

LATVIJAS UNIVERSITĀTE
FIZIKAS UN MATEMĀTIKAS FAKULTĀTE



ĒKAS SILTUMFIZIKĀLO PROCESU
KOMPLEKSĀ ANALĪZE

Staņislavs Gendelis

PROMOCIJAS DARBS
Doktora grāda iegūšanai fizikā

Darba vadītājs: Andris Jakovičs, Dr. fiz

Rīga, 2012

Anotācija

Šis darbs ir veltīts kompleksai ēkās notiekošo siltumfizikālo procesu analīzei, pielietojot eksperimentālās, analītiskās un skaitliskās modelēšanas pieejas. Tiek apskatīti siltuma apmaiņas procesi būvkonstrukcijās un telpās gan eksistējošās, gan projektējamās būvēs.

Būtiska darba daļa ir saistīta ar dzīvojamo ēku norobežojošo konstrukciju siltumfizikālo raksturlielumu un siltuma/gaisa apmaiņas procesu eksperimentāliem pētījumiem, kā rezultātā ir iegūti dati par siltuma zudumus raksturojošiem lielumiem – siltuma caurlaidības koeficientu U ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$) un gaisa apmaiņas koeficientu n (h^{-1}). Vairāku simtu veikto eksperimentālo mērījumu rezultātā ir izveidota specializētā informatīvā datu bāze, kas atvieglo iespējas veikt precīzāku siltuma pārneses procesu analīzi ēkās. Analīzes rezultātā tika atklāti un sistematizēti visbiežāk sastopamie palielinātas un/vai inženieraprēķiniem neatbilstošas būvkonstrukciju siltuma caurlaidības iemesli. Eksperimentālo pētījumu veikšanai tika izveidota un aprobēta mērsistēma ar oriģinālu datu apstrādes metodiku, kas ļauj veikt mērījumus arī izteikti nestacionāros ekspluatācijas apstākļos, kad klasiskās kumulatīvās metodes nav lietojamas. Vienlaicīgi tiek samazināts mērījumu ilgums un uzlabota to precizitāte. Darba ietvaros tika izstrādāta un aprobēta arī oriģināla materiālu siltuma ietilpības c ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$) noteikšanas metode, kura tiek izmantota uz izveidotā materiālu siltuma vadītspējas λ ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$) noteikšanas mērsistēma ar t.s. „karsto plati”.

Ir izveidoti un veiksmīgi aprobēti integrālie visas ēkas siltuma bilances modeļi, kuros tiek izmantoti mērījumos iegūtie dati par atsevišķu siltumfizikālo procesu raksturlielumiem. Parādīts, ka tādu matemātisko modeļu lietojumi palīdz objektīvi novērtēt konkrētu fizikālo procesu lomu kopējā ēkas siltuma bilancē un ļauj precīzāk prognozēt integrālos energopatēriņa rādītājus. Ir veikta arī atšķirīgu ēkas siltuma bilances modeļu salīdzinošā analīze, kas parādīja to lietojumu un precizitātes robežas noteiktu risināmo problēmu kontekstā.

Svarīga ir arī darba ietvaros veiktā atsevišķas telpas 2D un 3D skaitliskā modelēšana, kas dod iespēju analizēt dažādu fizikālo un ģeometrisko parametru ietekmi uz siltumfizikālajiem procesiem. Šādi modeļi ļauj iegūt fizikālo lauku – temperatūras, gaisa kustības ātrumu sadalījumu telpā un pētīt to izmaiņas atkarībā no pārējiem faktoriem, kas, savukārt, ļauj samazināt apkurei nepieciešamo siltuma daudzumu, tajā pat laikā būtiski neietekmējot vai pat uzlabojot cilvēka termiskā komforta apstākļus telpā. Līdz šim citu autoru veiktie skaitliskie aprēķini ietvēra tikai kāda konkrēta parametra studijas, bieži vien neievērojot citus svarīgu faktorus, un nebija savstarpēji salīdzināmi. Šis darbs ir pirmais kompleksais dažādu faktoru ietekmes analīzi aptverošais pētījums.

Satura rādītājs

1. IEVADS.....	1
1.1. PĒTĪJUMU AKTUALITĀTE.....	1
1.2. DARBA NOVITĀTE UN PRAKTISKĀ IZMANTOŠANA	4
1.3. DARBA MĒRĶI UN UZDEVUMI.....	5
1.4. LĪDZŠINĒJO PĒTĪJUMU APSKATS.....	6
1.4.1. Eksperimentālie mērījumi.....	7
1.4.2. Ēku siltuma bilances matemātiskie modeļi.....	10
1.4.3. Atsevišķu telpu matemātiskā modelēšana	12
2. EKSPERIMENTĀLĀS ĒKAS NOROBEŽOJOŠO KONSTRUKCIJU ANALĪZES METODES.....	15
2.1. TERMOGRĀFISKĀ DIAGNOSTIKA.....	16
2.1.1. Termogrāfijas metode	17
2.1.2. Raksturīgie piemēri	27
2.1.3. Secinājumi	29
2.2. SILTUMA VADĪŠANAS ZUDUMI	30
2.2.1. Mērījumi stacionāros apstākļos ar „karstās plates” metodi.....	37
2.2.2. Siltuma caurlaidības mērījumi termiskajā kamerā.....	56
2.2.3. Mērījumi nestacionāros apstākļos ekspluatācijā esošās ēkās.....	80
2.2.4. Secinājumi	107
2.3. KONVEKCIJAS SILTUMA ZUDUMI	108
2.3.1. Ēkas gaisa apmaiņas koeficients	112
2.3.2. Raksturīgie mērījumu piemēri	117
2.3.3. Secinājumi	122
2.4. SAULES ENERĢIJAS CAURLAIDĪBA	123
2.5. SECINĀJUMI	131
3. ĒKAS SILTUMA BILANCES ANALĪTISKIE APRĒĶINI.	134
3.1. SILTUMA BILANCE ATBILSTOŠI LATVIJAS BŪVNORMATĪVA LBN 002-01 PRASĪBĀM.	136
3.1.1. Metodes apraksts.....	136
3.1.2. Aprēķinu piemēri	139
3.2. UZ MĒNEŠA PATĒRIŅA BALSTĪTĀ SILTUMA BILANCE.....	142
3.2.1. Metodes apraksts.....	143
3.2.2. Aprēķinu piemēri	149
3.3. ABU METOŽU SALĪDZINĀJUMS. SECINĀJUMI.....	156

4. ATSEVIŠĶAS TELPAS SILTUMA ZUDUMU UN TERMISKĀ KOMFORTA APSTĀKĻU MODELĒŠANA	163
4.1. TERMISKĀ KOMFORTA APSTĀKĻI	164
4.2. FIZIKĀLĀ MODEĻA FORMULĒJUMS.....	173
4.3. 2D MODEĻI.....	184
4.3.1. Sildelementa virsmas temperatūras ietekme.....	186
4.3.2. Ārsienas siltuma caurlaidības ietekme	190
4.3.3. Palodzes ietekme	193
4.3.4. Spiedienu starpības ietekme.....	197
4.3.5. Variantu salīdzinošā analīze	202
4.4. 3D MODEĻI.....	209
4.4.1. Spiedienu starpības ietekme.....	213
4.4.2. Palodzes ietekme	218
4.4.3. Sildelementa novietojuma ietekme	220
4.4.4. Apkures veida ietekme	229
4.4.5. Starojuma ievērošana un solārā avota ietekme	234
4.4.6. Variantu salīdzinošā analīze	251
4.5. SECINĀJUMI	256
5. DARBA REZULTĀTI UN SECINĀJUMI.....	258
6. ZINĀTNISKIE PROJEKTI.....	259
7. PUBLIKĀCIJAS UN KONFERENCES.....	260
8. IZMANTOTĀ LITERATŪRA	264
PATEICĪBAS	274

Lietotie apzīmējumi

Apzīmējums	Lielums	Mērvienība
a	Temperatūras vadītspēja	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
a_N	Necaurspīdīgā būvelementa starojuma absorbcija	-
c	Īpatnējā siltumietilpība uz masas vienību	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
c'	Īpatnējā siltumietilpība uz tilpuma vienību	$\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$
c_T	Siltuma plūsmas sensora kalibrācijas konstante	$\text{W m}^{-2} \text{V}^{-1}$
clo	Apģērba izolācijas pakāpe (0,155)	$\text{m}^2 \text{K W}^{-1}$
d	Biezums, platums	m vai mm
e	Ēkas vēja aizsargātības koeficients	-
E_b	Starojuma jauda	W m^{-2}
f_i	Laukumu relatīvās daļas	-
g	Brīvās krišanas paātrinājums (9,81)	m s^{-2}
b_A	Ēkas 1 m^2 īpatnējo siltuma zudumu koeficients	$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$
H	Ēkas īpatnējie siltuma zudumi	W K^{-1}
H_{TR}	Normatīvais siltuma zudumu koeficients	W K^{-1}
H_T	Siltuma zudumu koeficients	W K^{-1}
H_V	Konvekcijas siltuma zudumi	W K^{-1}
k	Turbulentā kinētiskā enerģija	$\text{m}^2 \text{s}^2$
K	Relatīvā kļūda	-
l	Garums, augstums	m
met	Metabolisma pakāpe (58,2)	W m^{-2}
n	Gaisa apmaiņas koeficients	h^{-1}
n_{LBN}	Ēkas gaisa caurlaidība	$\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$
N	Siltuma daudzums	J vai kWh
p	Spiediens	Pa
P	Siltuma jauda	W
q	Siltuma plūsmas blīvums	W m^{-2}
\dot{q}	Iekšējo siltuma avotu jaudas blīvums	W m^{-3}
Q	Siltuma plūsma (jauda)	W
Q'_H	Ēkas īpatnējā (normētā) gada siltuma vajadzība (patēriņš)	kW h m^{-3}
Q_H	Ēkas gada siltuma vajadzība (patēriņš)	kW h
$Q_{H,M}$	Ēkas mēneša M siltuma vajadzība (patēriņš)	kW h
Q_V	Ēkas gada siltuma zudumi	kW h

$Q_{V,M}$	Ēkas mēneša M siltuma zudumi	kW h
Q_G	Ēkas gada kopējie siltuma avoti	kW h
$Q_{G,M}$	Ēkas mēneša M kopējie siltuma avoti	kW h
R	Siltuma vadītspējas pretestība	$m^2 K W^{-1}$
RC	Solārā starojuma redukcijas koeficients	-
S	Laukums	m^2
SF	Solārais faktors (siltuma enerģijas caurlaidība)	-
SF_{ekv}	SF ekvivalents faktors necaurspīdīgiem elementiem	-
t	Laiks	s vai h
t_M	Mēneša dienu skaits	-
T	Temperatūra	$^{\circ}C$ vai K
T_{ic}	Ēkas iekštelpu temperatūra	$^{\circ}C$ vai K
T_{∞}	Apkārtējās vides temperatūra tālu no virsmas	$^{\circ}C$ vai K
\bar{T}	Vidējotā temperatūra	$^{\circ}C$ vai K
Tu	Turbulences intensitāte	%
v	Ātrums	$m s^{-1}$
V	Tilpums	m^3
V_N	Tilpums	m^3
V'	Gaisa plūsma	$m^3 s^{-1}, m^3 h^{-1}$
U	Siltuma caurlaidības koeficients	$W m^{-2} K^{-1}$
U_{RN}	Normatīvais siltuma caurlaidības koeficients	$W m^{-2} K^{-1}$
U_{RM}	Maksimālais siltuma caurlaidības koeficients	$W m^{-2} K^{-1}$
\tilde{U}	Spriegums	V
x, y, z	Dekarta ortogonālās koordinātas	m
α	Siltuma atdeves koeficients	$W m^{-2} K^{-1}$
β	Termiskās izplešanās koeficients	K^{-1}
γ	Leņķis	o
δ_{ij}	Kronekera simbols (0 pie $i=j$ un 1 pie $i \neq j$)	-
ε	Virsmas emisijas koeficients	-
ε	Turbulentās kinētiskās enerģijas disipācijas ātrums	$m^{-2} s^{-3}$
φ	Gaisa relatīvais mitrums	%
κ	Temperatūras faktors	-
λ	Siltuma vadītspēja (siltuma vadišanas koeficients)	$W m^{-1} K^{-1}$

λ_{ef}	Efektīvā siltuma vadītspēja	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
λ_{max}	Viļņa garums	μm
η	Dinamiskā viskozitāte	$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$
η_t	Turbulentā viskozitāte	$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$
η_M	Ēkas siltuma avotu izmantošanas efektivitāte	-
ν	Kinemātiskā viskozitāte (η/ρ)	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
ρ	Blīvums	kg m^{-3}
σ	Stefana-Bolcmaņa konstante ($5,67 \cdot 10^{-8}$)	$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}$
τ	Termiskā laika konstante	diennakts vai h
χ	Punktveida termiskā tilta siltuma caurlaidība	W K^{-1}
ψ	Lineārā termiskā tilta siltuma caurlaidība	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
$\Phi_{S,M}$	Ēkas mēneša M solārā starojuma siltuma jauda	W
$\Phi_{I,M}$	Ēkas mēneša M iekšējie avoti siltuma jauda	W

Abreviatūras

ANSI	American National Standards Institute
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
ASTM	American Society for Testing and Materials
DIN	Deutsche Institut für Normung
EN	European Standard
ISO	International Organization for Standardization
LU FMF	Latvijas Universitātes fizikas un matemātikas fakultāte
PAIC	Procesu analīzes un izpētes centrs, SIA
VTPMML	Vides un tehnoloģisko procesu matemātiskās modelēšanas laboratorija

1. Ievads

1.1. Pētījumu aktualitāte

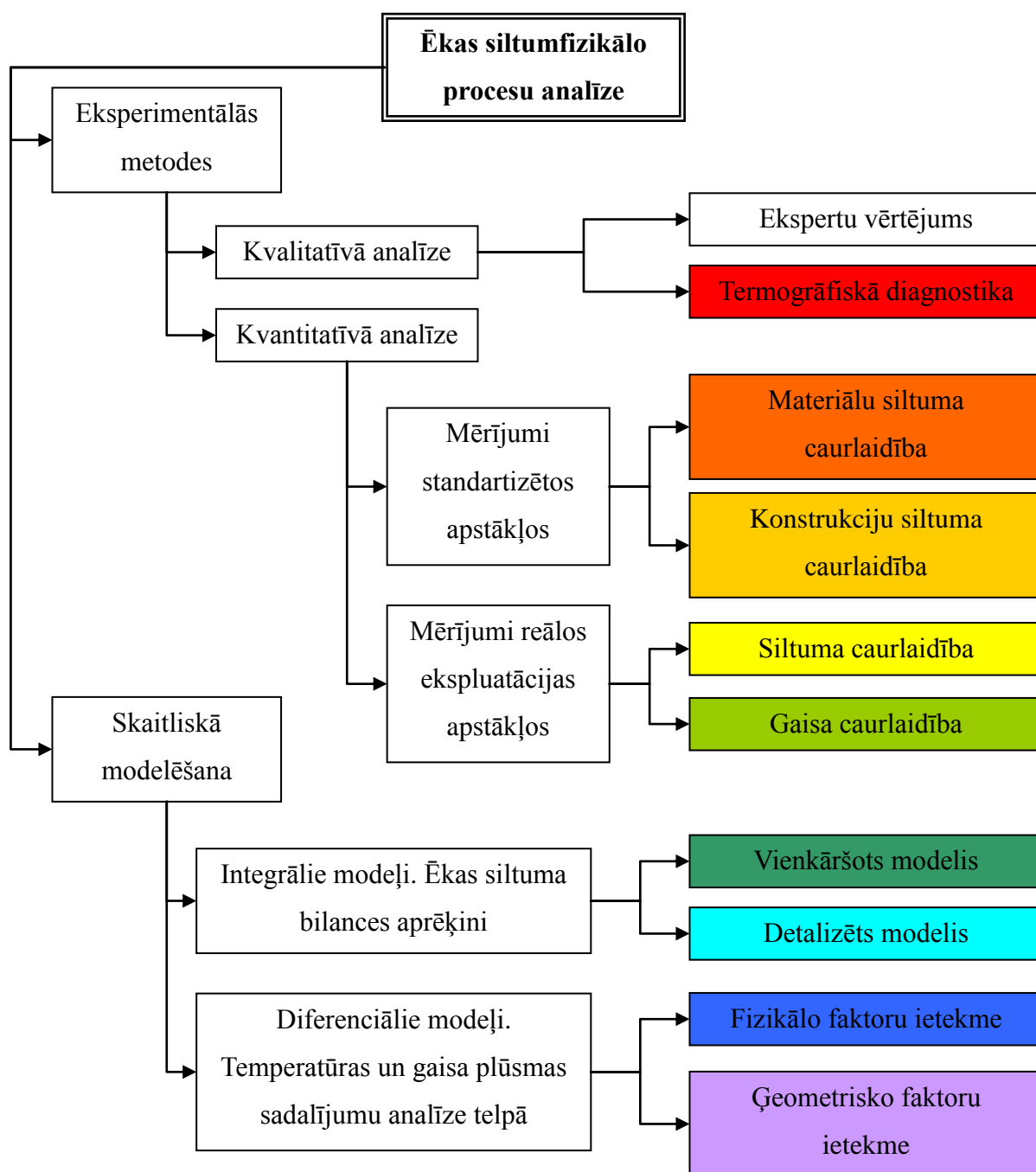
Viens no būtiskākajiem enerģijas patērētājiem Eiropas Savienībā un Latvijā ir ēkas. Šī sektora daļa sastāda ap 40% no kopējā enerģijas patēriņa (EU, 2010), lielāka daļa no tā tiek izmantota apkures vajadzībām. Pateicoties mūsdienīgu būvmateriālu un risinājumu lietošanai, var panākt, ka jauncelamajām ēkām siltuma zudumi sastāda vidēji 50% no siltuma patēriņa ēkās, kas celtas pirms 50 gadiem.

Pēdējās desmitgadēs Latvijā ir būtiski augusi nepieciešamība pēc iespējas pilnīgāk un objektīvāk novērtēt ēku siltuma zudumus gan kvalitatīvi, gan kvantitatīvi. Optimizējot siltuma apmaiņas procesus un tādējādi samazinot siltuma zudumus no ēkām, var panākt ne tikai enerģijas patēriņa (t.sk. arī CO₂ izmešu daudzuma) un izdevumu ekonomiju, bet arī nodrošināt vai pat uzlabot termiskā komforta apstākļus telpās. Tas kļūst arvien aktuālāk, plaši izplatoties zema energopatēriņa ēku koncepcijai, komforta apstākļi kurās var būtiski atšķirties un ir relatīvi maz izpētīti.

Pēdējos gados celtas ēkas pārsvarā atbilst Latvijas Būvnormatīvam „Ēku norobežojošo konstrukciju siltumtehnika” (LBN 002-01, 2001), taču apsekojot virkni agrāk celtu ēku pirms to renovācijas un arī pēc tās, kā arī atsevišķas jaunceltnes, konstatēti būtiski defekti un nepilnības, ko varēja novērst jau plānošanas stadijā, veicot rūpīgāku analīzi vai veicot atbilstošus matemātiskus aprēķinus vai modelējot fizikālos procesus. Veicot dažādu ēkas būvkonstrukciju stāvokli raksturojošo parametru mērījumus, pirms renovācijas darbu uzsākšanas un pēc to pabeigšanas, var ne tikai gūt priekšstatu par raksturīgo parametru (piem., siltuma caurlaidības, gaisa apmaiņas koeficienta) maiņu, bet arī uz ēkas siltuma bilances matemātiskā modeļa bāzes noteikt kopējos siltuma zudumus un to sadalījuma pa zudumu un būvelementu veidiem izmaiņas. Veicot modelēšanu atbilstoši dažādiem iespējamiem ēkas pārbūves projektu variantiem, iespējams izvēlēties piemērotāko variantu atkarībā no mērķa uzstādījuma – apkures siltuma daudzuma samazināšana, komforta nosacījumu uzlabošana vai arī ekonomiskais izdevīgums.

Lai detalizēti analizētu ēku siltuma zudumu samazināšanas iespējas, nepieciešams lietot kompleksu pieeju, kurā ietilpst gan kvalitatīvais novērtējums un kvantitatīvie siltuma apmaiņu raksturojošo parametru mērījumi, gan arī ēku siltuma bilances (integrālie) matemātiskie modeļi un atsevišķu telpu termiskā komforta apstākļu diferenciālie modeļi. Šāda kompleksa pieeja un tai atbilstoša metodika tika izveidota balstoties uz daudzu veikto eksperimentālo mērījumu un modeļaprēķinu datiem. Izveidotās metodikas lietojumi un veiktās analīzes rezultāti tiek detalizēti izklāstīti promocijas darbā.

Izstrādātās pieejas ietvaros ēkas energoefektivitātes stāvokļa analīzei lietderīgi izmantot shēmu, kas parādīta attēlā 1.1 (shēmā iekrāsoto lauku tēmas ietilpst promocijas darbā). Saskaņā ar to, novērtējot ēkas energoefektivitāti, ir nepieciešams izmantot gan eksperimentālās, gan arī matemātiskās modelēšanas metodes. Pirmā veida metodes var tikt nosacīti klasificētas kā kvalitatīvās un kvantitatīvās.



Attēls 1.1. Ēkas siltumfizikālo procesu un energoefektivitātes stāvokļa analīzes vispārīgā shēma.

Sākotnējo informāciju par ēkas stāvokli eksperts var iegūt jau vizuālās apskates laikā, bez papildus eksperimentiem atklājot būtiskus siltuma izolācijas defektus. Lielāku informācijas daudzumu par ēkas stāvokli sniedz virsmu temperatūras noteikšana no attāluma, t.s. termogrāfija (Vollmer *et.al.*, 2010), kas ļauj atklāt arī slēptus defektus, piem., aukstuma tiltus. Ar tās palīdzību var identificēt arī būvelementus ar atšķirīgu uzbūvi vai mitruma saturu, kuriem savukārt var tikt veikta detalizētāka izpēte.

Nākamajā solī ēkas siltuma zudumu analīzei jālieto kvantitatīvie mērījumi – siltuma vadīšanas, konvekcijas un starojuma siltuma pārneses procesus raksturojošo lielumu eksperimentāla noteikšana. Tā kā mērījumiem reālos apstākļos ir noteiktas īpatnības un ierobežojumi un kopumā tie ir komplicēti, tad plaši tiek lietoti arī standartizēti mērījumi stacionāros laboratorijas apstākļos (LVS ISO 8302, 2001; LVS EN ISO 8990, 2007). Ar šādu standartizētu mērījumu palīdzību var noteikt būvkonstrukciju siltuma caurlaidību raksturojošos parametrus un to atbilstību gan normatīvajiem dokumentiem (piem., LBN 002-01, 2001), gan to aprēķinu vērtībām. Savukārt mērījumi reālos ēku ekspluatācijas apstākļos, kam parasti ir izteikti nestacionārs raksturs, pirms šī pētījuma Latvijā praktiski netika lietoti un to iespējas bija maz izpētītas.

Jāatzīmē, ka mērījumiem reālos apstākļos ir savas īpatnības un kopumā tie ir komplicēti. Situācijas, kad ēkas celtniecībai tiek pielietoti viena veida būvelementi (piem., logi, paneli), var veikt to paraugu īpašību mērījumus laboratorijas jeb standartizētos apstākļos, t.i., neatkarīgi no klimatiskajiem apstākļiem speciālajā gatavo būvizstrādājumu siltuma caurlaidības koeficienta noteikšanas iekārtā (DIN EN 674, 1999). Laboratorijas apstākļos ir iespējams veikt standartizētus mērījumus arī homogēniem materiāliem ar nelielu biezumu, izmantojot speciālo siltumvadītspējas noteikšanas iekārtu un attiecīgo metodi (LVS ISO 8302, 2001; LVS EN ISO 8990, 2007; ASTM C 518, 2004). Ar šādu mērījumu palīdzību var novērtēt būvkonstrukciju siltuma caurlaidību raksturojošus parametrus un to atbilstību dažādiem normatīvajiem dokumentiem un standartiem (LBN 002-01, 2001; DIN EN 832, 2003; DIN, 2007), kā arī inženiertehnisko aprēķinu rezultātiem, kā arī noteikt siltuma caurlaidību būvkonstrukcijām ar nezināmu uzbūvi.

Bez siltuma vadīšanas zudumiem caur norobežojošām konstrukcijām ir jānovērtē arī ar gaisa apmaiņu saistītie konvektīvie siltuma zudumi caur atverēm ēkas ārējā čaulā, kas, atkarībā no ēkas stāvokļa, var būt pat noteicošie. To standartizētai mērīšanai izmanto speciālu mēriekārtu BlowerDoor (The Energy Conservatory, 2012), kuras darbības pamatā ir spiedienu starpības radīšana starp telpu un ārgaisu. Tiek noteikts ieplūstošā gaisa daudzums laika vienībā, kas arī ir kvantitatīvs rādītājs gaisa apmaiņai pie uzdotās spiedienu starpības un tādējādi nosaka arī pārnesto siltuma daudzumu. Konvektīvus siltuma zudumus raksturojošie lielumi arī noteikti nacionālajos normatīvos un dažādos standartos (LBN 002-01, 2001; ANSI/ASHRAE Standard 62, 2001; LVS EN 13829, 2002).

Kvalitatīvie novērtējumi un iepriekš minēto mērījumu rezultātā iegūtie kvantitatīvie rādītāji veido pamatu ēkas siltuma zudumu struktūras analīzei un apkures siltuma patēriņa modelēšanai, kā arī telpu termiskā komforta apstākļu optimizācijai, kas līdz šim parasti netika pētīta kopsakarā ar ēku siltuma patēriņu. Ēkas siltuma patēriņa matemātiskais modelis tiek veidots, ņemot vērā visus siltuma apmaiņas veidus un tas var tikt bāzēts vai nu uz vienkāršotiem vidējiem gada (apkures sezonas) vai mēneša aprēķiniem, vai arī veidojot nestacionārus siltuma apmaiņas modeļus (piem., LVS EN ISO 13790, 2009; DIN, 2007; SIA 380/1, 2007). Šādi modeļi parāda siltuma zudumu sadalījumu pa to veidiem, būvelementu tipiem, mēnešiem, kā arī ļauj izvēlēties projekta variantu, kas atbilst kādām konkrētām prasībām un ir realizējams ar iespējami minimāliem ieguldījumiem. Paralēli detalizētam siltuma bilances aprēķinam atsevišķos gadījumos var tikt lietoti vienkāršotie modeļi, kas dod iespēju ātri novērtēt ēkas atbilstību kādai energoefektivitātes klasei vai vienkāršotu normatīvu prasībām (Poussard *et.al.*, 2003; LBN 002-01, 2001).

Svarīga siltumfizikālo procesu analīzes komponente ir termiskā komforta apstākļi – cilvēkam atrodoties telpā, virknei fizikālo parametru ir jābūt noteiktās robežās, lai indivīds nejūtu diskomfortu. Šādu faktoru kopu, kas ietver temperatūru, temperatūru starpību, gaisa kustības ātrumu, mitrumu u.c. lielumus, nosaka standarti (LVS EN ISO 7730, 2006; ASHRAE, 2004). Minētie lielumi parasti tiek kontrolēti eksperimentāli vai noteikti, izmantojot empīriskas sakarības, bet to atkarība no dažādiem telpas fizikālajiem un ģeometriskajiem parametriem praktiski netiek atsevišķi pētīta. Lietojot matemātisko modelēšanu, var veikt aprēķinus atsevišķām telpām, iegūstot gaisa plūsmu un temperatūras sadalījumus to iekšienē un skaitliski noteikt arī citus parametrus (piem., siltuma atdevi no virsmām), kas ietekmē siltuma zudumus no telpas. Tādā veidā ir iespējams sabalansēt dažādus siltumfizikālos un ģeometriskos faktorus, kas ietekmē gan termiskā komforta apstākļus telpā, gan siltuma apmaiņu. Piemērām, gaisa plūsmas telpā un tās intensitātes ir būtiski atkarīgas gan no dažādu objektu izvietojuma tajā, gan arī no norobežojošo konstrukciju siltumtehnikajām īpašībām. Noslēgtā telpā gaisa cirkulāciju nosaka galvenokārt virsmu temperatūras, kas savukārt ir atkarīgas no to siltuma caurlaidības, termiskie apstākļi šajā gadījumā var būt kardināli atšķirīgi no tādas pašas telpas, kurai ir atveres uz blakus esošām telpām vai āru. Gadījumā, ja starp šīm atverēm pastāv arī spiedienu starpība, kā tas reālos apstākļos parasti ir, situācija atkal var būtiski atšķirties no abām iepriekšējām.

1.2. Darba novitāte un praktiskā izmantošana

Līdz šim līdzīgi pētījumi tika veikti kādā šaurā jomā, uzmanību pievēršot tikai vienai specifiskai problēmai vai konkrētam gadījumam, tāpēc dažādu siltumfizikālo procesu kompleksa analīze ar mērķi nodrošinot termiskā komforta apstākļus telpās un vienlaicīgi uzlabot ēkas energoefektivitāti ir

viena no galvenajām darba novītātēm. Tādējādi darbā izstrādātā kompleksās analīzes pieeja ietver gan plaši zināmas metodes, gan pilnveidotas un arī pilnīgi jaunas eksperimentālās pieejas, kā arī mērķtiecīgu matemātisko modeļu izmantošanu.

Pie jaunām eksperimentālām pieejām pieder metode siltuma caurlaidības koeficienta noteikšanai nestacionāros apstākļos un materiālu siltuma ietilpības noteikšana, izmantojot kontrolētas harmoniskas temperatūras svārstības „karstās plātes” iekārtā. Būtiska novītāte ir plašas informatīvās datu bāzes izveide, kas satur daudzveidīgu informāciju par dažāda veida (t.sk. arī tipveida) ēku būvkonstrukciju siltumfizikālajiem raksturlielumiem, lielāko daļu no kuriem sastāda raksturīgo norobežojošo konstrukciju un materiālu eksperimentāli noteikto rādītāju un raksturīgāko defektu un to cēloņu strukturēts apkopojums. Šo datu pieejamība un uzkrātā praktiskā pieredze nodrošina ātrāku un precīzāku ēku energoefektivitātes rādītāju novērtēšanu un priekšlikumu izstrādi energoefektivitātes paaugstināšanai, neveicot papildus instrumentālos mērījumus vai būtiski minimizējot to skaitu. Praktiski nozīmīga ir arī izplatītāko sērijveida ēku kopējo siltuma bilances modeļu izveide un to verifikācija, izmantojot faktiskos apkures datus.

Atsevišķu telpu skaitliskie modeļi, kas izveidoti darba ietvaros, uzskatāmi parāda dažādu būtisku faktoru ietekmi uz energoefektivitātes rādītājiem. Kompleksi analizējot to ietekmi uz gaisa plūsmām un temperatūras sadalījumiem telpā, ir noteikta dažādo faktoru loma siltuma zudumu caur būvkonstrukcijām sadalījuma un termiskā komforta apstākļu izmaiņās. Literatūrā sastopamie aprēķini parasti ir orientēti uz kādas konkrētas konfigurācijas telpas izpēti vai paredz kāda atsevišķa parametra variācijas. Šī darba ietvaros ir veikta izvēlētu būtisko parametru komplekta ietekmes analīze salīdzināmos apstākļos, tāpēc iegūto rezultātu kopa ir būtiska novītāte. Ņemot par pamatu veikto aprēķinu rezultātus, var veikt dažādo parametru ietekmes tendenču analīzi, lai nodrošinātu cilvēku termisko komfortu ar mazāku apkures patēriņu un tādējādi reducētām izmaksām.

1.3. Darba mērķi un uzdevumi

Promocijas darba galvenais mērķis ir izstrādāt un praksē aprobēt kompleksu eksperimentālo mērījumu un matemātiskās modelēšanas metodiku, kas ļautu objektīvi novērtēt ēku siltumfizikālo stāvokli un to energoefektivitāti, un ar kuras palīdzību būtu iespējams arī analizēt plānoto uzlabojumu ietekmi uz energopatēriņa un termisko apstākļu telpās rādītājiem.

Otrs mērķis, kas ir cieši saistīts ar pirmo, ir svarīgāko ēku energoefektivitāti un siltuma apmaiņu telpās ietekmējušu fizikālo faktoru analīze kā visas ēkas (integrālie siltuma bilances modeļi), tā arī atsevišķas telpas (gaisa kustības un temperatūras lauka matemātiskais modelis) kontekstā, līdztekus nodrošinot arī termiskā komforta nosacījumus telpās.

Trešais darba mērķis ir uz veikto mērījumu pamata balstītas informatīvās datu bāzes izveide, kas iekļauj pēc iespējas vairāk tipiskas Latvijas ēkas un būvkonstrukcijas raksturojošos siltumfizikālos parametrus.

Lai sasniegtu izvirzītos mērķus, tika formulēti šādi uzdevumi:

- Aprēķinu metodikas un atbilstošās mērsistēmas izveide siltuma caurlaidības koeficienta eksperimentālai noteikšanai nestacionāros apstākļos un tās aprobācija, veicot mērījumus dažādu veidu un stāvokļu ēkās.
- Materiālu siltuma ietilpības noteikšanas metodikas izstrāde uz „karstās plates” iekārtas bāzes un tās aprobācija.
- Caurspīdīgu būvkonstrukciju ar dažādu veidu pārklājumiem saules enerģijas caurlaidības eksperimentālo pētījumu veikšana.
- Eksperimentālā ceļā iegūto ēku un būvkonstrukciju siltumtehnisko raksturlielumu salīdzināšana ar inženieraprēķinos noteiktajām vērtībām, iespējamo atšķirību cēloņu analīze.
- Ēku un to konstrukciju raksturīgo siltumfizikālo parametru specializētās datu bāzes izveide, veicot eksperimentālos pētījumus dažādās būvēs.
- Ēkas siltuma bilances integrālo matemātisko modeļu izveide un pilnveidošana, atbilstošā programnodrošinājuma izstrāde un papildināšana.
- Latvijā izplatītu sērijveida ēku siltuma bilances modeļu izveide un apkures patēriņa aprēķins, dažādu energoefektivitātes uzlabojumu ietekmes uz kopējo energopatēriņu novērtējums.
- Atsevišķu telpu siltuma un gaisa apmaiņas matemātisko modeļu izveide un to skaitliska realizācija.
- Daudzvariantu aprēķini ar atšķirīgiem fizikālajiem un ģeometriskiem parametriem, to izmaiņu ietekmes uz siltuma zudumiem un termiskā komforta apstākļiem telpā analīze.

1.4. Līdzšinējo pētījumu apskats

Mūsdienu tehniskajā un teorētiskajā literatūrā, kā arī daudzu vispārīgo un specializēto konferenču rakstu krājumos var atrast ar siltuma pārneses ēkās procesiem saistītas nodaļas un publikācijas. Tomēr praktiski nav tādu literatūras avotu, kas sniegtu atbildi uz jautājumu, kā paaugstināt ēkas vai tās atsevišķas telpas energoefektivitāti un uzlabot cilvēka termiskā komforta apstākļus, lietojot kompleksu analīzes un optimizācijas pieeju, kas ievērotu teorētiskos aspektus, reālajos ekspluatācijas vai laboratorijas apstākļos iegūtos eksperimentālos datus un apskatāmo fizikālo procesu matemātiskos modeļus. Šāda pieeja dod iespēju skatīt šo sarežģītu procesu kopumā

un uzlabot to no daudziem atšķirīgiem aspektiem vienlaicīgi, atkarībā no optimizācijas mērķa un to sasniegšanas iespējām.

Ēkas energoefektivitāti raksturojošus literatūras avotus nosacīti var iedalīt trīs grupās pēc to lietojumu īpatnībām. Pie pirmās šādas literatūras grupas pieskaitīsim publikācijas, kurās tiek praktiski un ar konkrētiem detalizētiem risinājumiem apskatīti paņēmieni ēkas mezglu un būvelementu izveidei, to energoefektivitātes uzlabošanai vai defektu novēršanai. Tādi avoti var kalpot kā rokasgrāmatas problēmu lokalizēšanai un turpmākai to novēršanai, kā arī no komforta un siltumtehnikā viedokļa pareizu risinājumu izvēlei, to atbilstoši realizēšanai vai kāda konkrēta ražotāja piedāvātās produkcijas vai risinājumu izmantošanā (Belindževa-Korkla, 2002; PAROC, 2005). Šāda veida literatūra sniedz konkrētas atbildes uz praktiskiem jautājumiem un ir domāta galvenokārt inženieriem un celtniecības speciālistiem un šajā darbā tiks izmantota mazāk.

Pie otrās, vairāk izmantotās literatūras avotu grupas, pieder fundamentālie siltuma un masas pārnese procesu aprakstošie darbi, kuros iespējams iepazīties arī ar ēku vai tās elementu siltumfizikālo parādību teorētisko pamatojumu un veikt analītiskus aprēķinus un parametru studijas analītiskā veidā (Landau, Lifshic, 1986; Batchelor, 2001; Samarskiy, Vabishchevich, 2002; Pitts, Sissom, 1997; Incropera, DeWitt, 2002), kā arī dziļāk iepazīties ar teorētiskiem aspektiem kādā konkrētā ar ēku siltumfiziku saistītā jomā (McMullan, 2002; Hagentoft, 2003). Šāda tipa materiāli ir pamats dažādu veidu eksperimentāliem mērījumiem un matemātiskajiem modeļiem, kas tika izstrādāti vai uzlaboti un tiek aprakstīti turpmākajās nodaļās.

Pie trešās literatūras avotu grupas pieskaitīsim ar ēkas, tās telpu vai būvelementu siltuma pārnese procesiem saistīto eksperimentālo mērījumu un matemātisko modeļu pieejas, kuras tiek lietotas attīstītās kompleksas pieejas ietvaros, ir tieši ar to saistītas vai arī ir pielietoto metožu pamatā. Nozīmīgākus un interesantākus no tādiem darbiem apskatīsim atsevišķi.

1.4.1. Eksperimentālie mērījumi

Ēkas norobežojošo konstrukciju stāvokļa kvalitatīvā termogrāfiskā apskate palīdz atklāt raksturīgākus defektus un konstrukciju īpatnības, un literatūras avoti, kuros var iepazīties ar svarīgākām atziņām šajā jomā, pārsvarā ir balstītas uz objektu komerciālo apsekojumu rezultātiem. Tajos tiek izskaidroti un analizēti novērotu ēkas vai kādu tās telpu defektu rašanās cēloņi un atklātās īpatnības, kā arī piedāvātas to uzlabošanas vai optimizēšanas iespējas (piem., Svaic *et.al.*, 2005; Leonachescu *et.al.*, 2005; Karlsson, Moshfegh, 2005). Pašas metodes pamatprincipi un tās lietojumu īpatnības ar piemēriem Austrumeiropas raksturīgām daudzstāvu ēkām tiek minēti darbā (Jakovičs *et.al.*, 1998). Jāatzīmē, ka pati metode tiek plaši pielietota ēku norobežojošo konstrukciju kvalitatīvai

diagnostikai jau kopš 70.-80.-tajiem gadiem, kad plašākai sabiedrībai kļuva pieejamas militārās tehnoloģijas un izstrādāti arī attiecīgie standarti (piem., ISO 6781, 1983).

