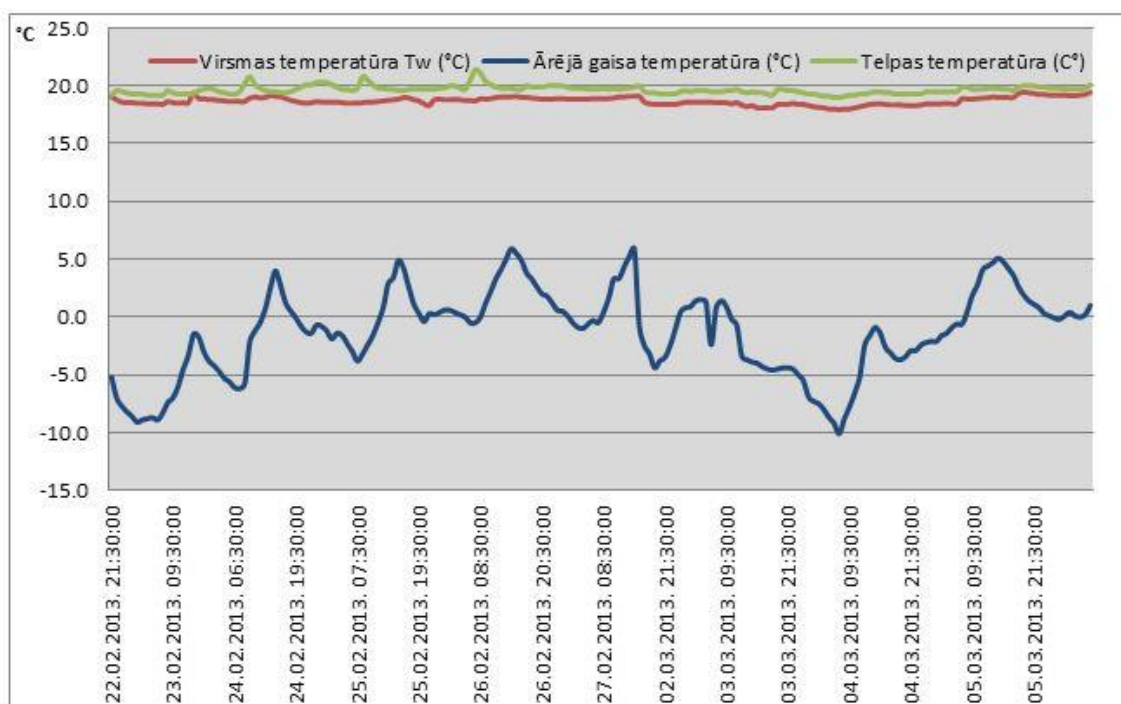
Tabulā redzams, ka pēc aprēķina kopējā sienas siltumpretestība ir $R_t = 3,053 \text{ m}^2\text{K/W}$, bet tās siltumcaurlaidības koeficients $U = 0,328 \text{ W/(m}^2\text{K)}$, savukārt pēc eksperimentālajiem datiem tie tomēr atšķiras.

Pētījuma laikā ārējā gaisa temperatūra svārstījās robežās no $-10,1 \text{ }^\circ\text{C}$ līdz $+5,9 \text{ }^\circ\text{C}$, kā arī starpība starp sienas iekšējās virsmas temperatūru un iekšējo gaisa temperatūru ir 1 jeb $5,1\%$. Relatīvais mitrums telpā svārstās no $31,4 \%$ līdz $51,7 \%$, kas ir pieļaujamas svārstības priekš cilvēka komforta stāvokļa.

Iekšējā gaisa temperatūra pētījuma laikā svārstās par 2,9 °C, kas ir maza amplitūda un svārstību periods ir pakāpeniski augošs vai krītošs, kas atkarīgs no virsmas temperatūras un attiecīgi cilvēks, kas uzturas šajā telpā, jūtas komfortabli.

Pēc 10. attēlā esošo rezultātu grafika, var arī redzēt, ka paaugstinoties ārējai gaisa temperatūrai, virsmas temperatūras paliek gandrīz nemainīga un kaut arī āra gaisa temperatūras svārstībām ir straujas – virsmas temperatūras turpina uzturēt vienmērīgu temperatūru.

