

# ĒKU SILTUMA ZUDUMU ANALĪZE, IZMANTOJOT MATEMĀTISKOS MODEĻUS

## *Numerical Modelling of Room Thermal Comfort Conditions*

S. Gendels, A. Jakovičs<sup>1</sup>

Latvijas Universitāte

Zeļļu 8, Rīga, tālr. 7033783, e-pasts: stasis@modlab.lv,<sup>1</sup>ajakov@latnet.lv, fakss: 7033781

### Abstract

*Particular heat transfer coefficients of building elements gives quantitative notion only about heat losses through this building element. Analysis of the overall heat balance and heat losses of complete building and study of particular contribution of building elements in overall balance allows one to figure out the state of the building and find the building elements of bounding construction with most significant heat losses. Project variants of the buildings (or rebuilding in case of renovation), which ensure the desirable economy of energy and proportions of investments can be find varying the proportions of the surface area of building elements (e.g., windows and doors).*

*A lot of factors can be included in requirements of heat consumption of the building. Moreover, monthly calculations are possible. These both aspects contribute in so called method of full calculations, which is made in correspondence with standard EN 832. Though, it is possible to use also the simplified variant of calculations offered by Latvian building normative LBN 002-01. Both approaches of modelling are realised in elaborated software HeatMod, which is made in laboratory of MMTEP.*

*Both methodologies are applicable to buildings, which can be divided in separate blocks in such a way that temperature in each of blocks is approximately constant or exists different number of floors in each of blocks. Separate analysis of heat balance is made for each block and finally the obtained heat consumptions are summed together. This allows one to consider really existing temperature difference in building, e.g., in office and depository. It is possible to approximate also the influence of given regime of temperature.*

*The possibility to minimise heat losses and their contributions are analysed on particular examples. Comparative analysis of both methods is performed and the dependence of various heat transfers on the change of different input data are studied.*

**Keywords:** *mathematical modelling; numerical simulation; hydrodynamics; heat exchange; convective and conductive heat losses; ANSYS/Flotran; boundary constructions; temperature and air flow distribution; thermal comfort conditions.*

### Ievads

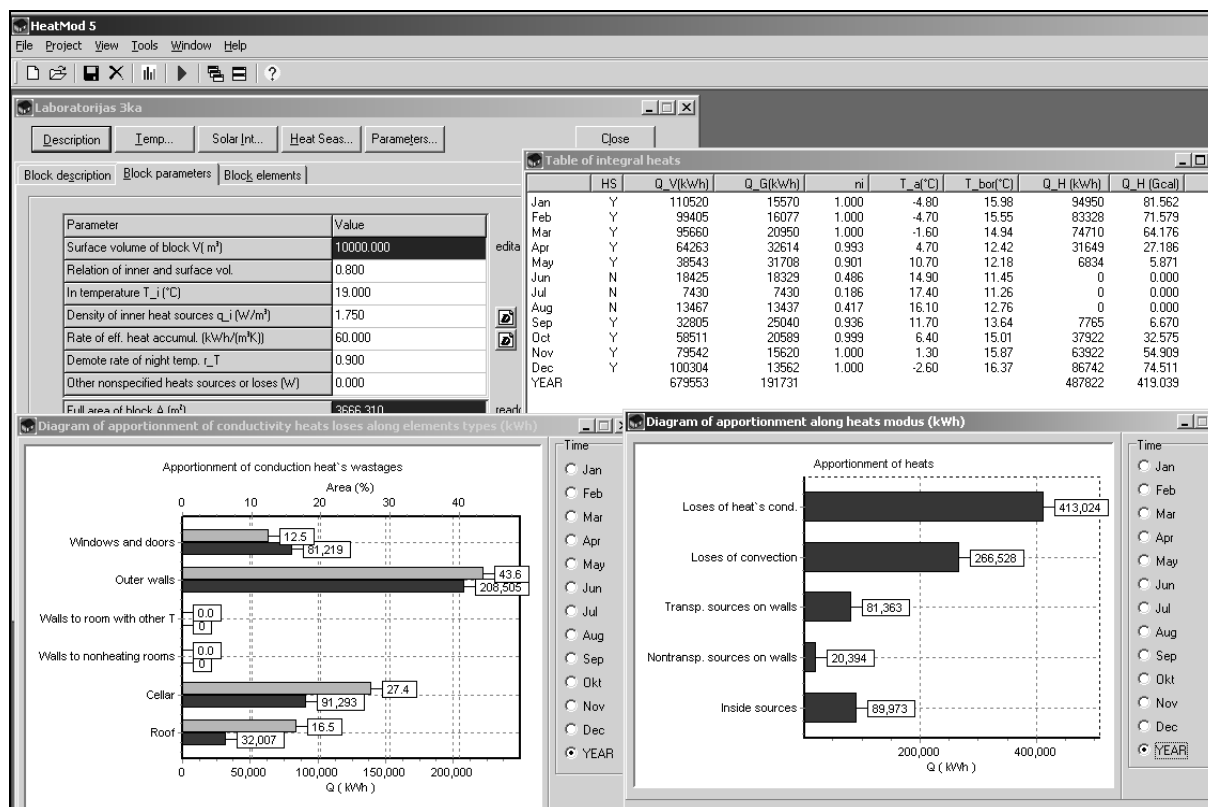
Analizējot ēkas siltuma bilanci, kā arī dažādu būvelementu siltuma zudumu ieguldījumu kopējā bilancē, var objektīvi novērtēt ēkas stāvokli un atrast enerģijas zudumu aspektā būtiskos elementus tās norobežojošās konstrukcijās. Variējot dažādu būvelementu laukumu proporcijas (piem., logi un sienas) un siltuma caurlaidības koeficientu vērtības, var izvēlēties tādu ēkas projekta (vai pārbūves, ja tā tiek renovēta) variantu, kas nodrošina vēlamu energoekonomijas un investīciju proporciju.