Atšķirībā no kvalitatīviem eksperimentiem, siltuma zudumus raksturojošo kvantitatīvo mērījumu jomā ir pieejams daudz lielāks specializēto metožu un pieeju literatūras apjoms, ko nosaka testējamo objektu piedāvājuma daudzveidība, daudzie spēkā esošie standarti un komplicētie fizikālie procesi, kas paredz iespējas uzlabot un attīstīt mērmetodiku, kā arī paaugstināt precizitāti un samazināt mērījumiem nepieciešamo laiku un izmaksas. Parasti materiālu siltuma izolējošās īpašības testē laboratorijas apstākļos, tādējādi nodrošinot vajadzīgo precizitāti un minimizējot citu faktoru ietekmi uz mērījumu norisi un objekta fizikālām īpašībām, šāda veida mēriekārtas un atbilstošās metodikas ir aprakstītas vairāku valstu (piem., DIN, ASTM) un internacionālos (EN) standartos.

Specializēto „karstās plates” iekārtu dažādu neliela izmēra homogēnu materiālu siltuma vadīšanas koeficienta noteikšanai plaši pielieto siltuma izolācijas materiālu izpētei un tās konceptuālā uzbūve un mērījumu veikšanas pamatprincipi definēti standartos (LVS ISO 8302, 2001; 1991; DIN EN 674, 1999; ASTM C 518, 2004). Šāda iekārta un atbilstošā metodika teorētiski nodrošina mērījumu precizitāti līdz 2%, bet tā kā siltumizolācijas materiālu siltumvadītspēja ir lielā mērā atkarīga no daudziem ārējiem faktoriem, t.sk. temperatūras, tad tās minimālās, maksimālās un vidējās vērtības, pie kurām ir jāveic materiālu siltuma vadīšanas koeficienta mērījumi šāda tipa iekārtās, ir noteiktas standartā (ASTM C 1058, 2003). Detalizētāk ar mērījumiem standartizētā rūpnieciski izgatavotā iekārtā un to fizikālajiem aspektiem var iepazīties darbā (Abdou, Budaiwi, 2005), kur tiek parādīts, ka siltumvadītspēja izolācijas materiāliem pie lielākām temperatūru starpībām var pieaugt par 35-50% salīdzinājumā ar nelielu temperatūras starpību, konstatēta ir arī siltumvadītspējas atkarība no vidējās temperatūras, kas jau pie 35°C dažiem materiāliem var būt par 35% lielāka nekā pie standartizētās 24°C temperatūras. Šajā darbā tika konstatēta un analizēta arī siltuma vadīšanas koeficienta atkarība no mitruma daudzuma un materiāla blīvuma – palielināts mitruma saturs nosaka palielinātu siltumvadītspēju, bet mazāks blīvums pastiprina siltuma vadīšanas koeficienta atkarību no temperatūras. Atbilstoši iepriekš minētajiem standartiem „karstās plates” mēriekārta tika uzbūvēta arī šī darba ietvaros un tā tika aprobēta ne tikai standartizētiem mērījumiem, bet tajā tika realizēti arī citi turpmākajās nodaļās aprakstītie pētnieciskie eksperimenti.

Gataviem būvizstrādājumiem, kuru uzbūve ir nehomogēna, īpaši logiem vai durvīm, siltuma zudumu noteikšanai caur tiem nevar izmantot iepriekšminēto metodi. To mērījumiem laboratorijas apstākļos izmanto cita veida standartizētu iekārtu, t.s. termisko kameru, kuras uzbūve un mērmetodika ir aprakstītas standartos (LVS EN ISO 8990, 2007; DIN EN 1098, 1993). Eksperimentālo mērījumu rezultātu šāda tipa mēriekārtā ar izmēriem, kas nepārsniedz 2 m, salīdzinājums ar teorētiskajiem aprēķiniem, ņemot vērā termiskos tiltus un nehomogenitātes, ir sniegts darbā (Rose, Svedsen 2004), kur autori pievērš uzmanību arī konvekcijas siltuma pārneses

izslēgšanas iespējām. Lai tuvinātu laboratorijas mērījumu apstākļus reālajiem, var tikt nodrošināts ne tikai standartizētais temperatūras, bet arī noteikts mitruma un sāluma režīms (Pavlík, Pavlík, 2002). Savukārt, gaisa kustības kontrolei un plūsmas homogenizācijai šāda tipa termokameras var tikt uzlabotas un modificētas, jo konvekcijas siltuma atdeve no virsmām, kas ir proporcionāla gaisa kustības ātrumam gar virsmu, var būtiski ietekmēt mērījumu rezultātus (Curcija, 2000). Jāatzīmē, ka divi iepriekš minētie pētījumi apraksta arī līdztekus standartizētam siltuma caurlaidības mērījumam lietoto, t.s. diferenciālo siltuma plūsmas sensoru metodi. Pirmā Latvijā iepriekš minētajiem standartiem atbilstoša termiskā kamera tika izveidota šī darba ietvaros un tajā tika veikti gan daudzi gatavu būvkonstrukciju siltuma caurlaidības mērījumi un pētījumu sērijas, gan arī pārbaudītas un aprobētas citas mērījumu metodes, pielietojot arī minēto diferenciālo metodi.

Situācijā, kad būvelementu nav iespējams testēt laboratorijas apstākļos tā izmēru dēļ vai arī gadījumā, ja mērījumi ir jāveic konstrukcijām jau eksistējošās ēkās, pielieto metodi, kas ļauj noteikt siltuma zudumus raksturojošo lielumu – siltuma caurlaidību reālajos ēkas ekspluatācijas apstākļos. Šādi mērījumi, atšķirībā no laboratorijas apstākļos veiktajiem, parasti notiek nestacionāros apstākļos, kas arī nosaka palielinātu eksperimentiem nepieciešamo laiku un samazina precizitāti gadījumā, ja aprēķini tiek veikti, izmantojot vidējošanas metodi. Tomēr gadījumā, ja ir iespējams veikt mērījumus vairāku nedēļu garumā, arī šī metode var tikt izmantota (Doran, 2000; King, 2000) un tās rezultāti ir apmierinoši. Taču šādiem mērījumiem nepieciešamo laiku iespējams samazināt, tajā pat laikā neietekmējot precizitāti, pielietojot speciālo datu apstrādes un analīzes pieeju (Trümmann *et.al.*, 1992), kuras pamatā ir analītiska divargumentu funkcijas minimizēšana, un tā ir bāzēta uz eksperimentālo un teorētiski aprēķināto temperatūru starpības un siltuma plūsmas kopu analīzes. Šī pieeja tiek izmantota un attīstīta šī darba ietvaros, pielietojot to kopā ar izstrādāto Latvijā pirmo siltuma caurlaidības mērsistēmu, kas paredzēta izmantošanai reālajos ēku ekspluatācijas apstākļos. Līdzīgas pieejas attīsta arī citi autori, piem., divargumentu funkcijas minimizācijas uzdevums ar Montekarlo metodi siltuma izolācijas mērījumos tiek aprakstīts un rezultāti analizēti darbā (Gutschker *et.al.*, 1995).

Konvektīvo siltuma pārnesei atsevišķās telpās un ēkās kopumā raksturo ar gaisa apmaiņas koeficientu, kas raksturo gaisa daudzumu, kas ar gaisa masām konvekcijas ceļā tiek pārnesti starp iekštelpām un āru, un, tādējādi, raksturo telpu blīvējuma pakāpi. Līdzīgi kā termogrāfiskajā diagnostikā, publikācijas pārsvarā ir saistītas ar konkrētu objektu apsekojumiem un tikai nedaudzās publikācijās tiek apskatīti un analizēti zinātniskie un teorētiskie šādu mērījumu un ar to saistīto parādību aspekti. Tā, ēkas gaisa apmaiņas koeficienta, kurš ir proporcionāls kvadrātsaknei no temperatūru starpības, atkarība no iekštelpu gaisa un ārgaisa temperatūrām, tika eksperimentāli noteikta un rezultāti analizēti arī no teorētiskajiem aspektiem darbā (Schmidt *et.al.*, 1999). Te tika konstatēta arī ļoti neliela apmaiņas koeficienta atkarība no vēja virziena un ēkas novietojuma pret

debess pusēm. Iekārtas BlowerDoor (The Energy Conservatory, 2012), kas parasti tiek lietota spiediena starpības radīšanai un gaisa apmaiņas koeficienta noteikšanai, detalizēts darbības pamatprincipu un mērmetodikas apraksts ir atrodams standartos (LVS EN 13829, 2002; ISO 9972, 2006).

Pietiekami plašs ir darbā mazāk apskatītā siltuma pārneses veida – siltuma starojuma ietekmes uz caurspīdīgo ēku norobežojošo konstrukciju rezultējošo siltuma caurlaidību publikāciju klāsts. Tas ir saistīts ar pēdējos gados popularitāti ieguvušo stikla pakešu plašu izmantošanu, kas pārsvarā tiek ražotas ar dažāda tipa selektīviem pārklājumiem, kuru izgatavotāju skaits strauji pieaug. Šādi speciālie stiklu pārklājumi ļauj būtiski samazināt siltuma zudumus caur logiem apkures sezonas laikā, bet vasaras sezonā aiztur saules enerģiju un tādējādi samazina dzesēšanai nepieciešamo jaudu. Kā piemēru stiklojumu un logu siltuma zudumu un saules enerģijas caurlaidības eksperimentiem var minēt darbu (Nielsen *et.al.*, 2000), kurā autori pievērš uzmanību siltuma zudumiem caur logu ar selektīvo pārklājumu atkarībā no Saules krišanas leņķa un kopējai apkures siltuma daudzuma ekonomijai visai ēkai. Šādu logu pārklājumu efektu vasaras sezonas laikā eksperimentāli pēta autori darbā (Li *et.al.*, 2004), konstatējot telpai ar speciāliem stikla pārklājumiem enerģijas ekonomiju mēnesī līdz pat 15 kWh/m² uz kondicioniera darbības laika un apgaismojumam nepieciešamās elektroenerģijas samazinājuma rēķina. Kā piemēru cita veida eksperimentiem var minēt logu ar lielu siltuma pretestību kondensāta rašanās uz ārējās virsmas pētījumus atkarībā no virsmas pārklājuma un emisijas īpašībām (Werner, Roos, 2007) – lietojot zemas emisijas pārklājumus tiek palielināta iekšējās virsmas temperatūra un novērsta kondensāta rašanās.

1.4.2. Ēku siltuma bilances matemātiskie modeļi

Ēku energoefektivitāti objektīvi iespējams novērtēt un veikt tās analīzi, izveidojot siltuma apmaiņas procesu modeli, kas, atkarībā no tam izvirzītām prasībām, var būt ļoti vienkāršs un dot ēkas novērtējumu pirmajā tuvinājumā, bet var ietvert sevī arī daudzus simtus parametru un ļaut pietiekami precīzi aprakstīt apkures sezonā patērēto siltuma daudzumu un detalizēti analizēt siltuma bilanci. Kā piemēru vienkāršotai ēkas siltuma zudumus raksturojošai metodei var minēt Latvijas Būvnormatīva siltuma zudumu koeficienta aprēķinu (LBN 002-01, 2001), kurā tiek ņemti vērā tikai siltuma vadīšanas zudumi un termiskie tilti, ja tādi ir zināmi. Šajā normatīvā 2006. gadā tika pieņemti labojumi, kas paredz arī t.s. ēkas īpatnējo siltuma zudumu koeficienta aprēķinu, kas parāda siltuma enerģijas zudumu daudzumu, normētus uz apkurināmo platību. Līdzīgie normētie koeficienti tiek lietoti arī daudzās komplicētākās siltuma bilances pieejās.

Citi ēkas siltuma bilances modeļi paredzēti ēku energoefektivitātes indeksa aprēķinam, kas pamatā balstās uz samērā vienkāršiem pieņēmumiem par nezināmiem parametriem, bet atsevišķos

gadījumos var tikt izmantoti arī ļoti komplicēti aprēķini, ievērojot tādus faktoros kā ūdens uzsildīšanu, Saules starojuma ietekmi, apgaismoju u.c. (SAP 2005, 2005). Darbā (Petrovs *et.al.*, 2006) var iepazīties ar Rīgas Tehniskajā universitātē izveidoto un alternatīvo energoefektivitātes skalu salīdzinošu analīzi un to lietojumu īpatnībām. Dažādu ēkas siltuma bilances modeļu un atbilstošo datorprogrammu salīdzinājums ēkas enerģijas patēriņa klases piešķiršanai dažādās Eiropas valstīs ir aprakstīts darbā (Poussard *et.al.*, 2003), kur var atrast arī uz punktiem bāzētās vienkāršotās metodes aprakstu, ar kuras palīdzību ēkai tiek piešķirta energoefektivitātes klase, piešķirot atbilstošo punktu skaitu par ēkas kompaktums, izolācijas un stiklojuma daudzums un tips, ēkas orientācija pret debess pusēm, apkures un ventilācijas tips u.c. pēc tabulu vērtībām. Latvijā arī pašreiz, pēc Ēku energoefektivitātes likuma (Saeima, 2008) pieņemšanas, energoefektivitātes skala ēkām nav definēta.

Literatūrā var atrast arī specializētu ēkas modeļu aprakstus, kas ir orientēti uz konkrētu problēmu risinājumu, stipri vienkāršoti apskatot citu faktoru ietekmi un kopējo bilanci. Kā piemēru šāda veida pieejai var minēt aprēķinu programmatūru REFSEN5 (Berkeley lab., 2005), kas ir orientēta uz logu un to raksturlielumu ietekmes uz visas ēkas apkures un dzesēšanas enerģijas patēriņu. Tā ir bāzēta uz modeļiem, kuros ieiet divi t.s. scenāriji (vispārīgie dati par ēku) un detalizēta informācija par logu tipiem, pārklājumiem, fizikāliem parametriem utt. Rezultātā stiklotu konstrukciju siltuma zudumi un iespējamās izmaksas tiek salīdzinātas ar nosiltinātu ārsienu vai citu norobežojošo konstrukciju raksturlielumiem.

Sarežģītākās pieejas ēkas siltuma bilances modeļa izveidei un analīzei ietver sevī visus siltuma pārneses veidus, t.sk. daudzus ar ēkas ekspluatāciju un iemītnieku dzīves veidu saistītos lielumus, kā arī ļauj modelēt procesus ēkās nestacionārā režīmā. Vienkāršoto un detalizēto ēkas bilances modeļu klasifikācija ir apkopota disertācijā (Toumaala, 2002), kuras autors salīdzina uz modeļa bāzes prognozēto apkures jaudu ar tās mērījumiem 24 stundu periodā nestacionārā režīmā, kā arī parāda vēja ātruma un virziena, ēkas konfigurācijas, ventilācijas sistēmas darbības, kā arī iedzīvotāju ietekmi uz telpas un, tādējādi, visas ēkas rezultējošo siltuma bilanci.

Viena no plaši izmantotām datorprogrammām nestacionāro siltuma apmaiņas procesu ēkās modelēšanai ir TRNSYS (Solar Energy Laboratory, 2012), to savos pētījumos izmanto daudzi autori. Tā šī programmatūra tiek lietota ventilācijas ietekmes uz kopējo bilanci novērtēšanai darbā (Gieseler *et.al.*, 2003), kuras autori detalizēti apraksta arī īpatnējās siltuma patēriņa modelēšanai nepieciešamo ieejas datu – iekštelpu temperatūras, siltā ūdens un elektroenerģijas patēriņa, laika apstākļu un gaisa apmaiņas eksperimentālos mērījumus. Šo modelēšanas programmatūru izmanto arī Latvijas autori, modelējot t.s. pasīvās ēkas ar pazeminātu apkures siltuma patēriņu Latvijas apstākļos (Blumberga, Kamenders, 2006).

Taču daudzos gadījumos tik detalizēta un komplicēta pieeja energoefektivitātes novērtēšanai nav nepieciešama, jo to precizitāte bieži vien ir augstāka par dabas apstākļu ienestajām izmaiņām.

Tad ir lietderīgi izmantot uz mēneša siltuma bilances bāzes veidoto siltuma bilances modeli (DIN, 2003), kas ievēro siltuma vadīšanas, konvekcijas un starojuma pārneses mehānismus, kā arī ņem vērā dažādus faktoros, kas tos ietekmē, piem., ēkas orientāciju pret debess pusēm, noēnojumu, papildus siltuma avotus, kas saistīti ar ēkas izmantošanas specifiku. Minētā metodika tiek izmantota šī darba ietvaros ēkas siltuma bilances aprēķina programmatūras izveidē un ir detalizēti apskatīta attiecīgajā nodaļā. Attiecinot šo pieeju uz apkures sezonu, tā kopumā atbilst standartam (LVS EN ISO 13790, 2009) nostādņēm.

1.4.3. Atsevišķu telpu matemātiskā modelēšana

Atšķirībā no visas ēkas modeļiem, kuru pamatā ir energopatēriņa analīzes un siltuma bilances algebriskie aprēķini, atsevišķas telpas fizikālo lauku sadalījumu matemātisko modeļu izveidei un aprēķiniem parasti izmanto pilnvērtīgas fizikālo procesu datormodelēšanas programmas, piem., ANSYS/CFX (Ansys Inc., 2005), kas tika lietota arī šī darba ietvaros apskatīto modeļu aprēķinos, un kas plaši tiek izmantota līdzīga rakstura dzīvojamo telpu temperatūras sadalījumu un gaisa plūsmu lauka uzdevumu risināšanā (Desta *et.al.*, 2004; Elmualim, 2006; Deevy *et.al.*, 2007). Dzīvojamo telpu modeļu problēmās, bez siltuma zudumu samazināšanas iespēju analīzes, ir jānodrošina arī cilvēka termiskā komforta apstākļi, kas ne vienmēr ir vienkāršs uzdevums un prasa dziļāku notiekošo procesu izpratni un dažādu ierobežojumu, ko uzliek komforta prasības, zināšanas.

Termiskā komforta prasības, kā arī to noteikšanas un aprēķinu metodes ir definētas standartos (LVS EN ISO 7730, 2006; ASHRAE, 2004). Svarīgākie komforta nodrošināšanas kritēriji ir absolūtā temperatūra, tās starpības, gaisa kustības ātrums, kā arī ar cilvēku ķermeņa izolāciju un aktivitāti saistītie lielumi, kas detalizētāk tiek apskatīti šī darba attiecīgajā sadaļā. Ir izplatītas divas metodes minēto prasību noteikšanai, kuru pamatā attiecīgi ir cilvēku subjektīvās komforta izjūtas un fizikālo lielumu kopums (Charles, 2003), no tām plašāk tiek izmantota pirmā metode. Vairāk par tās lietojumiem un ieejošo parametru noteikšanu var iepazīties darbā (Olesen, Parsons, 2002), kur autori apskata ne tikai standartizētos termisko komfortu noteicošos apstākļus, bet arī telpu gaisa kvalitāti, piem., CO₂ un CHO saturu, kas saistīts ar izdzīvotāju labsajūtu kopumā. Kā citu piemēru var minēt publikāciju (Hackleman, 2003), kur dzīvojamā istaba ar grīdas apkuri tiek minēta kā ļoti laba no gaisa stratifikācijas un termiskā komforta apstākļu nodrošināšanas viedokļa.

Līdz ar plašu skaitļošanas tehnikas izplatību tika veiksmīgi veidoti arī skaitliskie aprēķini dažāda tipa telpām un pētīta gaisa kustība un temperatūras sadalījums tajās. Piemērs divdimensionāliem šāda veida aprēķiniem ir publikācija (Krafthefer, Shah, 1995), kur autori uz vienkārša režģa bāzes ar datorprogrammas Fluent palīdzību pēta sildītāja periodiska darbības režīma ietekmi uz temperatūras stratifikāciju telpā, tādējādi analizējot arī vienu no termiskā komforta

faktoriem. Mūsdienīgās skaitliskās modelēšanas programmpaketes plaši tiek izmantotas tādu atsevišķu ar cilvēka komforta un ēkas energoefektivitāti saistītu uzdevumu atrisināšanai, kā gāzu koncentrācijas izmaiņas telpās (Svidt *et.al.*, 2001), ventilācijas sistēmas izvietojuma optimizācija ražošanas telpās (Lācis, Bethers, 2000) un dzīvojamās istabās (Bojic *et.al.*, 2002), dažādu tipu apkures/dzesēšanas iekārtu ietekmes uz gaisa kustību uz termiskā komforta apstākļiem analīze (de Carli, Olesen, 2001; Tibaut, Wielser, 2002), vēja izraisītās telpu dabiskas ventilācijas pētījumi, lietojot dažādus turbulences modeļus (Evola, Popov, 2006), logu žalūziju izmantošana gaisa temperatūras kontrolei saulainās dienās (Collins, 2004) un cilvēka klātbūtnes ietekme uz temperatūras un gaisa plūsmu laukiem telpā (Deevy *et.al.*, 2007). Šādi modeļi pamatā tiek veidoti kādu konkrētu telpu gaisa plūsmu un temperatūras sadalījuma analīzei un optimizācijai uzstādīto mērķu sasniegšanai.

Līdzšinējos pētījumos veiktie vidējoto turbulento plūsmu (RANS) aprēķini un to salīdzinājums ar mērījumu rezultātiem testa telpās (piem., (Potter, Underwood, 2004; Evola, Popov, 2006)) parādīja, ka sākotnēji tradicionāli lietotie k - ϵ turbulences modeļi neadekvāti atspoguļo faktisko situāciju, it īpaši sienu tuvumā esošajos robežslāņos un tos ir nepieciešams uzlabot, piem., lietojot modificēto RNG pieeju (Evola, Popov, 2006) vai arī modificējot aprēķinu šo sienīņu tuvumā, izmantojot dažādus zemo Reinoldsa skaitļu turbulences modeļu variantus (Ji, Cook; 2007). Modeļu īpašību analīzes dažādām plūsmām un atšķirības to raksturīgajās zonās parādīja, ka būtisku RANS modeļu uzlabojumu var panākt kombinējot populāros k - ϵ un k - ω modeļus un izveidojot *Shear Stress Transport* (SST) k - ω modeli, kurš aprobēts dažādu raksturu plūsmām (Vieser *et.al.*, 2002) un iekļauts arī komerciālajās CFD programmās, t.sk. ANSYS/CFX (Ansys Inc, 2005). Šis modelis, piem., sekmīgi izmantots (Deevy *et.al.*, 2008) gaisa plūsmu modelēšanai telpās cilvēka klātbūtnē. Tādējādi tas kļuvis par sava veida neformālo standartu turbulento plūsmu inženierfizikālā modelēšanā, jo nestacionāro turbulences modeļu, kas nodrošina arī lielāko enerģiju nesošo turbulento virpuļu izšķiršanu (piem., *Large Eddies Simulation* jeb LES modelis), realizācija ir vismaz par kārtu resursietilpīgāka nekā iepriekšminēto divu parametru turbulences modeļu lietojumi. Šie apsvērumi noteica šī SST modeļa izvēli dažādu faktoru ietekmes skaitliskam izvērtējumam modelētelpā šajā darbā.

Jāatzīmē, ka daudzos iepriekš veiktajos telpu siltuma apmaiņas aprēķinos nebija iekļauti kādi no būtiskajiem procesus telpā ietekmējošajiem faktoriem – piem., termiskais cēlējspēks (Evola, Popov, 2006), siltuma starojums (Bojic *et.al.*, 2002), sildelements (Deevy *et.al.*, 2008), tādējādi nedodot iespēju savā starpā salīdzināt šo dažādo faktoru nozīmību. Salīdzināšanu apgrūtinā arī tas, ka aprēķini veikti ar dažādiem programmlīdzekļiem. Līdztekus konvektīvajai siltuma apmaiņai, izmantojot diskretās pārneses starojuma modeli, kurš aprobēts darbā (Deevy *et.al.*, 2008), promocijas darba ietvaros ir izvērtēta arī siltuma starojuma loma gan iekšējā siltuma apmaiņā telpā, gan arī Saulei iespiļdot telpā caur logu. Tādēļ šajā darbā, izmantojot gan vienu un to pašu, aprobētu programmatūru

ANSYS/CFX (Ansys Inc, 2005), gan vienu un to pašu telpas bāzes ģeometriju, akcentēts tieši dažādo faktoru ietekmes savstarpējais salīdzinājums. Lai mazinātu iespējamo skaitlisko efektu ietekmi visiem aprēķinu variantiem izmantota vienvēidīga aprēķinu apgabala diskretizācija, veicot nepieciešamās režģa modifikācijas tikai gaisa ieplūdes/izplūdes atveru zonās.

Veidojot modeli Latvijas klimatiskajiem apstākļiem, ir nepieciešams izvēlēties tādus telpas parametrus, kas ir raksturīgi un reprezentatīvi tieši Latvijā eksistējošām ēkām, piem., ar lielu loga siltuma caurlaidību, spraugām loga konstrukcijā un dabīgo ventilāciju. Tāpat lielākā daļa no aktuālajiem darbiem šajā jomā ir orientēti uz noteiktas konfigurācijas telpas vai ēkas aprēķiniem ar kādu noteiktu mainīgu parametru ietekmes analīzi un nedod pārskatu par atsevišķas telpas energoefektivitātes un termiskā komforta stāvokli noteicošajiem faktoriem.

2. Eksperimentālās ēkas norobežojošo konstrukciju analīzes metodes

Veicot ēku energoefektivitātes komplekso analīzi, jāizmanto gan kvalitatīvas, gan arī kvantitatīvas pētījumu metodes (attēls 1.1). Procesu sāk ar ekspertu vizuālo siltumtehniskā stāvokļa kvalitatīvu novērtējumu, kura laikā bieži vien atklājas dažādi mehāniskie un citi bez speciālā aprīkojuma saskatāmie defekti, piem., elementu nepietiekams noblīvējums (spraugas), mitruma uzkrāšanās vietas vai mehāniskie defekti būvelementu konstrukcijās. Šāda ēkas norobežojošo konstrukciju apsekošana un izpēte kā no ārpuses, tā arī no iekšpuses dod vispārīgu priekšstatu par būves un tās atsevišķu konstrukciju stāvokli.

Ekspertu slēdzienam seko pirmie eksperimentālie mērījumi – būvkonstrukciju virsmas temperatūras noteikšana jeb termogrāfiskā diagnostika, kuras rezultātā var tikt atklāti tādi defekti, kas izraisa anomāli pazeminātu vai paaugstinātu virsmas temperatūru atsevišķās ēkas vai tās būvelementu zonās, un ko nevar atklāt vizuālajās ekspertu apskatēs. Sevišķi lietderīgi izmantot termogrāfisko metodi, vienlaicīgi radot spiedienu starpību starp ēku un ārgaisu, kas izraisa gaisa pastiprinātu caurplūdi nepietiekami noblīvētās vietās un tādējādi atklāj ēkas blīvējuma problemātiskās zonas. Ekspertu novērtējuma un termogrāfiskā diagnostikas rezultātā ēkām ar nezināmu vai nepilnīgu tehnisko specifikāciju var tikt noteikti raksturīgie elementi norobežojošās konstrukcijās, kuriem jāveic kvantitatīvie mērījumi, piem., dažāda tipa paneļi vienā fasādē vai vienādi atšķirīgos ēkas blokos.

Ēkas energoefektivitāti kvantitatīvi ietekmējošos parametrus iedalīsim trijās grupās pēc siltuma apmaiņas procesa veida:

- Siltuma vadīšana. Tie ir enerģijas zudumi caur ēkas norobežojošām konstrukcijām – ārsienām, jumtu, logiem u.c. elementiem siltuma vadīšanas ceļā. Homogēnus materiālus raksturo ar siltuma vadītspēju jeb siltuma vadīšanas koeficientu λ ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$), šī parametra eksperimentālie mērījumi notiek laboratorijas apstākļos „karstās plates” iekārtā (sadaļa 2.2.1). Gatavas būvkonstrukcijas ar komplicētu vai nezināmu uzbūvi raksturo ar siltuma caurlaidības koeficientu U ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$) vai arī ar tā apgriezto lielumu – siltuma vadītspējas pretestību R ($\text{m}^2 \text{K W}^{-1}$), kuru nosaka gan jau uzbūvētu ēku konstrukcijām reālos ekspluatācijas apstākļos (sadaļa 2.2.3), gan arī speciālā termiskajā kamerā (sadaļa 2.2.2). Koeficientā U parasti tiek iekļauti arī citi siltuma pārnese veidi (piem., konvekcija un starojums stikla paketēm) caur būvkonstrukciju.
- Konvektīvā siltuma pārnese. Zudumi, kas rodas gaisa masām pārvietojoties starp ēkas iekšstelpām un āru. Šāda tipa zudumus raksturo ēkas vai tās atsevišķu bloku gaisa apmaiņas koeficients jeb blīvējuma pakāpe n (h^{-1}) pie noteiktas spiedienu starpības, kas parāda, cik ilgā

laikā telpā vai visa ēkā esošā gaisa masa nomainās ar ārgaisu. Tas tiek eksperimentāli noteikts uzbūvētām ēkām, izmantojot speciālo iekārtu BlowerDoor (sadaļa 2.3).

- Siltuma starojums. Ar elektromagnētiskajiem viļņiem pārnests enerģijas daudzums, kam var būt gan negatīva, gan pozitīva loma ēkas siltuma bilancē, piem., Saules enerģijas pievade caur caurspīdīgiem elementiem (piem., logiem) vai arī caur necaurspīdīgiem elementiem (to ieguldījums kopējā siltuma bilancē gan ir daudz mazāks). Zemas temperatūras starotāju starojuma siltuma pārnese caur stiklotiem elementiem savukārt parasti tiek iekļauta to siltuma caurlaidības koeficientā U . Atkarībā no stikla selektīvā pārklājuma tipa, šāda tipa zudumi var tikt reducēti (sadaļa 2.4).

Līdzīgi kā kvalitatīvās analīzes metodēs, informācija par kvantitatīviem ēkas siltuma zudumus raksturojošiem parametriem var tikt iegūta, veicot mērījumus pašā objektā. Šādu eksperimentu veikšanai ir nepieciešams nodrošināt dažu nosacījumu izpildi, piem., veicot siltuma caurlaidības mērījumus, ir nepieciešams nodrošināt pietiekami lielu temperatūras starpību precizitātes palielināšanai. Savukārt, ēkas konvektīvos zudumus raksturojošais gaisa apmaiņas koeficients nevar tikt noteikts ārpus apskatāmās ēkas. Tomēr atsevišķos gadījumos mērījumi var tikt veikti arī laboratorijas apstākļos un specializētajās iekārtās, kas ļauj uzlabot to precizitāti un samazināt eksperimentiem nepieciešamo laiku, kā arī veikt to rezultātu ar analogiskajiem mērījumiem reālajos ekspluatācijas apstākļos salīdzinošo analīzi un samazināt kļūdas iespējamību. Atšķirībā no eksperimentiem dabā, kur to pielietojumu iespējas pārsvarā nosaka laika apstākļi, mērījumiem laboratorijas apstākļos būtiskais faktors ir pētāmā objekta izmēri un tā ievietošanas iekārtā iespējas un īpatnības.

2.1. Termogrāfiskā diagnostika

Ēku norobežojošo konstrukciju defekti, kurus nespēj pamanīt „neapbruņota” cilvēka acs, un kuri ir saistīti ar palielinātu siltuma vadīšanu vai ievērojamu gaisa ieplūdi/izplūdi, kas tad arī nosaka lielākus siltuma zudumus, var tikt konstatēti un kvalitatīvi novērtēti tikai lietojot speciālās metodes un ierīces, ar kuru palīdzību ir iespējams reģistrēt un cilvēkam saprotamā veidā attēlot zudumus raksturojošos lielumus. Ja pieņemsim, ka iekštelpu temperatūra $T_{\text{iekšā}}$ visā ēkā ir vienāda, tad pie vienādas ārgaisa temperatūras ($T_{\text{ārā}} < T_{\text{iekšā}}$), elementiem ar lielāku siltuma caurlaidību ārējās virsmas temperatūra būs augstāka. Tātad, analizējot ēku no siltuma zudumu viedokļa, šādā idealizētajā situācijā pietiek reģistrēt un salīdzināt tās ārējo konstrukciju virsmu temperatūras. Vienkāršākā gadījumā var izmantot distances sensorus, kas ļauj noteikt vidējo temperatūru tikai vienā virsmas punkta apkārtnē (attēls 2.1). Lai iegūtu pilnu objekta virsmas temperatūras sadalījumu cilvēkam ērti analizējamā veidā, nepieciešams izmantot speciāli šim nolūkam paredzētu ierīci – termogrāfu jeb

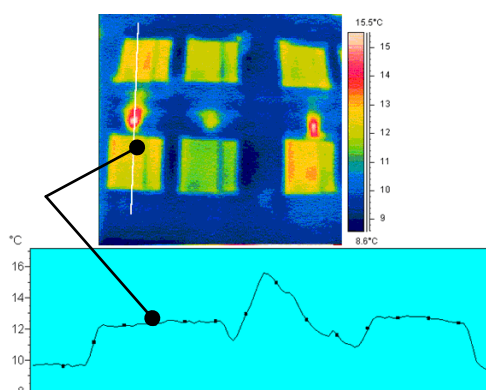
termovizoru (attēls 2.2), kas uztver un reģistrē objektu virsmas temperatūru, ļauj to vizuāli attēlot, izmantojot krāsu skalu, un paredz iespēju tālāk šo informāciju noglabāt turpmākai pēcapstrādei, piem., temperatūras profilu konstruēšanai (attēls 2.3) vai tās vidējās, minimālās vai maksimālās vērtības noteikšanas izvēlētajā attēla apgabalā (attēls 2.4). Termogrāfiskā metode ēku un tās norobežojošo konstrukciju defektu atklāšanai tiek lietota visai plaši atbilstoši standarta (ISO 6781, 1983) prasībām.



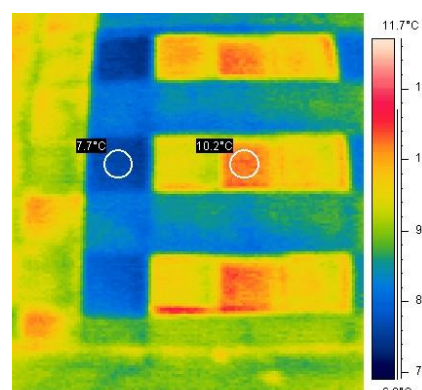
Attēls 2.1. Distances temperatūras noteikšanas ierīce.



Attēls 2.2. Mūsdienīgā rokas termogrāfa kopskats.



Attēls 2.3. Temperatūras profila piemērs.



Attēls 2.4. Vidējās temperatūras apgabalā piemērs.

2.1.1. Termogrāfijas metode

Objektu virsmas temperatūras distances noteikšanas metodes pamatā ir Stefana-Bolcmaņa likums (Incropera, DeWitt, 2002), saskaņā ar kuru visi ķermeņi izstaro elektromagnētisko starojumu, kas ir viennozīmīgi saistīts ar to virsmas temperatūru un kuru reģistrētais starojuma jaudas blīvums E_b (W m^{-2}) ir proporcionāls temperatūras 4. pakāpei:

$$E_b \sim T^4. \quad (2.1)$$

„Absolūti melnam” ķermenim, kas visu garumu viļņus absorbē un neko neatstaro, proporcionalitātes koeficients ir $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ un to sauc par Stefana-Bolcmaņa konstanti.

Eksperimentos sastopamajiem objektiem virsmas īpašības atšķiras no „absolūti melnā” ķermeņa īpašībām un, lai temperatūru noteiktu korekti, ir jāņem vērā arī virsmas t.s. emisijas koeficients (jeb nomelnojuma pakāpe) ε , kas ir bezdimensionāls lielums un raksturo objekta spēju absorbēt vai atstarot elektromagnētiskos viļņus. “Absolūti melnajam” ķermenim, tas ir 1, bet ķermenim, no kura visi viļņi tiek atstaroti un nekas netiek absorbēts, tas ir 0. Reālos mērījumos tiek lietots t.s. „pelēka ķermeņa” tuvinājums, t.i. tiek pieņemts emisijas koeficienta vērtības starp 0 un 1, kas ir atkarīgas no materiāla virsmas īpašībām un viļņa garuma, piem. metāliem $\varepsilon \approx 0,3 \dots 0,8$, bet stikliem, kokam, krāsām, ūdenim un lielākai daļai no celtniecības materiāliem $\varepsilon > 0,9$). Mērījumi rāda, ka lielākai daļai no ķermeņiem šo koeficientu var pieņemt vienādu ar 0,95, kas lietojot termogrāfisko metodi parasti tiek darīts. Ievērojot Stefana-Bolcmaņa konstanti un virsmas emisijas koeficientu, likumu (2.1) var pārrakstīt sekojošā formā:

$$E_b = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4. \quad (2.2)$$

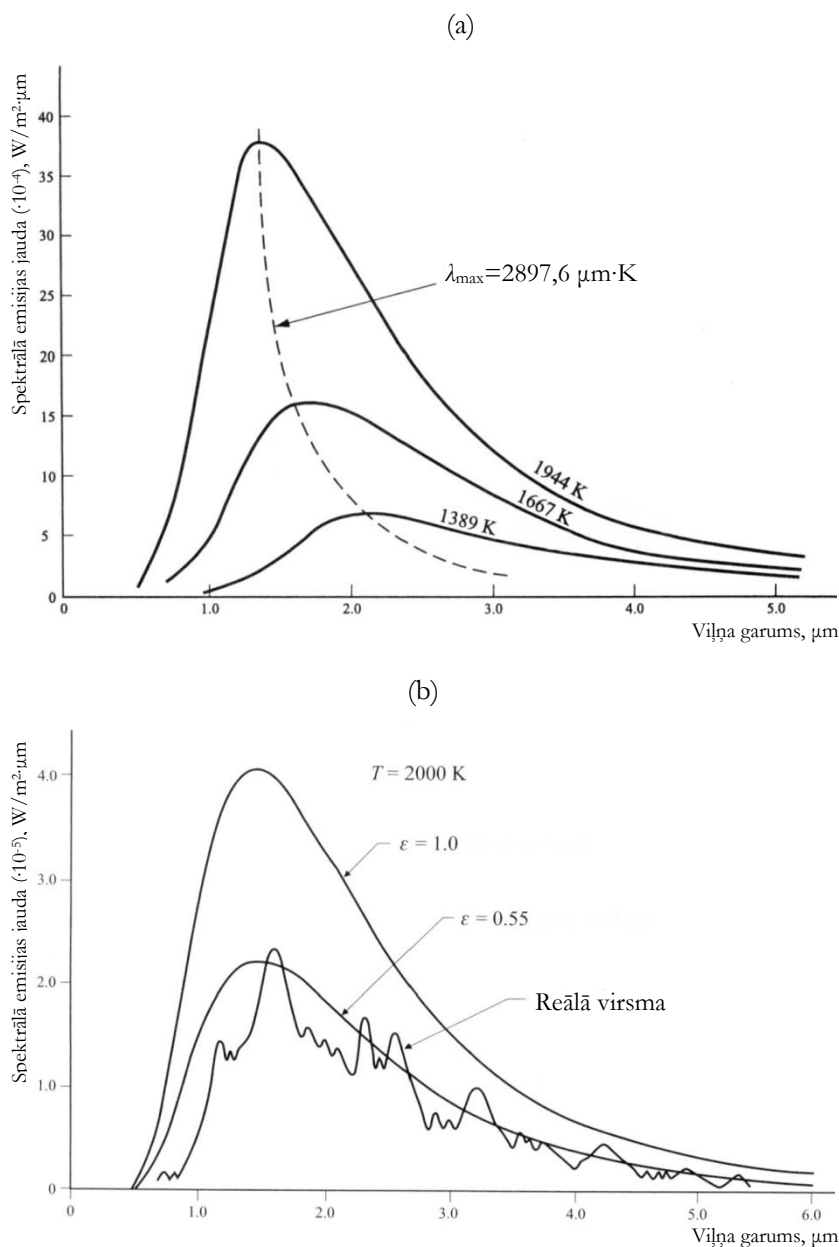
Termogrāfijas metodē skaitliskajai temperatūras vērtībai noteikšanai tiek izmantots Vīna nobīdes likums, kas seko no absolūti melnā ķermeņa starojuma Planka sadalījuma (Incropera, DeWitt, 2002), kas nosaka, ka maksimālā izstarotā starojuma jauda pie uzdotās temperatūras ir novērojama pie konkrētā viļņa garuma, ko sauc par īpatnējo viļņa garumu λ_{\max} (μm) un, temperatūrai palielinoties, starojuma maksimums pārbīdās īsāko viļņu virzienā:

$$\lambda_{\max} \cdot T = 2897,6 [\mu\text{m} \cdot \text{K}]. \quad (2.3)$$

Grafiski izstarotās jaudas spektrālais sadalījums atkarībā no temperatūras absolūti melnam ķermenim un reālām virsmām parādīts attēlā 2.5.