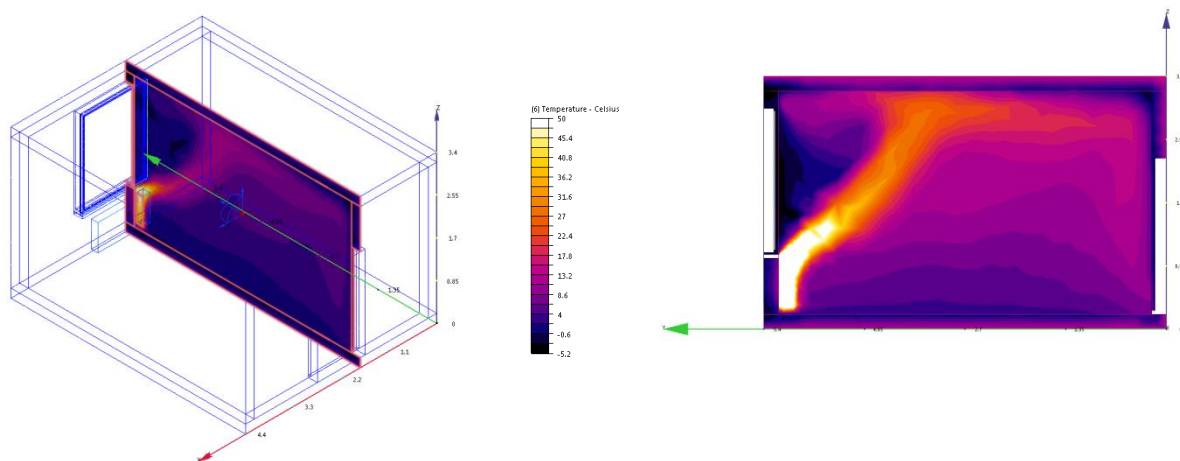
Salīdzinot praktiski iegūtos datus pētījuma laikā ar datiem, kas iegūti pēc aprēķina, var secināt, ka iegūtās U vērtības atšķiras. Pētījumā iegūtais siltuma caurlaidības koeficients $U = 0,211 \text{ W/m}^2\text{K}$, bet aprēķinā $U = 0,328 \text{ W/m}^2\text{K}$ (atšķirība 36%). To varētu skaidrot ar ēkas konstrukcijas parametru biezuma lielums, jo tas lielāks, jo neprecīzākus datus dod mēraparāts, kas siltuma caurlaidības koeficientu rēķina atkarībā no temperatūru starpības un sienas biezuma.



10. att. Virsmas temperatūras un telpas gaisa temperatūras svārstības atkarībā no āra gaisa temperatūras.

Programmaturā Autodesk Simulation CFD 2013 ar eksperimentāli iegūtajiem datiem un pēc iepriekš aprakstītā telpas modeļa izvēles, tika simulēts modelis, kas atbilstu šīs ēkas raksturlielumiem. Temperatūras svārstības un vērtība telpas vidusdaļā pie āra gaisa temperatūras parametriem -5.2 °C.

Kā redzams pēc grafika, siltumplūsma ir svārstīga telpas vidusdaļā, kas liecina par siltā gaisa nepārtrauktu pārvietošanos pēc gaisa plūsmas vektoru līnijām. Bet telpas vidū pēc modeļa ir precīzi modelēta temperatūra, kas atbilst eksperimentāli mērītajai – 19.4 °C.



11. att. Temperatūras sadalījums telpas 3D formāta un 2D plaknē.

Apkures sistēmas nevienmērīguma koeficienta ieviešanas izstrāde, ņemot vērā ēku masivitāti.

Telpas siltumnoturība - tā ir spēja samazināt iekšējā gaisa temperatūras svārstības pie apkures sistēmas siltuma plūsmas svārstībām. Jo būs mazākas pie vienādiem apstākļiem gaisa temperatūras svārstību amplitūdas telpā, jo tā ir vairāk noturīga.

Siltumnoturībai ir vislielākais sakars ar norobežojošo konstrukciju masivitāti, tādēļ, ja siena ir masīvāka tā labāk uztur sevī siltumu. Jo mazākas iekšējās virsmas temperatūras izmaiņas pie vienas un tās pašas gaisa temperatūras svārstību amplitūdas, jo tā ir vairāk noturīga, un otrādi.

Tā kā pieļaujamā temperatūras svārstību amplitūda ir $\pm 3^{\circ}\text{C}$, tad pēc iepriekš jau eksperimentāli pierādītiem datiem, var pieņemt, telpām ar vieglām norobežojošām konstrukcijām šī vērtība svārstās daudz lielāka amplitūdā kā masīvajām konstrukcijām.

Apkures ierīces siltumatdeves svārstības tiek vērtētas ar tās siltuma atdeves nevienmērīguma koeficientu m , kuru nosaka pēc formulas:

$$m = \frac{Q_{\max} - Q_{\min}}{2Q_z}, \quad (6)$$

kur Q - apkures sistēmas maksimālā siltumatdeve, Wh; Q - apkures sistēmas minimālā atdeve, Wh; Q - vidējā apkures ierīces siltumatdeve, Wh.