Veidojot ēkas siltuma vajadzības bilanci, jāņem vērā, ka siltuma apmaiņa starp ēku un apkārtējo vidi galvenokārt notiek trijos veidos:

- siltuma vadīšanas ceļā (caur necaurspīdīgiem ēkas čaulas elementiem – sienām, pagrabu, jumtu u.c.),
- konvekcijas ceļā (ar gaisa plūsmām caur neblīvām vietām un atverēm, kā arī ar piespiedu ventilācijas palīdzību),
- siltuma starojuma ceļā (ar elektromagnētiskā starojumu infrasarkanajā diapazonā caur caurspīdīgiem elementiem, t.i. stiklotām virsmām).

Minēto siltuma apmaiņas faktoru analīzi un aprēķinus var veikt pa mēnešiem - lietot t.s. pilno aprēķinu metodi [1], kas veidota saskaņā ar Vācijas standartu DIN 4108 [2]. Taču iespējams izmantot arī vienkāršotu aprēķinu variantu, kas tiek piedāvāts Latvijas Būvnormatīvā [3].

Abas metodikas lietojamas ēkām, kuras iespējams sadalīt telpu blokos, katrā no kuriem temperatūra tuvināti ir nemainīga vai arī ir vienāds stāvu skaits. Katrai šādai telpu grupai tiek veidota atsevišķa siltuma bilance un beigās iegūtās siltuma vajadzības tiek summētas. Tā iespējams tuvināti ievērot ēkās reāli eksistējošās temperatūru atšķirības, piem., birojos un noliktavās. Tuvināti iespējams ievērot arī uzdotu temperatūras režīmu, piem., temperatūras pazemināšanas naktīs ietekmi. Īsi apskatīsim abas modelēšanas pieejas, kuras ir realizētas LU VTPMM laboratorijā izstrādātajā programmatūrā *HeatMod*.



1. attēls. Raksturīgs modelēšanas programmas *HeatMod* logs

## Aprēķins uz mēneša siltuma bilances bāzes

Kā viens no iespējamajiem modeļa variantiem ir t.s. pilna siltuma bilance, kuras pamatā ir standarts [2] un kurā siltuma zudumu analīze tiek veikta katram mēnesim atsevišķi. Pilnais modelis ne tikai uzskatāmi parāda siltuma zudumu sadalījumu pa to veidiem, elementu tipiem, mēnešiem, bet arī ļauj izvēlēties projekta variantu, kas atbilst kādām konkrētām prasībām un ir realizējams ar iespējami minimāliem ieguldījumiem. Kā piemēru var minēt dažādu būvkonstrukciju siltuma caurlaidības koeficientu un laukumu variācijas ar mērķi optimizēt ieguldījumus, tajā pašā laikā apmierinot būvnormatīva prasības.