Sakarību (2.3) var izmantot, lai aprēķinātu redzamās gaismas spektra minimālāi un maksimālāi viļņa garuma vērtībai (0,4 un 0,7 μm attiecīgi) atbilstošās starotāja līdzsvara temperatūras – 7244 K un 4139 K, tādējādi vidējā temperatūra sastāda aptuveni 5700 K, kas labi sakrīt ar Saules virsmas temperatūras novērtējumiem. Absolūti melnam ķermenim ar virsmas temperatūru 1000 K starojuma maksimums ir pie 2,9 μm ar nelielu izstarotu sarkanās gaismas daļu, ko iespējams novērot arī eksperimentāli, uzkaršējot kādu metāliski objektu, piem., naglu.

Ēku norobežojošo konstrukciju eksperimentālo pētījumu laikā reģistrētie elektromagnētiskie viļņi parasti atrodas infrasarkanajā diapazonā ar viļņa garumiem 3...13 μm , kas atbilst starotāja temperatūrai 20...100 °C un nav redzami ar „neapbruņotu” cilvēka aci. Tie kļūst redzami tikai gadījumā, ja temperatūra pārsniedz 530 °C. Minēto viļņa garumu diapazons ietilpst t.s. siltuma (termiskā) starojumu spektra daļā, kurā notiek siltuma pārnese starojuma ceļā. Tas ietver daļu no ultravioleto viļņu spektra (sākot ar 0,1 μm), kā arī visu redzamās un infrasarkanās gaismas spektru līdz 100 μm (attēls 2.6).

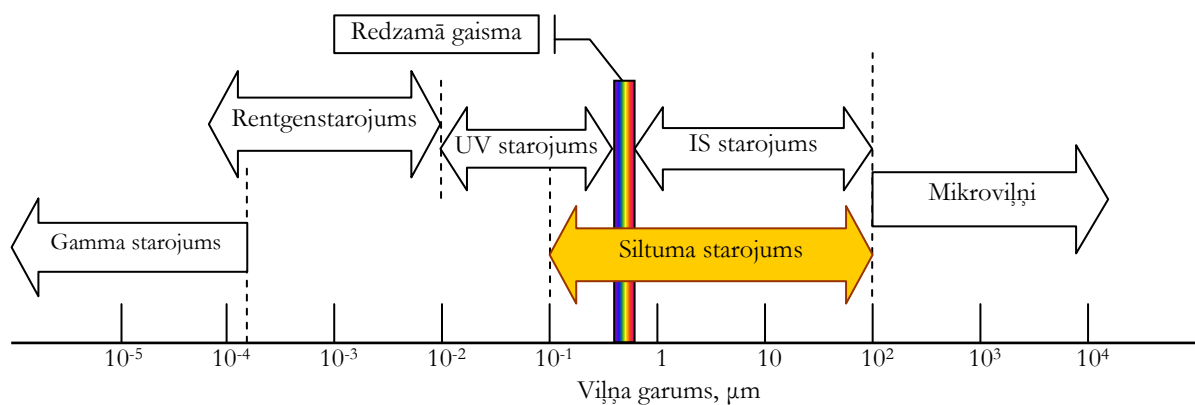


Attēls 2.5. Spektrālais emisijas jaudas sadalījums absolūti melnajam ķermeim pie dažādām temperatūrām (a) un reālajam ķermeim (b).

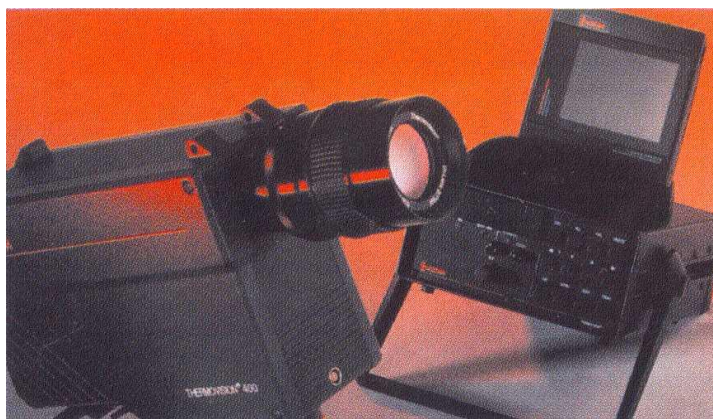
Šī darba ietvaros veiktajos mērījumos, kas tika realizēti sadarbībā ar AS „Augstsprieguma tīkls” (agrāk VAS „Latvenergo” filiāle „Mācību un energopētniecības centrs”), tika izmantots vecā tipa termogrāfs AGEMA Thermovision 487 (attēls 2.7), kā arī nākamās paaudzes termogrāfi FLIR ThermaCAM P65 un FLIR P620 (attēls 2.8). Abu izmantoto termogrāfu modeļu svarīgāko parametru salīdzinājums sniegts tabulā 2.1.

Veicot termogrāfiskos apsekojumus, galvenais nosacījums labu rezultātu iegūšanai ir temperatūru starpība starp iekštelpu gaisu un ārējo gaisu – tādā gadījumā tiek nodrošināta liela siltuma plūsma un ir labāk saskatāmas defektu vietas. Mērījumu laikā ir ieteicams papildus izmantot arī pārspiedienu iekārtu, kas sekmē siltā gaisa izplūšanu no telpām, vai, gadījumā, ja termogrāfiskā

apskate notiek no iekšpuses, pazemināts spiediens (zemspiediens) iekšstelpās izraisa pastiprinātu aukstā ārējais ieplūdi. Parasti šim nolūkam tiek izmantota standartizēta ēkas gaisa apmaiņas noteikšanas iekārta (skat. sadaļu 2.3), ar kuras palīdzību tiek nodrošināta 50 Pa spiedienu starpība.



Attēls 2.6. Siltuma starojuma diapazons elektromagnētisko viļņu spektrā.



Attēls 2.7. Termogrāfs AGEMA Thermovision 487.



Attēls 2.8. Termogrāfi FLIR ThermoCAM P65 un FLIR P620.

Tabula 2.1. Izmantoto termogrāfu svarīgāko parametru salīdzinājums.

Parametrs	AGEMA Thermovision 487	FLIR ThermaCAM P65	FLIR P620
Temperatūru diapazons	-20...500 °C (2000 °C ar filtriem)	-40...500 °C (2000 °C ar filtriem)	-40...500 °C (2000 °C ar filtriem)
Izšķirtspēja, punkti	140×140	320×240	640×480
Jutība pie 30 °C	0,1 °C	0,08 °C	0,04 °C
Objektīvi	Silīcija, maināmi	Germānija, maināmi	Germānija, maināmi
Datu nesējs	3,5" diskete	RAM vai SD karte	RAM vai SD karte
Detektora darbības diapazons	2...5 μm, IR spektra īso viļņu daļa (SWB)	8...13 μm, IR spektra garo viļņu daļa (LWB)	8...13 μm, IR spektra garo viļņu daļa (LWB)
Detektora tips	HgCdTe vienelementa ar dzesēšanu	mirobolometru tipa bez dzesēšanas	mirobolometru tipa bez dzesēšanas
Detektora dzesēšana	Termoelektriskā	-	-
Detektora darba temperatūra	-70 °C	30 °C	30 °C
Svars, kg	8	2	1,8
Papildus iespējas	-	Fotoaparāts, Bluetooth, FireWire, IrDA u.c.	Fotoaparāts, MPEG-4, FireWire, WLAN, USB, IrDA u.c.

Arī klimatiskajiem apstākļiem ir liela nozīme rezultātu korektībai – pastiprināts vējš, lietus vai tiešs Saules starojums var radīt neprecizitātes mērījumu rezultātu iegūšanā un interpretēšanā. Tā, mitruma uzkrāšanās vietā notiek aktīva ūdens iztvaikošana, kas arī rada pazeminātas virsmas temperatūras efektu. Savukārt, Saules apspīdētiem objektiem noteiktā virsmas temperatūra ir lielāka pateicoties uzsilšanai, nevis to mazākai siltuma vadītspējai. Kopumā apstākļus un nosacījumus ēku siltuma izolācijas defektu atklāšanai, izmantojot infrasarkanā starojumu, definē norma (ISO 6781, 1983), bet detalizētāka informācija par šādu mērījumu teorētiskiem aspektiem ir atrodama darbā (Jakovičs *et.al.*, 1998). Lietojumu pieredze dažādu valstu klimatiskajos apstākļos atspoguļota darbos (Jakovičs, Banga, 1997), (Svaic *et.al.*, 2005) un (Leonachescu *et.al.*, 2005).

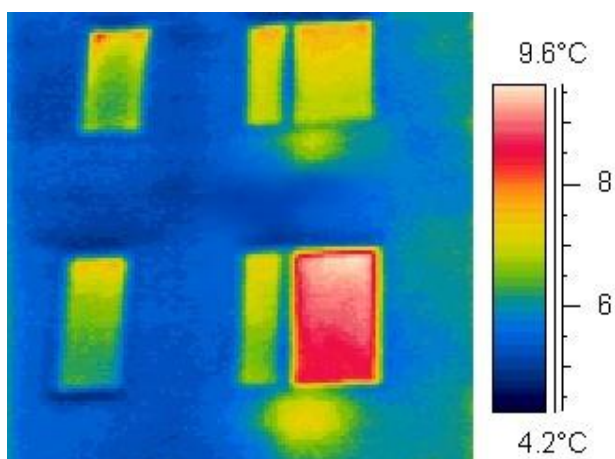
2.1.2. Raksturīgie piemēri

Termogrāfiskā diagnostikas metode tika pielietota daudzu desmitu dzīvojamo, biroja un rūpniecisko ēku apsekojumos vairāku apkures sezonu laikā, kā rezultātā uzkrāta ievērojama biežāk sastopamo defektu un raksturīgāko piemēru datu bāze, dažus raksturīgākos no tiem apskatīsim detalizētāk.

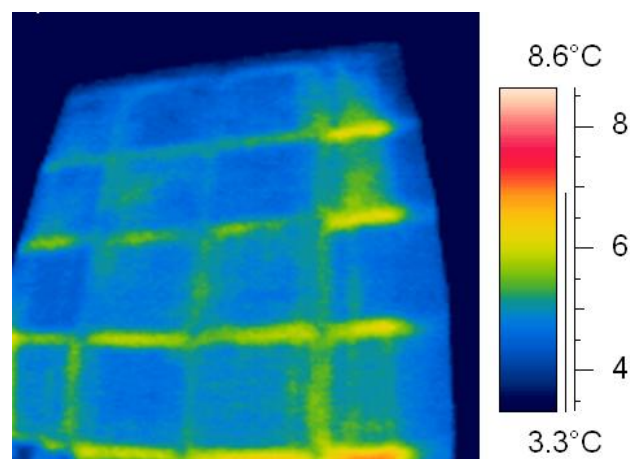
Daļa termogrāfiskās diagnostikas rezultātā atklāto defektu ir saistīta ar ēku norobežojošo konstrukciju palielinātu siltuma caurlaidību. Attēlā 2.9 ir redzams ārsienām ar lielu siltuma caurlaidību raksturīgs defekts – paaugstināta virsmas temperatūra zonā pie pārāk tuvu sienai novietotā apkures sistēmas sildķermeņa, kas mazina apkures efektivitāti un palielina siltuma patēriņu. Tāpat šajā attēlā ir redzams arī vienkamra logs ar lielāku virsmas temperatūru salīdzinājumā ar divstiklu logu, kas nozīmē lielāku siltuma plūsmu un ievērojamus siltuma zudumus. Šī termogramma uzņemta ar AGEMA Thermovision 487 kameru, kuras detektora darbības diapazons (Tabula 2.1) ļauj noteikt arī stikloto virsmu temperatūru, ko nevar izdarīt ar jaunākām kamerām ar detektora darbības diapazonu spektra garo viļņu daļā reflektētā starojuma dēļ. Termogrāfiskās apskates laikā detektēto paaugstinātu vienkamra loga virsmas temperatūru varēja paredzēt jau pēc vienkāršas vizuālās apskates, savukārt, sildķermeņu izraisīto ārsienas temperatūras pieaugumu ar neapbruņoti aci konstatēt ir praktiski neiespējami.

Attēlos 2.10 un 2.11 ir parādīti divi termogrāfiskie uzņēmumi ar paaugstinātu ēku ārsienas temperatūru. Ja daudzstāvu mājas gala sienas paneļu savienojumu vietas atšķiras arī vizuāli un šuvju lielāku siltuma caurlaidību var paredzēt (attēls 2.10), tad termiskos tiltus stāvu pārsegumu konstrukciju savienojuma vietās var noteikt tikai mērījumos (attēls 2.11).

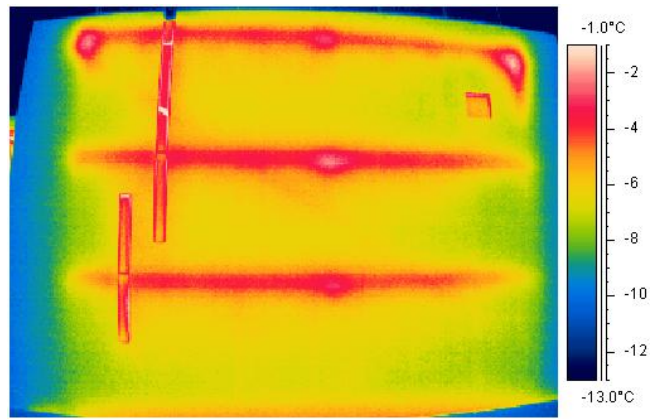
Attēlā 2.12 redzams raksturīgs uzņēmums no ēkas iekšpuses, kur norobežojošās būvkonstrukcijas temperatūra metāla karkasam ir līdz pat 7 °C zemāka kā izolējošā pildījuma virsmai un ir izveidojies būtisks termiskais tilts, šādā situācijā pie zemām ārējās temperatūrām uz virsmas var veidoties kondensāts. Līdzīgu pazeminātu temperatūru karkasam salīdzinājumā ar pildījumu, tikai zem apdares esošo un tāpēc nepamanāmu ar neapbruņoti aci, var redzēt attēlā 2.13.



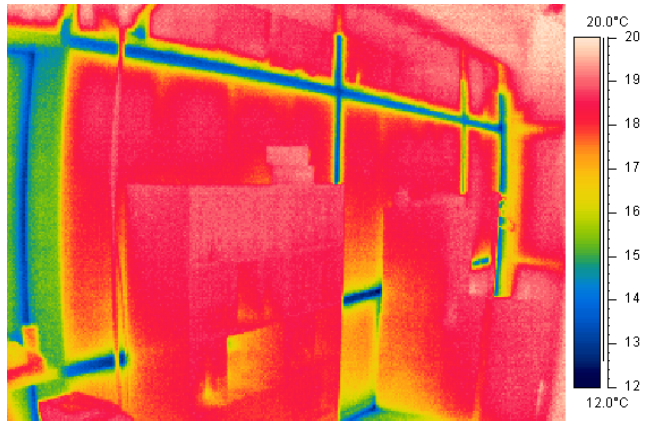
Attēls 2.9. Paaugstināta ārsienas temperatūra pretī radiatoru novietojuma vietām (Latvijas Universitātes Fizikas un matemātikas fakultātes laboratoriju korpusa fasāde pirms tā rekonstrukcijas).



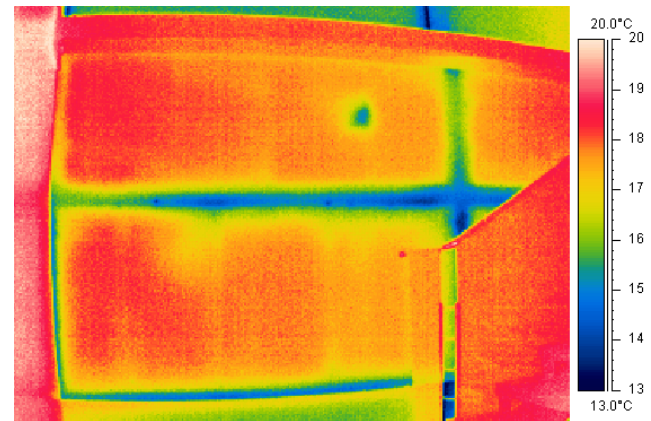
Attēls 2.10. Paaugstināta ēkas paneļu gala sienas šuvju temperatūra.



Attēls 2.11. Paaugstināta ēkas sienas temperatūra stāvu pārsegumu salaiduma vietās.



Attēls 2.12. Metāla karkasa konstrukciju un izolējošā pildījuma temperatūru atšķirība.



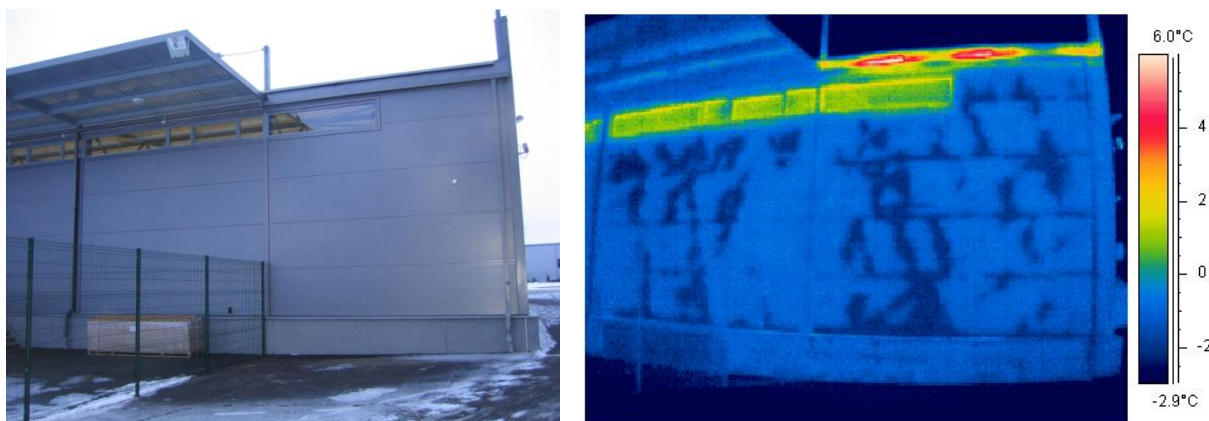
Attēls 2.13. Zem apmetuma neredzamā karkasa konstrukcijas pazemināta temperatūra.

Defekts, kas ir saistīts ar rūpnieciski izgatavotu būvmateriālu defektiem, ir parādīts attēlā 2.14, kur ir redzamas neregulāras pazeminātās temperatūras zonas uz relatīvi jaunu ārējo bloku virsmām, kas ir saistītas ar ārējā metāla apšuvuma atslāņošanu.

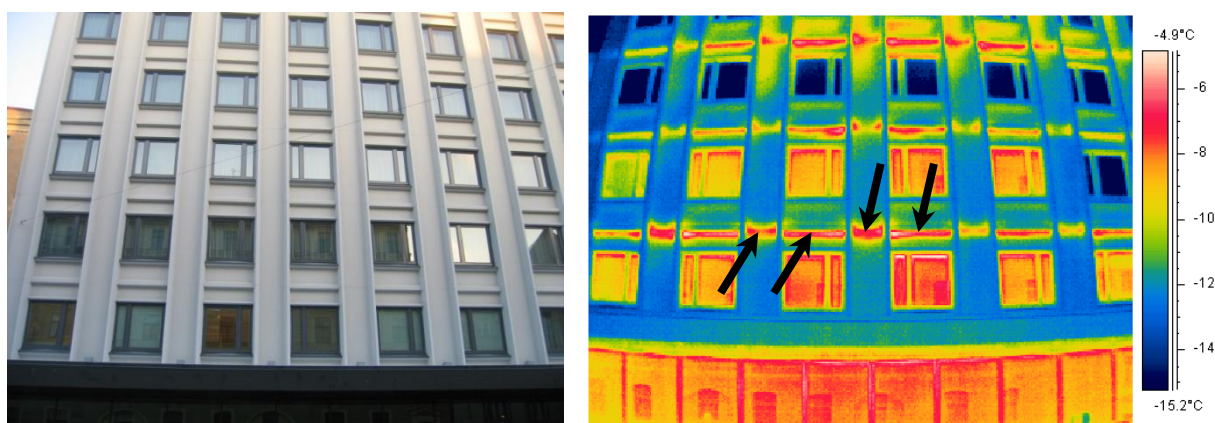
Pareizas siltināšanas tehnoloģijas ēkas renovācijā neievērošanas rezultāts ir redzams attēlā 2.15. Šajā gadījumā visu telpu ārējo sienas ir nosiltinātas no iekšpuses, bet starpstāvu betona konstrukcijas un fasāžu salaiduma vietām nav lietota papildus siltuma izolācija, kā rezultātā ir izveidojušies siltuma

tilti, kas ir ne tikai cēlonis palielinātiem siltuma zudumiem, bet arī ievērojami pazemina iekštelpu temperatūras nenosiltināto salaiduma vietu tuvumā (attēls 2.16), kas pie zemas ārējās temperatūras var būt par iemeslu rāsas punkta sasniegšanai.

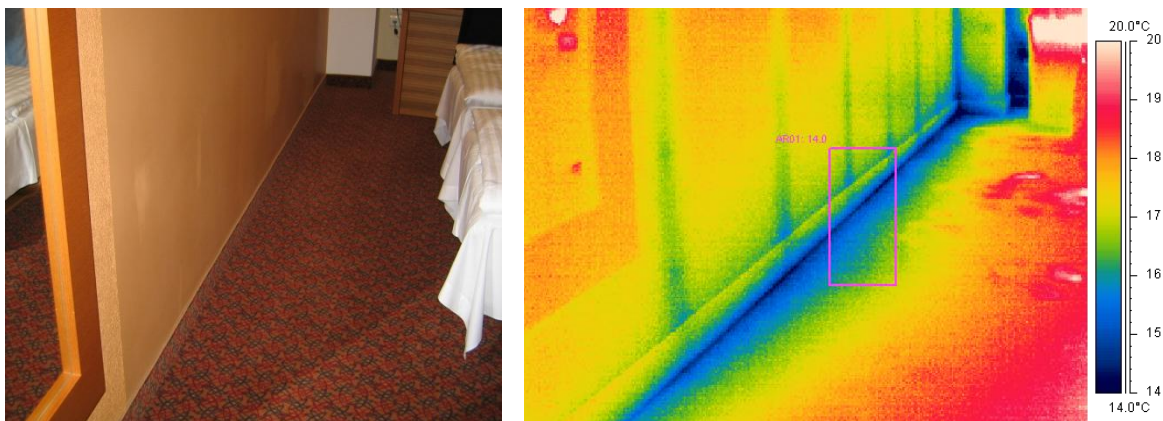
Nākamais raksturīgāko termogrāfiskās diagnostikas rezultātā atklāto siltuma zudumu veids ir saistīts ar konvekcijas siltuma pārneš ekās, visbiežāk tas ir logu un durvju nepietiekamais blīvējums un ar to saistītā kondensāta veidošanās varbūtība. Attēlā 2.17 ir redzams ievērojams temperatūras kritums pie loga veramās daļas, kas pēc absolūtās vērtības sasniedz tikai 4 °C, tāpēc šajās vietās veidojas kondensāts un arī rodas lieli siltuma zudumi. Vēl kritiskāka situācija ir novērojama attēlā 2.18 parādītajā konstrukcijā, kad sildītāja tuvumā ārdurvju apakšējā daļā nepietiekama blīvējuma un palielinātas siltuma caurlaidības dēļ veidojas kondensāts, kas zonās ar īpaši zemu temperatūru (līdz -6 °C, skat. attēla skalu) sasalst, tādējādi izveidojas situācija, kad pusmetra attālumā no sildītāja uz vienas no telpas iekšējām virsām novērojama ledus kārtā.



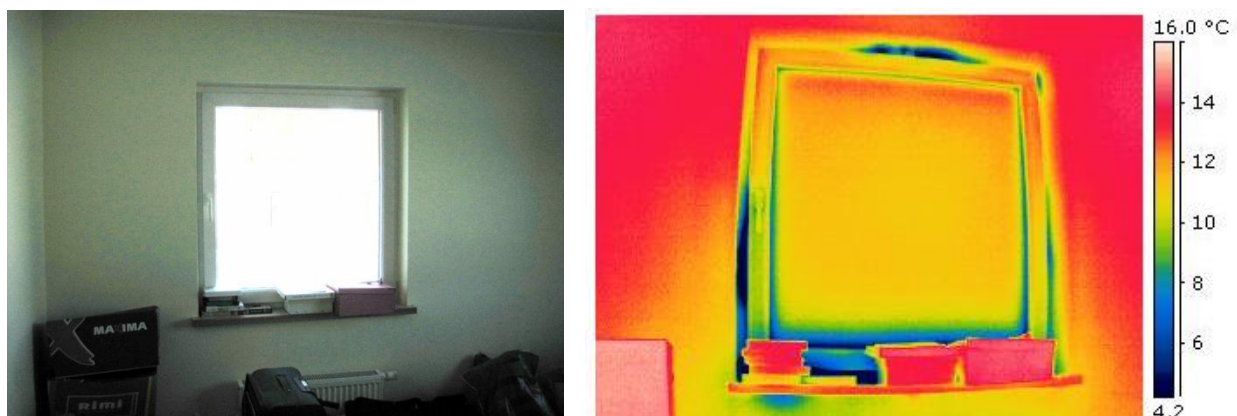
Attēls 2.14. Nohomogenitātes ārsienas paneļu virsmas temperatūra.



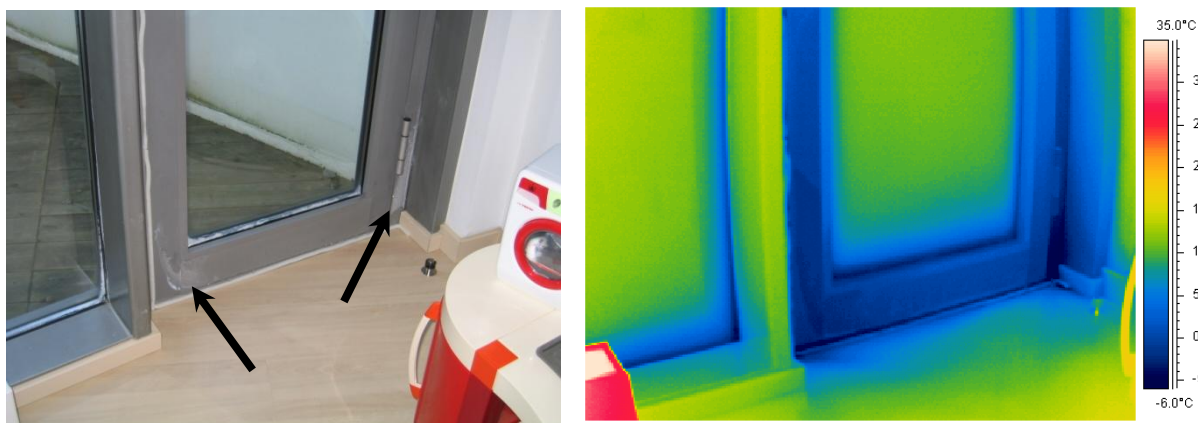
Attēls 2.15. Izteikti termiskie tilti nenosiltinātās starpstāvu pārsegumu zonās.



Attēls 2.16. Pazemināta temperatūra no iekšpuses nosiltinātas ārsienas un grīdas salaiduma vietā.

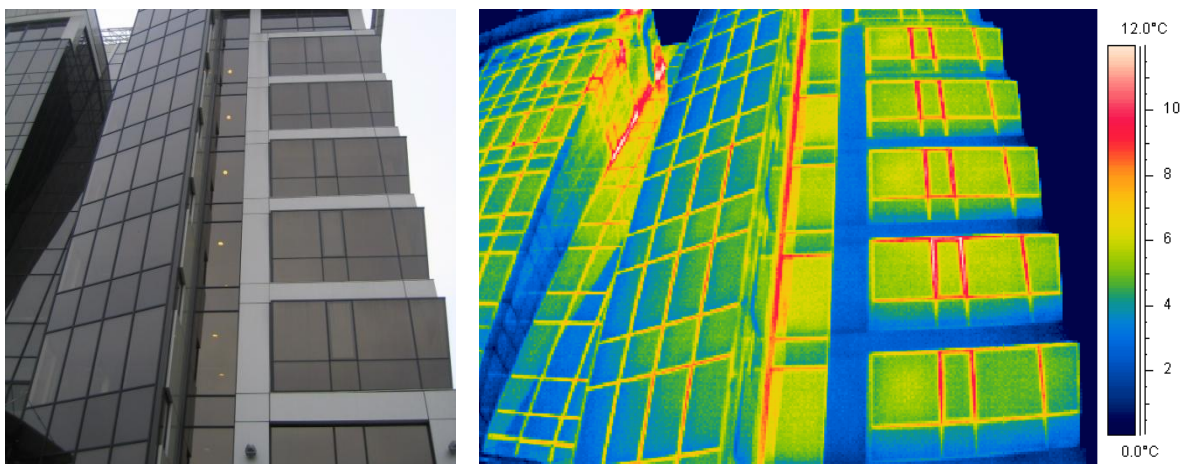


Attēls 2.17. Aukstā ārgaisa ieplūde pa neblīvām vietām loga konstrukcijā.

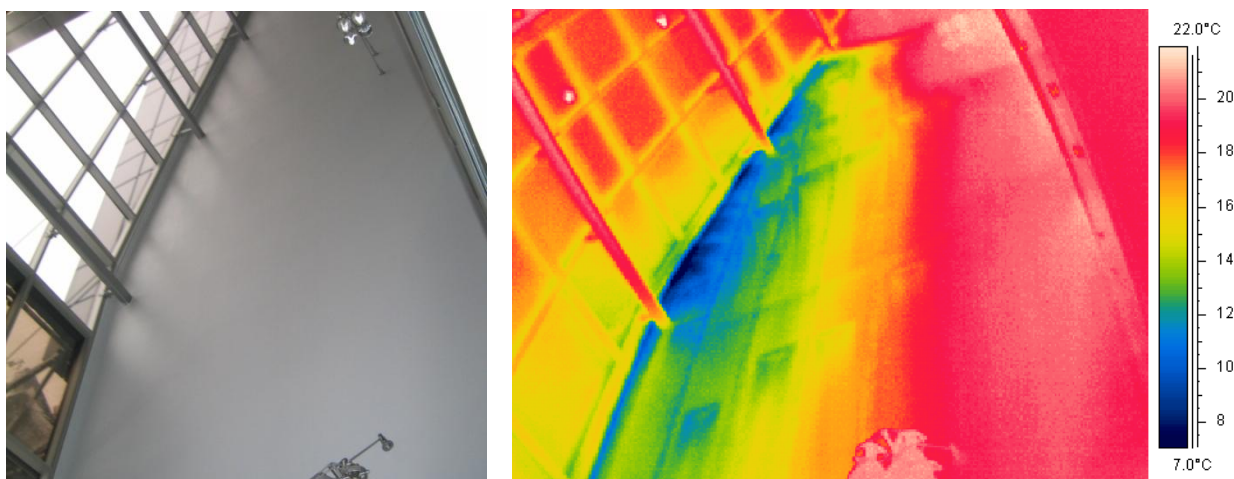


Attēls 2.18. Negatīva temperatūra uz iekšējām ārdurvju konstrukcijas virsmas.

Daudzstāvu ēkās sienās bez pietiekamas pretvēja izolācijas vai telpās, kas aizņem vairākus stāvus, konvekcijas radītos siltuma zudumus pastiprina t.s. termogravitācijas efekts, kura rezultātā vieglākās siltā gaisa masas ceļas augšup un, ja augstākos stāvos ir arī ievērojami blīvējuma defekti vai tiek lietotas konstrukcijas ar lielu siltuma caurlaidību, notiek pastiprināta siltuma apmaiņa vai gaisa izplūde (attēls 2.19) un veidojas pazemināta temperatūra uz augstāko stāvu norobežojošo konstrukciju iekšējām virsmām (attēls 2.20).



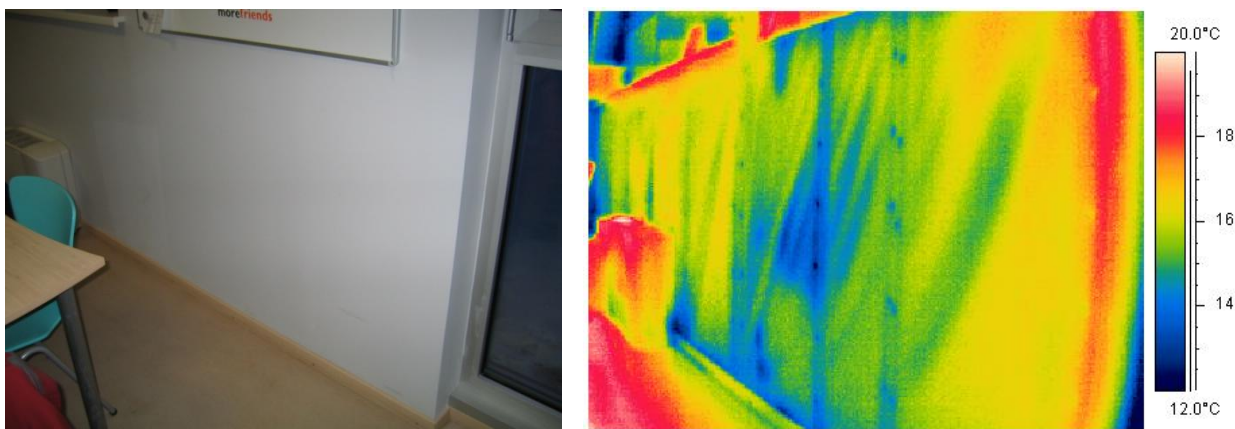
Attēls 2.19. Siltā gaisa izplūdes rezultātā paaugstināta temperatūra daudzstāvu ēkas augstākajos stāvos.



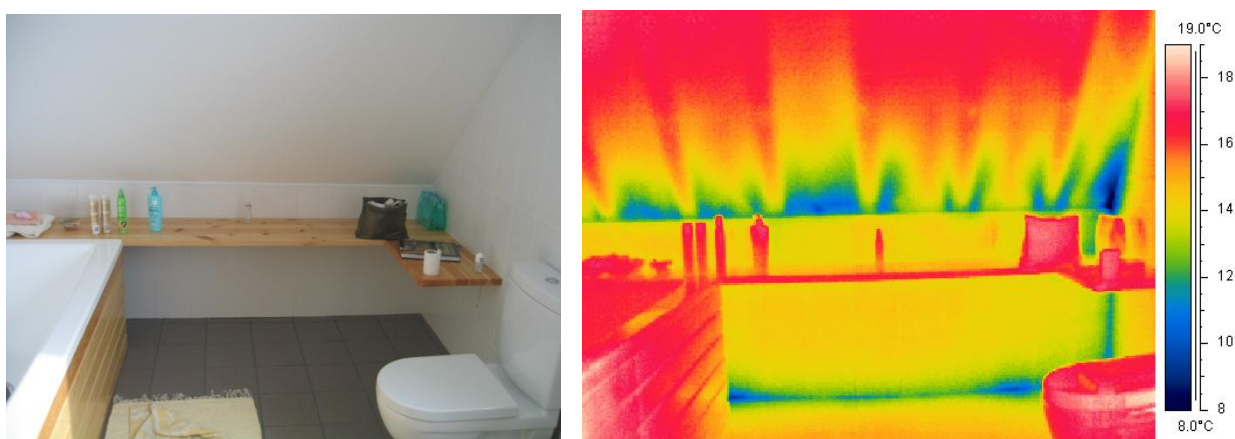
Attēls 2.20. Sienas temperatūras pazeminājums par 15 °C daudzstāvu ēkas augšējos stāvos.

Ar gaisa masu pārvietošanos ir izskaidrojama vēl viena termogrāfiskās diagnostikas laikā atklāto raksturīgāko defektu grupa, kas ir saistīta ar mūsdienās plaši izplatītajām vieglajām konstrukcijām, kurām tehnoloģiski nepilnīga izpildījuma gadījumā var būt liela gaisa caurlaidība. Konvekcijas siltuma zudumi šāda tipa ēkās saistīti ar konstruktīviem risinājumiem, kas paredz gaisa starpslāņus un daudzas būvkonstrukciju salaiduma vietas, kuras praksē bieži vien netiek atbilstoši apstrādātas un stiprāka vēja gadījumā vai pie lielākas temperatūras starpības notiek pastiprināta gaisa apmaiņa. Dažus šāda tipa defektus ir iespējams pamanīt arī reālajos ēku ekspluatācijas apstākļos, tomēr ir lietderīgi radīt lielāku spiedienu starpību starp iekštelpu un ārgaisu, tādējādi palielinot gaisa caurplūdi un vienkāršojot defektu vietu atrašanu. Attēlos 2.21 un 2.22 parādīti aukstā ārgaisa ieplūdes piemēri vieglo būvkonstrukciju ēkās ar mākslīgi radīto zemspiedienu telpās, kā rezultātā notiek pastiprināta ārgaisa infiltrācija pa dažādiem neblīvējumiem un tai ir raksturīgs neregulārs pazemināto temperatūras zonu izvietojums. Savukārt, radot telpās pārspiedienu, no ārpuses ar

termogrāfiskās metodes palīdzību var redzēt siltā iekštelpu gaisa izplūdes zonas, kas parasti veidojas neblīvās salaiduma vietās (attēls 2.23).



Attēls 2.21. Aukstā ārgaisa ieplūde sienas konstrukcijā pie zemspiediena telpā.



Attēls 2.22. Aukstā ārgaisa ieplūde jumta un fasādes salaiduma konstrukcijā pie zemspiediena telpā.