Lielums m ir atkarīgs no apkures sistēmas un tās ekspluatācijas. Koeficientam m ir liela nozīme telpu temperatūras svārstību amplitūdas noteikšanā, t.i. telpu siltumnoturības novērtēšanā.

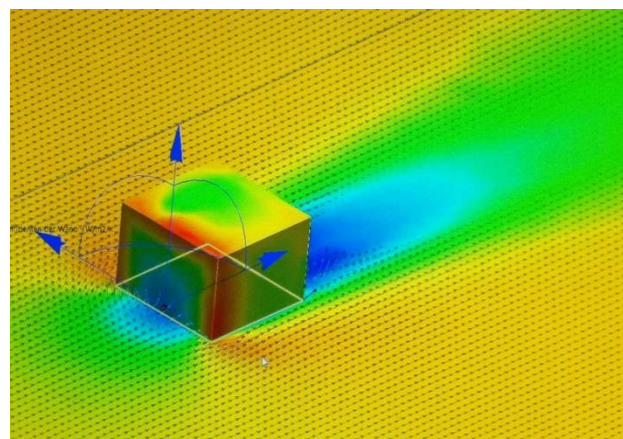
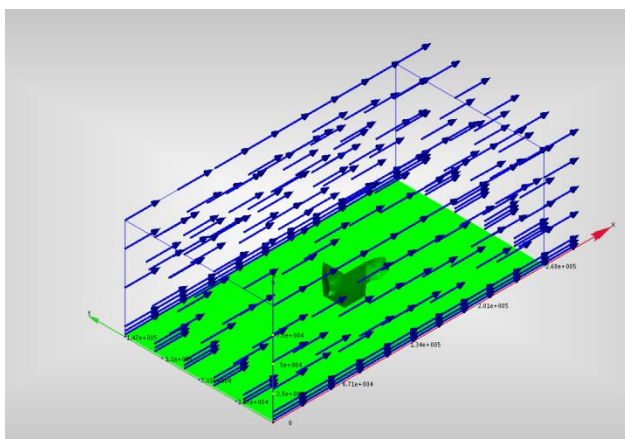
Iepriekš tika uzkatīts, ka pie centrālās apkures sistēmas izmantošanas ēkās, koeficienta m vērtība ir 0,1, bet galīgo elementu skaitliskās dinamikas datorprogrammā, tika pierādīts, ka šis koeficients atšķiras gan pie dažādām temperatūrām, gan pie vieglās vai masīvas konstrukcijas norobežojošās ārsienas. Iegūtie rezultāti apkopoti tabulā 2.

Lai noteiktu precīzāku apkures nevienmērīguma koeficienta vērtību, tika tāpat kā iepriekš simulēts modelis ar ārējo laika apstākļu ietekmi, kas parādīts attēlā 12.

2. tabula

Koeficienta m aprēķina vērtības pie dažādiem āra gaisa temperatūras lielumiem.

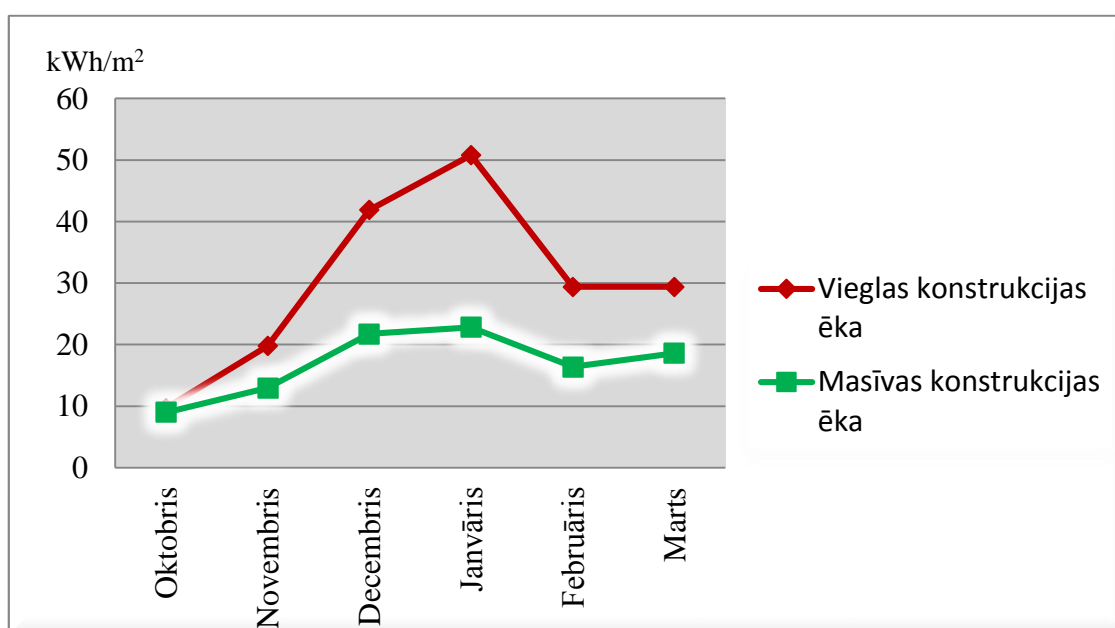
T °C	0 – -10 °C	-10 – -15 °C	-15 – -20.7 °C
Konstrukcija			
Vieglas konstrukcijas ārsiena	0,06	0,20	0,30
Masīvas konstrukcijas ārsiena	0,10	0,23	0,36