Vispārīgā gadījumā ēkas apkures siltuma patēriņu nosaka:

- siltuma vadīšanas un starojuma zudumi caur ārējiem būvelementiem. Šos zudumus raksturo ar būvelementu siltuma caurlaidības koeficientu  $U$ ,  $W/(m^2 \cdot K)$ ;
- konvektīvie siltuma zudumi, siltajam iekštelpu gaisam apmainoties ar auksto āra gaisu (ventilācija, utt.). Tos raksturo ar ēkas gaisa apmaiņas koeficientu  $n$ , (1/h);
- pārējie siltuma zudumi, ko nosaka siltā ūdens patēriņš, kanalizācija, gaisa mitrums u.c.;
- Saules radiācijas avoti, ko nosaka tiešais starojums caur caurspīdīgiem elementiem (piem., logi) un siltuma absorbcija uz necaurspīdīgu būvelementu virsmas;

- iekšējie siltuma avoti, ko nosaka darbināmās elektriskās iekārtas, mākslīgais apgaismojums, cilvēku un dzīvnieku ķermeņu siltums u.c. faktori.

Siltuma vadīšanas un ar gaisa apmaiņu saistītie zudumi ir proporcionāli konkrēto iekštelpu un āra temperatūru starpībai. Caurspīdīgiem un daļēji caurspīdīgiem būvelementiem to  $U$  vērtībā iekļauti arī starojuma siltuma zudumi. Ar ūdens apmaiņu un gaisa mitrumu saistītie zudumi ir ļoti mazi salīdzinājumā ar iepriekšminētajiem un parasti netiek ievēroti. Standartos (piem., [2]) pēc datu statistiskās analīzes veikti vidējoti pieņēmumi par tipisko enerģijas ģenerāciju telpās ar dažādu lietojumu. Ēku elementu siltuma akumulācija, kura stingri stacionāras analīzes gadījumā nav būtiska, tiek ievērota saistībā ar saules enerģijas un iekšējo siltuma avotu izmantošanas efektivitāti.

Aprēķinu metode bāzēta uz ēkas mēneša enerģijas bilanci kvazistacionārā stāvoklī, kurā ievērotas iekšējo un saules enerģijas avotu dinamiskās ietekmes, kas daļēji nodrošina noteiktas iekštelpu temperatūras  $T_i$  uzturēšanai vajadzīgo siltuma daudzumu. Tādējādi metode ļauj aprēķināt siltuma vajadzību  $Q_H$ , kas jānodrošina ar apkures sistēmas dažādo elementu (apkures radiatoru, el. sildītāju utt.) palīdzību. Summējot, iegūstam kopējo siltuma vajadzību.

Katrā mēnesī apsildīšanai nepieciešamais siltuma daudzums tiek noteikts no siltuma bilances ēkas zonām ar atšķirīgām iekštelpu temperatūrām. Siltuma avotu jaudu nosaka vidējais saules starojuma siltuma daudzums un ieguvums no iekšējiem siltuma avotiem. Īpatnējos siltuma zudumus nosaka siltuma vadīšanas un konvekcijas siltuma zudumu summa.

Mēneša bilances sastādīšanai nepieciešamās vērtības nosakāmas secīgu soļu veidā:

1. Ēkas telpu bloku ar atšķirīgām temperatūrām tilpumu, ēkas ārsienu un tās bloku ar atšķirīgām temperatūrām atdalošo iekšsienu laukumu aprēķins.
2. Īpatnējo siltuma zudumu noteikšana.
3. Iekšējo temperatūru fiksācija (piem.,  $T_i=20^{\circ}\text{C}$  dzīvojamām telpām) vai to izmaiņu režīma uzdošana dažādiem telpu blokiem, lietojot temperatūras redukcijas faktoru.
4. Vidējās mēneša āra gaisa temperatūras attiecīgajā klimatiskajā zonā un saules starojuma intensitātes noteikšana uz meteoroloģisko datu bāzes.
5. Iekšējo siltuma avotu jaudas vidējās vērtības un saules starojuma radītā siltuma daudzuma aprēķins un to izmantošanas lietderības koeficienta noteikšana mēnesim.
6. Apkures robežtemperatūras, kuru āra gaisa mēneša vidējai temperatūrai pārsniedzot, mēnesis netiek piaskaitīts apkures sezonai, noteikšana.
7. Mēneša un apkures sezonas siltuma vajadzības aprēķini.
8. Ieejas datu un aprēķinu rezultātu attēlojums tabulu un diagrammu veidā.