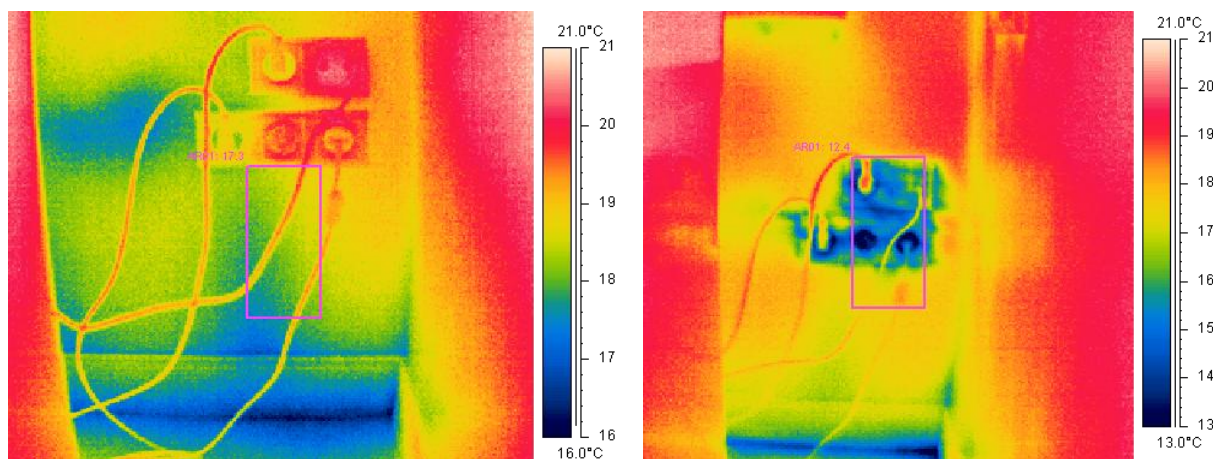


Attēls 2.23. Siltā gaisa izplūde pa neblīvējumiem būvkonstrukciju salaiduma vietās pie pārspiediena telpās.

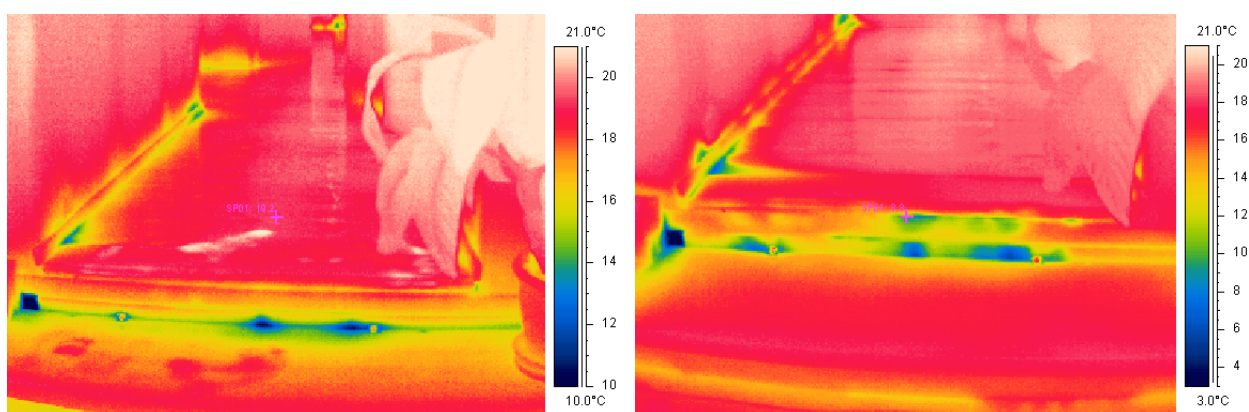
Ja termogrāfiskais apsekojums nenotiek vējainā laikā, tad defekti norobežojošās konstrukcijās, kas ir saistīti ar nepietiekamu hermetizāciju, nevar tikt korekti novērtēti un bieži vien pat atklāti bez mākslīgi radīta zemspiediena vai pārspiediena. Rezultātus, kas ir iegūti šādos eksperimentos, ir

lietderīgi salīdzināt ar ēkas stāvokļa bez spiedienu starpības apsekojumu, tādējādi novērtējot konvekcijas gaisa apmaiņas ietekmi uz temperatūras lauka izmaiņām. Faktiski visplašāk vieglo konstrukciju ēkās izplatīts defekts ir saistīts ar elektrības rozetēm ģipškartona sienās, kad tās netiek attiecīgi noblīvētas, novēršot gaisa caurplūdi. Bieži vien šādu vietu tuvumā var ne tikai konstatēt pazeminātu konstrukciju virsmas temperatūru, bet arī aukstā gaisa intensīvu ieplūdi, kuras ātrums pie lielākas spiedienu starpības var sasniegt pat vairākus metrus sekundē.

Attēla 2.24 ir parādīts istabas rozetņu bloks bez un ar 50 Pa zemspiedienu telpā – kā redzams, pie lielākas spiedienu starpības temperatūra samazinās par vairākiem grādiem, kas liecina par aukstā ārgaisa ieplūdi pa sienas iekšpusē esošajiem gaisa ceļiem. Tomēr arī gadījumā, ja pazeminātas temperatūras zonas kādā telpas vietā ir konstatējamas arī dabiskos apstākļos, mākslīgi radītā spiedienu starpība ļauj modelēt situāciju stipra vēja apstākļos.



Attēls 2.24. Ģipškartona plāksnē iemontētās rozetes bez (pa kreisi) un ar (pa labi) 50 Pa zemspiedienu telpā.

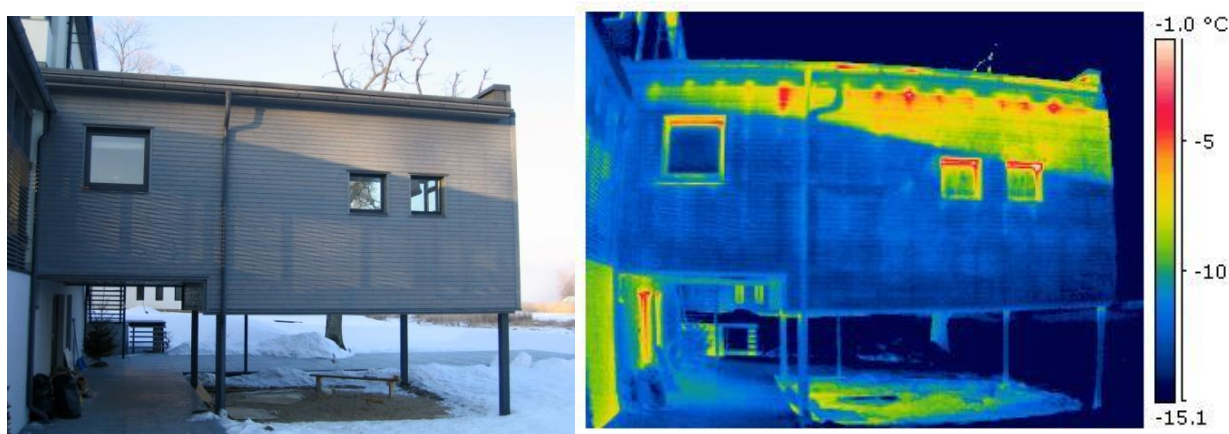


Attēls 2.25. Gaisa ieplūde caur grīdas konstrukciju bez (pa kreisi) un ar (pa labi) 50 Pa zemspiedienu telpā.

Tā, attēlā 2.25 tiek salīdzinoši parādīti divi termogrāfiskie uzņēmumi pie dažādām spiedienu starpībām starp iekštelpu un ārgaisu – kvalitatīvi temperatūras lauks atšķiras maz, tomēr kvantitatīvi atšķirības ir būtiskas. Kā redzams no temperatūru krāsu skalām, pie 50 Pa liela zemspiediena telpā,

aukstā ārgaisa ieplūdes intensitāte ir būtiski lielāka, kā rezultātā minimālā virsmas temperatūra samazinās no 10 °C līdz 3 °C.

Raksturīgākais piemērs termogrāfiskās apskates laikā reģistrētam efektam, kas nav saistīts ar ēkas norobežojošo būvkonstrukciju stāvokli, ir parādīts attēlā 2.26, kur ir redzams ilgstošā Saules starojuma rezultātā radies ārsienas temperatūras palielinājums tās augšējā daļā. Šādus efektus ir viegli identificēt, ja arī vizuāli ir redzami Saules apspīdētie laukumi, tajā pat laikā problēmas var sagādāt tādu eksperimentu rezultātu analīze, kas veikti īsi pēc Saules staru iedarbības un attiecīgo virsmu temperatūra vēl ir paaugstināta.



Attēls 2.26. Palielināta ēkas sienas virsmas temperatūra saistīta ar Saules enerģijas atstarošanu un uzsilšanu.

Grūtības precīzai virsmas temperatūras noteikšanai var būt arī gadījumos, kad virsmas emisijas koeficients ε materiālam ir daudz mazāks par 1 vai nav precīzi zināms, kā arī situācijās, kad vienā termogrāfiskā uzņēmumā ir redzami materiāli ar būtiski atšķirīgām virsmas emisijām. Šo faktoru fizikālās ietekmes izpratne un novērtējums tādējādi ir svarīgi kvalitatīvam iegūto termogrammu izvērtējumam. Relatīvi plaši izplatīts ir „mīts”, ka ar termogrāfiju var izmērīt siltuma plūsmu caur būvkonstrukcijām, te jānorāda, ka pat veicot papildus gaisa un virsmas temperatūras mērījumus ar termogrāfijas metodi ticamu siltuma caurlaidības vērtību nevar iegūt.

2.1.3. Secinājumi

Virsmu temperatūras noteikšana ar termogrāfiskās diagnostikas palīdzību ir pirmā metode attīstītās ēku kompleksas siltuma zudumu analīzes pieejas sastāvā un dod vispārīgo priekšstatu par ēkas vai tās bloku siltumtehniko stāvokli kopumā, kā arī ļauj atklāt ar neapbruņoti aci nepamanāmus defektus un izvēlēties vietas un objektus turpmāko kvantitatīvo mērījumu veikšanai. Lietojot to kopā ar zemspiediena un pārspiediena radīšanas iekārtu, var tikt atklāti arī tādi defekti un novērtētas

norobežojšo konstrukciju kritiskās vietas no gaisa konvekcijas viedokļa, kas pie dabīgiem gaisa apmaiņas apstākļiem nevar tikt atklātas. Vairāku gadu garumā veiktie mērījumi parāda, ka bez palielinātās siltuma vadīšanas atsevišķos mezglos, liels siltuma daudzums tiek zaudēts arī konvekcijas gaisa apmaiņas procesu rezultātā, it sevišķi raksturīgs tas ir vieglām konstrukcijām.

Kad ēkas siltumfizikālajam stāvoklim ir dots ekspertu novērtējums un tai ir veikta termogrāfiskā diagnostika, kā rezultātā parasti tiek atklātas lielāko siltuma zudumu zonas, nākošais solis ir kvantitatīvos siltuma zudumus raksturojošo parametru eksperimentāli mērījumi gan ēkas reālajos ekspluatācijās, gan laboratorijas apstākļos. Termogrāfiskā metode nedod kvantitatīvu priekšstatu par siltuma zudumu daudzumu, jo netiek reģistrēti nekādi citi lielumi, izņemot virsmas temperatūru, kas ir nepietiekami, lai veiktu (piem., siltuma caurlaidības) kvantitatīvu analīzi, tāpēc to noteikšanai jāizmanto principiāli cita mērījumu tehnika.

2.2. Siltuma vadīšanas zudumi

Kad ēkas norobežojšo konstrukciju raksturīgie elementi un kritiskie defekti ir noteikti, nākamais solis tās energoefektivitātes kompleksās analīzes pieejas ietvaros (attēls 1.1) ir eksperimentālie mērījumi kvantitatīvu siltuma zudumus raksturojošo lielumu noteikšanai. Latvijas klimatiskajos apstākļos lielākā daļa no siltuma apmaiņas starp ēku un apkārtējo vidi notiek siltuma vadīšanas un konvekcijas ceļā, starojuma siltuma pārneses loma ir mazāk svarīga un var būt nozīmīga tikai ēkām ar būtisku caurspīdīgo norobežojšo konstrukciju daļu tās ārējā čaulā, kā arī saulainās dienās. Kā pirmo no minētajiem procesiem apskatīsim siltuma vadīšanu, tās intensitātes raksturojošus parametrus un to noteikšanas metodes.

Siltuma pārneses procesa pamatsakarības, to izvedumus un pielietojumus var atrast daudzās siltumfizikas mācību grāmatās un rokasgrāmatās, piem., (Incropera, DeWitt, 2002; Samarskiy, Vabishchevich, 2002). Siltuma vadīšanas teorijas pamatsakarība jeb Furjē likums balstās uz fenomenoloģisko likumu, saskaņā ar kuru siltuma plūsma q nekustīgā homogēnā vidē ir proporcionāla temperatūras gradientam:

$$q = -\lambda \operatorname{grad} T, \quad (2.4)$$

kur λ – siltuma vadīšanas koeficients.

Lai iegūtu siltuma pārneses vienādojumu, enerģijas saglabāšanās vienādojumu pierakstam izskatā

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = -\operatorname{div} q + \dot{q}, \quad (2.5)$$

kur \dot{q} nosaka iekšējo siltuma avotu jaudas blīvumu, piem., elektrovadošā materiāla uzsilšana strāvas

plūšanas laikā, c ir siltuma ietilpība un ρ – vides blīvums. Ievietojot šajā vienādojumā siltuma plūsmas izteiksmi (2.4), iegūstam siltuma vadīšanas pamatvienādojumu diferenciālā formā nekustīgai videi:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + \dot{q}, \quad (2.6)$$

ko Dekarta ortogonālā koordinātu sistēmā var uzrakstīt šādi:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = c\rho \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (2.7)$$

Vispārīgā veidā nehomogenā vidē siltumfizikālās īpašības un vienādojuma (2.7) labā puse var būt atkarīgi gan no telpas punkta, gan arī no temperatūras (att. 2.27) t.i. $c = c(x, y, z, T)$, $\rho = \rho(x, y, z, T)$, $\lambda = \lambda(x, y, z, T)$, $\dot{q} = \dot{q}(x, y, z, T)$, vienādojums ir kvazilineārs. Gadījumā, ja vides īpašības ir konstantas, šo vienādojumu var pārrakstīt vienkāršotā veidā:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{\lambda} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (2.8)$$

kur $a = \lambda/c\rho$ ir temperatūras vadītspējas koeficients, kas parāda, cik ātri temperatūras izmaiņas izplatās materiālā. Atsevišķi var izdalīt šī vienādojuma trīs speciālus gadījumus:

- nestacionārs process bez iekšējiem siltuma avotiem (Furjē vienādojums):

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (2.9)$$

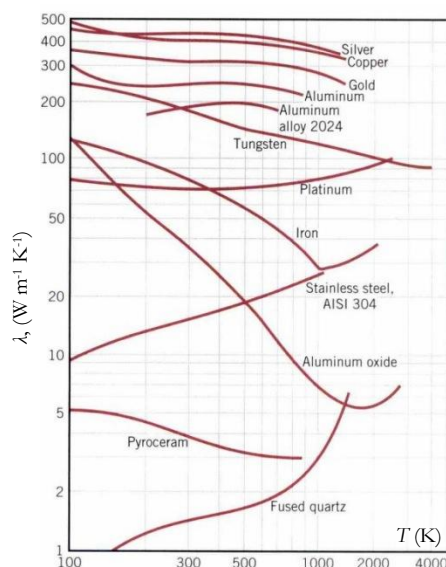
- stacionārs process ar iekšējiem siltuma avotiem (Puasona vienādojums):

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{\lambda} = 0, \quad (2.10)$$

- stacionārs process bez iekšējiem siltuma avotiem (Laplasa vienādojums):

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0. \quad (2.11)$$

Dažu tipisko būvniecībā izmantojamo materiālu siltumtehnikie parametri, kas ieiet siltuma vadīšanas vienādojumos, apkopoti tabulā 2.2.



Attēls 2.27. Dažādu materiālu siltuma vadītspējas atkarība no temperatūras (Incropera, DeWitt, 2002).

Tabula 2.2. Dažu būvniecībā izmantojamo materiālu siltumfizikālās īpašības.

Materiāls	Siltuma vadītspēja λ ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	Īpatnējā siltumietilpība c ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)	Blīvums ρ (kg m^{-3})
Ķieģelis	0,6	800	1500
Betons	1,7	900	2300
Ģipsis	0,22	800	900
Tērauds	84	500	7800
Mīnerālvate	0,04	800	15...150
Koks	0,14	1500	500
Gaiss	0,025	1000	1,2

Apskatot siltuma pārnesei kustīgā vidē (kustīgā koordinātu sistēmā), siltuma vadīšanas vienādojums (2.6) transformējas, parciālo atvasinājumu $\partial/\partial t$ aizvietojo ar pilno jeb substanciālo: $d/dt = \partial/\partial t + \vec{v} \text{grad}$, kur \vec{v} ir vides lokālais ātrums. Tādā gadījumā iegūstam vienādojumu:

$$c_p \rho \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \text{grad} T \right) = \text{div} (\lambda \text{grad} T) + \dot{q}, \quad (2.12)$$

kur loceklis $\vec{v} \text{grad} T$ nosaka temperatūras izmaiņas konvektīvās pārnese rezultātā.

Siltuma vadīšanas vienādojumam tiek pielietoti pirmā, otrā un trešā veida robežnosacījumi. Apskatīsim tos uz virsmas $x=0$ viendimensionālas nekustīgas sistēmas gadījumā (attēls 2.28). Visvienkāršāko gadījumu raksturo ar konstantas temperatūras uzdošanu uz apgabala robežas – t.s. pirmā veida jeb Dirihlē nosacījums (att. 2.28a):

$$T(0, t) = T. \quad (2.13)$$

Otrā veida jeb Neimaņa nosacījums atbilst siltuma plūsmas uzdošanai uz robežas (att. 2.28b):

$$\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = q, \quad (2.14)$$

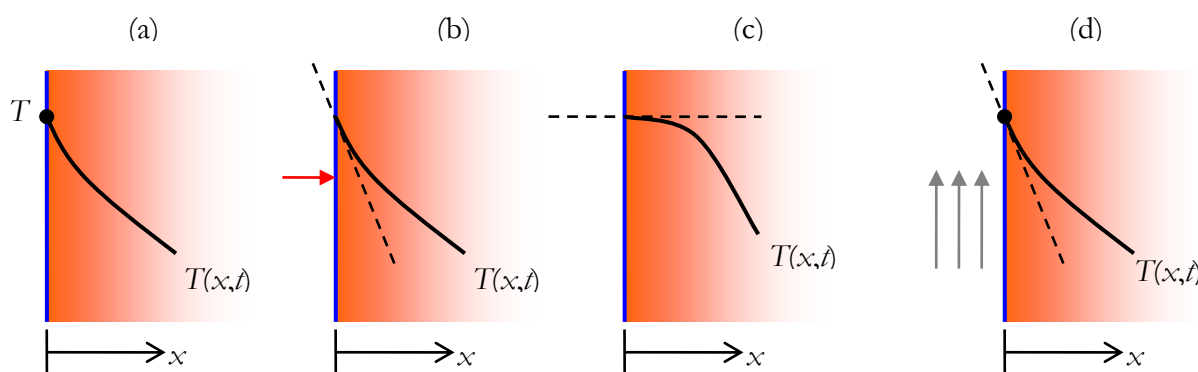
kas pie $q = 0$ raksturo termiski izolētu robežu (adiabātiskais nosacījums), caur kuru nenotiek siltuma apmaiņa (att. 2.28c):

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = 0. \quad (2.15)$$

Visbeidzot, trešā veida robežnosacījums modelē konvektīvo siltuma apmaiņu starp cietā ķermeņa robežu un apkārtējo gāzveida vai šķidruma vidi ar temperatūru T_∞ . Tiek pieņemts, ka siltuma plūsma ir proporcionāla temperatūru starpībai starp virsmu un apkārtējo vidi (att. 2.28d):

$$\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = \alpha(T_\infty - T), \quad (2.16)$$

kur α ir siltuma atdeves koeficients, kas atkarīgs no plūsmas rakstura, intensitātes un tajā bieži iekļauj arī starojuma siltuma atdevi.



Attēls 2.28. Siltuma vadīšanas vienādojuma robežnosacījumi uz virsmas $x = 0$: (a) – virsmas temperatūra, (b) – siltuma plūsma, (c) – adiabatiskais (siltuma izolācijas) nosacījums, (d) – konvekcijas nosacījums.

Viendimensionālā stacionārā gadījumā bez iekšējiem siltuma avotiem vienādojumu (2.7) var pierakstīt sekojoši:

$$\frac{d}{dx} \left(\lambda \frac{dT}{dx} \right) = 0, \quad (2.17)$$

no kurienes, ievērojot vienādojumu (2.4), seko, ka siltuma plūsma šādā gadījumā ir konstanta un nav atkarīga no x . Ja pieņem, ka materiāla siltuma vadītspēja ir nemainīga, divreiz veicot integrēšanu, var iegūt vispārīgo vienādojuma (2.17) atrisinājumu:

$$T(x) = C_1 x + C_2. \quad (2.18)$$

Integrācijas konstantes C_1 un C_2 var atrast no robežnosacījumiem. Lietojot pirmā veida temperatūras nosacījumus (2.13) uz materiāla ar biezumu d abām robežām, iegūstam lineāru temperatūras

sadalījumu (attēls 2.29a):

$$T(x) = (T_2 - T_1) \frac{x}{d} + T_1, \quad (2.19)$$

kur T_1 un T_2 ir temperatūras uz materiāla robežām. Tagad, izmantojot iegūto temperatūras sadalījumu (2.19), no Furjē likuma (2.4) ir iespējams iegūt siltuma plūsmas izteiksmi:

$$q = \frac{\lambda}{d} (T_1 - T_2). \quad (2.20)$$

Starp siltuma vadīšanu un elektrovadītspēju pastāv zināma analogija – līdzīgi, kā elektriskā pretestība ir saistīta ar elektrovadītspēju, arī t.s. siltuma pretestība var tikt saistīta ar siltuma vadītspēju. Tā, siltuma pretestību R materiāla slānim ar biezumu d definē sekojoši:

$$R = \frac{T_1 - T_2}{q} = \frac{d}{\lambda}, \quad (2.21)$$

Savukārt, siltuma pretestību konvekcijas siltuma atdevei no virsmas, kad siltuma plūsmas blīvums var tikt noteikts saskaņā ar Ņūtona likumu

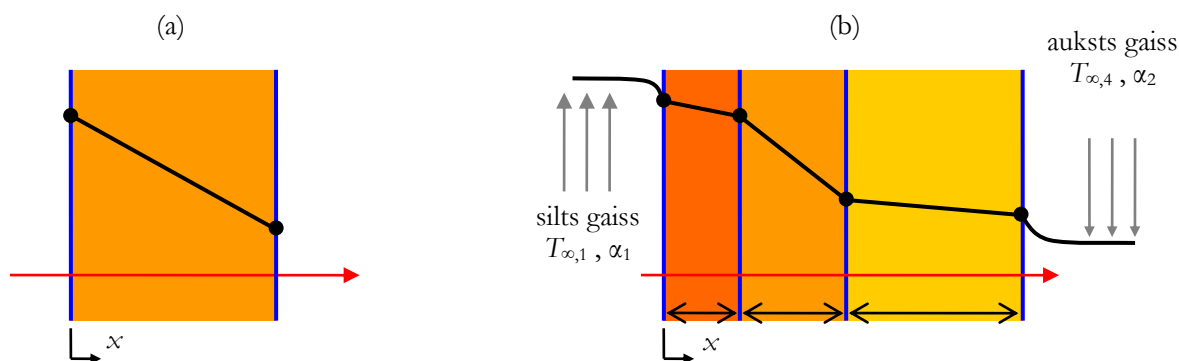
$$q = \alpha (T - T_\infty), \quad (2.22)$$

sauc par robežslāņa termisko pretestību un nosaka pēc sakarības:

$$R = \frac{T - T_\infty}{q} = \frac{1}{\alpha}. \quad (2.23)$$

Izmantojot abas siltuma pretestības, var noteikt rezultējošo siltuma pretestību konstrukcijai, kas sastāv no vairākiem homogēnu materiālu slāņiem, kā arī ievērot termiskos robežslāņus pie tās virsmām. Līdzīgi, kā elektriskajās ķēdēs ar virknes slēgumiem, kopējo siltuma vadītspējas pretestību aprēķina, summējot atsevišķu slāņu pretestības, piem., trīs dažādu homogēnu materiālu slāņiem, ievērojot papildus siltuma pretestības uz virsmām (att. 2.29b):

$$R = R_{\text{virsmas},1} + R_1 + R_2 + R_3 + R_{\text{virsmas},2} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_2}. \quad (2.24)$$



Attēls 2.29. Temperatūras sadalījums viendimensionālā stacionārā gadījumā bez iekšējiem siltuma avotiem: (a) – viendabīgā materiāla slānī, (b) – trīs slāņu dažādu materiālu konstrukcijā ar termiskiem robežslāņiem.

Stacionārā gadījumā, zinot siltuma plūsmas blīvumu un temperatūru starpību tās abās pusēs ārpus termiskajiem robežslāņiem, ir viegli aprēķināt saliktas konstrukcijas rezultējošo siltuma vadītspējas pretestību:

$$R = \sum R_i = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,2}}{q} = \frac{\Delta T}{q}. \quad (2.25)$$

Sarežģītākas konfigurācijas konstrukcijās, kuru slāņi var sastāvēt no atšķirīgu materiālu daļām (attēls 2.30), siltuma plūsma vairs nav viendimensionālā un apskatīto pieeju vairs nav iespējams izmantot. Speciālā metode, kas ļauj tuvināti noteikt šādu saliktu objektu rezultējošo siltuma pretestību, ir definēta standartā (LVS EN ISO 6946, 2003) un tās lietojumi detalizēti apraksti metodiskajos norādījumos (Belindževa-Korkla, 2002). Heterogēnu konstrukciju rezultējošās siltuma pretestības R aprēķinu pamatā ir t.s. lielākās un mazākās siltuma zudumu pretestības (R'_T un R''_T attiecīgi) aprēķins (skat. arī attēlu 2.30):

$$R = \frac{R''_T + R'_T}{2}, \quad (2.26)$$

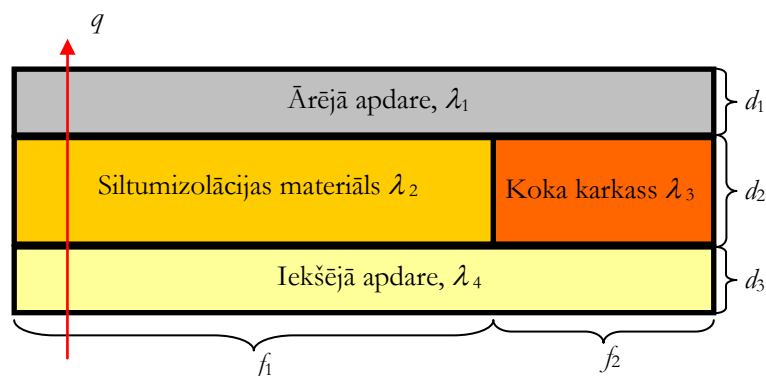
$$R''_T = \sum_{i=1}^n R_i = R_{SI} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{SE}, \quad (2.27)$$

$$R'_T = \frac{1}{\sum_{j=1}^m \frac{f_j}{R_j}} = \frac{1}{\frac{f_1}{R_1} + \frac{f_2}{R_2} + \dots + \frac{f_n}{R_n}}, \quad (2.28)$$

kur f_i ir laukumu relatīvās daļas. Materiālu siltuma pretestības R_i un R_j tiek aprēķinātas saskaņā ar formulām:

$$R_j = \sum_{i=1}^n R_i = R_{SI} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{SE}, \quad (2.29)$$

$$R_i = \frac{1}{\sum_{j=1}^m \frac{f_j}{R_j}} = \frac{1}{\frac{f_1}{R_1} + \frac{f_2}{R_2} + \dots + \frac{f_n}{R_n}}. \quad (2.30)$$



Attēls 2.30. Heterogēnās konstrukcijas piemērs.

Papildus labojumi siltuma pretestības aprēķinam ir nepieciešami, ja norobežojošo konstrukciju risinājumos tiek lietoti mehāniskie stiprinājumi vai ir gaisa starpslāņi un spraugas konstrukcijā. Ar to aprēķinu metodēm var iepazīties standartā (LVS EN ISO 6946, 2003) un metodiskajos norādījumos (Belindževa-Korkla, 2002). Nehomogēno konstrukciju aprēķinu metodes ar stiprinājumu un gaisa starpslāņu labojumiem tiek realizētas arī kā atsevišķs modulis visas ēkas siltuma bilances aprēķina programmā HeatMod (PAIC, 2006).

Būvkonstrukciju aprēķinos liela nozīme ir termiskajiem robežslāņiem, kas raksturo siltuma atdevi no virsmām (2.22) un galvenokārt ir atkarīgi no gaisa kustības intensitātes gar virsmu. Ir iespējams noteikt šo robežslāņu termiskās pretestības eksperimentāli, vai arī izmantot to standartizētās vērtības. Dažādu valstu normatīvos var atrast nedaudz atšķirīgas siltuma pretestības skaitliskās vērtības, tāpēc turpmāk, ja nav norādīts citādi, izmantosim (LVS EN ISO 6946, 2003) definētās vērtības, kas atkarībā no virsmas un siltuma plūsmas virziena ir apkopotas tabulā 2.3. Ēkas elementu, kas atrodas saskarē nevis ar gaisu, bet ar zemi (grīdas uz grunts, grīdas virs neapkurinātas zemgrīdas telpas, apkurināmie un neapkurināmie pagrabi), siltuma pretestības aprēķinus veic saskaņā ar standartu (LVS EN ISO 13370, 2006), kura lietojumu dažādu piemēru aprēķinos var atrast metodiskajos norādījumos (Belindževa-Korkla, 2002). Dažādu tipu norobežojošo konstrukciju rezultējošās siltuma caurlaidības aprēķins ir realizēts ērtā grafiskajā vidē programmatūrā (BuildDesk, 2006).

Tabula 2.3. Norobežojošo konstrukciju virsmu termiskā pretestība R , $\text{m}^2 \text{K W}^{-1}$.

Virsmas	Siltuma plūsmas virziens		
	uz augšu	horizontāls*	uz leju
Iekšējā	0,10	0,13	0,17
Ārējā	0,04	0,04	0,04

* siltuma plūsmas virziens tiek uzskatīts par horizontālu, ja tas atrodas $\pm 30^\circ$ no horizontālās virsmas

Praksē siltumtehnikajos aprēķinos bieži tiek lietots siltuma pretestības apgrieztais lielums – siltuma caurlaidības koeficients U ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$) (vecajā literatūrā sastopams arī apzīmējums k):

$$U = \frac{1}{R} = \frac{1}{\sum R_i}, \quad (2.31)$$

kas cietā, necaurspīdīgā materiālā raksturo vadīšanas siltuma pārnesei vielā ar siltuma vadītspēju λ un biezumu d :

$$U = \frac{\lambda}{d}. \quad (2.32)$$

Sienai, kas sastāv no trīs dažādu homogēnu materiālu slāņiem, ievērojot termiskos robežslāņus (attēls 2.29b), sakarību (2.24) var pārrakstīt sekojoši:

$$U = \frac{1}{R} = \frac{1}{R_{virsmā,1} + R_1 + R_2 + R_3 + R_{virsmā,2}} = \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^{-1} \quad (2.33)$$

Porainiem materiāliem ar gāzes vai šķidrums ieslēgumiem, materiāliem ar gāzes starpslāņiem, kā arī daļēji vai pilnīgi caurspīdīgiem materiāliem bieži lieto t.s. efektīvās siltuma vadītspējas jēdzienu un vērtību λ_{ef} , jo siltuma apmaiņu tajos nosaka ne tikai molekulārā siltuma vadīšana, bet arī to sastāvā esošo šķidrums konvekcija un siltuma starojums. Līdz ar to šī efektīvā siltuma vadītspēja var būt ļoti stipri atkarīga no siltuma apmaiņas apstākļiem, it īpaši temperatūras. Zinot materiāla slāņa biezumu un siltuma caurlaidību, šo efektīvo siltuma vadītspēju var aprēķināt:

$$\lambda_{ef} = d \frac{q}{T_1 - T_2} = \frac{d}{R} = d \cdot U, \quad (2.34)$$

kur T_1 un T_2 ir temperatūras uz materiāla pretējām virsmām.

Ja kādā materiāla slānī (piem., gaisa spraugā) vienlaicīgi darbojas dažādi siltuma apmaiņas mehānismi (vadīšana, konvekcija un starojums), tad šī slāņa rezultējošās termiskās pretestības aprēķinam, līdzīgi kā elektrisko ķēžu aprēķinos, tuvināti var lietot paralēlā slēguma formulu:

$$U = \frac{1}{R} = \frac{1}{R_{vad}} + \frac{1}{R_{konv}} + \frac{1}{R_{star}} = U_{vad} + U_{konv} + U_{star}. \quad (2.35)$$

kur indeksi *vad*, *konv* un *star* attiecas uz vadīšanas, konvekcijas un starojuma siltuma apmaiņas procesiem attiecīgi.

Attīstītās kompleksās ēku energoefektivitātes analīzes pieejas ietvaros tika veikti daudzi desmiti eksperimentālo materiālu siltuma vadīšanu un konstrukciju siltuma caurlaidības koeficientu mērījumi gan stacionārajos laboratorijas apstākļos izveidotajās iekārtās, gan arī reālajos ekspluatācijas apstākļos jau eksistējošās ēkās. Mērījumu metodikas un to īpatnības, kā arī raksturīgākie mērījumu piemēri un to analīze apskatīti turpmākajās sadaļās.

2.2.1. Mērījumi stacionāros apstākļos ar „karstās plates” metodi

Kvantitatīvi siltuma zudumus caur ēkas norobežojošajām konstrukcijām raksturo ar siltuma caurlaidības koeficientu U ($W \ m^{-2} \ K^{-1}$), kas var tikt aprēķināts analītiski vai arī noteikts eksperimentālā ceļā. Gadījumā, ja konstrukcijas materiāls vai tās uzbūve nav zināma, ir nepieciešami eksperimentālie mērījumi, kas var tikt veikti reālajos ēkas ekspluatācijas vai arī laboratorijas apstākļos. Kā speciālu gadījumu izdala homogēnus materiālus, kuriem ir iespējams izmantot principiāli citu siltuma caurlaidības noteikšanas metodi (2.32), zinot materiāla biezumu un nosakot tā siltuma

vadītspēju stacionārā režīmā specializētajās iekārtās. Abas metodes tiek detalizēti apskatītas un plaši lietotas kompleksās analīzes pieejas ietvaros. Sākumā apskatīsim vienkāršāku un precīzāku metodi – homogēnu materiālu siltuma vadītspējas noteikšanu.

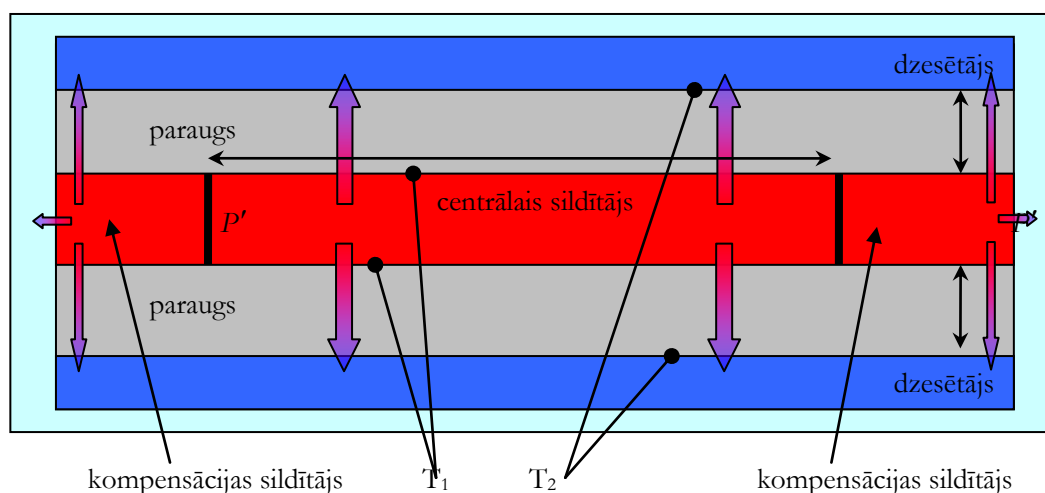
Metodes materiālu siltuma vadītspējas (siltuma vadīšanas koeficienta) noteikšanai ir daudzveidīgas un atšķiras gan pēc tieši mērāmajiem fizikālajiem lielumiem, gan pēc izmantotajām iekārtām un pielietojumu jomas. Viena no mūsdienās izplatītākajām pieejām, kas nodrošina augstu precizitāti, ir balstīta uz viendimensionālas siltuma plūsmas caur homogēnu materiālu ar noteiktu biezumu un virsmas laukumu nodrošināšanu, jaudas un temperatūru reģistrēšanu stacionārā režīmā speciālajā t.s. „karstās plates” iekārtā (angļu literatūrā – *guarded hot plate*) ar atbilstošu metodi.

Šī metode ir iekļauta daudzu valstu nacionālajos un starptautiskajos standartos (LVS ISO 8302, 2001; DIN EN 674, 1999; ASTM C 518, 2004) un tiek plaši pielietota materiālu ar siltuma pretestību $R \geq 0,1 \text{ m}^2 \text{ K W}^{-1}$ siltuma vadītspējas noteikšanai, kā arī lielai daļai siltuma izolācijas materiāliem. Izmantojot minēto metodi un atbilstošu eksperimentālo iekārtu, mērījumu kļūdu teorētiski ir iespējams samazināt līdz 2%, kas ir svarīgi materiālu ar mazu siltuma vadītspēju mērījumos. Tāpat minētajos standartos ir aprakstītas arī nosakāmā siltuma vadīšanas koeficienta atkarība no references temperatūras, temperatūru starpības un mitruma, kas uzliek zināmus nosacījumus eksperimentu norisei, un telpām, kur notiek mērījumi. Tā, minimālās, maksimālās un vidējās (references) temperatūras, pie kurām tiek rekomendēts veikt eksperimentus, ir iespējams izvēlēties saskaņā ar standartu (ASTM C 1058, 2003), bet rekomendācijas eksperimentālās iekārtas projektēšanai un izveidei, piem., dzesēšanas bloka konstrukcijai, ir minētas standartos (ASTM C 518, 2004; LVS ISO 8302, 2001).

„Karstās plates” tipa rūpnieciski izgatavotās iekārtas (piem., Holometrix, Hukselux) plaši tiek izmantotas arī dažādiem zinātniskiem eksperimentiem. Bieži tiek pētītas kāda materiāla siltuma vadītspējas atkarība no dažādiem faktoriem. Eksperimentāli tiek konstatēta temperatūru starpības, references temperatūras un mitruma ietekme uz rezultējošo siltuma vadīšanas koeficientu, kas atsevišķos gadījumos var palielināties līdz pat 150% no standartlieluma, tāpat tiek noteiktas arī citu siltumfizikālo lielumu atkarības, piem., eksperimentāli ir konstatēts, ka materiāla blīvumam palielinoties, samazinās siltuma vadītspējas atkarība no temperatūras (Abdou, Budaiwi, 2005). VIPMM laboratorijā šī darba ietvaros tika izgatavota, aprobēta un uzlabota oriģinālā „karstās plates” mēriekārta un atbilstošais programmnodrošinājums, ar kuru palīdzību ir iespējams eksperimentāli noteikt materiālu siltuma vadītspēju saskaņā ar standartizēto metodi, kā arī veikt citu veidu siltumfizikālos mērījumus, kas tiks apskatīti turpmākajās sadaļās.