12. att. Vēja spiediena un temperatūras noteikšana modelī.

5. FINANSIĀLĀS RENTABILITĀTES IZVĒRTĒJUMS

Lai noteiktu izmaksu ekonomiju izmantojot noteiktus norobežojošo konstrukciju materiālus, tika izvēlētas 2 dažādu ārējo sienu konstrukciju ēkas. Izvērtējot esošo ēku apbūvi, modelim tika izvēlēta ēka ar 150 m² apdzīvojamo platību un ar griestu augstumu - 2,7 m. Analīzei tiek izmantoti eksperimentāli iegūtie mērījumu dati par sienu konstrukcijām un atbilstošās ēkas patērētais siltuma daudzums apkurei kWh/m² pēdējās apkures sezonas 6 mēnešos. Abām ēkām tiek pieņemts, ka ir centrālā apkure un salīdzinātas pašreizējās izmaksas par MWh, izmaksas atbilst vidējai cenai Latvijas tirgū.



13. att. Ēku siltumenerģijas patēriņš kWh/m² 2012./2013. gada apkures sezonā.

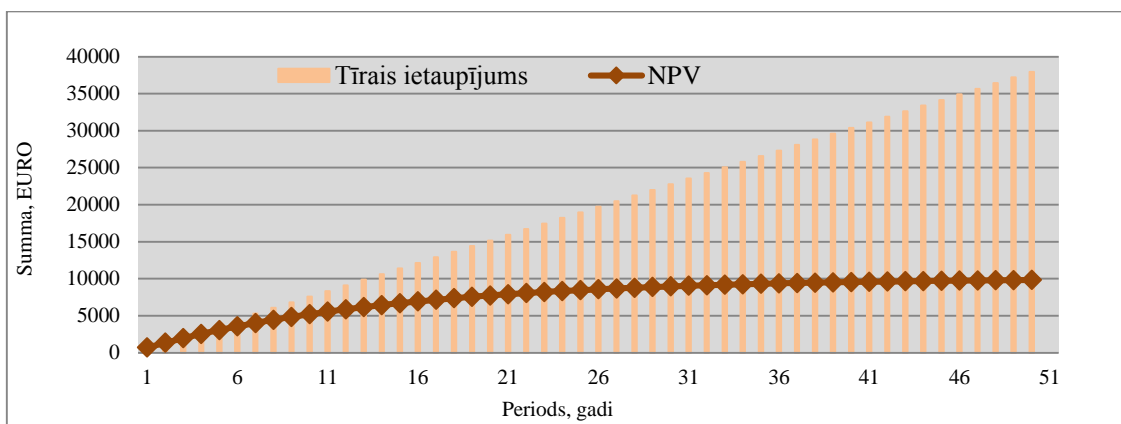
$$NPV = \sum_{n=0}^N \frac{R_t}{(1+D)^n} = \int_{n=0}^{\infty} (1+D)^{-n} r(n) dt, \quad (7)$$

kur R_t – naudas plūsma, EURO; D – diskonta likme, %; n – katrs nākošais gads atmaksāšanās periodā.

Ņemot vērā diskonta likmi, atmaksāšanās periods atšķiras no iepriekš aprēķinātiem 12 gadiem. Pēc pašreizējās neto vērtības atmaksāšanas periods šim projektam sākas 32. gadā, bet ņemot vērā ēkas ekspluatācijas laiku – šis periods pierāda projekta efektivitāti jebkurā gadījumā.