Labi siltumizolētās ēkās svarīgi ievērot lineāros un punktveida siltuma tiltus, kas var veidoties būvkonstrukciju salaiduma vietās. Tos raksturojošās vērtības var ņemt no tabulām [2, 3], noteikt eksperimentāli, vai arī noteikt, risinot vairākdimensionālas siltuma vadīšanas problēmas. Tabulētu (standartizētu) vērtību izmantošana, fizikālo procesu precizēta modelēšana vai arī mērījumi izmantojami arī visu turpmāk aplūkojamo parametru noteikšanai. Pieejas izvēli nosaka iespējas un aprēķina precizitātes prasības.

Siltuma zudumu uz citas temperatūras telpu blokiem un uz neapkurinātām telpām (pagrabi, verandas, bēniņi utt.) vai caur virsmām, kas robežojas ar grunti, aprēķinam tiek izmantoti temperatūras redukcijas faktori [2]. Ar ierobežotu aprēķinu apjomu visus faktorus precīzi ievērot nav iespējams, tādēļ modelī pieņemta nemainīga gaisa apmaiņas koeficienta  $n$  vērtība mēneša ietvaros. Koeficienta  $n$  standartvērtība telpām bez piespiedu ventilācijas  $n_s=0,8$  1/h. Mehānisku ventilācijas sistēmu gadījumā šī koeficienta vērtība aprēķināma, ievērojot sistēmas efektivitāti un to darbināšanas vidējo laiku [2]. Blīvējuma pakāpe arī ir nosakāma eksperimentāli vai matemātiski modelējot. Ēkas iekšējie siltuma avoti ir būtiski atkarīgi no tās izmantošanas rakstura, un to mēneša jaudas vidējo vērtību normē uz tilpuma vienību. Dzīvojamām ēkām, piem., tas ir  $1,75 \text{ W/m}^3$ , administratīvām ēkām –  $2,2 \text{ W/m}^3$ . Saules starojuma pievadīto siltuma daudzumu nosaka vidējā saules starojuma intensitāte uz

būvelementu virsmām atkarībā no to orientācijas un slīpuma, caurspīdīgo elementu enerģijas caurlaidības pakāpe, apēnojums un saules aizsargu esamība, kā arī necaurspīdīgo būvelementu siltuma absorbcijas pakāpe [2, 4]. Arī šeit aprēķinu vienkāršošanai var izmantot integrālas (vidējotās) vērtības no tabulām. Piem., ja elementa izvirzījums ir 1m, tad redukcijas faktors dienvienu fasādei ir 0,4. Līdzīgi, lietojot redukcijas koeficientus, var tuvināti novērtēt arī logu rāmja daļas ietekmi, piem., parastam logam tipiska vērtība ir 0,7.

Apskatītās sakarības un parametri, veido loģiski noslēgtu modeli, kas ļauj noteikt siltuma avotu jaudu, zudumus un aprēķināt ēkas apkures siltuma vajadzību. Vienlaicīgi šī pieeja ir atvērta dažādo modeļa elementu precizētam aprēķinam uz pilnveidotu attiecīgo fizikālo procesu apraksta vai mērījumu bāzes. Precizējumu lietderību nosaka gan attiecīgo faktoru nozīmīgums siltuma bilancē, gan arī veicamo aprēķinu mērķis. Pilnu informāciju par modeli izmantotajiem parametriem, kā arī pašu metodiku var gūt publikācijās [1, 2, 4].

### **Aprēķins atbilstoši LBN 002-01**

2001. gada beigās pieņemtais Latvijas būvnormatīvs LBN 002-01 “Ēku norobežojošo konstrukciju siltumtehnika” [3] ierobežo ēkas siltuma zudumu koeficientu. Tas ir nosakāms uz visu ēkas norobežojošo konstrukciju laukumu un siltumcaurlaidību bāzes. Apskatīsim tā aprēķinu iepriekš minētās VTPMML izstrādātās programmatūras *HeatMod* ietvaros (1. att.).