2.2.1.1. Metodes apraksts

„Karstās plates” metodē materiāla siltuma vadītspējas λ noteikšanai tiek reģistrēts siltuma daudzums, kas izplūst no elektriski sildītas centrālās plates caur simetriski tās abās pusēs novietoto pētāmā materiāla paraugu plāksnēm ar noteiktu biezumu un virsmas laukumu fiksētā laika periodā. Šis siltums tiek aizvadīts no plākšņu pretējām virsmām, kuras tiek dzesētas (attēls 2.31). Tāpat tiek reģistrētas arī paraugu abu virsmu temperatūras, šim nolūkam izmantojot 5 termopārus katrai no virsmām, dati no kuriem tiek vidējoti.



Attēls 2.31. „Karstās plates” iekārtas šķērsgriezuma shēma ar raksturīgo parametru norādēm.

Augstas mērījumu precizitātes sasniegšanai temperatūrām uz parauga virsmām jābūt nemainīgām laikā. Lai risinātu viendimensionālu siltuma pārneses uzdevumu, jānodrošina siltuma plūsmas perpendikularitāte pret paraugu virsmām un jānovērš siltuma zudumi caur paraugu malām. Šim nolūkam izmanto kompensācijas sildītāju, kurš pa perimetru iekļauj centrālā sildītāja plāksni un nodrošina temperatūru, kas ir vienāda ar centrālās daļas temperatūru. Šos nosacījumus mērījumu praksē var nodrošināt tikai tuvināti, tādēļ aprēķinu veikšanai izmērīto temperatūru vērtības tiek vidējas gan pa laika periodu, gan arī pa materiāla paraugu virsmām. Mērījuma norisi var sadalīt divos etapos (attēls 2.32):

- Sagatavošanas fāze. Sākumā, izmantojot jaudas regulēšanu ar atgriezeniskās saites shēmu, sasniedz uzdoto temperatūru līmeni un panāk, lai novirzes no mērījumā nepieciešamajām virsmu temperatūras vērtībām nepārsniegtu uzdotus lielumus (parasti $\pm 0,1$ °C);
- Mērījumu fāze. Pēc kvazistacionāra stāvokļa sasniegšanas pietiekami ilgā laika periodā (parasti vairāk nekā 10 stundas) tiek uzskaitīts elektroenerģijas patēriņš centrālajā sildītājā.

Materiāla paraugu termisko pretestību R šādā kvazistacionārā stāvoklī nosaka, sakarībā (2.21) siltuma plūsmas blīvumu izsakot caur siltuma daudzumu, laukumu un laiku, kā arī ievērojot, ka siltuma pārnese notiek uz divām pusēm (attēls 2.31):

$$R = 2S \frac{(\bar{T}_1 - \bar{T}_2)t}{N}, \quad (2.36)$$

kur \bar{T}_1 un \bar{T}_2 – paraugu vidējotās sildīto un dzesēto virsmu temperatūras ($^{\circ}\text{C}$), N – kopējais centrālajam sildītājam pievadītais siltuma daudzums (J), S – sildplates virsmas laukums (m^2) un t – mērījumu ilgums (s). Ja paraugu materiāls ir viendabīgs, tad no (2.32) siltuma vadīšanas koeficientam λ seko:

$$\lambda = \frac{Nd}{2S(\bar{T}_1 - \bar{T}_2)t}, \quad (2.37)$$

kur d – paraugu biezums (m). Formulās (2.36 un 2.37) izmantotās vidējās temperatūras tiek iegūtas sekojošā veidā: vispirms vidējo katra atsevišķa temperatūras sensora mērvērtības uzdotajā laika periodā, bet pēc tam aprēķina vidējās vērtības no šādi noteiktajām temperatūrām katrai parauga virsmai, t.i., divām siltajām un divām aukstajām virsmām. Pēc tam tiek aprēķinātas attiecīgi silto un auksto virsmu vidējās temperatūras.

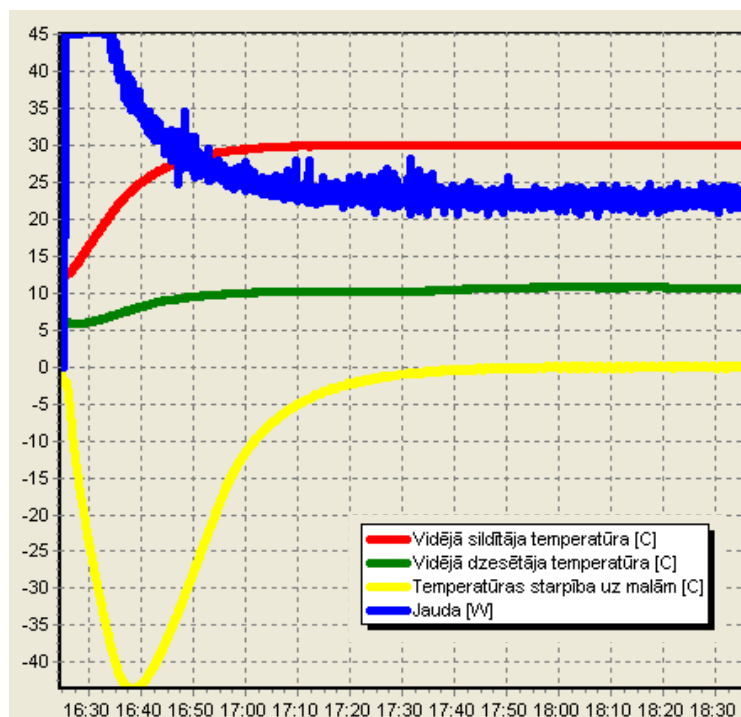
Šīs metodes priekšrocība ir iekārtas kompakts un iespēja strādāt ar relatīvi nelielām temperatūru starpībām, bet tajā siltuma pretestību var noteikt tikai plakanparalēliem paraugiem, kuru neviendabību (piem., poru, piemaisījumu) raksturīgie izmēri ir daudz mazāki par paraugu biezumu d .

Kā redzams attēlos 2.31 un 2.33, iekārta ir līdzīga „sendvičam” un sastāv no vairākām kārtām. Vidējā slānī ir sildplate, kurai tiek pievadīta jauda P (W):

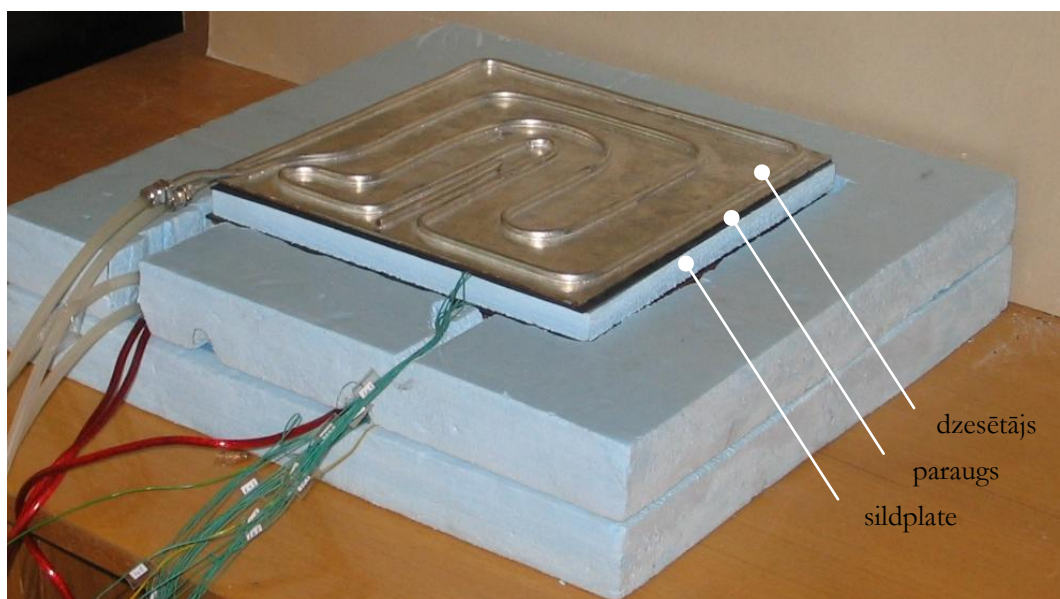
$$P = N/t. \quad (2.38)$$

Tā uztur konstantu temperatūru T_1 uz abu paraugu iekšējām virsmām. Savukārt, uz parauga ārējām virsmām stabilu temperatūru T_2 uztur dzesētājs, caur kuru izvītas dzesējošā šķidrums – ūdens caurules.

Siltuma izplatīšanos tikai vienā virzienā jeb viendimensionālu siltuma plūsmu panāk ap centrālo sildītāju izvietojot kompensācijas sildītāju, kas, pieskaņojot jaudu P' (attēls 2.31), uztur uz tam pieguļošajām paraugu virsmām tādu pašu temperatūru kā centrālais sildītājs. Līdz ar to temperatūras gradients šķērsvirzienā parauga centrālajā daļā ir 0. Parasti iekārtu no ārpusē arī izolē, lai samazinātu siltuma apmaiņu ar apkārtējo vidi, kuras temperatūra T_0 , jo kompensācijas sildītājā izdalītajai jaudai P' ir jākompensē siltuma zudumi šķērsvirzienā.



Attēls 2.32. Temperatūru un jaudas stabilizācija mērījumos ar „karstās plate” metodi.



Attēls 2.33. „Karstās plates” iekārtas mērīšanas bloka augšējā puse atsegtā veidā.

Parauga termiskās pretestības relatīvo kļūdu aprēķina pēc formulas (Zambrāns, Rezvaja, 1984)

$$K_R = \frac{\Delta R}{R} = \pm \sqrt{K_{T_1}^2 + K_{T_2}^2 + K_A^2 + K_P^2}, \quad (2.39)$$

kur saskaitāmo kvadrāti zem kvadrātsaknes tiek aprēķināti pēc sekojošām formulām:

$$K_{T_1} = \frac{2S}{P} \Delta T_1; K_{T_2} = -\frac{2S}{P} \Delta T_2; K_A = 2 \frac{T_1 - T_2}{P} \Delta S; K_P = -2S \frac{T_1 - T_2}{P^2} \Delta P, \quad (2.40)$$

kur ar ΔT_1 , ΔT_2 , ΔS un ΔP apzīmētas attiecīgi vidējās parauga siltās virsmas temperatūras precizitāte,

vidējās parauga aukstās virsmas temperatūras precizitāte, parauga virsmas laukuma precizitāte un vidējās sildītājam pievadītās jaudas precizitāte. Siltuma vadītspējas precizitāte tiek noteikta pēc formulas

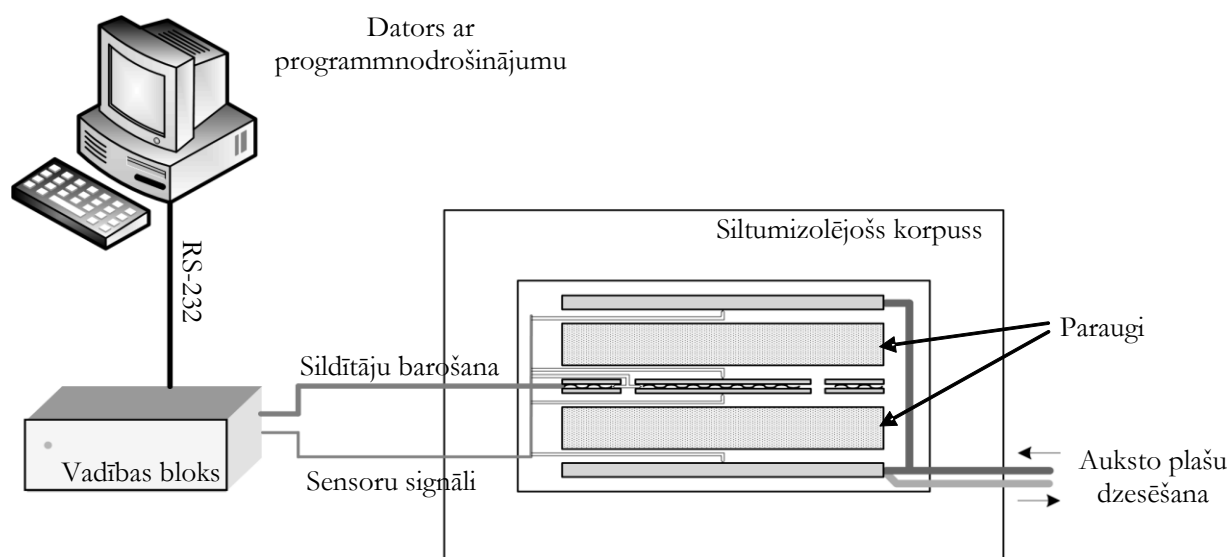
$$K_I = \pm \sqrt{K_d^2 + K_R^2}, \quad K_d = \frac{1}{R} \Delta d, \quad K_R = -\frac{1}{R^2} d \Delta R, \quad (2.41)$$

kur Δd ir kļūda, ar kuru noteiks parauga biezums, bet ΔR – no (2.39) noteiktā parauga termiskās pretestības kļūda.

Izveidotās mērsistēmas galvenās komponentes parādītas attēlā 2.34. Tā sastāv no:

- datora ar vadības un datu apstrādes programmu;
- elektroniskā vadības bloka mērsensoru signālu nolasīšanai un apstrādei, kā arī sildplātes jaudas automātiskai regulēšanai, uzturot nepieciešamo temperatūru;
- mērīšanas bloka ar „karstās plātes” iekārtu (attēls 2.33).

Mērāmie paraugi ir ievietoti starp sildītāju un dzesētāja plāksnēm (attēls 2.31), savukārt, šī konstrukcija, siltuma zudumu minimizēšanai, ir ievietota siltumizolējošā materiāla korpusā.



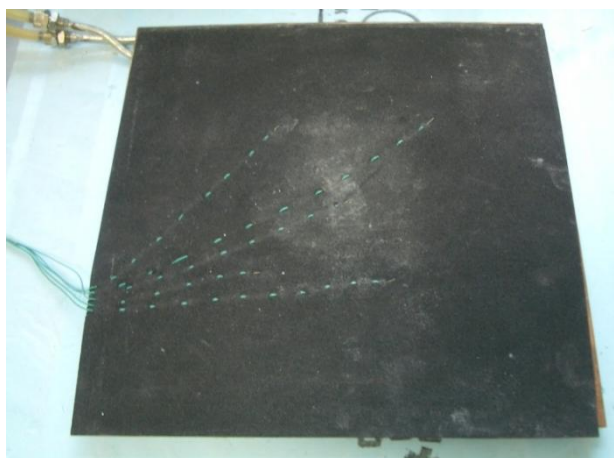
Attēls 2.34. „Karstās plātes” mērsistēmas galvenās komponentes.

Materiālu paraugu, ko ievieto „karstās plātes” iekārtā eksperimentāliem mērījumiem, izmēri ir 30×30 cm, kā arī tiem ir jābūt ar plakanparalēlām virsmām, jo biezuma nevienmērība var būtiski ietekmēt temperatūras uz to virsmas un tieši iespaidot siltuma vadītspējas aprēķina precizitāti atbilstoši formulai (2.37). Paraugu pieļaujamais maksimālais biezumu ir atkarīgs no to materiāla siltuma vadītspējas. Ja parauga siltuma vadītspēja ir liela, tad, paņemot pārāk plānus paraugus var izrādīties nepietiekama sildītāja jauda, lai nodrošinātu uzdoto temperatūru starpību, savukārt

temperatūras starpības samazinājums palielina nosakāmo lielumu kļūdu. Veicot mērījumus bieziem materiālu paraugiem ar lielu siltuma pretestību, var pieaugt siltuma plūsmas nevienādība paraugu malu zonās, kā rezultātā palielinās jaudas mērījuma un tādējādi arī gala rezultātu relatīvā kļūda.

Lai nodrošinātu mērīšanai nepieciešamo temperatūru starpību paraugi ir ievietoti starp dažādas temperatūras metāla plāksnēm (attēls 2.31). Aukstās plāksnes (dzesētāja) temperatūra tiek uzturēta ar tai piestiprināto siltummaini, t.i., sūkņējot ūdeni ar uzdotu temperatūru pa caurulītēm, kas uzlodētas dzesēšanas plāksnes ārpusē (attēls 2.33). Sildplate sastāv no centrālās daļas ar izmēru 15×15 cm, kur notiek siltuma daudzuma uzskaitīšana, un malu (kompensācijas) sildītāja, kura uzdevums ir minimizēt siltuma plūsmu šķērsvirzienā, tādējādi nodrošinot, ka viss centrālajā daļā izdalītais siltuma daudzums izplūst caur paraugu. Uz katras no paraugu virsmām ir izvietoti 5 termopāri, kas nodrošina temperatūras mērījumus dažādās parauga vietās un tiek izmantoti vidējās virsmas temperatūras noteikšanai.

Temperatūru izkliedes samazināšanai izšķiroša nozīme ir termopāru kontaktam ar parauga virsmām un termiskajam kontaktam starp virsmām – gaisa spraugas būtiski palielina siltuma pretestību. Kā redzams attēlā 2.31, termopāru vadi šķērso paraugu virsmas, tādēļ to šķērsriezums jāizvēlas pēc iespējas mazāks (veiktajos eksperimentos <0,8 mm). Viens no paņēmieniem, kā šādos apstākļos nodrošināt vienmērīgu kontaktu starp parauga un plašu virsmām ir elastīgu starpliku no porgumijas lietošana ar tajā iestrādātiem termopāru vadiem, kas ir ieteikts standartā (LVS EN ISO 8302, 2001) un realizēts eksperimentālajā iekārtā (attēls 2.35). Tas būtiski atvieglo arī praktisko eksperimenta veikšanu, jo visi termopāri kopā ar starplikām tiek vienlaicīgi uzlikti uz virsmām, nodrošinot mērījumus vienās un tajās pašās vietās. Ja temperatūru mērījumi tiek veikti uz paraugu virsmām, tad starplikas klātbūtne tieši neietekmē parauga siltuma pretestības aprēķinu, tomēr tā palielina kopējo sistēmas termisko pretestību.



Attēls 2.35. Porgumijas slānis ar iestrādātiem termopāriem un izvadītiem termoelementiem.

Karstās plātes mēriekārtas darbība tiek regulēta no vadības bloka (attēls 2.34), kas arī veic datu saņemšanu un mērījumu rezultātu nosūtīšanu uz datoru, izmantojot protokolu RS-232. Speciāli izveidotā datorprogramma Isis ļauj vadīt procesu, mainot dažādus iestādījumus, kā arī attēlot eksperimentālos datus grafiski vai tabulas veidā, saglabāt tos tālākai pēcapstrādei un veikt nepieciešamo lielumu aprēķinus. Detalizētāku informāciju par vadības bloka uzbūvi un tā darbības principiem var iepazīties publikācijā (Javaitis *et.al.*, 2005) vai maģistra darbā (Ērglis, 2005), kura autors ir izstrādājis „karstās plātes” iekārtas vadības bloku, savukārt, ar programmatūras iespējām – tās rokasgrāmatā (PAIC, 2004). Apskatīsim tikai dažas būtiskās vadības bloka un vadības datorprogrammas iespējas un atzīmēsim to svarīgākās īpatnības.

Vadības bloka galvenā sastāvdaļa ir mikrokontrolieris, kas veic termopāru multipleksēšanu, analoģu-ciparu un ciparu-analoģu pārveidotāja vadību, izmērīto datu apstrādi, sildītāja jaudas regulēšanu un nodrošina komunikācijas ar datoru. Temperatūru un citu aprēķiniem nepieciešamo lielumu mērīšanu nodrošina analoģu-ciparu pārveidotājs, saņemot signālus no sensoriem, kas iepriekš tiek pastiprināti vai pavājināti, kā arī filtrēti. Centrālajam sildītājam regulācija tiek veikta, pieskaņojot tā jaudu tā, lai vidējā temperatūra uz parauga siltajām pusēm maksimāli tuvinātos mērsistēmas vadības programmā uzdotajai temperatūrai. Patērētā jauda tiek noteikta, mērot spriegumu uz centrālā sildītāja un caur to plūstošo strāvu. Malu (kompensācijas) sildītāja regulācijai tiek izmantoti termopāru dati, pieskaņojot jaudu tā, lai temperatūru starpība uz centrālā un malu sildītāju malām tiektos uz nulli. Vienā mērījumu ciklā vadības bloks nolasa visu 24 termopāru mērījumus, centrālā sildītāja sprieguma un strāvas vērtības, mitruma vērtību un nosūta tos datoram, kā arī pārrēķina jaunas sildītājiem uzdodamās jaudas vērtības. Viens šāds mērīšanas/regulēšanas cikls ilgst aptuveni vienu sekundi.

Lai vadītu un kontrolētu „karstās plātes” iekārtas darbību un noteiktu paraugu siltuma caurlaidības pretestību, attiecīgā materiāla siltuma vadītspēju, kā arī citus mērījumus eksperimentāli nosakāmos lielumus, tiek izmantota speciālā datorprogramma, kas nodrošina komunikācijas ar vadības bloku. Ar programmas palīdzību iespējams uzstādīt sildītāja un mērījuma režīma kontroles parametrus – vidējošanas un ieraksta laika soli, mērījumu ilgumu, kā arī sildītāja temperatūru vai sildītāja jaudu ar atbilstošu amplitūdu. Atsevišķi jānorāda ekstremāli pieļaujamās sildītāja un dzesētāja temperatūras. Ja eksperimentāli noteiktās temperatūras ir ārpus norādītā diapazona, tad mērījums tiek pārtraukts un sildītājs izslēgts. Šie uzstādījumi ir būtiski darba drošības apsvērumu dēļ. Mērījuma izdarīšanas laikā tiek apkopoti temperatūru, spriegumu, jaudas, siltuma pretestības, kā arī siltuma vadītspējas dati, kas var tikt atspoguļoti reālajā laikā vai saglabāti.

2.2.1.2. Raksturīgie mērījumu piemēri

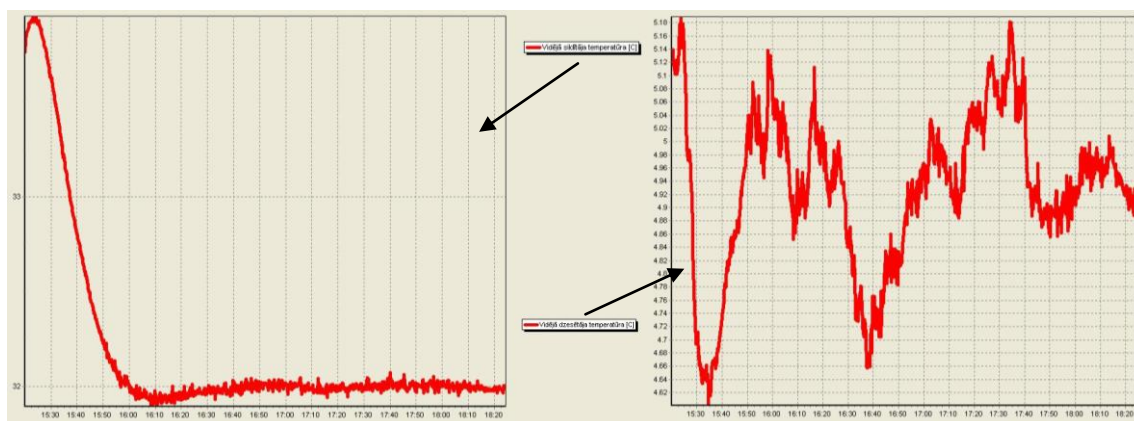
„Karstās plates” iekārtā tika veikti daudzi standartizētie būvniecībā izmantojamo materiālu siltuma pretestības R un siltuma vadīšanas koeficienta λ mērījumi, kā arī verifikācijas pētījumi, kas parādīja izveidotās iekārtas spēju nodrošināt eksperimentālo mērījumu pietiekamu precizitāti pat siltuma izolācijas materiāliem ar mazu siltuma vadītspēju. Pateicoties ērtai uzbūvei un plašām papildus iespējām, iekārta tika lietota arī dažādiem nestandarta pētījumiem, kas tiks apskatīti tālāk.

Mēriekārtas un programmatūras darbības, kā arī precizitātes pārbaudes nolūkos tika veikta eksperimentu sērija un iegūtie siltuma vadītspējas dati salīdzināti ar zināmo parauga siltuma vadīšanas koeficientu. Par paraugmateriālu tika izvēlēts būvniecībā plaši izmantojams putuplasts, kura siltumfizikālie parametri ir atrodami tā ražotāja tehniskajā specifikācijā. Siltuma vadītspēja tādiem materiāliem atkarībā no blīvuma un ražošanas tehnoloģijas ir robežās no 0,030 līdz 0,040 W m⁻¹ K⁻¹.

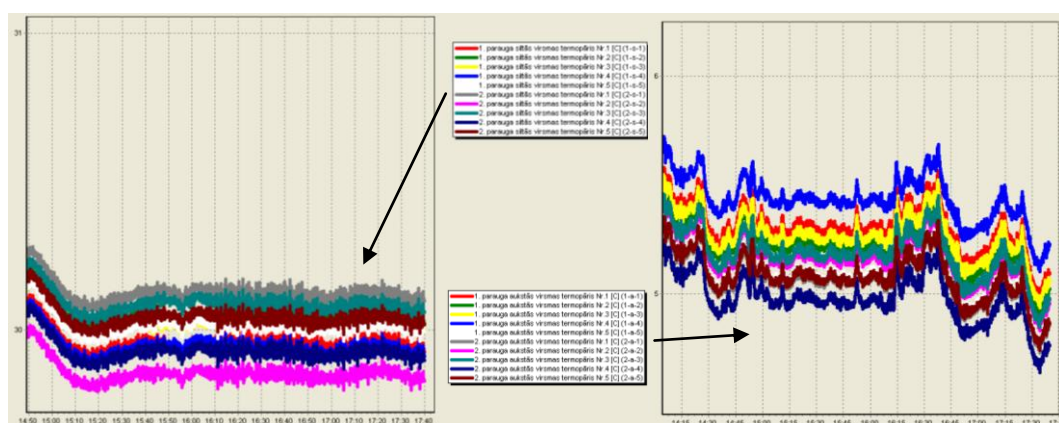
Veiktajiem verifikācijas eksperimentiem tika izmantots putuplasta Styrodur paraugs ar ražotāja definēto siltuma vadītspēju 0,030 W m⁻¹ K⁻¹. Parauga siltuma pretestība saskaņā ar formulām (2.31 un 2.32) ir $R = d/\lambda = 0,0193/0,033 = 0,58$ W m⁻¹ K⁻¹. Siltās virsmas temperatūra tika iestādīta konstanta un pievadītā jauda attiecīgi regulēta, savukārt, dzesētāja temperatūra ir atkarīga no svārstībām pilsētas ūdens apgādes tīkla, pie kā dzesēšanas iekārta ir pievienota. Abu virsmu temperatūru izmaiņas laikā ir parādītas attēlā 2.36. Kā redzams, siltās puses temperatūra pēc noteikta laika paliek kvazistacionāra un ir lietojama aprēķinu veikšanai, bet aukstajā pusē ir novērojamas neregulāras temperatūras svārstības, kas konkrētajā gadījumā nebija būtiskas ($\pm 0,4^\circ\text{C}$), bet vispārīgā gadījumā var būt arī ievērojamas atkarībā no ūdens apgādes sistēmas režīma.

Virsmu temperatūras tiek iegūtas, vidējot visu 10 termopāru rādījumus uz abām divām siltajām un attiecīgi 10 termopāru rādījumus uz divām aukstajām virsmām. Kā redzams no attēla 2.37, termopāru rādījumu izkliede ir mazāka par $0,4^\circ\text{C}$, bet sākotnējos eksperimentos, nelietojot porgumijas starpslāņus ar tajos ievītajiem termopāriem, izkliede sasniedza pat 1°C . Ar gumijas starplikas palīdzību (attēls 2.35) tika samazināta papildus gaisa spraugas siltuma pretestība, kas iepriekš veidojās starp paraugu un sildītāju vai dzesētāju virsmām.

Ir svarīgi novērtēt temperatūras gradientus, kas izraisa siltuma plūsmu (2.4) centrālā sildītāja tuvumā un pārlicināties, ka zudumi uz tā malām ir maznozīmīgi. Šim nolūkam izmanto iekārtā speciāli iestrādāto termopāru temperatūru rādījumu starpību starp centrālo un kompensācijas sildītāju, un visos eksperimentos šī starpība bija tuva nullei (piem., attēls 2.38). Ja ņem vērā, ka attēlotā starpība starp abiem sildītājiem ir summa no astoņām starpībām (katrā sildītājā ir ievietoti 8 termopāri), tad var apgalvot, ka kompensācijas sildītāja regulēšana notiek ļoti precīzi.



Attēls 2.36. Siltās un aukstās virsmas vidējās temperatūras atkarībā no laika.

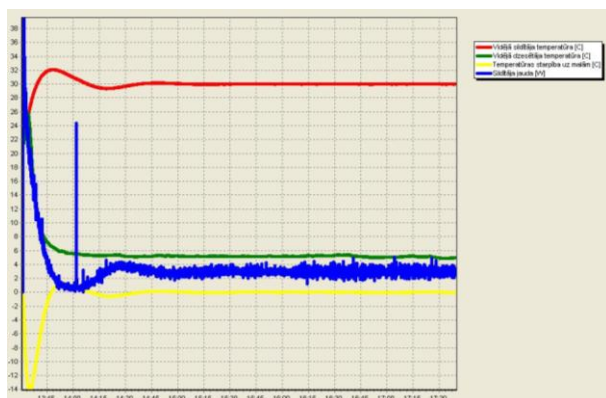


Attēls 2.37. Temperatūras rādījumu izkliede parauga siltajā un aukstajā pusē.

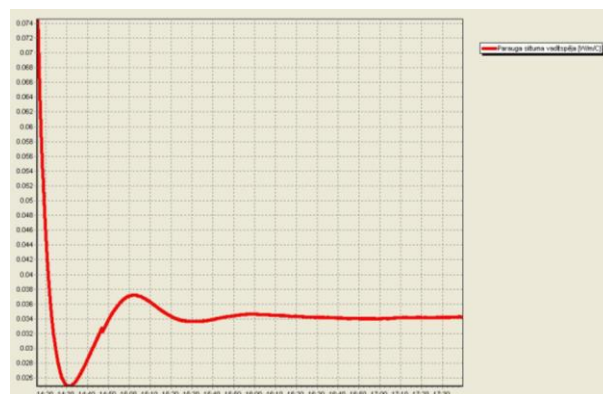
Pirmo verifikācijas un kalibrācijas mērījumu laikā tika detektētas un novērstas neprecizitātes, kas ir saistītas ar vadības bloka mikrokontroliera jaudas regulēšanas algoritmu (Strautiņš, 2005) un programmnodrošinājuma darbību. Pēc uzlabojumu veikšanas mērījumi ar putuplasta plāksnēm tika veikti dažādos temperatūras režīmos un arī dažādu biezumu paraugiem. Raksturīgs eksperimentu gaitā iegūto sildītāja jaudas, vidējo sildītāja un dzesētāja temperatūru, kā arī temperatūras starpības starp centrālo un kompensācijas sildītājiem datu piemērs (ar sildītāja iestādīto temperatūru 30 °C) parādīts attēlā 2.38. Kā redzams, jau pēc nepilnām 2 stundām process kļūst kvazistacionārs un var tikt noteikta materiāla siltuma vadītspēja (attēls 2.39), kas šajā mērījumā tika noteikta $\lambda = 0,034 \pm 0,005 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, kura kļūdas robežās sakrīt ar ražotāja sniegtajiem datiem.

Vispārīgā gadījumā materiālu siltuma vadītspēja ir atkarīga no daudziem faktoriem, t.sk. no temperatūras (attēls 2.27). Bet lielākajai daļai cietu materiālu šī atkarība nav būtiska un pie temperatūrām 18...25 °C ar „karstās plates” iekārtu to nav iespējams novērot. Līdz ar to, atkārtojot eksperimentus ar putuplasta paraugiem pie dažādām temperatūru starpībām, vidējām parauga temperatūrām, kā arī parauga biezumu, rezultātiem ir jāsakrīt kļūdas robežās. Daži eksperimenti, kas veikti atšķirīgā biezuma putuplasta Styrodur paraugam pie atšķirīgiem temperatūru iestādījumiem, ir

apkopotu tabulā 2.4. Analizējot iegūtos rezultātus, var secināt, ka eksperimentu rezultāti labi sakrīt ar ražotāja deklarēto siltuma vadīšana koeficienta vērtību un iekārta nodrošina pareizus mērījumu rezultātus ar atbilstošu precizitāti.



Attēls 2.38. Sildītāja jauda, vidējās siltās un aukstās puses temperatūras un temperatūru starpība starp centrālo un kompensācijas sildītāju malām vienā no eksperimentiem atkarībā no laika.



Attēls 2.39. Parauga siltuma vadītspējas aprēķinātā vērtība vienā no eksperimentiem atkarībā no laika.

Tabula 2.4. Mērījumu rezultāti putuplasta paraugam.

Nr	Parauga biezums d , m	Temperatūru starpība ΔT , °C	Vidējā parauga temperatūra T , °C	Parauga siltuma vadītspēja λ , $\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$	Parauga siltumpretestība R , $\text{m}^2 \text{K W}^{-1}$
1	0,0262±0,0001	30,1±0,24	19,9±0,24	0,034±0,006	0,78±0,14
2	0,0262±0,0001	35,0±0,24	22,5±0,24	0,034±0,005	0,77±0,12
3	0,0262±0,0001	40,2±0,24	25,2±0,24	0,031±0,005	0,84±0,14
4	0,0183±0,0001	22,3±0,24	21,8±0,24	0,034±0,006	0,54±0,09
5	0,0104±0,0001	23,2±0,24	23,4±0,24	0,034±0,003	0,31±0,03

Kā vēl vienu piemēru materiāla siltuma vadītspējas noteikšanai apskatīsim eksperimentu ar būvniecībā plaši izmantojamā ģipskartona plāksnēm. No materiāla „Knauf Mini” ar standarta biezumu 1.25 cm tika izgriezti četri „karstās plates” iekārtas izmēriem atbilstošie paraugi ar laukumu 0.09 m² (attēls 2.40), kas tika ievietoti pa divi katrā no dzesētāja pusēm, tādējādi kopējais biezums testējamā materiāla paraugam katrā pusē sasniedza 2.5 cm. Starp ģipskartona slāņiem tika ievietoti papildus termopāri temperatūras kontrolei, to rādījumi tika izmantoti abu slāņu siltuma caurlaidības koeficienta vērtības salīdzināšanai. Labāka termiskā kontakta nodrošināšanai un iespējamā gaisa starpslāņa novēršanai iekārtai tika uzlikts vairāku kilogramu svars (attēls 2.41).

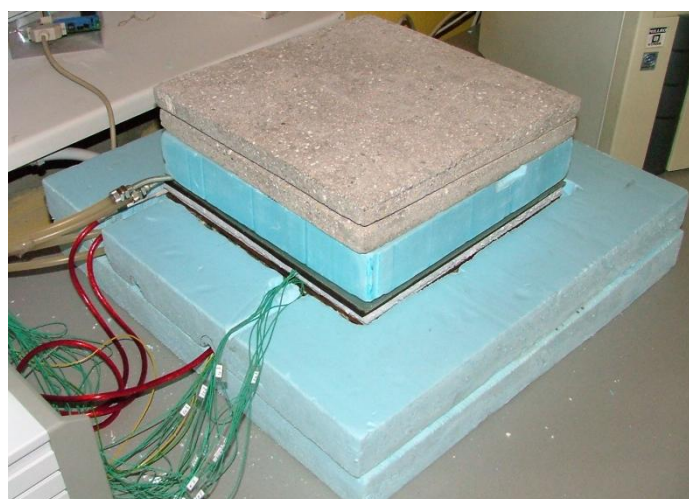
Veicot temperatūras mērījumus ne tikai uz materiāla siltās un aukstās puses, bet arī pa vidu starp diviem ģipskartona slāņiem, katra slāņa noteiktā siltuma vadītspēja nepārsniedza visam

paraugam kopumā noteikto kļūdas robežās, kas norāda uz labu termisko kontaktu starp materiāla slāņiem. Jāatzīmē, ka šajā gadījumā parauga siltuma vadītspēja ir ievērojami lielāka par putuplasta vadītspēju, kas nozīmē arī lielāku sildītājam pievadīto jaudu (2.37), to var redzēt arī no temperatūru un jaudas stacionāro mērījumu grafika (attēls 2.42). Ģipškartona parauga mērījumā tika noteikts siltuma caurlaidības koeficients $\lambda = 0,21 \pm 0,02 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, kas labi sakrīt ar ražotāja definēto vērtību $\lambda = 0,22 \dots 0,25 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Eksperimenti ar diviem materiāla slāņiem citos aspektos tiks apskatīti arī nākamajā sadaļā.

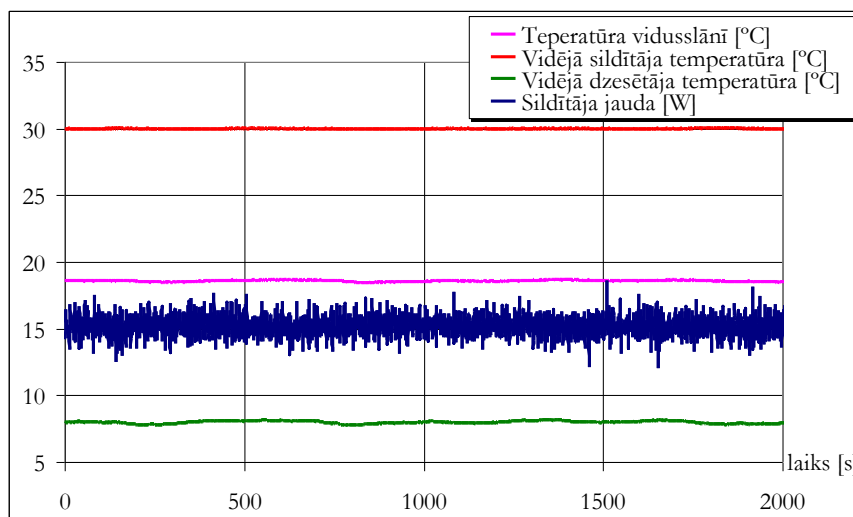
Iekārta tika izmantota, lai noteiktu arī citu siltuma izolācijas materiālu (piem., inovatīvs ar silīcija aerogēlu piesūcināts vatelīna materiāls vai presētas kaņepju plāksnes) un dažādu celtniecības materiālu (piem., keramikas plāksnes) siltuma vadītspēju.



Attēls 2.40. „Karstās plates” iekārtā ievietoti ģipškartona paraugi.



Attēls 2.41. Papildus svars nodrošina labāku termisko kontaktu starp materiāla slāņiem.