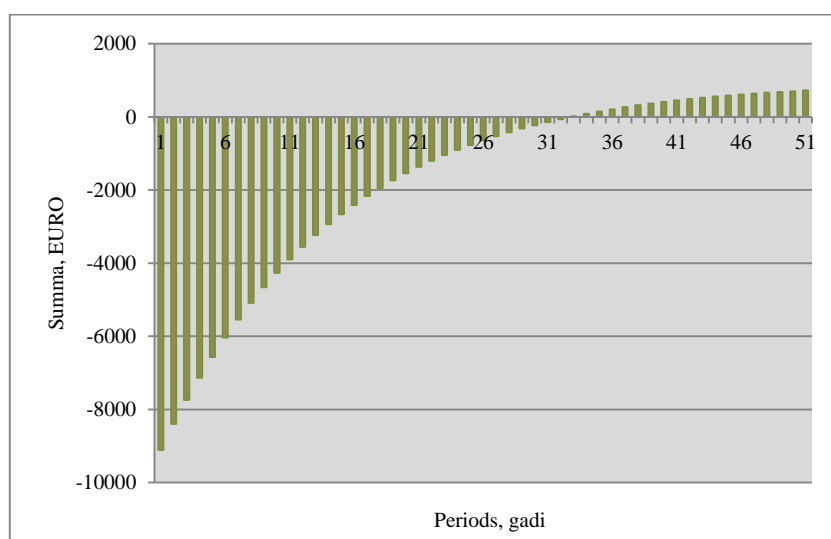
Grafikā (14. att.) var redzēt tīrās peļņas un pašreizējās neto vērtības atšķirīgo augšanas tendenci, tīrais ietaupījums strauji pieaug jau pirmajos gados un turpina celties augšup, bet

pašreizējās neto vērtības līkne pirmajos gados aug straujāk, bet ar katru nākamo gadu samazina proporcionāli augšanas procesu.



14. att. Tagadnes vērtības un NPV naudas plūsmas salīdzinājums 50 gados.

Projekta atmaksāšanas periods uzskatāmi redzams grafikā (15. att.). Tajā redzams, ka līdz 32. gadam izmaksas ir ar mīnus zīmi, bet pēc perioda atmaksāšanās laika beigām, līkne maina savu orientāciju un projektā parādās jau ienesums ar plusu zīmi.



15. att. Atmaksāšanās periods.

Masīvās konstrukcijas ēkas neskatoties uz sākotnēji daudz lielākiem ieguldījumiem, tomēr atspoguļo savu ekonomiskumu. Apskatot šīs konstrukcijas ilgākā periodā, tās ir ilgmūžīgākas, stabilākas un drošākas gan no konstruktīvā viedokļa, gan no ugunsdrošības viedokļa. Rezultātā var secināt, ka masīvās ēkas kā norobežojošas konstrukcijas ir gan rentablākas, gan drošākas, ja skatās uz ēkas dzīves ilgumu un kvalitāti.