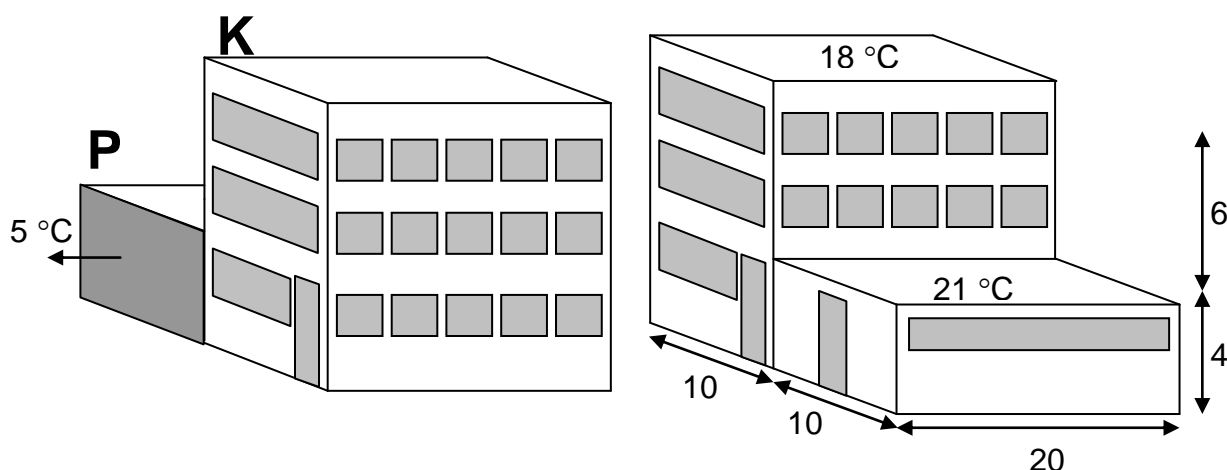
Saskaņā ar LBN 002-01 normatīva II sadaļas prasībām, visai ēkai vai tās atsevišķam blokam (ēka tiek dalīta blokos, ja tās dažādās daļās ir atšķirīgs stāvu skaits vai arī eksistē bloki ar dažādām iekštelpu temperatūrām) kopumā tiek aprēķināts siltuma zudumu koeficients  $H_T$  (W/K), kas norāda kopējos enerģijas zudumus caur ēkas būvelementiem, ja temperatūras starpība uz to pretējām virsmām ir viens grāds. Tajā ietilpst būvelementu laukumi ar attiecīgajiem siltuma caurlaidības koeficientiem, kā arī lineārie un punktveida termiskie tilti.

Normatīvo siltuma zudumu koeficientu  $H_{TR}$  (W/K) nosaka, izmantojot būvelementu laukumus un atbilstošās būvnormatīvā noteiktās siltuma caurlaidības koeficienta vērtības, ka arī termiskos tiltus. Ēkām ar dažādu stāvu skaitu  $H_{TR}$  vērtību nosaka katrai ēkas daļai atsevišķi. Aprēķinos tiek lietots arī temperatūras redukcijas faktors, kas ir atkarīgs no starpības starp iekštelpu temperatūru un āra gaisa vidējo temperatūru apkures sezonas laikā. Aprēķina siltuma zudumu koeficients  $H_T$  nedrīkst pārsniegt normatīvo vērtību  $H_{TR}$ . Atsevišķu būvelementu un lineāro termisko tiltu aprēķina siltuma caurlaidības koeficientu vērtības var pārsniegt normatīvo siltuma caurlaidības koeficientu vērtības, bet nedrīkst pārsniegt maksimālās vērtības.

Atšķirībā no iepriekš aprakstītās t.s., pilnās siltuma bilances, LBN 002-01 tiek analizēti tikai siltuma vadīšanas zudumi. Ja starojuma siltuma pārneses neievērošana var tikt uzskatīta par nelielu vienkāršošanu, tad par būtisku jāuzskata konvektīvo siltuma zudumu neievērošana, kas atsevišķos gadījumos var būt salīdzināmi ar siltuma vadīšanas zudumiem, un pat pārsniegt tos, ja ēkas blīvējums ir slikts. Tāpēc, ja ir jāveic pilna un detalizēta siltuma vajadzības analīze, aprēķinam jāizvēlas uz mēneša bilances bāzes veidotais modelis.