Attēls 2.42. Sildītāja jaudas un temperatūru mērījumi stacionārā režīmā divslāņu paraugam.

Regulējot „karstās plates” iekārtas sildītāju tādā veidā, lai uzturētu konstantu temperatūru parauga siltajā pusē, tiek nodrošināts kvazistacionārs siltuma pārnese process, analītiskajos aprēķinos tiek izmantots atbilstošs matemātisks modelis, tomēr tas nav vienīgais veids, kā pielietot izveidoto iekārtu. Nākamajā sadaļā apskatīsim principiālu citu pieeju nestacionāra procesa gadījumā, kas tiek lietota materiālu citu siltumfizikālo īpašību pētījumiem.

2.2.1.3. „Karstās plates” iekārtas izmantošana materiāla siltuma ietilpības noteikšanai

Kaut arī „karstās plates” iekārta ir veidota saskaņā ar standartu (LVS ISO 8302, 2001) un tā pamatā ir paredzēta attiecīgo standartizēto mērījumu veikšanai, tās daudzfunkcionālā uzbūve un programmējams vadības bloka kontrolieris ļauj izmantot iekārtu arī citiem pētnieciskiem mērķiem, t.sk. arī nestacionāra siltuma vadīšanas procesa realizācijai.

Pilnīgākai materiāla siltumfizikālo īpašību raksturošanai nestacionāros apstākļos ir nepieciešams zināt arī tā temperatūras vadītspēju $a = \lambda/c\rho$ (2.8), ko var noteikt, izmantojot harmoniskās (sinusoidālās) temperatūras svārstības uz viena no parauga virsmām, kā nodrošināšanai kalpo periodisks sildīšanas režīms. Šāda režīma uzturēšanai tika modernizēts un uzlabots iekārtas vadības bloks un programmnodrošinājums.

Ņemot vērā „karstās plates” iekārtas uzbūves īpatnības, varam pieņemt, ka siltuma pārnese process ir viendimensionāls un nestacionārā gadījumā bez iekšējiem siltuma avotiem var tikt aprakstīts ar Furjē vienādojumu (2.9). Materiāla parametrus uzskatīsim par konstantiem. Gadījumā, ja sildītāja jauda laikā mainās sinusoidāli, tad atrisinājumu var meklēt kompleksā formā

$T = T_C(x) + T(x)e^{i\omega t}$, kur $i = \sqrt{-1}$ un ω ir cikliskā frekvence. Tad no siltuma vadīšanas vienādojuma iegūstam:

$$\left(i\omega T - a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) e^{i\omega t} = a \frac{\partial^2 T_C}{\partial x^2}, \quad (2.42)$$

ko var sadalīt divos neatkarīgos vienādojumos:

$$i\omega T - a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0 \quad \text{un} \quad \frac{\partial^2 T_C}{\partial x^2} = 0. \quad (2.43)$$

Pirmais vienādojums satur tikai temperatūras svārstību amplitūdu un fāzi, bet otrais apraksta stacionāru siltuma vadīšanu. Tādējādi sinusoidāls iekārtas darbības režīms var tikt izmantots materiāla temperatūras vadītspējas noteikšanai.

Ievēdot apzīmējumu: $\tilde{a}^2 = i\omega / a$, siltuma vadīšanas vienādojumu pārrakstām sekojoši:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \tilde{a}^2 T = 0, \quad (2.44)$$

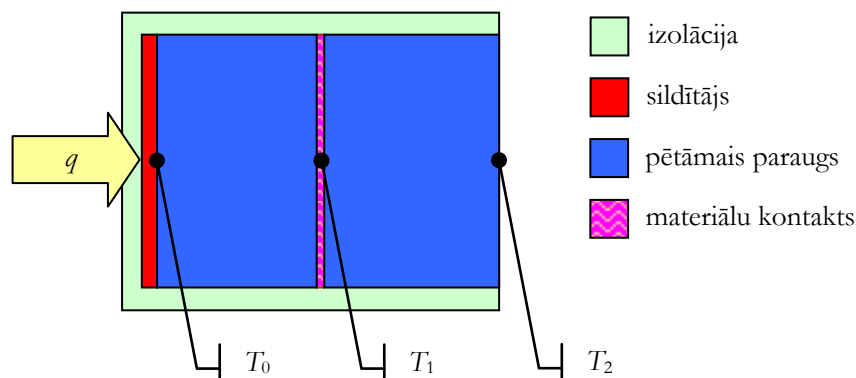
tā atrisinājums ir funkcija

$$T(x) = C_1 e^{\tilde{a}x} + C_2 e^{-\tilde{a}x}. \quad (2.45)$$

Viena materiāla gadījumā ir nepieciešami trīs vienādojumi nezināmo C_1, C_2, \tilde{a} atrašanai, t.i. ir nepieciešams noformulēt trīs robežnosacījumus.

Ir iespējams izmantot vairākas pieejas \tilde{a} noteikšanai, piem., pārejas procesa parametru mērījumus pēc sildītāja izslēgšanas vai mērījumus vienam materiāla slānim. Pirmajā gadījumā ir nepieciešama iekārtas pilnīgā siltuma izolācija, kas praksē ir ļoti grūti realizējama, bet otrajā – siltuma plūsmas blīvuma mērījumi. Abas metodes ir lietojamas materiālu temperatūras vadītspējas un siltumietilpības noteikšanai un to matemātiskais aparāts, kā arī precizitātes novērtējumi ir detalizēti apskatīti publikācijā (Tīmušins *et.al.*, 2006).

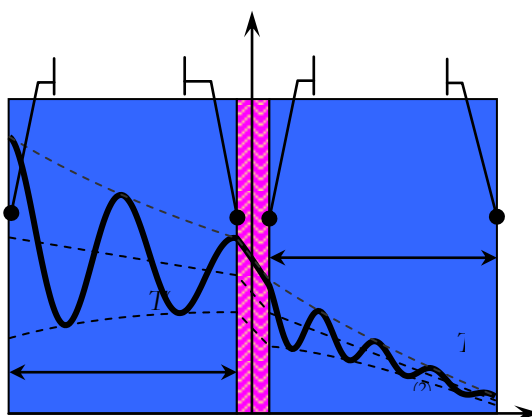
Vēl viena no iespējamām „karstās plātes” iekārtas konfigurācijām parametra \tilde{a} noteikšanai ir shematiski parādīta attēlā 2.43. Tā sastāv no diviem pētāmā materiāla slāņiem, kas ievietoti starp sildītāju un dzesētāju, uz paraugu virsmām un starp tiem periodiskā procesā tiek mērītas temperatūras T_0, T_1 un T_2 . Šī metode tika izvēlēta eksperimentu sēriju veikšanai, jo ļauj noteikt materiāla temperatūras vadītspēju tikai uz viena parametra – temperatūras mērījumu datu bāzes.



Attēls 2.43. Shēma materiālu temperatūras vadītspējas noteikšanai, izmantojot divus paraugus.

Aprakstot eksperimentu ar diviem vienādiem materiāla slāņiem (attēls 2.43), temperatūru sildītājam tuvākā paraugā apzīmēsim ar $T^{(1)}(x)$, bet nākamajā, pie dzesētāja novietotajā materiālā, ar $T^{(2)}(x)$ - skat. attēlu 2.44. Pie nosacījumiem, ka koordinātu sistēmas sākums ir izvēlēts starp materiālu slāņiem, uz robežām temperatūras ir zināmas un temperatūras sadalījums tiek meklētas šādā izskatā: $T^{(1)}(x) = C_1 e^{\tilde{a}_1 x} + C_2 e^{-\tilde{a}_1 x}$, $T^{(2)}(x) = C_3 e^{\tilde{a}_2 x} + C_4 e^{-\tilde{a}_2 x}$, periodiskais process var tikt aprakstīts ar šādu vienādojumu sistēmu:

$$\begin{cases} T^{(1)}(-d_1) = T_0, & T^{(2)}(d_2) = T_3 \\ \lambda_1 \frac{\partial T^{(1)}}{\partial x} \Big|_{x=0} = \lambda_2 \frac{\partial T^{(2)}}{\partial x} \Big|_{x=0}, & R \lambda_1 \frac{\partial T^{(1)}}{\partial x} \Big|_{x=0} = T^{(1)}(0) - T^{(2)}(0) \end{cases} \quad (2.46)$$



Attēls 2.44. Temperatūras sadalījuma divos paraugos ar gaisa starpslāni shematiskais attēlojums.

Šajos eksperimentos ir svarīga nezināmā termiskā kontakta, ko izraisa gaisa starpslānis starp negludām virsmām, noteikšana. Novērtējumi parāda, ka kontakta pretestība starp betona virsmām ir $R \approx 0.04 \text{ m}^2 \text{ K W}^{-1}$ un tās ietekme uz periodisku režīmu ir nenozīmīga pie sekojošās kontakta materiāla izvēles $\rho_g c_g < \rho_m c_m$; $\lambda_g > \lambda_m$, kur indekss g norāda uz gaisu, bet m – uz pētāmo

materiālu. Literatūrā (Lienhardt, Lienhardt, 2003) tiek minēta vēl mazāka kontakta pretestība starp keramiskām virsmām atkarībā no to raupjuma: $R = 3 \cdot 10^{-4} \dots 2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ K W}^{-1}$, kas praktiski neietekmē temperatūras lēcienus.

Neievērojot kontaktpretestību un pieņemot, ka vidējā temperatūra starpslānī ir vienāda ar eksperimentāli noteikto T_2 : $T^{(1)}(0) + T^{(2)}(0) = 2T_2$, iegūstam vienādojumu \tilde{a}_2 noteikšanai:

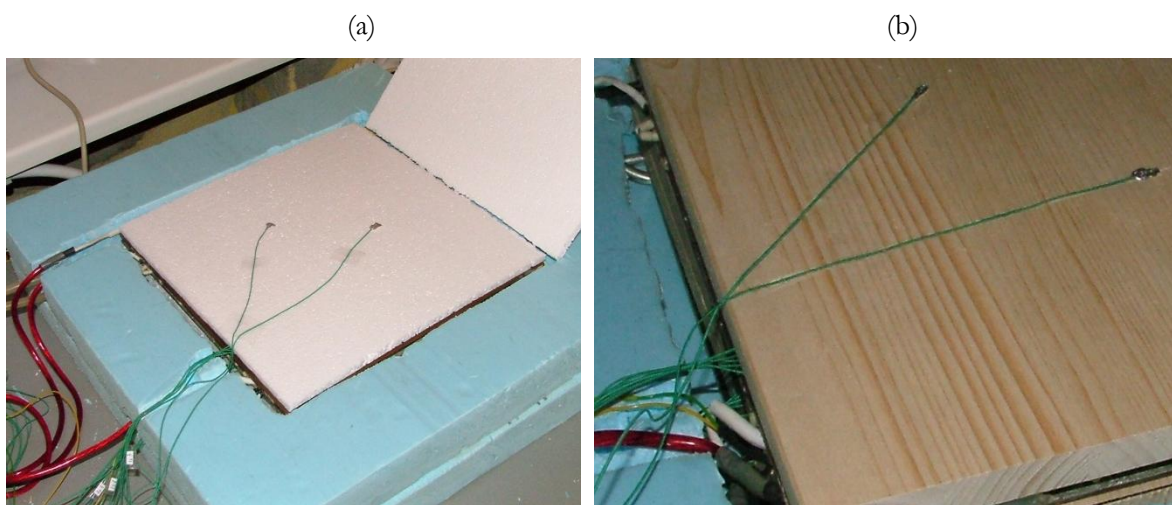
$$Q_1 = -\frac{\lambda_2 \tilde{a}_2 (T_3 - T_2 \cosh(\tilde{a}_2 d_2))}{\sinh(\tilde{a}_2 d_2)}, \quad (2.47)$$

kur siltuma plūsma starp slāņiem ir $Q_1 = -\lambda_1 \tilde{a}_1 (T_2 \cosh(\tilde{a}_1 d_1) - T_0) / \sinh(\tilde{a}_1 d_1)$. Vienādu materiālu gadījumā $\tilde{a}_1 d_1 = \tilde{a}_2 d_2 = \tilde{a} d$ un vienādojums (2.47) būtiski vienkāršojas:

$$2T_2 \cosh(\tilde{a} d) = T_0 + T_3.$$

(2.48) Kā redzams, parametra \tilde{a} noteikšanai ir nepieciešami tikai temperatūru mērījumi uz materiālu robežām un starpslānī. Apskatītās pieejas matemātiskā modeļa detalizētāks apraksts, jutīgums pret dažādiem parametriem un precizitāte, kā arī lietojumi eksperimentāliem pētījumiem ir apskatīti darbā (Tīmušins *et al.*, 2006).

Praksē labu termisko kontaktu nodrošināt un samazināt kontaktpretestību divu paraugu kontaktzonā ir iespējams, izvēloties materiālus ar iespējami gludākām virsmām un pieliekot mehānisku slodzi perpendikulāri slāņu virsmām (attēls 2.41). Mīksto materiālu, piem., putuplasta, gadījumā termopāri, kas paredzēti mērījumiem starp diviem paraugiem, un to vadi var tikt ievietoti bez papildus apstrādes, tos iespiežot (attēls 2.45a). Savukārt, temperatūras mērījumiem starp diviem cietāka materiāla paraugiem jāizveido kanāli vienā no slāņiem, kur tiek ievietoti termopāru vadi, tādējādi izslēdzot gaisa spraugas rašanās iespēju (attēls 2.45b).



Attēls 2.45. Termopāru un to vadu ievietošana starp diviem materiāla slāņiem uz putuplasta virsmas (a) un izgrieztajos kanālos koka plāksnē (b).

Cits svarīgs nosacījums mērījumiem ar diviem paraugu slāņiem periodiskās sildītāja darbināšanas režīmā ir pareizi novērtēt un izvēlēties to biežumus atkarībā no materiāla siltuma vadītspējas, lai nodrošinātu periodiska signāla pietiekamu svārstību amplitūdu paraugu aukstajā pusē. Attēlā 2.46 parādīti 4 dažādu materiālu paraugu mērījumi ar atšķirīgiem biežumiem un λ vērtībām.

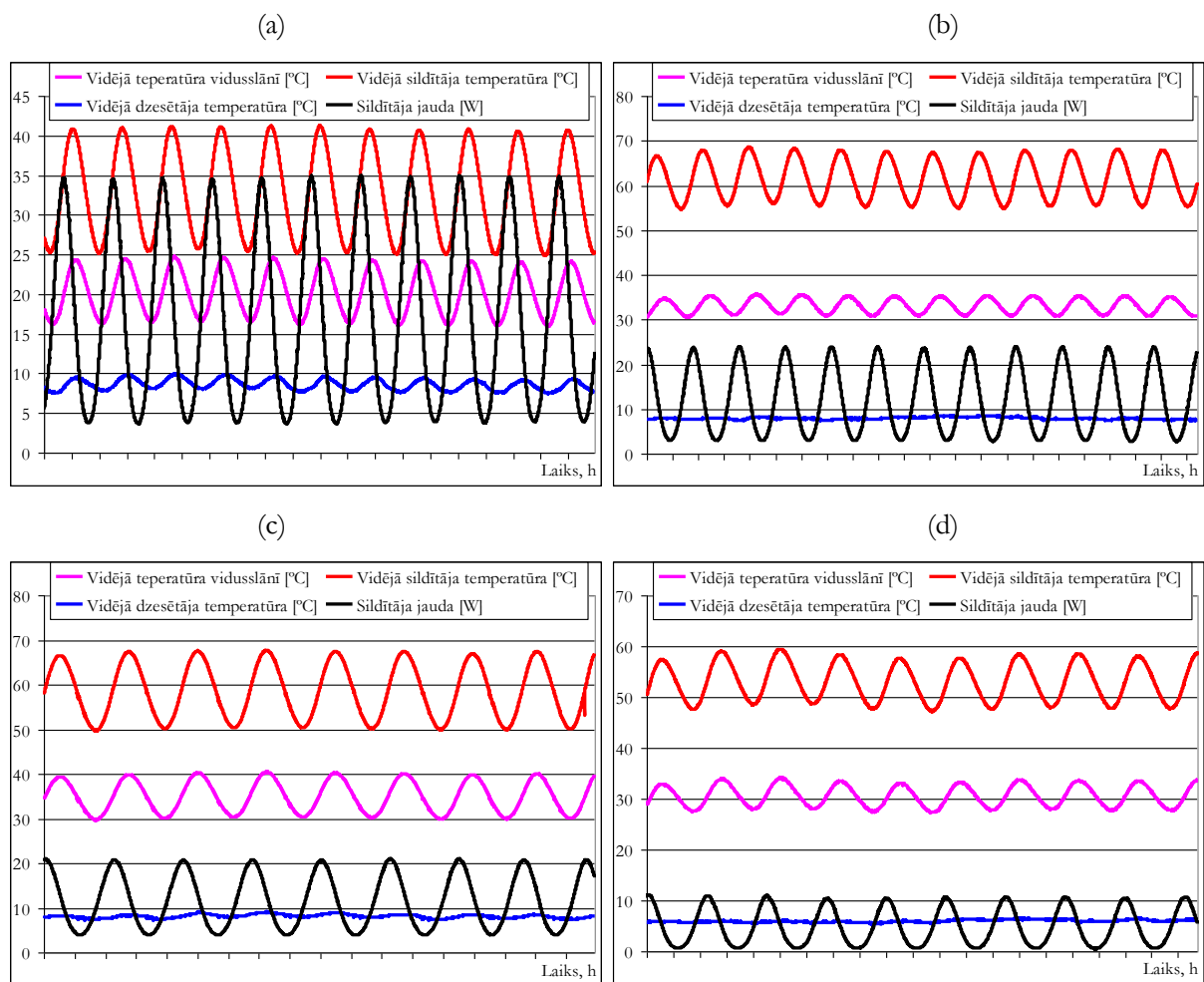
Kā redzams, vislielākās temperatūras svārstības ar amplitūdu 1,2 °C uz aukstās virsmas ir reģistrētas ģipškartona plāksnēm ar kopējo biežumu 25 mm (attēls 2.46a), kam ir lielāka siltuma vadītspēja – 0,22 W m⁻¹ K⁻¹ un pie sildītāja vidējās jaudas 17 W pateicoties lielai siltuma plūsmai caur materiālu maksimālā siltās virsmas temperatūra pieaug tikai līdz ~40 °C.

Savukārt, egles koka paraugam (attēls 2.46b) ar kopējo biežumu 34 mm un ievērojami mazāku siltuma vadītspēju 0,1 W m⁻¹ K⁻¹ pie sildītāja vidējās jaudas tikai 12 W reģistrēta maksimālā temperatūra uz siltās virsmas sasniedz 68 °C ar svārstību amplitūdu 7 °C, bet jau starpslānī temperatūra nokrīt līdz 33 °C un tās svārstību amplitūda samazinās līdz 2,5 °C. Uz aukstās virsmas koka paraugam periodiskas temperatūras izmaiņas nav novērojamas un ir atkarīgas tikai no ūdens apgādes sistēmas īpatnībām, tāpēc mērījumu veikšanai ir nepieciešams mazāks materiāla biežums, tajā pat laikā nevar tikt palielināta sildītāja jauda, jo būtiski paaugstināsies parauga temperatūra.

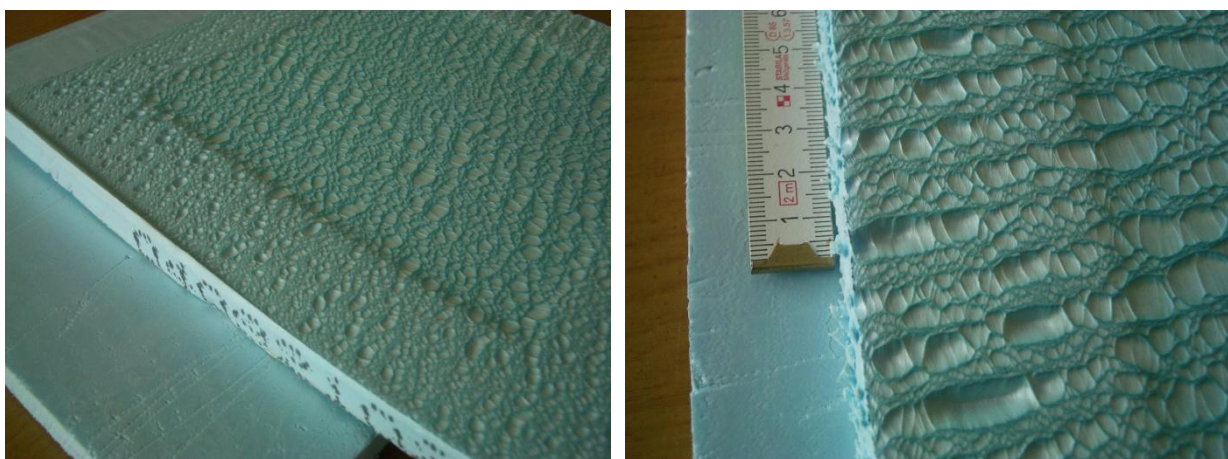
14 mm bieza putuplasta parauga mērījumos (attēls 2.46c) periodiskais signāls tika reģistrēts aukstajā pusē, bet tas ir nepietiekams precīzu aprēķinu veikšanai – amplitūda kopā ar ūdens sistēmas radītiem trokšņiem nepārsniedza 1 °C. Jāatzīmē, ka, neskatoties uz visai nelielu materiāla biežumu, pateicoties mazai siltuma vadītspējai 0,04 W m⁻¹ K⁻¹ maksimālā temperatūra uz siltās virsmas sasniedza 68 °C, bet sildītāja jauda – 20 W.

Attēlā 2.46d parādīti 40 mm bieza putu polistīrola ar siltuma vadītspēju 0,05 W m⁻¹ K⁻¹ divu slāņu parauga mērījuma dati. Ir redzams, ka siltās virsmas temperatūra sasniedz 60 °C jau pie sildītāja vidējās jaudas ap 5 W un minimālās ap 0, kas rada problēmas skaitliskajā periodiskās signāla veidošanas algoritmā „karstās plates” iekārtas vadības blokā – funkcijas izskats vairs nav sinusoidāls. Mēģinot palielināt sildītāja jaudu eksperimentos ar šiem paraugiem, strauji pieauga materiāla temperatūra un tas ir sācis kust un deformēties sildītāja tuvumā (attēls 2.47).

No apskatītajiem eksperimentālo mērījumu piemēriem var secināt, ka izolācijas materiālu gadījumā temperatūras svārstības uz parauga aukstās virsmas nav pietiekamas, bet siltās virsmas temperatūras var sasniegt materiālam kritiskās un šo periodisko temperatūru svārstību metode nevar tikt korekti izmantota. Izņēmums ir eksperimenti ar ļoti plāniem materiāla paraugiem, bet šajā gadījumā var rasties problēmas ar korektiem biežuma un temperatūras mērījumiem starp materiāliem, kā arī ar termopāru ievietošanu.



Attēls 2.46. Sildītāja jauda un temperatūras svārstības paraugu siltajā, aukstajā pusē un starpslānī dažādu materiālu gadījumā: (a) – ģipškartons 25 mm, (b) – koks 34 mm, (c) – putuplasts 14 mm, (d) – polistirols 40 mm.



Attēls 2.47. Paaugstinātās sildītāja temperatūras rezultātā izraisītās polistirola parauga deformācijas.

Eksperimenti ar diviem paraugu slāņiem tika veikti vairākiem būvniecībā izmantojamiem materiāliem un tika noteikta to īpatnējo siltuma ietilpība uz masas vai uz tilpuma vienību:

$$c = \frac{\lambda}{a \cdot \rho} \left(\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1} \right), \quad c' = \frac{\lambda}{a} \left(\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1} \right) \quad (2.49)$$

Materiāla siltuma vadītspēju λ ir iespējams noteikt standartizētos mērījumos, bet temperatūras vadītspēju a nosaka, izmantojot temperatūras mērījumus „karstās plates” iekārtā ar aprakstīto metodi, reģistrējot temperatūras svārstības uz divu materiāla slāņu virsmām un starp tiem, darbinot sildītāju periodiskā režīmā.

Mērījumu, kas tika veikti divu veidu betona paraugiem ar atšķirīgiem piemaisījumiem, parametri, kā arī eksperimentāli noteiktie un aprēķinātie lielumi ir apkopoti tabulā 2.5. Pirmā parauga (praktiski bez piemaisījumiem) ar lielāku blīvumu mērījumā ir iegūta temperatūras vadītspējas vērtība $7,1 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, kas atbilst literatūras datiem (Hohmann *et.al.*,). Otrajam paraugam (ar piemaisījumiem) ar mazāku siltumvadītspēju tika konstatēta arī mazāka temperatūras vadītspēja un divreiz lielāka uz masu normētā siltuma ietilpība. Būvniecības aspektā tas nozīmē, ka no šāda materiāla veidotas ēku norobežotās konstrukcijas spēj ilgāk saglabāt siltumu un temperatūras izmaiņas iekšstelpās vai ārā mazāk ietekmē temperatūras režīmu sienas otrā pusē.

Tabula 2.5. Parametri siltuma ietilpības noteikšanai un rezultāti diviem betona veidiem.

Parametrs	Mērvienība	1. paraugs	2. paraugs
Temperatūru svārstību periods	s	8124	8028
Nobīde starp temperatūrām uz karstās/aukstās virsmas	s	564	528
Karstās virsmas temperatūras svārstību amplitūda	°C	±4,8	±5,4
Aukstās virsmas temperatūras svārstību amplitūda	°C	±1,7	±1,9
Paraugu blīvums ρ	kg m^{-3}	2712	2340
Paraugu biezums d	m	0,0201	0,0205
Paraugu siltumvadītspēja λ	$\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$	0,72	0,67
Materiāla temperatūras vadītspēja a	$\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$	$7,1 \cdot 10^{-7}$	$3,7 \cdot 10^{-7}$
Uz tilpuma vienību normēta materiāla siltuma ietilpība c'	$\text{J m}^{-3} \text{ K}^{-1}$	$1,0 \cdot 10^6$	$1,8 \cdot 10^6$
Uz masas vienību normēta materiāla siltuma ietilpība c	$\text{J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$	374	774

Eksperimentālie mērījumi “karstās plates” iekārtā laboratorijas apstākļos ļauj pietiekami ātri un precīzi noteikt siltuma vadīšanas koeficientu dažādiem homogēniem būvniecībā izmantojamiem materiāliem ar noteiktu izmēru, taču pastāv virkne faktoru, kas ierobežo iekārtas lietojumus:

- būvkonstrukcijām ar heterogēnu uzbūvi nevar tikt nodrošināta viendimensionāla siltuma plūsma un apskatītā metode nav lietojama (piem., ķieģeļi ar makroskopiskiem dobumiem);

- daži gatavi konstrukciju paraugi un mezgli savu izmēru dēļ fiziski nevar tikt ievietoti eksperimentālajā iekārtā (piem., paneļi un bloki);
- nekontrolējamā dzesēšanas sistēma nedod iespēju regulēt temperatūras līmeni.

Minētie trūkumi tiek novērsti, lietojot iekārtu ar regulējamo dzesēšanas iekārtu, ar iespēju ievietot lielāku izmēru objektus un ar principiālu citu siltuma zudumus noteikšanas metodi, kas ļautu veikt eksperimentus heterogēnām būvkonstrukcijām – t.s. termisko kameru, kas tiek apskatīta nākamajā sadaļā.

2.2.2. Siltuma caurlaidības mērījumi termiskajā kamerā

Atšķirībā no „karstās plates” iekārtas un atbilstošās metodikas, kas pamatā ir paredzēta standartizētai homogēnu materiālu siltuma vadītspējas λ (vai λ_{ef}) noteikšanai, siltuma caurlaidības koeficienta U (vecākajā literatūrā pazīmēts arī ar k) eksperimentāliem mērījumiem ir nepieciešama principiāli cita pieeja un iekārta. Koeficients U ($W\ m^{-2}\ K^{-1}$) ir apgriezts lielums siltuma pretestībai (2.31) un raksturo siltuma plūsmu caur $1\ m^2$ lielu laukumu pie temperatūru starpības $1\ ^\circ C$.

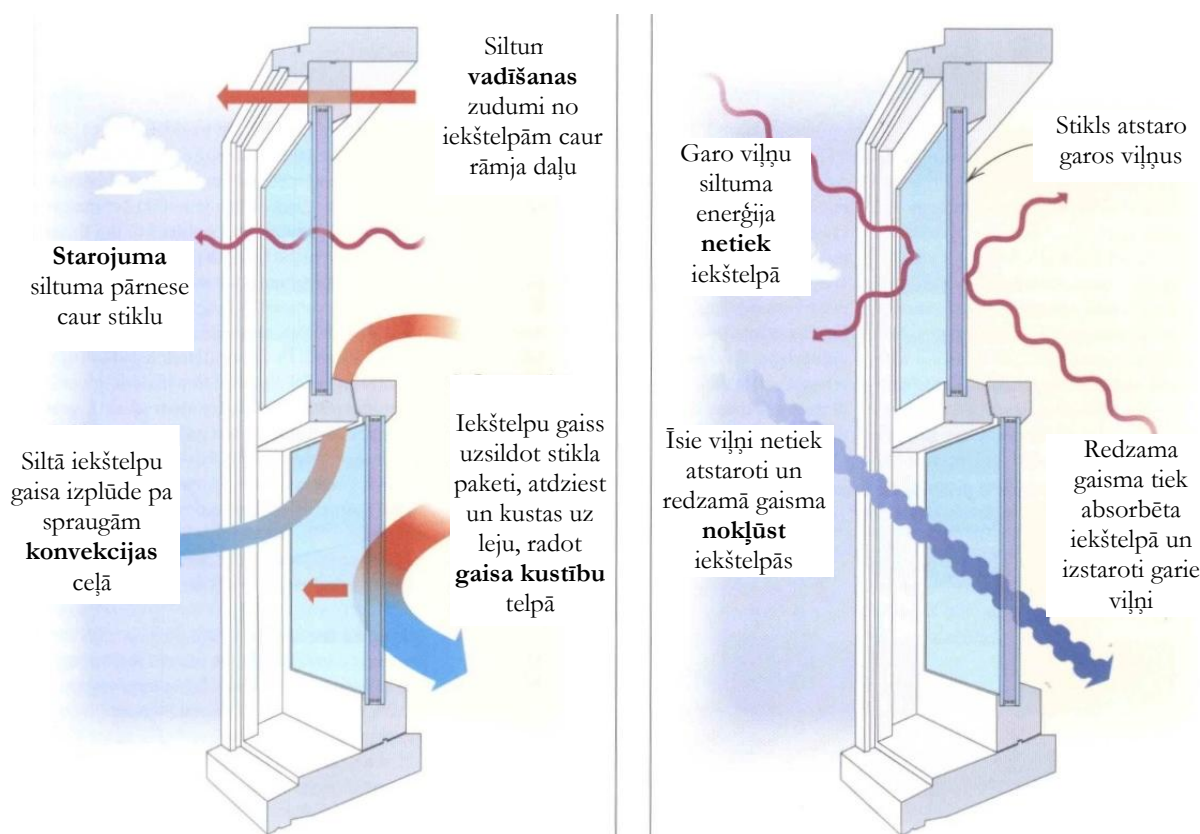
Siltuma caurlaidības koeficients raksturo visu siltuma pārneses veidu ietekmi – vadīšanu, konvekciju (ar šķidrums vai gāzes masām) un siltuma starojumu (caur caurspīdīgām daļām) un kopā ar siltuma pretestību R tiek lietots norobežojošo konstrukciju siltumtehniko īpašību aprakstam. Kā minēts iepriekš, koeficients U cietiem necaurspīdīgiem materiāliem ir tieši saistīts ar to siltuma vadītspēju un ir apgriezti proporcionāls parauga biezumam (2.32), bet citos gadījumos tā vērtības analītiskais aprēķins ir sarežģīts un neprecīzs, tādēļ ir nepieciešami eksperimentālie mērījumi.

Ar pieredzi eksperimentālajā siltuma caurlaidības noteikšanā specializētajā kamerā un rezultātu salīdzinājumu ar teorētiskajiem aprēķiniem, ņemot vērā termiskos tiltus un nehomogenitātes var iepazīties darbos (Rose, Svedsen, 2004), (Pavlík *et.al.*, 2002) un (Curcija, 2000). Kā alternatīvu mērījumiem var lietot būvelementu siltuma pārneses procesu skaitlisko modelēšanu, piem., (Krievāns, 2000). Bet tas prasa ievērojamus laika un skaitliskos resursus katrā tāda objekta aprēķiniem un modeļa ieejas datu precizitāti, ko bieži vien nevar nodrošināt.

Siltuma caurlaidības koeficienta mērījumiem paredzētā iekārta – t.s. termiskā kamera (angļu literatūrā – *hot box*) pēc darbības principiem ir līdzīga iepriekšējā sadaļā apskatītai iekārtai ar dažādu temperatūras režīmu uzturēšanas iespējām un enerģijas patēriņa uzskaiti. Viena no būtiskākajām atšķirībām ir tās izmēri, kas ļauj ievietot dažāda izmēra gatavos būvizstrādājumus, piem., logus. Līdzīgi kā „karstās plates” mērījumos, šāda veida eksperimentiem būtiski ir kvazistacionāri apstākļi, kas nozīmē arī īsāku mērperiodu un precīzākus rezultātus. Svarīgs ir arī apkārtējās vides un

klimatisko apstākļu faktoru neievērošanas iespēja, kas nozīmē mērījumu neatkarību no gadalaikiem un mērījumu vietas.

Raksturīgais heterogēnās būvkonstrukcijas, kuras siltuma caurlaidības koeficients nav precīzi nosakāms ar analītiskās pieejām, piemērs ir logs. Viens no veidiem tā atrašanai ir eksperimentālie mērījumu termiskajā kamerā, kas praksē tiek lietoti pietiekami sen (DIN 52619-1, 1982; LVS EN ISO 12567-1, 2010). Plašāka informācija par mērījumu metodi un izveidotās iekārtas darbības aspektiem tiek sniegta nākamajā sadaļā. Tagad detalizētāk apskatīsim siltuma pārneses loga konstrukcijā teorētiskos aspektus. Attēlā 2.48a parādīti siltuma pārneses veidi caur loga konstrukciju (siltuma vadīšanas caur rāmi, konvekcijas, starojuma un vadīšanas caur caurspīdīgo stikla paketei) un kuru kopējo ieguldījumu raksturo ar siltuma caurlaidības koeficientu U . Tas ir atkarīgs no vairākiem faktoriem, piem., stiklojuma tipa un skaita, paketē iepildītās gāzes un pārklājuma, rāmja materiāla u.c.



Attēls 2.48. Siltuma pārneses caur logu veidi (a) un stikla paketes selektīvā pārklājuma darbības princips (b) (Fine Homebuilding, 1999).

Tā kā logs ir kritiskākais elements ēkas norobežojošās konstrukcijās, tā siltuma caurlaidība ir būtisks faktors ēkas energoefektivitātē. Ar stikla pakešu siltuma pretestību saistīts arī kondensāta rašanās risks uz tā iekšējās virsmas – vienkāršam stiklam ar $U=5,6 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ pie ārējās temperatūras $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ un iekšējās temperatūras $20 \text{ }^\circ\text{C}$ iekšējās virsmas temperatūra samazinās līdz $-1,0 \text{ }^\circ\text{C}$, bet trīskāršai paketei ar speciāliem pārklājumiem tā ir tikai par $3-4 \text{ }^\circ\text{C}$ mazāka nekā telpā.

Siltuma vadīšanas process un tā raksturlielumi bija detalizēti aprakstīti iepriekšējā sadaļā. Starojuma siltuma pārneši caur stikla paketi ar speciāliem atstarojošiem pārklājumiem (attēls 2.48b) un to eksperimentālie mērījumu tiks apskatīti vēlāk. Šeit plašāk analizēsim konvekcijas siltuma pārneši ar gāzi pildītā stikla paketē.

Konvekcijas gadījumā siltuma pārnese notiek līdz ar šķidrās vai gāzveida vielas pārvietošanos. Šķidrumam nonākot kontaktā ar cietu ķermeņa virsmu, kuras temperatūra ir atšķirīga no šķidrums temperatūras, notiek konvektīvā siltuma apmaiņa (piem., gāzes plūsma gar ēkas sienu vai stikla virsmu). Vispārīgā gadījumā nesaspiežama šķidrums kustību laminārās plūsmas režīmā virsmas tuvumā apraksta ar Navjē-Stoksa vienādojumu un nesaspiežamības nosacījumu (Landau, Lifshic, 1986; Batchelor, 2000):

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \operatorname{grad} \vec{v} \right) = -\operatorname{grad} p + \eta \Delta \vec{v} + \rho \vec{f}, \quad \operatorname{div} \vec{v} = 0, \quad (2.50)$$

kur p – spiediens, \vec{f} – masas spēku vektors un η – dinamiskā viskozitāte. Businesska tuvinājumā, cēlējspēku, kas veidojas līdz ar temperatūru mainoties materiāla blīvumam gravitācijas laukā, izsaka formula

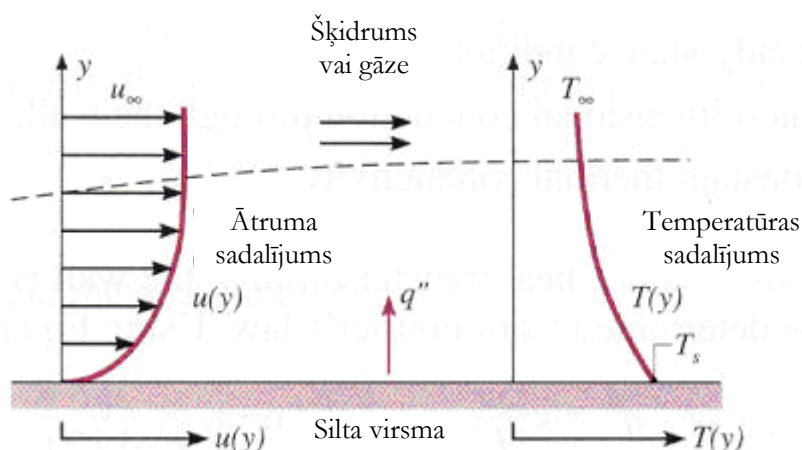
$$\vec{f} = \vec{g} \beta \Delta T, \quad \beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p, \quad (2.51)$$

kur β ir termiskās izplēšanās koeficients. Ideālām gāzēm $\beta = 1/T$. Savukārt siltuma pārneši šķidrumā apraksta iepriekš apskatītais vienādojums (2.12), kas ietver konvektīvo pārneši raksturojošo locekli.