SECINĀJUMI

- 1) Latvijas būvnormatīvā LBN 002-01 „Norobežozošo konstrukciju siltumtehnika” prasības par ēkas gaiscaurlaidību un būvelementu siltuma inerci ir nepilnīgas un parāda, ka šie parametri ēkas norobežozošo konstrukciju siltumtehniskajos aprēķinos nebūtu svarīgi. Praksē ir pierādīts, ka tiem ir liela ietekme uz ēkas enerģijas patēriņa samazināšanu un uz stabilu mikroklimata nodrošināšanu iekšējās telpās.
- 2) LBN 002-1 „Norobežozošo konstrukciju siltumtehnika” un LBN 231 „Ēku apkure un ventilācija” nav savā starpā saskaņoti, kas būtiski apgrūtina optimālu konstrukciju materiālu īpašību ietekmes izpēti. Tāpēc nav skaidra metodoloģija konstrukcijas masivitātes ietekmei uz apkures sistēmas aprēķinu. Kā rezultātā ēkas tiek būvētas neņemot vērā norobežozošo konstrukciju materiālu īpašības un reālas ekspluatācijas īpatnības.
- 3) Normatīvos dotās āra gaisa temperatūras ievērojami atšķiras no pētījuma laikā novērotajām, piemēram, maksimālā temperatūra 50 gados ir $-34,8^{\circ}\text{C}$ un 10 gados $-31,0^{\circ}\text{C}$, ko dažkārt izmanto aprēķinos lai noteiktu siltummezgla jaudu, netika novērota nevienā no analizējamām apkures sezonām.
- 4) Klimatisko datu analīzē konstatēts, ka apkures sistēmas biežāk izmantotā aprēķinu temperatūra $-20,7^{\circ}\text{C}$, pētījuma laikā 3 apkures sezonās tika novērota 2 reizes, kas liecina par nerentablu apkures sistēmas aprēķinu.
- 5) Latvijas būvnormatīvos nav definēts kas ir mikroklimats, bet ir atrodama tikai paskaidrojoša informācija Ministru kabineta noteikumos Nr. 359. Tomēr šie noteiktumi nenosaka tādu svarīgu parametru kā CO_2 maksimālo saturu.
- 6) Cilvēkiem, kuri atrodas telpā var būt dažāda reakcija uz mikroklimata izmaiņām un nosacījumiem, tas atkarīgs gan no katra indivīda atsevišķām izjūtām, gan arī apģērba un aktivitātēm, ko tas veic. Piemēram, ja cilvēks, kurš uzturas telpā veic sēdošu darbu, mugurā esot garrokainam apģērbam – vēlamā temperatūra būtu $+22^{\circ}\text{C}$, bet pie šādiem pašiem nosacījumiem, ja cilvēks ir atgūlies – komforta temperatūra jau pakāpj uz $+26^{\circ}\text{C}$, savukārt telpā sportojot $+16^{\circ}\text{C}$.
- 7) Telpu gaisa stabilitātes teorētiskais vērtējums parāda, ka strauja temperatūras krišanās notiek ēkās ar mazu termisko inerci ($D=1,44$), piemēram, ēkās ar koka karkasu. Koka karkasa ēkām jāizmanto absolūtā minimālā temperatūra (vienreiz 50 gados) ar minimālām pieļaujamām telpu gaisa temperatūras un relatīvā mitruma svārstībām.
- 8) Atkarībā no telpu siltuma pieauguma, ēkas termiskās masas un prasībām, kas attiecas uz telpu gaisa parametriem, apkures sistēmu maksimālās siltumjaudas aprēķinam var izmantot šādas āra gaisa projektētās temperatūras: piecu aukstāko dienu vidējo temperatūru (iespējamība 0,92), piecu aukstāko dienu vidējo temperatūru (iespējamība 0,98), absolūto minimālo temperatūru (vienreiz 10 gados), absolūto minimālo temperatūru (vienreiz 50 gados). Turpmākais pētījums atklās visu minēto faktoru kopsakarības. Arī tādas ēkas gadījumā, kurai ir augsta termiskā masa un minimālās telpu gaisa parametru prasības, āra projektētā temperatūra varētu būt augstāka nekā piecu aukstāko dienu vidējā temperatūra (iespējamība 0,92).
- 9) Ventilācijas sistēmas un gaisa apmaiņas ātrumu aprēķinus parasti veic, neņemot vērā dzīvokļa līmeni - lai gan deviņu stāvu daudzdzīvokļu ēkas gadījumā gaisa spiediena atšķirība starp pirmo un deviņo stāvu ir 24 reizes. Darba gaitā tika pierādīts, ka ir nepieciešams projektēt ventilācijas sistēmas ņemot vērā stāvu skaitu un dzīvokļa atrašanās vietu.
- 10) Pat ja padeves gaisa un izvades gaisa kopējais līdzsvars ir aprēķināts pareizi, pastāv gaisa pārplūdes risks infiltrācijas dēļ. Šādā gadījumā notiek papildu gaisa eksfiltrācija kāpņu telpās un kanālu plaisās, un tas paceļas uz augšējiem stāviem.