### **Metožu salīdzinošā analīze**

Lai salīdzinātu minētās metodes ēkas siltuma bilances un siltuma zuduma koeficienta aprēķinam un analizēt atšķirības rezultātos, apskatīsim piemēru – ēku, kas parādīta 2. attēlā. Tās trīsstāvu bloka iekštelpu temperatūra ir 18°C, kam piekļaujas vienkārša piebūve ar paaugstinātu iekštelpu temperatūru (21°C) un vienu sienu uz neapkurināmu telpu, kas modelī nav iekļauta. Arī bloku savstarpējā siena aprēķinos netiek iekļauta, jo siltuma zudumi no bloka ar augstāko temperatūru nosaka papildus siltuma pieplūdi blokā ar zemāku temperatūru. Tādēļ kopējā siltuma bilancē šo siltuma daudzumu neievēro.



2. attēls. Modelējamās ēka skice ar tās raksturīgiem izmēriem

Pirmajā aprēķinu variantā būvkonstrukciju siltuma caurlaidības apzināti izvēlētas neatbilstošas būvnormatīva LBN 002-01 nosacījumiem, bet otrajā piemeklētas tādas, lai atbilstu tiem. Ieejas dati abiem ēkas blokiem diviem aprēķinu variantiem apkopoti 1. tabulā. Aprēķini tika veikti ar divām metodēm – uz mēneša bilances modeļa bāzes un saskaņā ar LBN 002-01 izmantojot programmatūru *HeatMod*, ar kuras pilno aprakstu iespējams iepazīties tās lietotāja instrukcijā [5].

Aprēķiniem nepieciešamie parametri ir atšķirīgi abām metodēm, tad programmatūrā to uzdod katrai metodei atsevišķi, taču daži raksturīgie parametri paliek nemainīgi, piem., elementu laukumi un siltuma caurlaidības koeficients, tāpēc tos pietiek uzdot vienu reizi. Līdz ar to aprēķinam uz mēneša bilances bāzes ir nepieciešami daudz vairāk ieejas datu (gan visu ēku, gan arī klimatiskos apstākļus raksturojošie parametri), nekā aprēķinam atbilstoši LBN 002-01, kas ir daudz vienkāršāks. Atbilstoši tam arī rezultāti otrajai metodei sniedz lietotājam daudz mazāk informācijas par ēkas siltumefektivitāti. Tie tikai parāda tās atbilstību vai neatbilstību normatīva prasībām. Salīdzināsim ar abām metodēm iegūtos rezultātus un tālākās to izmantošanas iespējas.

1. tabula

### Modelējamās ēkas (2. attēls) bloku parametri

Elements	Elementu laukums (m <sup>2</sup> )		U (W/ m <sup>2</sup> K)	
	Korpuss (K) (3 stāvi)	Piebūve (P) (1 stāvs)	1. variants	2. variants
Sienas (>100 kg/m <sup>2</sup> )	508	96	0,4	0,3
Jumts	200	200	0,3	0,2
Grīda uz grunts	200	200	0,3	0,2
Durvis un logi	218	24	2,7	1,3
Siena uz neapkurinātu telpu	-	40	0,4	0,3

Aprēķinā uz pilnās mēneša siltuma bilances bāzes, ievērojot konvektīvos un radiācijas siltuma apmaiņas procesus, tiek iegūti:

- dati par ēkas integrālajiem siltuma zudumiem, avotiem un vajadzību;
- siltuma zudumu un avoti sadalījums pa to veidiem;
- siltuma vadīšanas zudumu sadalījums pa elementu tipiem.

Bez šo parametru skaitlisko vērtību aprēķina, tiek nodrošina arī to grafiskā attēlošana un salīdzināšana (3. attēls).

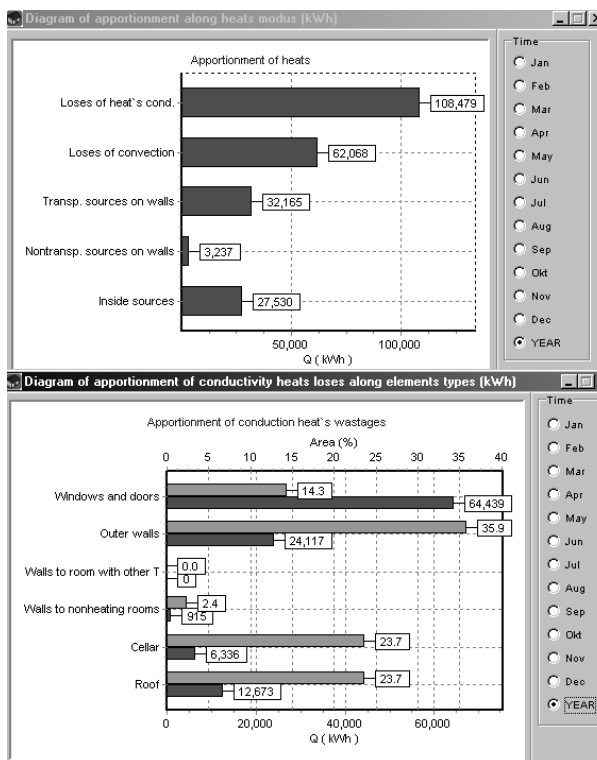
Informācija tiek aprēķināta un apkopota gan pa mēnešiem, gan visas apkures sezonas laikā, kas ļauj novērtēt ne tikai katram mēnesim raksturīgos siltuma zudumus vai avotus, bet arī noteikt apkures sezonas ilgumu. Pēc noklusēšanas apkures sezona tiek rēķināta