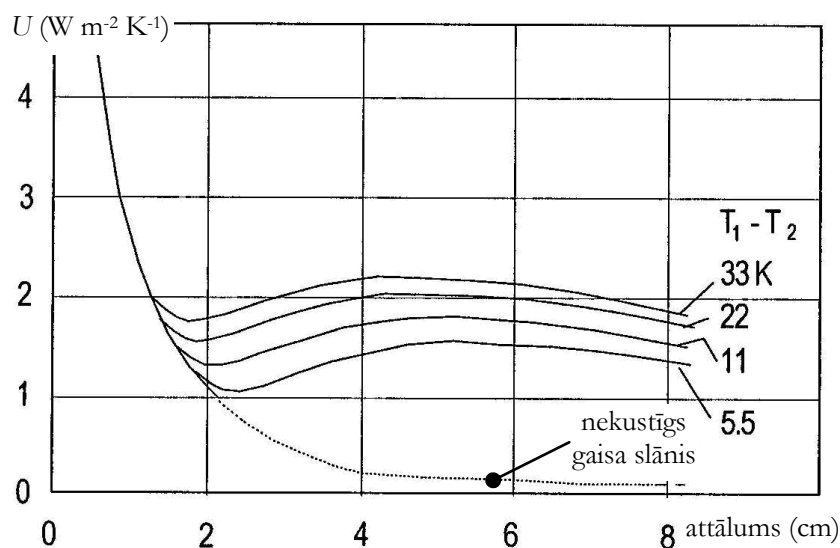
Lielākajā daļā praksē sastopamo gadījumu plūsmas raksturs ir turbulents un siltuma apmaiņu aprakstīt ir vēl sarežģītāk, jo inženierfizikālos aprēķinos nākas lietot papildus pusempīriskus pieņēmumus un efektīvās parametru vērtības (piem., turbulento viskozitāti un siltuma vadītspēju), kas neraksturo pašu materiālu īpašības, bet ir atkarīgas no procesu apstākļiem un to priekšvēstures kopumā.

Nosacīti mēdz šķirot divus konvekcijas veidus – piespiedu vai dabīgo (jeb brīvo). Piespiedu konvekcijas gadījumā šķidrums kustību gar virsmu nosaka kādi ārējie spēki \vec{f} (2.50), piem., spiedienu starpība caurulē vai elektromagnētiskie spēki šķidrā metālā, bet kustības ātrumi var būt daudz lielāki nekā brīvajai konvekcijai. Piespiedu konvekcijas gadījumā praksē visbiežāk plūsmas ir turbulentas. Dabīgās konvekcijas gadījuma šķidrumam, nonākot kontaktā ar citas temperatūras virsmu, mainās tā blīvums un rodas cēlējspēks, kas izraisa kustību. Šādas konvekcijas tipiski piemēri ir gaisa plūsmas pie ēkas sienas bezvēja laikā vai stikla paketes iekšpusē.

Shematiski konvektīvās siltuma apmaiņas robežslānis pie horizontālās virsmas, kuras temperatūra ir augstāka nekā šķidrumam parādīti attēlā 2.49. Attēlā 2.50 parādīta konvekcijas ietekme uz konstrukcijas, kas sastāv no divām vertikālām paralēlām virsmām, starp kurām atrodas gāze (piem., stikla paketes), siltuma caurlaidību. Pie nelieliem attālumiem starp virsmām konvekcijas efekts nav būtisks, bet attālumam un temperatūru starpībai palielinoties, konvekcija rezultējošajā siltuma caurlaidībā kļūst par noteicošo faktoru. Kā ir redzams no grafika, pie noteikta attāluma vērtības koeficienta U vērtībai ir minimums, tātad zudumi ir vismazākie. Šis fakts tiek izmantots arī stikla pakešu ražošanas tehnoloģijā, izvēloties to optimālo biezumu.



Attēls 2.49. Konvektīvās siltuma apmaiņas robežslāņi pie cietas virsmas (Incropera, DeWitt, 2002).



Attēls 2.50. Gaisa slāņa starp divām vertikālām plāksnēm siltuma caurlaidības atkarība no attāluma starp plāksnēm un plāksņu virsmu temperatūru starpības (Hagentoft, 2003).

Siltuma apmaiņas intensitāte ir būtiski atkarīga no spraugas platuma, temperatūru starpības, šķidruma vai gāzes īpašībām un plūsmas laminārā vai turbulentā režīma. Šo iemeslu dēļ

inženierfizikālos lietojumos siltuma apmaiņas starp šķidrumu un cietu virsmu raksturošanai bieži izmanto vienkāršotas empīriskā rakstura sakarības, piem., Ņūtona siltuma atdeves sakarību (2.22). Dažādām vielām raksturīgās brīvās konvekcijas siltuma atdeves koeficientu α vērtību intervāli ir atšķirīgi, piem., gaisam – 5...25, bet ūdenim – 20...100 W m⁻² K⁻¹. Pieaugot plūsmas intensitātei virsmas tuvumā, siltuma atdeves koeficients proporcionāli pieaug, savukārt termiskā robežslāņa biezums un tā siltuma pretestība samazinās – skat. arī (Curcija, 2000). Plūsmas intensitāte brīvās termiskās konvekcijas gadījumā būtiski pieaug līdz ar šķidruma un virsmas temperatūru starpības pieaugumu.

Ja termiskā konvekcija attīstās spraugā ar platumu d starp divām virsmām ar konstantu temperatūru starpību ΔT , tad siltuma apmaiņu starp virsmām tuvināti var novērtēt, izmantojot empīriskās sakarības starp termisko konvekciju raksturojošajiem bezdimensionālajiem parametriem – Nuselta skaitli Nu, Prandtla skaitli Pr un Releja skaitli Ra:

$$\text{Nu} = \frac{\alpha d}{\lambda}, \quad (2.52)$$

$$\text{Pr} = \frac{\eta}{\rho a} = \frac{c_p \eta}{\lambda}, \quad (2.53)$$

$$\text{Ra} = \frac{g \beta \rho \Delta T d^3}{a \eta}, \quad (2.54)$$

kur visi šķidrumu raksturojošie lielumi tiek aprēķināti vidējai temperatūrai. Ja brīvā konvekcija veidojas pie vienas vertikālas izotermiskas virsmas, tad cēlējspēka un viskozo spēku attiecības raksturošanai Releja skaitļa vietā var lietot Gragofa skaitli Gr, ko definē saistībā ar tās augstumu l :

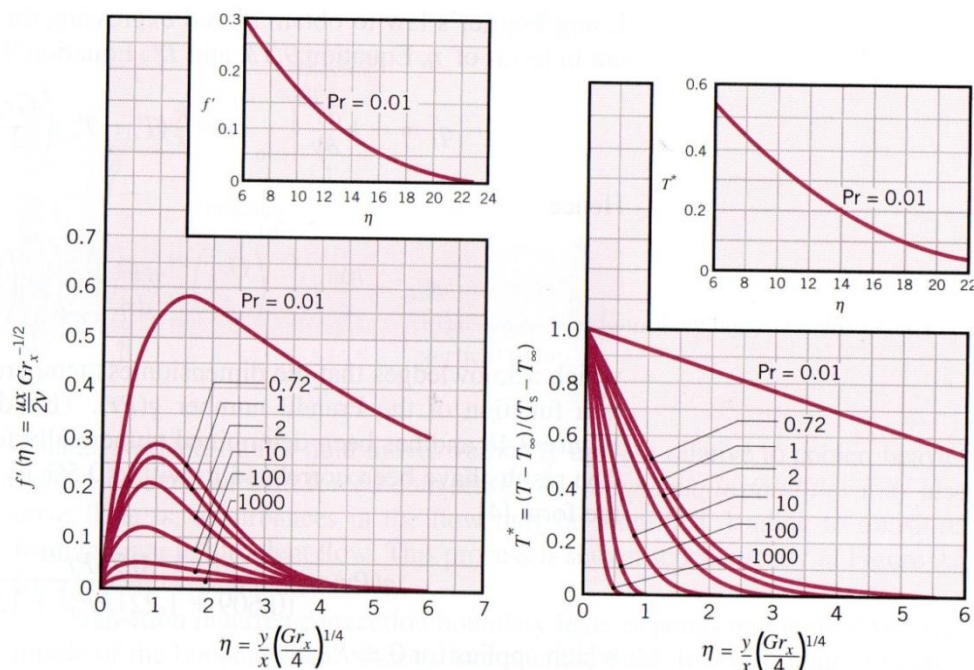
$$\text{Gr} = \frac{g \beta \rho^2 (T - T_\infty) l^3}{\eta^2}. \quad (2.55)$$

Minētie parametri savā starpā ir cieši saistīti:

$$\text{Ra} = \text{Pr} \cdot \text{Gr}. \quad (2.56)$$

Virsmāi paralēlās ātruma komponentes un temperatūras sadalījumi virsmas tuvumā dažādām Prandtla skaitļa vērtībām bezdimensionālā formā parādīti attēlā (2.51), kur redzams, ka šie sadalījumi ir būtiski atkarīgi no šķidruma īpašībām. Piem., pie lielas viskozitātes un mazas šķidruma siltuma vadītspējas termiskā robežslāņa biezums samazinās. Pie $\text{Pr} \sim 1$ virsmas tuvumā veidojas izteikts virsmāi paralēlās ātruma komponentes maksimums. Šie sadalījumi ļauj tuvināti noteikt arī vidējo siltuma atdeves koeficientu no virsmas (Incropera, DeWitt, 2002):

$$\text{Nu} = \frac{4}{3} \left(\frac{\text{Gr}}{4} \right)^{1/4} \cdot \varphi(\text{Pr}), \quad \varphi(\text{Pr}) = \frac{0,75 \text{Pr}^{1/2}}{(0,609 + 1,221 \text{Pr}^{1/2} + 1,38 \text{Pr})^{1/4}} \quad (2.57)$$

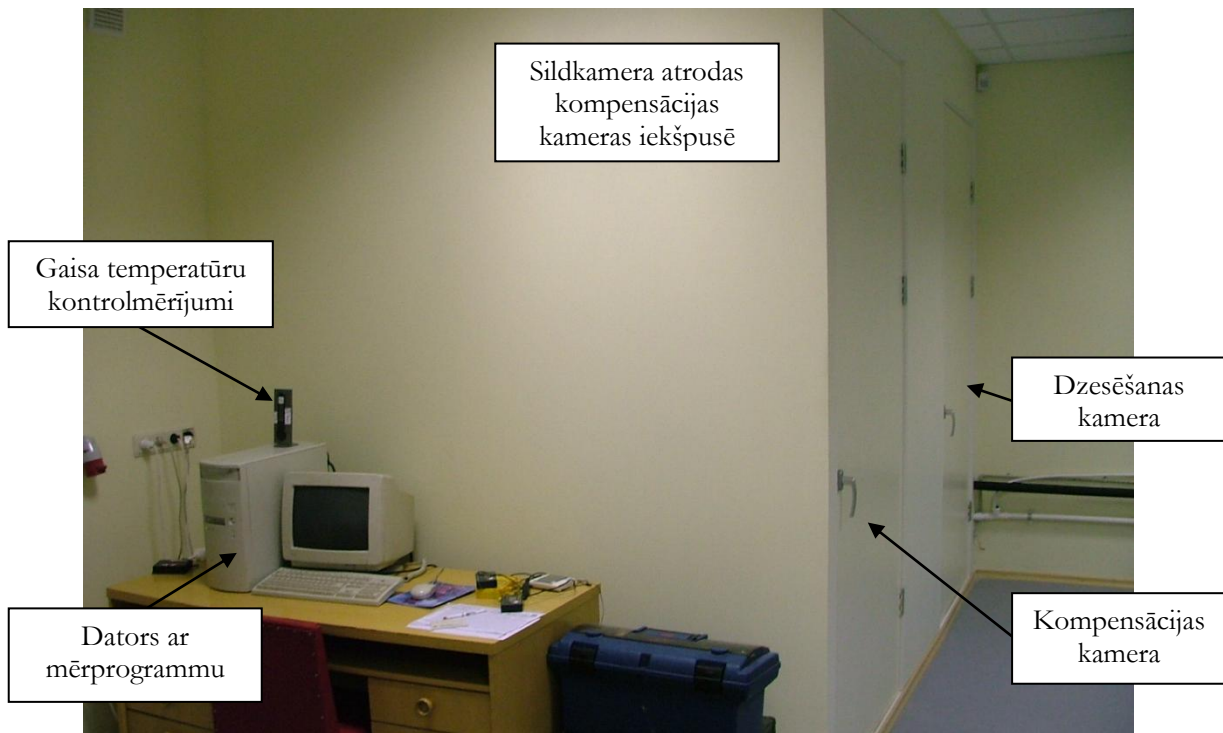


Attēls 2.51. Ātrumi (kreisajā pusē) un temperatūras (labajā pusē) pie izotermiskas, vertikālas virsmas laminārās brīvās konvekcijas robežslāņa gadījumā (Incropera, DeWitt, 2002). Apzīmējumi: u_x – ātruma komponente gar virsmu, y – attālums no virsmas, x – koordināte garenvirzienā.

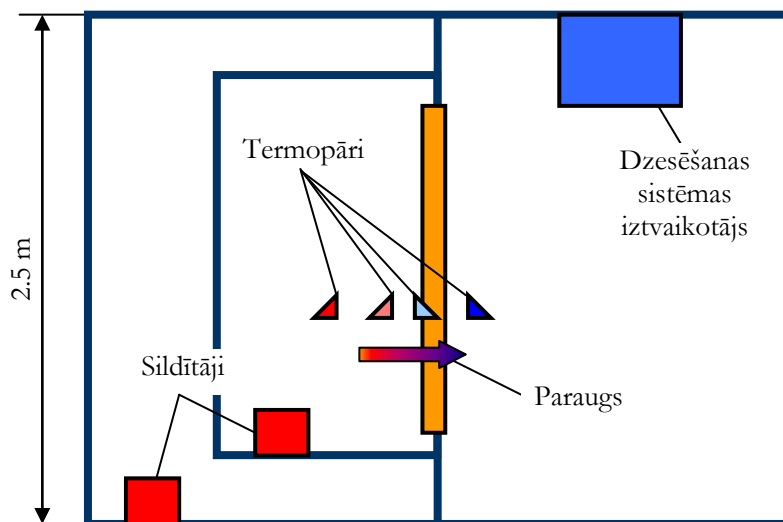
Empīriskās formulas atšķiras dažādiem tuvinājumiem un bezdimensionālo parametru diapazoniem, piem., gadījumā, ja $l/d=1...40$, $Pr=1...20$ un $Ra=10^6...10^9$, tad $Nu = 0,046Ra^{1/3}$, bet, ja $l/d=10...40$, $Pr=1...2\cdot 10^4$ un $Ra=10^4...10^7$, tad $Nu = 0,42Ra^{1/4} \cdot Pr^{0,012}(l/d)^{-0,3}$.

VTPMM laboratorijā izveidotais mērstends gatavo būvizstrādājuma siltuma pretestības un siltuma caurlaidības koeficienta noteikšanai (t.s. termokamera) ir parādīts attēlā 2.52, bet tās vertikālais šķērsgriezums pa vidusšķēlumu – attēla 2.53. Eksperimentālās iekārtas pamatsastāvdaļas ir sildkamera, kompensācijas un dzesēšanas kameras, kurās iespējams regulēt gaisa temperatūru. To norobežojošās virsmas ir izveidotas no siltuma izolācijas materiāla ar mazu siltuma vadītspējas koeficientu $\lambda \leq 0,035 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

Sildkamerā, automātiski ieslēdzoties un izslēdzoties elektriskam sildītājam ar ventilatoru, ir iespējams uzturēt temperatūru diapazonā $25...45^\circ\text{C}$. Kompensācijas kameras uzdevums ir samazināt siltuma zudumus no sildkameron caur iekārtas starpsienām – tajā tiek uzturēta temperatūra, kas ir maksimāli tuva temperatūrai sildkamerā. Temperatūras režīmu stabilitāte tiek kontrolētā mērot gaisa temperatūras dažādās kameru vietās. Īpaši nozīmīga loma kompensācijas kamerai ir tad, ja pētāmā parauga siltuma caurlaidību nosaka, mērot kopējo siltuma daudzumu, kas pievadīts sildkamerai (t.s. integrālā metode, kas tiks apskatīta turpinājumā).



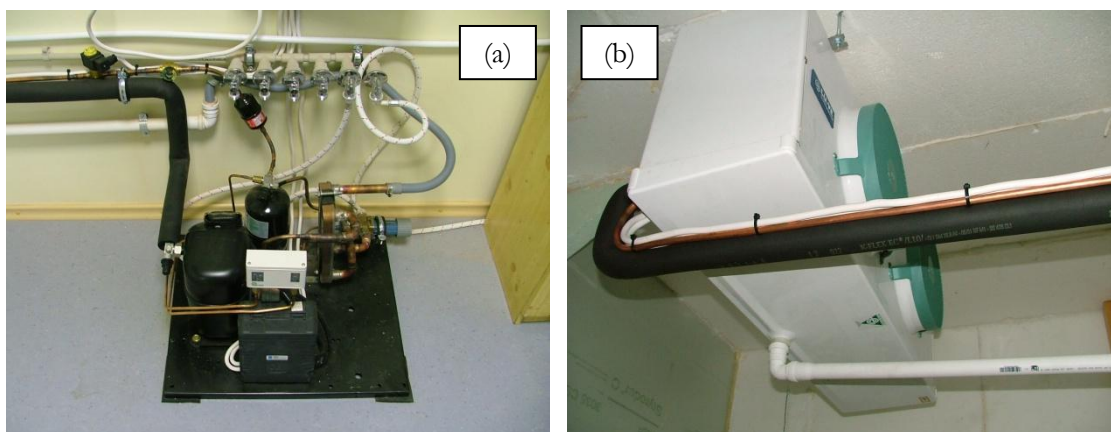
Attēls 2.52. Termokameras ar mērdatoru kopskats.



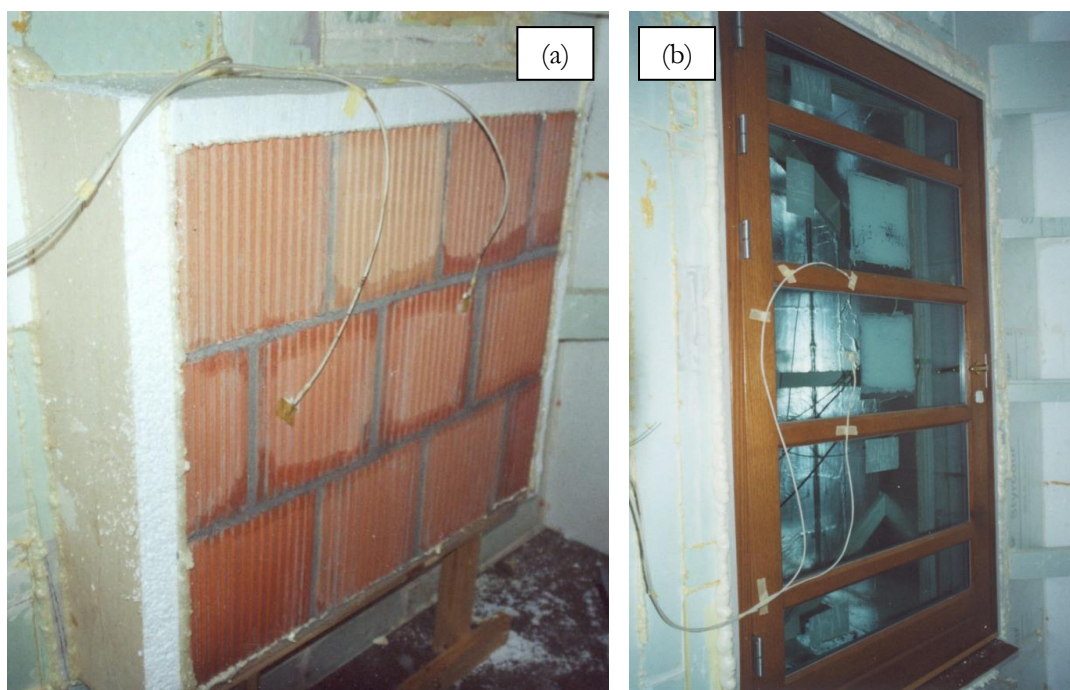
Attēls 2.53. Shematisks vertikālais termokameras šķērs griezumus.
(1 – kompensācijas kamera, 2 – sildkamera, 3 – dzesēšanas kamera).

Dzesēšanas kamerā, izmantojot kompresoru ar ūdens dzesēšanu (attēls 2.54a), iespējams nodrošināt temperatūru diapazonā no $-10...15\text{ }^{\circ}\text{C}$ diapazonā. Iztvaikotājs novietots pie dzesēšanas kameras griestiem (attēls 2.54b) un gaisa plūsma caur to orientēta prom no pētāma parauga tā, lai pēc iespējas mazāk iespaidotu dabisko gaisa konvekciju gar parauga auksto virsmu. Šādā režīmā termokameru iespējams darbināt ilgstoši – vairākas dienas, kā arī mērījumu gaitā mainīt temperatūru regulēšanas sildkamerā un dzesēšanas kamerā uzstādījumus.

Testējamais būvizstrādājums tiek iestiprināts kameras starpsienas (maskas) izgriezumā (attēli 2.53 un 2.55), īpaši rūpējoties par blīvējuma nodrošināšanu un lineāro siltuma tiltu novēršanu pa izstrādājuma perimetru, lai tādējādi novērstu nekontrolējamus papildus siltuma zudumus vadīšanas un konvekcijas dēļ.



Attēls 2.54. Termokameras dzesēšanas sistēmas kompresors ar ūdens dzesēšanu (a) un iztvaikotājs dzesēšanas kamerā (b).



Attēls 2.55. Termokamerā mērījumiem ievietotie objekti – ķieģeļu bloki (a) un koka durvis (b).

Testējamās būvkonstrukcijas t.s. tiešo siltuma caurlaidības koeficientu $U_{\text{tiešais}}$ nosaka saskaņā ar formulu (2.25):

$$U_{\text{tiešais}} = q/\Delta T, \quad (2.58)$$

kur q (W m^{-2}) – vidējais siltuma plūsmas blīvums caur būvizstrādājumu, bet ΔT ($^{\circ}\text{C}$) ir temperatūru starpība starp vidējām temperatūrām uz testējamā izstrādājuma siltās un aukstās virsmas. Gadījumā, ja testējamais būvizstrādājums sastāv no vairākiem elementiem ar atšķirīgu uzbūvi (piem., stikla

pakete un rāmis) un dažādu siltuma caurlaidības pretestību, tad vidējās temperatūras uz attiecīgo elementu virsmām parasti atšķiras. Tādējādi vidējo temperatūru noteikšanai uz būvizstrādājuma virsmām ar vairākiem sensoriem nosaka temperatūru uz katra no atšķirīgajiem elementiem.

Siltuma plūsmas blīvums var tikt izmērīts eksperimentāli (diferenciālā metode) vai arī noteikts saskaņā ar formulu (integrālā metode)

$$q = \frac{\frac{N}{t} - Q_{\text{maska}} - Q_{\text{komp}}}{S}, \quad (2.59)$$

kur S (m^2) – testējamā parauga laukums, N (J) – kopējais sildkamerai pievadītais siltuma daudzums, Q_{maska} un Q_{komp} (W) – attiecīgi siltuma plūsmas no sildkamberas caur masku un uz kompensācijas kameru, t (s) – mērperioda ilgums. Lielumi Q_{komp} un Q_{maska} var tikt aprēķināti, izmantojot maskas un kompensācijas kameras materiāla siltuma vadītspēju, biezumu un laukumu, kā arī mērījumos reģistrēto temperatūru starpību:

$$Q = \frac{\lambda}{d} S \Delta T. \quad (2.60)$$

Tā kā gaisa cirkulācijas apstākļi mērījumu laikā atšķiras no dabiskajiem un temperatūras mērījumu notiek uz virsmām, tad rezultējošā siltuma caurlaidības koeficienta U_{rez} aprēķinam ir nepieciešams ievērot arī gaisa robežslāņu objekta abās pusēs ietekmi. Šim nolūkam izmanto standartizētās siltuma atdeves koeficientu vērtības no virsmām (tabula 2.3) un noteikto tiešo siltuma caurlaidības koeficientu (skat. arī 2.23):

$$U_{\text{rezultējošais}} = \frac{1}{\frac{1}{U_{\text{tiešais}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{iekšā}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{ārā}}}}. \quad (2.61)$$

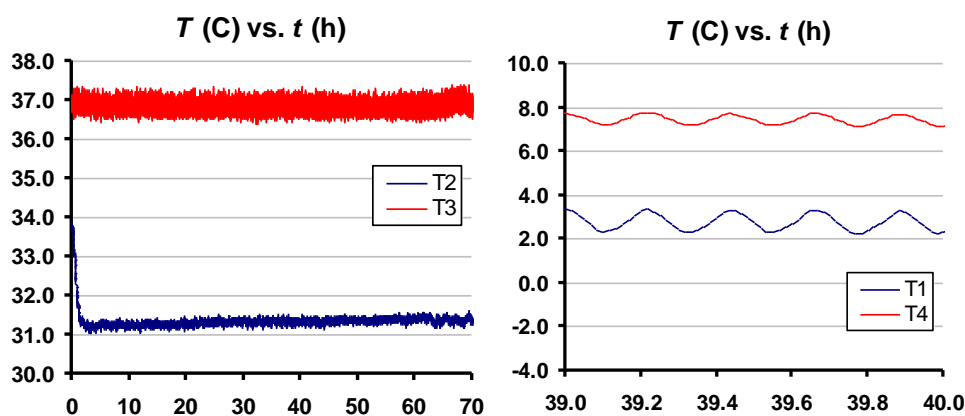
Veicot temperatūras mērījumus gan uz mēroobjekta virsmām, gan arī vairāku centimetru attālumā no tam, var novērtēt siltuma atdeves koeficientus uz katras no virsmām, saskaņā ar formulu (2.23) siltuma plūsmas blīvuma vērtību izdalot ar temperatūru starpību uz virsmas un gaisā.

Uzsākot eksperimentu, ar speciāliem termoregulatoriem (attēls 2.52) izvēlas sildkamberas, kompensācijas un dzesēšanas kameru temperatūras uzstādījumus. Katru reizi, uzsākot jaunus mērījumus, ir nepieciešama sildkamberas un kompensācijas kameras temperatūru saskaņošana. To temperatūru starpībai ir jābūt pēc iespējas mazākai, tajā pat laikā temperatūrai sildkamerā jābūt augstākai, pretējā gadījumā tai tiks pievadīts papildus siltums no kompensācijas kameras un uzskaitītais patērētais siltuma daudzums būs nekorekts.

Visās kamerās esošo temperatūru sensoru mērījumu nolasīšanai tiek izmantotas vairākas pieejas. Vidējās gaisa temperatūras kontrolei tiek izmantoti bezvadu termodevēji ar lielu termisko inerci, ko rādījumus neietekmē periodiskas temperatūras svārstības. Sildīšanas un dzesēšanas sistēmu

regulēšanai tiek izmantoti devēji ar mazu termisko inerci, kas ļauj pietiekami ātri ieslēgt atbilstošās sistēmas, temperatūrai sasniedzot iestādīto kritisko vērtību.

Savukārt temperatūras sensori uz objekta virsmām un pie tām, kuru rādījumi tiek izmantoti siltuma caurlaidības koeficienta aprēķinos, kā arī siltuma plūsmas sensors caur signālu kondicionēšanas bloku ar nepieciešamo nulles punkta kompensācijas slēgumu, izmantojot augstjutīgu mērkarti National Instruments AT-MIO-16XE-50 (National Instruments, 2008) ir pieslēgti datoram. Faktiski gaisa temperatūra svārstās visās kamerās mainās periodiski ar lielāku vai mazāku periodu un amplitūdu atkarībā no sildītāja vai dzesētāja darbības principa un īpatnībām. Tipisku gaisa un mērobjekta virsmas temperatūru svārstību piemēri dažādos laika mērogos parādīti attēlā 2.56. Kā redzams, temperatūras svārstības dzesēšanas kamerā ir daudz lielākas nekā sildkamerā, tāpēc siltuma plūsmas blīvums parasti tiek mērīts sildkameras pusē.



Attēls 2.56. Tipiskas temperatūras svārstības gaisā un uz materiāla virsmas sildkameras pusē (T2, T3) un dzesēšanas kameras pusē (T1, T4)

Četrus temperatūras sensorus un divus siltuma plūsmas sensorus mērījumu procesa kontrolei, mērdatu automātiskai reģistrācijai, kā arī to attēlošanai tiek izmantota speciāli izstrādātā programmatūra UMeas (PAIC, 2003). Ar tās palīdzību ir iespējams:

- iestatīt datu ierakstu biežumu (laika intervālu sekundēs, kura vidējā mērvērtība tiek attēlota vizuāli un ierakstīta rezultātu failā);
- labot siltuma plūsmas sensoru kalibrācijas un temperatūras sensoru korekcijas konstantes;
- kontrolēt eksperimenta norisi, attēlojot temperatūru, siltuma plūsmas blīvuma sensoru rādījumus un U vērtību (2.25, 2.58) tekstuālā un grafiskajā (attēli 2.57 un 2.58) veidā;
- mērījuma datus saglabāt teksta faila iespējamās pēcapstrādes veikšanai.

UMeas - C:\MEAS\Stends\Rezultati\PAKETES\P06pas01b\meas.mst

File Measure

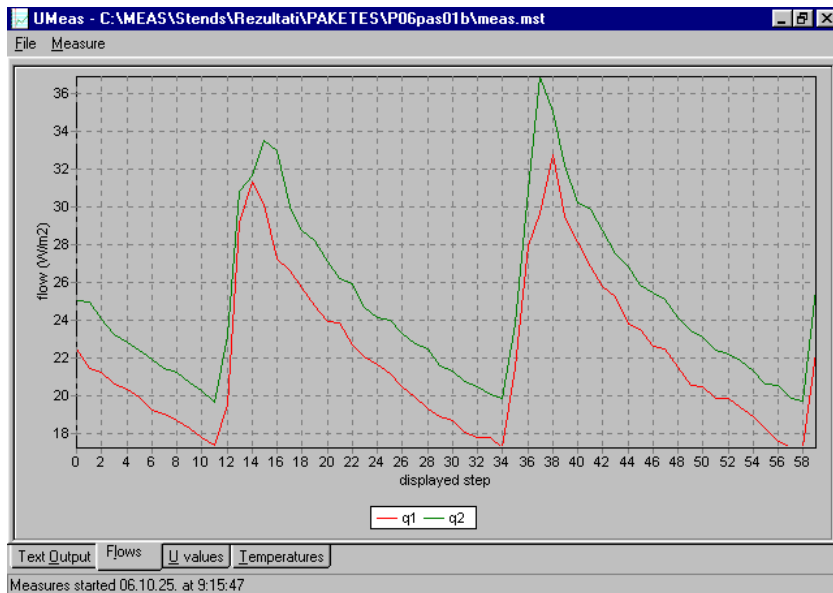
Count of subiterations: 662 Count of global iteration: 627

q1	T1	T2	T3	T4	q2	U1	U2	date	time
26,833	-5,222	36,239	37,595	-4,540	29,861	0,593	0,663	06.10.25.	10:58
25,795	-5,096	36,254	37,616	-4,493	28,796	0,593	0,663	06.10.25.	10:58
25,273	-4,989	36,263	37,622	-4,445	27,504	0,593	0,663	06.10.25.	10:58
23,802	-4,935	36,265	37,631	-4,420	26,819	0,593	0,663	06.10.25.	10:58
23,531	-4,944	36,268	37,630	-4,412	25,876	0,593	0,663	06.10.25.	10:58
22,650	-4,989	36,273	37,625	-4,412	25,432	0,593	0,663	06.10.25.	10:58
22,476	-5,023	36,277	37,588	-4,417	25,115	0,593	0,663	06.10.25.	10:58
21,510	-5,089	36,261	37,572	-4,419	24,183	0,593	0,663	06.10.25.	10:58
20,583	-5,172	36,258	37,541	-4,444	23,445	0,593	0,663	06.10.25.	10:58
20,478	-5,271	36,256	37,526	-4,466	23,132	0,593	0,663	06.10.25.	10:58
19,895	-5,374	36,242	37,492	-4,494	22,460	0,593	0,663	06.10.25.	10:58
19,897	-5,493	36,228	37,457	-4,520	22,244	0,592	0,662	06.10.25.	11:00
19,405	-5,615	36,218	37,419	-4,555	21,888	0,592	0,662	06.10.25.	11:00
18,873	-5,750	36,205	37,380	-4,587	21,302	0,592	0,662	06.10.25.	11:00

Text Output Flows U values Temperatures

Measures started 06.10.25. at 9:15:47

Attēls 2.57. No termodevījiem un siltuma plūsmas sensoriem nolasītie dati UMeas programmatūrā.

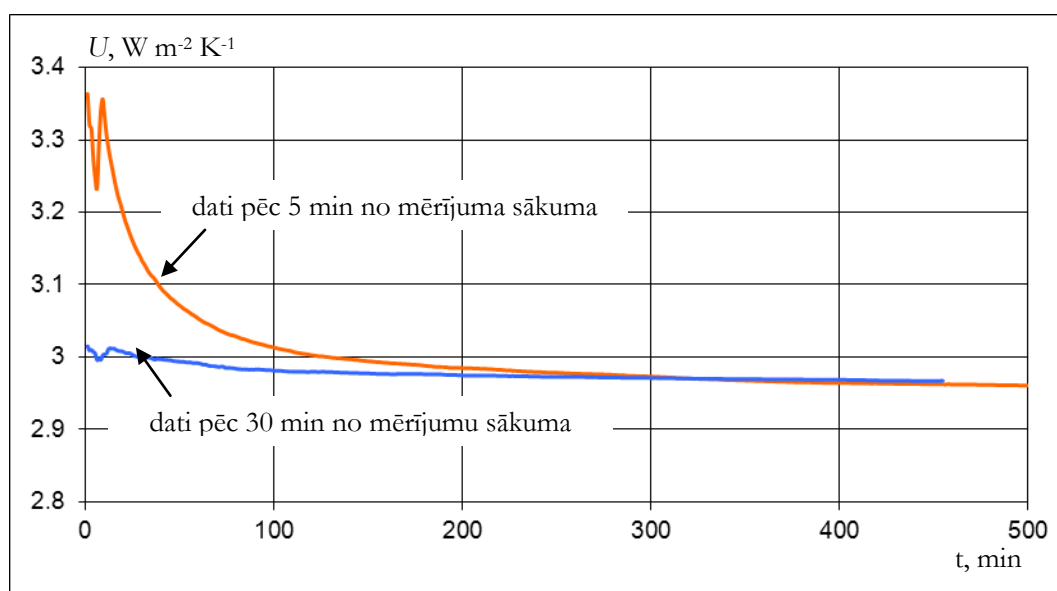


Attēls 2.58. Izmērīto siltumu plūsmu blīvumu attēlojums grafiskajā logā UMeas programmatūrā.

Ar datora palīdzību reģistrētā siltuma plūsmas blīvuma q vērtības un temperatūru starpība abās parauga pusēs ΔT laikā svārstās, sildītājam un dzesēšanas sistēmai darbojoties periodiskā režīmā (skat. arī attēlu 2.56). Tādējādi apstākļi ir kvazistacionāri un vidējo lielumu vērtību noteikšanai tiek izmantota kumulatīvā metode – aktuālās vidējās vērtības \bar{q}_n , $\Delta\bar{T}_n$ un \bar{U}_n (2.25, 2.58) tiek noteiktas no visām līdz tam brīdim reģistrētajām n mērvērtībām:

$$\bar{q}_n = \frac{(n-1)\bar{q}_{n-1} + q_n}{n}, \Delta\bar{T}_n = \frac{(n-1)\Delta\bar{T}_{n-1} + \Delta T_n}{n}, \bar{U}_n = \frac{\bar{q}_n}{\Delta\bar{T}_n}. \quad (2.62)$$

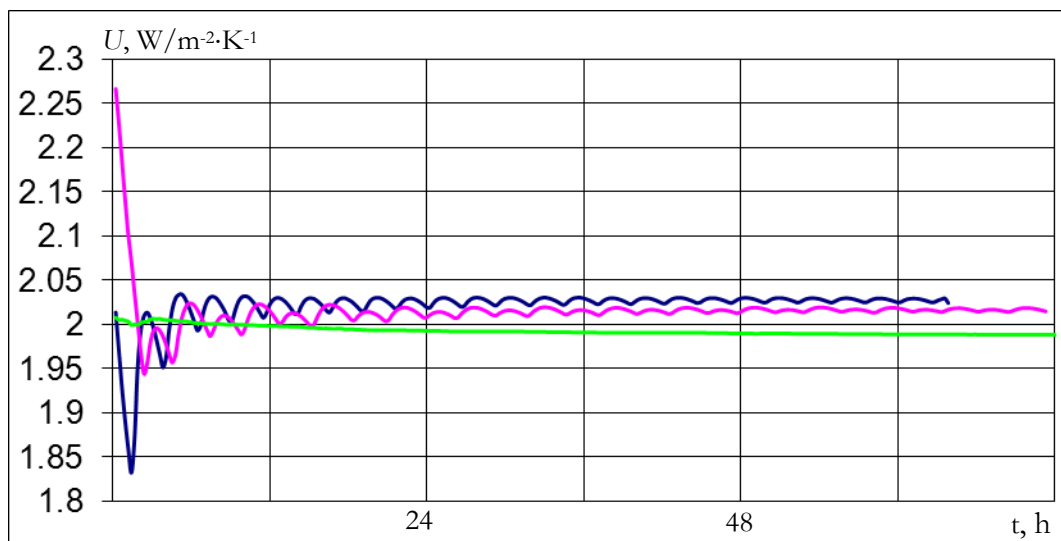
Mērījumus ir ieteicams sākt vairākas stundas pēc tam, kad pētāmā būvkonstrukcija ievietota termiskajā kamerā un temperatūras uzturēšanas sistēma iedarbināta. To nosaka divi faktori – blīvēšanas materiālu žūšanas periods (paraugu nostiprināšanai un spraugu blīvēšanai izmantojamās poliuretāna putas sacietē vairāku stundu periodā) un kvazistacionārā režīma iestāšanās laiks, kas ir atkarīgs no objekta siltuma pretestības un iestādītās temperatūru starpības. Attēlā 2.59 parādīti divi mērījumu piemēri pēc 5 un 30 minūtēm no mērījumu sākuma – kā redzams, sākot reģistrēt datus gandrīz uzreiz pēc to sākuma, process vēl nav stabilizējies un kumulatīvās vērtības aprēķinam ir nepieciešams ilgāks laiks. Tā, stabilizētā (kvazistacionārā) režīmā jau pēc 1 stundas kumulatīvi noteiktās U vērtības izmaiņas nepārsniedz 2%. Ja mērdatos iekļauts arī sākotnējās siltuma režīma stabilizācijas posms, tad attiecīgais stabilizācijas periods pagarinās par dažām stundām.



Attēls 2.59. Kumulatīvās siltuma caurlaidības vērtības stabilizācija laikā.

Būtiski atšķiras arī periodi, kuros kumulatīvi aprēķinātā U vērtība stabilizējas, ja siltuma plūsmas sensors tiek novietots dažādās mēroobjekta pusēs. Tā, novietojot mērsensoru dzesēšanas kamerā tam nepieciešamas 10-12 stundas, bet mērot siltuma plūsmu sildkamerā – tikai 1-2 stundas. Minēto iemeslu dēļ siltuma plūsmas sensori vienmēr tiek novietoti uz testējamā izstrādājuma virsmas sildīšanas kamerā.

Darbinot dzesēšanas sistēmu nepārtrauktā režīmā (attēls 2.60) ar maksimāli iespējamo tās jaudu, t.i. iestādot nesasniedzami zemu dzesēšanas kameras temperatūru, iespējams nodrošināt ievērojami lielāku temperatūru starpību starp sildkameru un dzesēšanas kameru nekā tas nepieciešams standartizētiem eksperimentiem, kur $\Delta T \approx 20$ °C. Tādējādi termiskajā kamerā iespējams veikt būvizstrādājumu pārbaudi arī ekstremālos apstākļos ($\Delta T \approx 50$ °C).