- 11) Gaisa infiltrācijas ietekme uz enerģijas patēriņu un telpu gaisa parametriem ir ļoti svarīga augstceltnēm, ko parāda deviņu stāvu daudzdzīvokļu ēkas piemērs, gaisa infiltrācijas apjoms pirmajā stāvā 62 m³/h, bet devītajā stāvā 2,50 m³/h.
- 12) Siltuma radiācijai ir liela nozīme telpu mikroklimatam. Piemēram, ja telpas gaisa temperatūra ir +25°C, kas atbilst ļoti labiem komforta apstākļiem, bet norobežojošo konstrukciju iekšējās virsmas temperatūra ir zema +10°C (virsmas ir aukstas), auksto virsmu radiācija rada ievērojamu siltuma zudumus.
- 13) Telpas temperatūras masīvajām konstrukcijām svārstās ± 4 °C, bet vieglajām ± 6 °C. Arī masīvajām konstrukcijām svārstības pārsniedz pieļaujamos ± 3 °C, bet tikai par vienu grādu, ko reālajā situācijā varētu arī neizjust cilvēks, bet vieglajām tas pārsniedz 2 reizes, kas jau būtu jūtams diskomforts telpā.
- 14) Promocijas darba ietvaros izstrādātais ēku matemātiskais modelis pierādīja, ka masīvo ēkas konstrukcijas ēkām nav vajadzības apkures sistēmā izmantot 5 dienu zemāko temperatūru, jo temperatūrai noslīdot īslaicīgi zem -15 °C, telpas temperatūra nekritīsies strauji, ko nevar teikt par vieglajām ēku konstrukcijām, jo to iekšgaisa temperatūra pēc eksperimentālajiem datiem svārstās līdz ar āra gaisa temperatūru.
- 15) Eksperimentālo datu apstrādei var izmantot detalizētu modeli – kā šajā darbā tika pierādīts, ka izmantojot vienkāršotu pietuvinātu modeli, ir iespējams panākt reālas laika apstākļu un iekšējo parametru vērtības.
- 16) Eksperimentālie mērījumi ir atkarīgi no āra gaisa parametriem, kas ir mainīgi un katru gadu atšķirīgi. Tāpēc iegūtie rezultāti citos laika posmos var atšķirties, līdz ar to gala secinājumi un rezultāti sniedz vispārīga rakstura informāciju, kas nelielos apmēros var atšķirties gadu no gada.
- 17) Siltumnoturība ir svarīga ēkas konstrukciju īpašība, ja avārijas situācijā nav iespējams ātri atjaunot siltumpadevi, tad masīvas konstrukcijas sienas spēj nodrošināt ēkā siltumu par 8h jeb 33 % ilgāk kā vieglas konstrukcijas ēka.
- 18) Līdz šim praksē plaši pielietotais apkures nevienmērīguma koeficients ēkās ar centrālo apkuri bija 0,1. Darba ietvaros ar galīgo elementu skaitliskās dinamikas datorprogrammas palīdzību, tika pierādīts, ka šis koeficients atšķiras gan pie dažādām temperatūrām, gan pie vieglās vai masīvās konstrukcijas norobežojošās ārsienas. Balstoties uz praktiskiem mērījumiem un izstrādātā ēkas matemātiskā modeļa tika pierādīts, ka apkures nevienmērīguma koeficients svārstās no 0,1 līdz 0,36 masīvajām konstrukcijām un no 0,05 līdz 0,3 viegla tipa norobežojošām konstrukcijām.
- 19) Balstoties uz darba rezultātiem tika izstrādāti priekšlikumi esošās normatīvās dokumentācijas uzlabošanai:
 - Noteikt minimālās vērtības ne tikai siltuma caurlaidībai, bet arī īpatnējai siltuma ietilpībai jeb materiāla spējai absorbēt siltuma enerģiju, kas uzlabotu siltuma inerci apkurināmās ēkās;
 - LBN 231. Ēku apkure un ventilācija iekļaut aprēķina temperatūru – masīvajām konstrukcijām - -15 °C, bet vieglajām – 19 °C., jo šobrīd izmantotā apkures sistēma temperatūras aprēķina vērtība ir neracionāli augsta un tā nevar tikt pielāgota masīvo un vieglo norobežojošo konstrukciju sienām vienāda.
 - Papildināt LBN 231. Ēku apkure un ventilācija ar tabulārām vērtībām, kas noteiktu inerces koeficientu pie masīvās konstrukcijas $D \geq 6$ un pie vieglām konstrukcijām ēkām $D \leq 5$.
 - Ieviest LBN 231. Ēku apkure un ventilācija rekomendācijas gaisa apmaiņas nodrošināšanai daudzstāvu daudzdzīvokļu dzīvojamās ēkās.
 - Ieviest LBN 231. Ēku apkure un ventilācija apkures nevienmērīguma koeficientu m .

- LBN 002-01. Ēku norobežojošo konstrukciju siltumtehnika noteikt minimālās gaisa caurlaidības prasības ventilācijas kanāliem ēkās.
- 20) Masīvo ēku konstrukcijas ir ievērojami dārgākas sākotnējos kapitālieguldījumos, tomēr veicot finansiālās rentabilitātes analīzi, tika pierādīts, ka apmaksāšanas periods šāda tipa ēkām būtu 32 gados, bet ņemot vērā ēkas ekspluatācijas laiku, tas atmaksājas trīskārtīgi, kā arī ēkas stabilitātes un komforta apstākļu ziņā, masīvās konstrukcijas ir veiksmīgāka izvēle nekā vieglas konstrukcijas ēkas.