automātiski, taču lietotājam iespējams uzdot arī fiksētu apkures sezonas dienu skaitu, kā rezultātā tiks aplūkota ēkas siltuma bilance tikai attiecīgajos mēnešos. Kopējā ēkas siltuma vajadzība mēnešos, kuros apkure nav nepieciešama, netiek analizēta.

Veicot aprēķinus šai pašai ēkai atbilstoši Latvijas Būvnormatīvam, iegūstam sekojošu informāciju:

- ēkas un tās bloku siltuma zudumu koeficientus, kā arī atbilstošos normatīvos siltuma zudumu koeficientus saskaņā ar vispārīgo un vienkāršoto aprēķinu formulām;
- kopējo norobežojošo konstrukciju laukumu, siltuma tiltu kopgarumu un/vai skaitu;
- siltuma zudumu koeficientu sadalījumu pa būvelementiem un blokiem;
- salīdzinājumu būvelementu siltuma zudumu koeficientiem un to laukumiem.

Abu variantu aprēķinu pamatzinātni, kas iegūti ar katru no metodēm, apkopot 2. tabulā. Izmantojot uz mēneša siltuma bilances bāzētu aprēķinu, kopējā ēkas siltuma vajadzība tiek izrēķināta kWh. Savukārt izmantojot aprēķinu saskaņā ar LBN 002-01, ēkas siltuma zudumus raksturo t.s. siltuma zudumu koeficients (W/K). Atšķirības rezultātos ir izskaidrojamas ar dažādu faktoru neievērošanu vienkāršākajā modelī, it īpaši jāatzīmē konvektīvie siltuma zudumi. Veicot detalizētu ēkas siltuma efektivitātes analīzi, lietderīgi izmantot uz mēneša bilances bāzētu aprēķinu metodi. Tā sniedz pilnīgāku un detalizētāku pārskatu par siltuma zudumiem, un to sadalījumiem pa veidiem un elementu tipiem. Pie tam iespējams analizēt situāciju ne tikai visai sezonai kopumā, bet arī viena vai dažu mēnešu ietvaros.



3. attēls. Aprēķinu rezultātu grafiskā attēlošana

2. tabula

**Siltuma zudumu raksturlielumi, kas iegūti ar dažādām metodēm**

Aprēķinu metode	Gada siltuma patēriņš, kWh		Siltuma zudumu koef., W/K	
	1. variants	2. variants	1. variants	2. variants
Mēneša bilance	170547 (100%)	118307 (100%)	1781* (155%)	1235* (184%)
LBN 002-01	110220* (65%)	63968* (54%)	1151 (100%)	668 (100%)
Atbilstība LBN	-	+	-	+

\* - netiek tieši aprēķināti programmatūrā

**Literatūra**

1. Jakovičs A., Gendelis S., Krievāns Z. *Ēku siltuma zudumu un apkures siltuma vajadzības modelēšana*. Latvijas Fizikas un tehnisko zinātņu žurnāls, Nr. 3, 2000. g., lpp. 3-18.
2. DIN 4108-6 *Wärmeschutz im Hochbau. Berechnung des Jahresheizwärmebedarfs von Gebäuden*. 1995.
3. Latvijas būvnormatīvs LBN 002-01. *Ēku norobežojošo konstrukciju siltumtehnikā*, 2001.
4. EN 832 *Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden. Berechnung des Heizenergiebedarfs. Wohngebäude*. 1992.
5. HeatMod v 5.01. *Lietotāja instrukcija*. 2002.