PUBLIKĀCIJU SARAKSTS

- 1) Borodiņecs A., Gaujēna B. Improving Energy Performance of Buildings Using the Controlled Buildings Envelopes// Proceedings of 30th AIVC Conference “Trends in High Performance Buildings and the Role of Ventilation” and 4th International Symposium on Building and Ductwork Air Tightness (BUILDAIR), 30th AIVC Conference “Trends in High Performance Buildings and the Role of Ventilation” and 4th International Symposium on Building and Ductwork Air Tightness (BUILDAIR), Germany, Berlin, Oktober 1 - 2, 2009. - 6 p.
- 2) Borodiņecs A., Gaujēna B., Krēsliņš A. Optimization of Energy Consumption by Air-Conditioning Systems by Implementation of Building Envelopes with Controlled Thermal Resistance// Proceedings of 10th REHVA World Congress CLIMA 2010 "Sustainable Energy Use in Buildings", Turkey, Antalya, May 9 - 12, 2010. - 5 p.
- 3) Borodiņecs A., Gaujēna B. The Air Exchange Rate in Multi-Storey Apartment Buildings Depending on the Floor Level// Proceedings of 10th REHVA World Congress CLIMA 2010 "Sustainable Energy Use in Buildings", Turkey, Antalya, May 9 - 12, 2010. - 5 p.
- 4) Vilnītis M., Noviks J., Gaujēna B., Paplavskis J. Impact of External Factors on Humidity Migration Processes in Walls Made from Autoclaved Aerated Concrete// Proceedings of Advanced Computational Methods and Experiments in Heat Transfer XI, Estonia, Tallin, July 14 - 16, 2010. – p. 212-217.
- 5) Vilnītis M., Noviks J., Gaujēna B. Heat Transfer and Humidity Migration Processes Modelling in Walls Made from Autoclaved Aerated Concrete// Proceedings of 1st Central European Symposium on Building Physics, Poland, Cracow, September 13 - 15, 2010. – p. 113-117.
- 6) Borodiņecs A., Gaujēna B. Specifics of Air Distribution in Multi-Storey Apartment Buildings// Proceedings of the 2nd International Conference Advanced Construction, Lithuania, Kaunas, November 11 - 12, 2010. – p. 221-226.
- 7) Borodiņecs A., Gaujēna B., Vāravš V., Krēsliņš A. The Influence of External Wall Thermal Mass on Indoor Air Parameters Stability// Proceedings of 9th Nordic Symposium on Building Physics NSB 2011: Vol.3, Finland, Tampere, May 29 – June 2, 2011. – p. 1095-1101.
- 8) Borodiņecs A., Gaujēna B., Zemītis J., Krēsliņš A. The Stack Effect Influence on Air Exchange Rate and IAQ in Dwelling Buildings// Proceedings of 12th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Unites States of America, Texas, Austin, June 5 - 10, 2011. - 6 p.
- 9) Pšeničnaja J., Gaujēna B., Krēsliņš A. Evaluation of working parameters of radiant heating systems// Proceedings of 2nd WTA International PhD Symposium, Czech Republic, Brno, Oktober 6 - 7, 2011. - p. 196-205.

- 10) Vilnītis M., Gaujēna B. Heat transfer in external walls made from autoclaved aerated concrete// Proceedings of International Scientific conference „Renewable energy and energy efficiency”, Latvia, Jelgava, May 28 - 30, 2012. – p. 218-223.
- 11) Pšeničnaja J., Gaujēna B. Evaluation of working parameters of radiant heating systems// Scientific Journal of RTU. 2. series., Būvzinātne. - 13. vol., 2012. – p. 41-46.
- 12) Gaujēna B., Zemītis J., Vāravš V., Borodiņecs A. Minimization of Maximal Heat Capacity of Heating Systems// Proceedings of Central & Eastern Europe Energy Forum, Romania, Neptun-Olimp, June 17 - 21, 2012. - 6 p.
- 13) Borodiņecs A., Gaujēna B. The implementation of building envelopes with controlled thermal resistance// Proceedings of 10th International Conference “Healthy Buildings 2012”, Australia, Brisbane, July 8 - 12, 2012. - 8 p.
- 14) Borodiņecs A., Zemītis J., Gaujēna B. Determination of optimal air exchange rate to provide optimal IAQ// Proceedings of 10th International Conference “Healthy Buildings 2012”, Australia, Brisbane, July 8 - 12, 2012. - 6 p.
- 15) Krēslīņš, A., Pšeničnaja, J., Ivancovs, D., Gaujēna, B. Ceiling Panels Radiant Heating Systems// Proceedings of XI Studying Conference „Indoor Air and Environment Quality”, Vietnam, Hanoi, March 23 - April 5, 2013. – p. 246-253.