Attēls 2.60. Piemēri kumulatīvi aprēķinātās U vērtības aprēķinam dzesēšanas sistēmai darbojoties nepārtrauktā un impulsu režīmā.

Kā vienu no lielākām grūtībām mērījumu gaitā var minēt testējamā objekta ievietošanu tam paredzētajā vietā maskā, palielinot vai samazinot izgriezumu tajā, kā arī tā kvalitatīvu noblīvēšanu. Pēc katras objekta nomaiņas ir jāpārbauda gan maskas, gan būvkonstrukcijas instalācijas hermētiskums, tādējādi izslēdzot arī konvekcijas siltuma zudumus caur iespējamiem noblīvējumiem. Šo faktu saistībā ar mērījumiem termokamerā uzsver arī citi autori, piem., (Rose, Svedsen, 2004), veicot eksperimentus mazāka izmēra iekārtā.

Izveidotā iekārta ir pietiekami universāla un tajā ir iespējams veikt ne tikai siltuma caurlaidības koeficienta mērījumus, bet, pateicoties kvazistacionāru apstākļu uzturēšanas iespējai objekta pretējās pusēs un to izolācijai, arī dažādus citus ar būvkonstrukciju fizikālām īpašībām saistītus eksperimentus. Tā, ilgākā laika periodā var tikt veikti arī siltuma izmaiņu mērījumi būvkonstrukcijās laboratorijas apstākļos (Pavlik *et.al.*, 2002), tādējādi aizvietojo mērījumus ēkās.

Kā minēts iepriekš, siltuma caurlaidības koeficienta U noteikšanu atbilstoši (2.58-2.60) var veikt divējādi – mērot siltuma plūsmu blīvumus caur būvizstrādājuma elementiem ar atšķirīgām īpašībām (diferenciālā metode) vai arī mērot kopējo sildkamerai pievadīto siltuma daudzumu (integrālā metode). Bieži vien abu metožu kombinācija tiek lietota rezultātu pārbaudei un precizitātes uzlabošanai, piem., (Curcija, 2000). Tas tika darīts arī šī darba ietvaros veiktajos eksperimentālos pētījumos, kā arī termokameras kalibrēšanai, veicot mērījumus paraugiem, kuru siltuma caurlaidības pretestības ir zināmas un to vērtības pārklāj testējamo būvizstrādājumu U vērtību diapazonu ($0,4 \dots 3,5 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$). Apskatīsim katru no pieejām detalizētāk, kā arī analizēsim veikto raksturīgo mērījumu rezultātus.

2.2.2.1. Diferenciālā metode

Viena no metodēm, kas tiek lietota eksperimentos termiskajā kamerā, ir t.s. diferenciālā mērījumu metode, kad siltuma plūsma caur objektu tiek noteikta tieši, ar siltuma plūsmas sensora palīdzību. Pētāmām konstrukcijām ar heterogēnu uzbūvi rezultējošo U aprēķina, mērot siltuma plūsmas blīvumu caur katru no atšķirīgajiem būvizstrādājuma elementiem, tādējādi nosakot to siltuma pretestības (2.21), kā arī ievērojot to laukumu proporcijas (Belindževa-Korkla, 2002):

$$U = \frac{1}{R} = \frac{S}{\sum_i S_i R_i}, \quad (2.63)$$

kur S – ir konstrukcijas kopējais laukums, S_i un R_i – katra atsevišķa elementa laukums un siltuma pretestība attiecīgi.

Elementiem, kuru uzbūvē ir gaisa spraugas vai porainiem materiāliem ar diferenciālās metodes palīdzību iespējams noteikt arī t.s. efektīvo siltuma vadītspējas koeficientu λ_{ef} , kas ir analogs materiāla siltuma vadītspējas koeficientam λ un tiek aprēķināts pēc formulas (2.34). Piem., dobtie ķieģeli (attēls 2.61), kuru eksperimentālie mērījumi tiks apskatīti vēlāk, tiek raksturoti tieši ar šo efektīvo siltuma vadītspējas koeficientu (LVS EN 1745, 2003). Taču gadījumā, ja ir jānosaka λ pašam materiālam (piem., mālam), ir jāveic mērījumi ar iepriekš apskatītās „karstās plates” metodi.



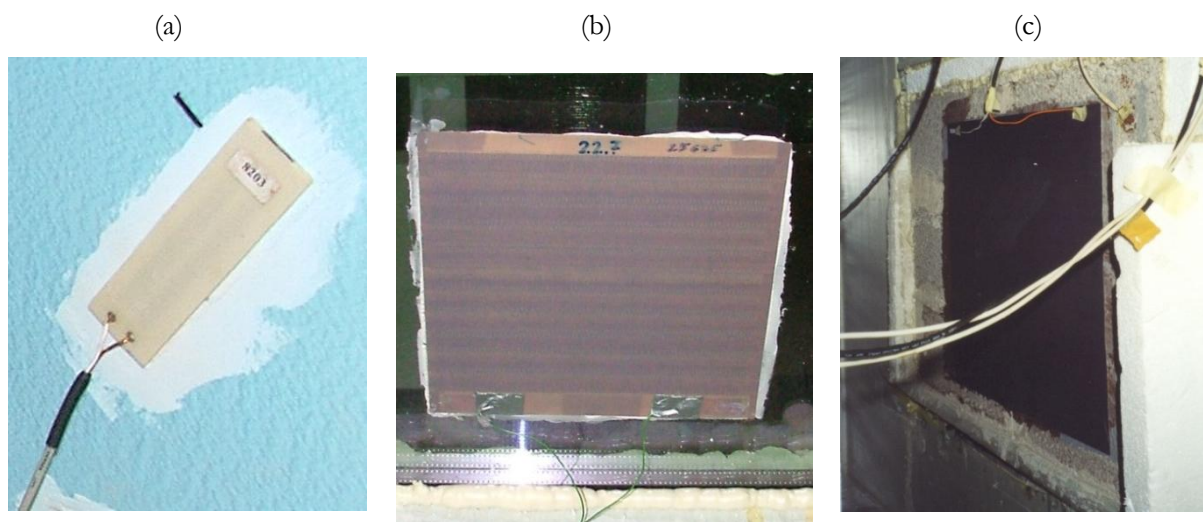
Attēls 2.61. Dobtiem ķieģļiem lieto efektīvo siltuma vadītspēju koeficientu λ_{ef} .

Viena no diferenciālās metodes priekšrocībām ir tā, ka nav nepieciešama siltuma apmaiņas ar kompensācijas kameru un zudumu caur masku analīze - nepieciešams tikai stabils temperatūras režīms. Pastāv arī daži ierobežojumi siltuma plūsmu metodes lietojumiem termokamerā un tie galvenokārt ir saistīti ar pētāmās konstrukciju īpatnībām:

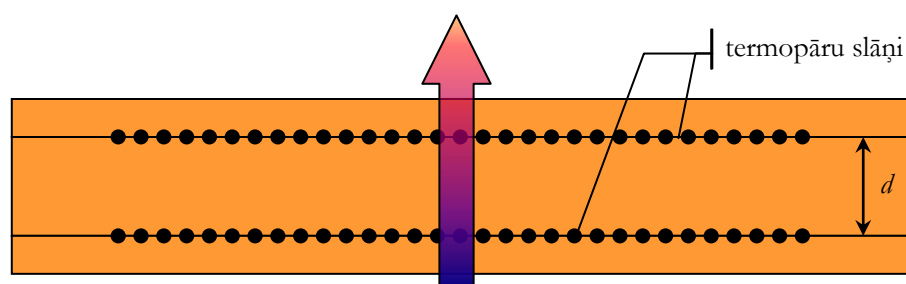
- siltuma caurlaidības ziņā atšķirīgo konstruktīvo elementu skaits ir neliels, piem., pakešu logs ar rāmja veramo un fiksēto daļām;
- atšķirīgo elementu izmēri nav ļoti mazi, kā tas, piem., var būt logam ar spraišļiem;
- elementu U vērtību atšķirības nav ļoti lielas, jo pretējā gadījumā siltuma plūsmas kļūst izteikti telpiskas.

Mērījumos tiek izmantoti dažādu izmēru siltuma plūsmas blīvuma sensori. Piem., loga rāmim izmanto mazu garenisku sensoru ar izmēriem 3×10 cm (attēls 2.62a), bet lielu būvizstrādājumu pētījumos – kvadrātveida ar izmēriem $0,5 \times 0,5$ m (attēls 2.62c). Visbiežāk veiktajos eksperimentos tika lietoti vidējā izmēra termoelektriskie sensori ar izmēru 25×25 cm (attēls 2.62b).

Termoelektriskā tipa plāksņveida plūsmas sensora darbība ir balstīta uz temperatūras mērīšanu ar NiCr-Ni tipa termoelementiem plāna materiāla slāņa ar noteiktu biezumu un siltuma vadītspēju abās pusēs. No šiem datiem pēc sakarības (2.20) var aprēķināt siltuma plūsmas blīvumu q . Temperatūru starpība ir proporcionāla siltuma plūsmas blīvumam, bet, mazā attāluma starp sensoriem dēļ, katra atsevišķa termoelementu pāra spriegumu starpība ir ļoti maza. Tādēļ, lai iegūtu signālu mV diapazonā, šāda plūsmas sensora plāksnītē ievieto vairākus simtus termoelementu pāru (skat. attēlu 2.63). Ievērojot iespējamās neprecizitātes sensoru izgatavošanā, katrs no tiem tiek individuāli kalibrēts.



Attēls 2.62. Termoelektriskā tipa siltuma plūsmu sensori: 3×10 cm (a), 25×25 cm (b), 50×50 cm (c).



Attēls 2.63. Termoelektriskā siltuma plūsmas sensora shematisks šķērsgriezums.

Veiktajos mērījumos tiek lietoti Leibnica Hannoveres Universitātes Elektrotehnoloģiju institūtā izveidotie un kalibrētie termoelektriskā tipa sensori *W-150 S* (Jakovičs *et.al.*, 1997). To kalibrācijas konstante c_T ($\text{W m}^{-2} \text{V}^{-1}$) ir uzdota ar sakarību

$$q = c_T \cdot \tilde{U}, \quad (2.64)$$

kur \tilde{U} (V) ir mērāmais spriegums. Atkarībā no izpildījuma sensoru ar laukumu 25×25 cm kalibrācijas konstantes vērtības parasti mainās intervālā $0,02-0,03 \text{ W m}^{-2} \text{V}^{-1}$. Tādējādi pie praksē raksturīga siltuma plūsmas blīvuma 25 W m^{-2} izejas signāls sasniedz 1 mV – jo lielāka minētā konstante, jo mazāka ir sensora jutība.

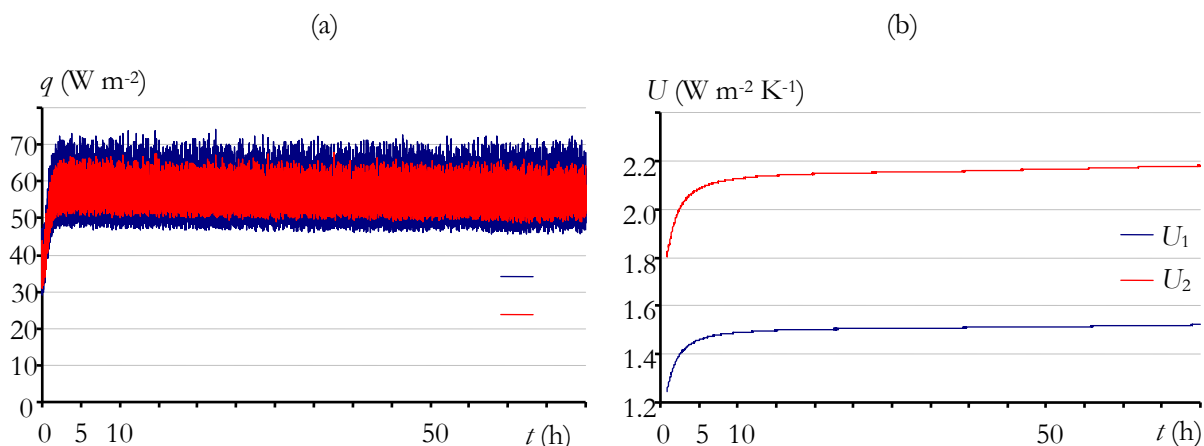
Lai praktiskajos siltuma plūsmas mērījumos reāli nodrošinātu kalibrēšanā uzdoto 5% mērprecizitāti, ir jānodrošina labs sensora termiskais kontakts ar materiāla, no kura izgatavots paraugs (mūris, betons, stikls), virsmu. Praktiski izmēģinot parādīts, ka, līmējot sensoru ar plānu akrila masas slāni uz notīrītas virsmas, ir iespējams panākt labu termisko kontaktu. Svarīgi, lai starp sensoru un materiāla virsmu nebūtu gaisa ieslēgumu (burbuļu), jo tie var būtiski palielināt kopējo termisko pretestību un tādējādi samazināt mērījumu precizitāti. Šādu plāksnes tipa sensoru priekšrocība ir to mazais biezums, elastība un iespēja iegūt vidējotās plūsmas vērtības arī neviendabīgām konstrukcijām, bet trūkums ir to relatīvi mazā jutība.

Temperatūras mērījumiem gan uz materiāla virsmām, gan gaisā ārpus termiskajiem robežslāņiem (attēls 2.53) tiek izmantoti kalibrēti temperatūras mērsensori - četri NiCr-Ni tipa termoelementi, kuri piestiprināti uz 2 cm^2 lielām vara plāksnītēm un kuru nulles punkta kompensācijai izveidots atbilstošs slēgums elektronikas blokā. Arī temperatūras sensoru, kas tiek novietoti uz eksperimentālā objekta virsmām, tiek piestiprināti ar akrila masas palīdzību.

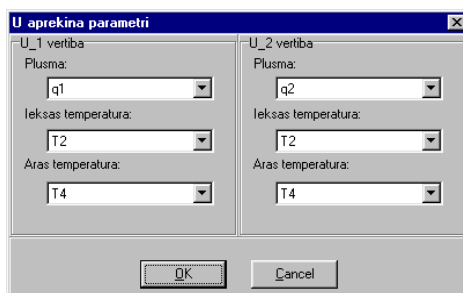
Dati no temperatūras un siltuma plūsmas sensoriem tiek apstrādāti un attēloti teksta un grafiskā režīmā, izmantojot iepriekš minēto programmatūru UMeas (PAIC, 2003). Tā kā apstākļi termokamerā tiek uzturēti kvazistacionāri, tad jau dažu stundu laikā pēc objekta ievietošanas un akrila masas izžūšanas temperatūras režīms stabilizējas un var tikt noteikts siltuma caurlaidības koeficients U (vai arī efektīvā siltuma vadītspēja λ_{ef}). Periodisku temperatūras režīmu izraisītās siltuma plūsmas blīvumu svārstības un siltuma caurlaidības koeficientu U kumulatīvo vērtību stabilizācija laikā vairāku dienu ilgā eksperimentā parādītas attēlā 2.64. Mērsistēmas uzbūve ļauj vienlaicīgi lietot vairākus siltuma plūsmas sensorus, tāpēc programmatūras iestatījumos norāda temperatūras un siltuma plūsmas blīvuma sensorus, kas tiks izmantoti aprēķinos (attēls 2.65).

Sarežģītākās ģeometrijas būvkonstrukcijām ar telpisku siltuma plūsmas raksturu vai sīkiem elementiem, kuru siltuma caurlaidību atsevišķi noteikt nav iespējams, diferenciālās metodes lietojumi ir ierobežoti. Ir nepieciešami siltuma caurlaidības koeficienta mērījumi ar principiāli citas – integrālās

metodes palīdzību, neņemot vērā atsevišķu detaļu ietekmi, bet pētot siltuma zudumus caur visu objektu kopumā.



Attēls 2.64. Tipiskās siltuma plūsmas blīvuma svārstības un ar kumulatīvo metodi aprēķināto siltuma caurlaidību piemēri.



Attēls 2.65. UMeas programmatūras dialoga logs U vērtību aprēķina uzdošanai.

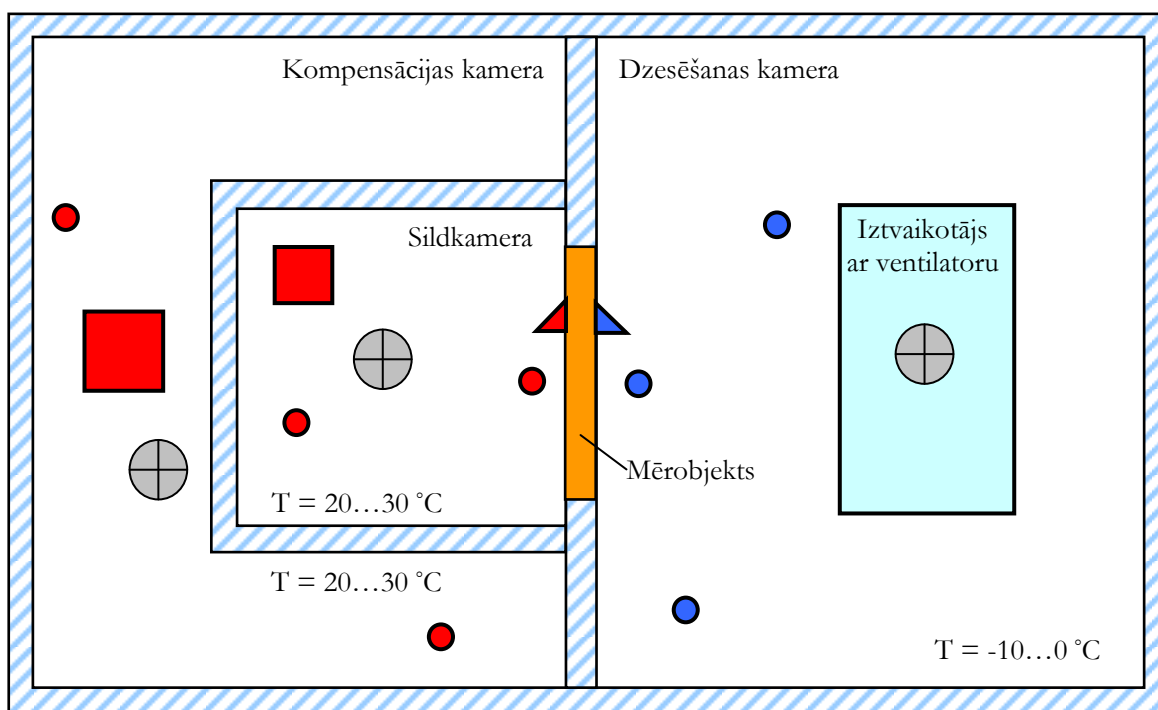
2.2.2.2. Integrālā metode

Cita metode gatavo būvizstrādājumu siltuma caurlaidības mērījumiem laboratorijas apstākļos balstās uz konstantas temperatūru starpības uzturēšanai patērētā siltuma daudzuma reģistrēšanu, kas tiek pievadīts eksperimenta laikā un daļa no kura iziet caur pētāmo objektu ar zināmu laukumu. Tā kā tās pamatā ir kopējā siltuma daudzuma uzskaitē, tad to nosacīti sauc par integrālo metodi. VTPMM laboratorijā izveidotā iekārtā jeb termokamerā ir veidota saskaņā ar standartiem (DIN EN 1098, 1993; LVS EN ISO 8990, 2007) un tajā ir iespējams veikt atbilstošos būvkonstrukciju un logu mērījumus (LVS EN 12412-2, 2003; LVS EN ISO 12567-1, 2010).

Līdzīgas standartizētās mērījumu iekārtas tiek būvētas un lietotas būvkonstrukciju siltuma caurlaidības koeficienta U noteikšanai dažādās testēšanas laboratorijās. Kaut arī pieeja ir detalizēti aprakstīta attiecīgos standartos, bieži iekārtu izmanto arī pētnieciskos nolūkos, t.sk. izmantojamo eksperimentālo un aprēķina pieeju uzlabošanai. Piem., metāla rāmju radīto siltuma tiltu ietekmes un kopējo siltuma caurlaidību mērījumiem un skaitliskai modelēšanai (Rose, Svedsen, 2004), mitruma

un sāluma režīmu kontrolei (Pavlík *et.al.*, 2002) vai gaisa plūsmas homogenizācijas stagnācijas zonu novēršanai kamerās (Curcija, 2000).

Apskatīsim integrālās mērījumu metodes termiskajā kamerā pamatnostādnes un aprēķinu metodiku. Kā minēts iepriekš, sildkambars maskā tiek iestiprināts mēroobjekts (attēli 2.53 un 2.66) un visās kamerās tiek iestādīta konstanta temperatūra, kas tuvināti arī tiek uzturēta (attēls 2.56) – pirms mērījumu uzsākšanas, vairākas stundas darbinot sildīšanas un dzesēšanas sistēmas, panāk kvazistacionārā temperatūras režīma iestāšanos. Temperatūras abās būvizstrādājuma pusēs stabilizācijai nepieciešamais laiks ir lielāks par objekta termiskās laika konstantas τ vērtību, t.i. laika periods ir tāds, lai siltuma impulss izietu caur būvelementu. Tā kā logiem un citām līdzīgām konstrukcijām šāda konstanta ir neliela un sastāda dažas stundas, tad arī režīms iestājas aptuveni pēc tāda paša laika.



Attēls 2.66. Shematiskais termokambars attēlojums. Horizontāls šķēlums. Skats no augšas.

(1 – gaisa temperatūru sensori; 2 – temperatūru sensori uz virsmām, 3 – sildītāji; 4 – ventilatori).

Sasniedzot kvazistacionāro stāvokli, tiek reģistrēts summārais siltuma enerģijas daudzums N , kas izdalās sildkambars visā mērījumu periodā t . Atkarībā no objekta siltuma caurlaidības raksturīgais tā ilgums sastāda 2 – 4 dienas. Tiešo siltuma caurlaidības koeficientu aprēķina, izmantojot sakarības (2.21), (2.31) un (2.59):

$$U_{\text{tiešais}} = \frac{1}{S \cdot \Delta T} \left(\frac{N}{t} - Q_{\text{komp}} - Q_{\text{maska}} \right), \quad (2.65)$$

kur S ir pētāmā objekta laukums (m^2), bet ΔT – vidējā temperatūru starpība uz tā pretējām

virsmām (K). Uzskaitot siltuma daudzumu patēriņu N (kWh) pieņemam, ka viss sildkamerai pievadītais elektroenerģijas daudzums tiek pārvērsts siltuma enerģijā, kuras patēriņa uzskaitē tiek izmantots elektriskais skaitītājs. Lai iegūtu rezultējošo siltuma caurlaidības koeficienta vērtību U_{rez} , iekļaujot termiskos robežslāņus, izmanto formulu (2.61) un siltuma atdeves pretestības saskaņā ar tabulu 2.3. Siltuma apmaiņa ar kompensācijas kameru Q_{komp} un zudumi uz dzesēšanas kameru caur masku Q_{maska} tiek aprēķināti, izmantojot starpsienu materiāla ar biezumu d siltuma vadītspēju λ , ko deklarē ražotājs un kas var tikt noteikta arī eksperimentāli, kā arī ievērojot attiecīgos laukumus un temperatūru starpību:

$$Q = \frac{\lambda}{d} \cdot S \cdot \Delta T. \quad (2.66)$$

Tā kā temperatūras režīms tiek uzturēts tādā veidā, lai temperatūras starpība starp sildkameru un dzesēšanas kameru būtu minimāla (parasti $\Delta T < 1$ °C), tad siltuma zudumi starp šīm kamerām ir mazi, bet tie tomēr tiek ņemti vērā. Ievērojami lielāka temperatūru starpība ($\Delta T = 30 \dots 40$ °C) tiek uzturēta starp sildkameru un dzesēšanas kameru un mērījumu precizitātes nodrošināšanai īpaši svarīgi kontrolēt zudumus tieši caur masku.

Cits svarīgs faktors precīzai U vērtības noteikšanai ir temperatūru starpība ΔT (2.65). Ja testējamais būvizstrādājums sastāv no diviem vai vairākiem elementiem ar atšķirīgu uzbūvi (piem., stikla pakete un rāmis loga konstrukcijas gadījumā) un dažādu siltuma caurlaidības pretestību, tad vidējās temperatūras uz attiecīgo elementu virsmām parasti atšķiras. Tādējādi vidējo virsmu temperatūru noteikšanai uz būvizstrādājuma virsmām:

- ar pietiekamu sensoru skaitu jānosaka vidējā temperatūra \bar{T}_i uz katra no atšķirīgajiem konstrukcijas elementiem,
- jāveic aprēķins, ievērojot šo i -to elementu laukumu proporcijas: $T = \frac{1}{S} \sum_i (\bar{T}_i \cdot S_i)$.

Sensoru rādījumus vidējo vērtības uzdotos laika intervālos, izmantojot multifunkcionālu augstjutīgu mērkarti un iepriekš minēto programmatūru UMeas, tiek attēlotas vizuāli reālajā laikā (attēli 2.57 un 2.58) un noglabātas teksta formāta failā.

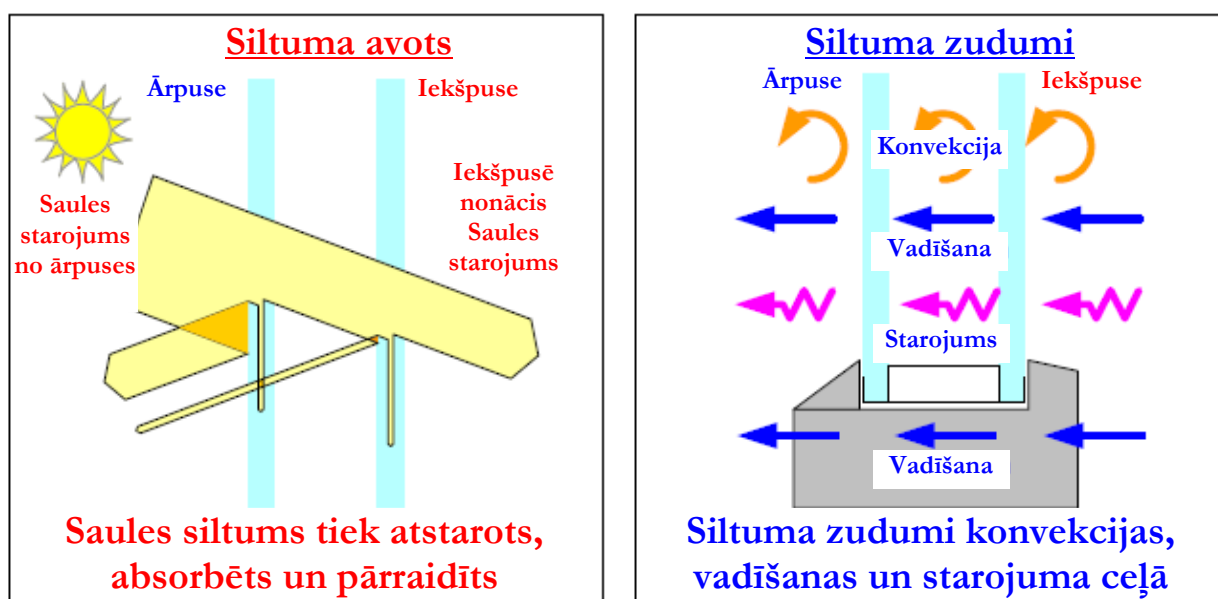
Atšķirībā no iepriekšējā sadaļā apskatītās siltuma plūsmas sensoru metodes, kad gan temperatūras, gan siltuma plūsmas blīvuma sensori ir kalibrēti, lietojot integrālo mērījumu metodi, ir nepieciešama papildus kalibrācija. Šim nolūkam ir veikti mērījumi materiāliem ar zināmu siltuma caurlaidību, papildus tiek novērtēta arī materiāla, kas tiek lietots kameru starpsienās, siltuma vadītspēja, lietojot siltuma plūsmas sensorus un attiecīgo diferenciālo metodi.

2.2.2.3. Raksturīgie mērījumu piemēri

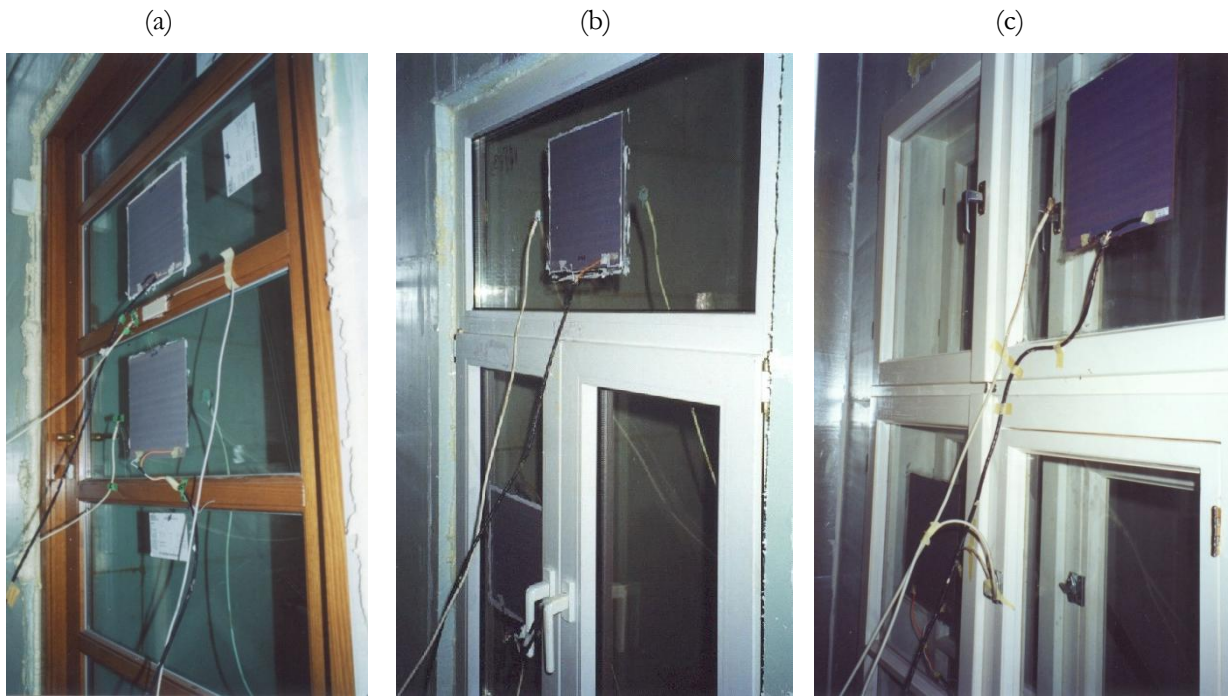
VTPMM laboratorijā izveidotajā eksperimentālajā iekārtā kopš tās ekspluatācijas uzsākšanas 90-to gadu otrajā pusē un pēc tās modernizācijas 2004. gadā galvenokārt ir testēta heterogēnu konstrukciju – logu un stikla pakešu siltuma caurlaidība saskaņā ar iepriekš minēto standartu (LVS EN ISO 12567-1, 2010) pamatā lietojot integrālo pieeju. Siltuma pārnese veidi, kuru rezultējošā ietekme uz caurspīdīgo būvelementu kopējo siltuma caurlaidību tiek noteikta ar integrālās metodes palīdzību, shematiski parādīti attēlā 2.67.

Praktiski visos veiktajos eksperimentos paralēli tiek lietota arī diferenciālā siltuma plūsmu sensoru metode rezultātu kontrolei. Stiklotās durvis, pakešlogs ar plastmasas (PVC) rāmi un vienkāršs koka dubultlogs, kas ir sagatavoti mērījumiem termiskajā kamerā ar piestiprinātiem siltuma plūsmas blīvuma un temperatūras sensoriem parādīti attēlā 2.68. Tabulā 2.6. apkopotas dažu raksturīgo stikla pakešu U vērtības, kas tika iegūtas mērījumos termiskajā kamerā.

Kā redzams no iegūtiem rezultātiem, pēdējos gados Latvijā lietojamo pakešu logu siltumizolējošās īpašības mainās plašā diapazonā – no 0,65 līdz 2,8 $W\ m^{-2}\cdot K^{-1}$ atkarībā no attāluma starp rūtīm, to skaita, paketes gāzes pildījuma un selektīviem stikla virsmas pārklājumiem. Attālums starp rūtīm stikla paketē parasti tiek izvēlēts tāds, lai rezultējošā konvekcijas un siltuma vadīšanas procesu ietekme būtu minimāla (skat. att. 2.50), inertās gāzes pildījums nodrošina lēnāku plūsmu starp stikliem un mazāku siltuma pārnesei konvekcijas ceļā, bet dažāda tipa stikla virsmas pārklājumi samazina starojuma ceļā pārnests enerģijas daudzumu.



Attēls 2.67. Siltuma pārnese veidi caur stikla paketi.



Attēls 2.68. Termiskajā kamerā ievietotas stiklotās durvis (a), logs ar stikla paketi un PVC rāmi (b) un vienkāršs dubultlogs ar koka rāmi (c).

Tabula 2.6. Termiskajā kamerā noteiktās dažādu konstrukciju stikla pakešu U vērtības.

Rūšu skaits	Selektīvs pārklājums	Attālums starp rūtīm (mm)	Pildījums	U ($\text{W m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$)
2	nav	12	nav	2,8
2	nav	15	kriptons	2,3
3	nav	10/12	gaiss	1,9
2	Planitherm	12	gaiss	1,7
2	Planitherm	12	argons	1,4
2	Planitherm	12	kriptons	1,2
3	Planitherm	12/150	kriptons/gaiss	0,9
3	Optiterm×2	12/12	argons	0,65

Rezultāti uzskatāmi parāda, ka stiklu ar speciāliem selektīviem pārklājumiem, kas būtiski samazina to virsmu emisijas koeficientu ϵ , lietojumi pakešu izgatavošanā ļauj vairākas reizes samazināt to siltuma caurlaidību. Šādu pārklājumu uzdevums ir aizturēt siltuma zudumus starojuma ceļā no iekštelpas, tajā pašā laikā ļaujot Saules starojumam nokļūt telpā (skat. attēlu 2.67), vairāk par dažādu stikloto virsmu pārklājumu ietekmi uz logu Saules starojuma caurlaidību skat. sadaļā 2.4.

Lietojot trīs stiklu konstrukcijas ar parasto stiklu var panākt līdzīgu siltuma caurlaidības samazinājumu kā divstiklu paketēs ar selektīvo pārklājumu. Savukārt, trīs stiklu pakešu trūkums ir relatīvi lielāks svārs. Kombinējot stiklus ar speciāliem mazas emisijas pārklājumiem (piem., ar atomāra mēroga sudraba slāni) trīs stiklu paketē ar kriptona pildījumu teorētiski iespējams sasniegt U vērtības mazākas par $0,5 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ (Interpane Glas Industrie AG, 2002). Veikt stikla paketes

optimizāciju, nosakot labāko risinājuma no siluma caurlaidības viedokļa var arī veidojot un analizējot to matemātiskos modeļus (Krievāns, 2000) vai izmantojot specializētās šim mērķim paredzētās programmas, kas ļauj lietotājam detalizēti uzdod ne tikai loga ģeometriju, bet arī izvēlēties dažādu veidu rāmjus, stikla paketes, to pildījumus un pārklājumus (Berkeley lab., 2001).

Rezultējošā siltuma pretestība ir atkarīga arī no rāmja materiāla, tā uzbūves un konstruktīvām īpatnībām, un tā siltuma vadītspējas pretestība parasti ir mazāka nekā ar inerto gāzi pildītās stikla paketei ar selektīvo pārklājumu. Tā kā veiktajos eksperimentos pamatā tika pētīti liela izmēra logi vai atsevišķas stikla paketes, tad rāmja daļas ietekmi uz rezultējošo siltuma caurlaidību atsevišķi neapskatīsim.

Kaut arī inertās gāzes (argons, kriptons, ksenons) koncentrācija stikla paketē saskaņā ar standartu (LVS EN 1279-3, 2003) var būt robežās no 90%+10% līdz 90%-5%, tā laika gaitā var samazināties un izraisīt palielinātus siltuma zudumus. Tāpēc pakešu siltuma izolējošo īpašību mērījumus ir lietderīgi veikt ne tikai pirms to montāžas, bet arī hermētiskuma un gāzes satura tajā noteikšanai loga ekspluatācijas laikā – efektīva metode ir objekta siltuma caurlaidības koeficienta mērījumi eksistējošās ēkās, kas ir apskatīta sadaļā 2.2.3. Tā ļauj noteikt gāzes koncentrāciju un novērtēt paketes nomaiņas nepieciešamību gadījumā, ja hermētiskums ir bijis nepietiekams un inertās gāzes koncentrācija ir būtiski samazinājusies.

Kā alternatīvu pieeju tiešiem siltuma caurlaidības mērījumiem var lietot arī tehniku ultraskaņas ātruma noteikšanai stikla paketēs, kas ļauj noteikt koeficientu U , analizējot gāzes koncentrāciju (Butkus *et.al.*, 2004). Pie tam mērījumi var tikt veikti kā no abām, tā arī no vienas būvelementa puses, kas atvieglo eksperimentālo mērījumu veikšanu augstceltnēs vai liela laukuma stiklotām virsmām, kur vienlaicīga mēraparatūras novietošana pretējās pusēs ir praktiski neiespējama. Tomēr šīs metodes lietojumiem ir būtiski ierobežojumi daudzu precizitāti ietekmējošo faktoru dēļ, piem., argona/gaisa maisījumam skaņas ātruma atkarība no koncentrācijas ir neliela, kas palielina mērījumu kļūdu. Cits veids, kas ļauj precīzi noteikt stikla paketes gāzes pildījuma saturu, ir nelielas atveres stiklā izveide un sastāva analīze, bet šāda veida pārbaudes ir sagraujošas – pakete pēc tam nav vairs izmantojama.

Atbilstoši Latvijas Būvnormatīva LBN 002-01 prasībām logu, durvju un stikloto sienu (dzīvojamām mājām pie 19 °C lielas temperatūru starpības) normatīvā siltuma caurlaidības koeficienta vērtība ir 1,8 W m⁻² K⁻¹, bet maksimāli pieļaujamā sastāda 2,7 W m⁻² K⁻¹. Šādas vērtības iespējams viegli sasniegt ar esošām ražošanas tehnoloģijām, ko apliecina arī vairāki desmiti veikto mērījumu Latvijas tirgū piedāvāto logu konstrukciju paraugiem. Tomēr jāatzīmē, ka citās Eiropas valstīs ar līdzīgiem un pat maigākiem klimatiskiem apstākļiem prasības logu siltuma caurlaidībai, ir stingrākas, kas nozīmē arī lielāku enerģijas ekonomiju. Tā, maksimālā U koeficienta vērtība logiem jauncelāmās ēkās (BPIE, 2011) tiek noteikta 1,6 W m⁻² K⁻¹ Ungārijā, Norvēģijā, Slovēnijā un Lietuvā,

1,4 W m⁻² K⁻¹ – Austrijā un Igaunijā, 1,3 W m⁻² K⁻¹ – Rumānijā un Šveicē, bet Somijā tā nevar pārsniegt 1,0 W m⁻² K⁻¹.

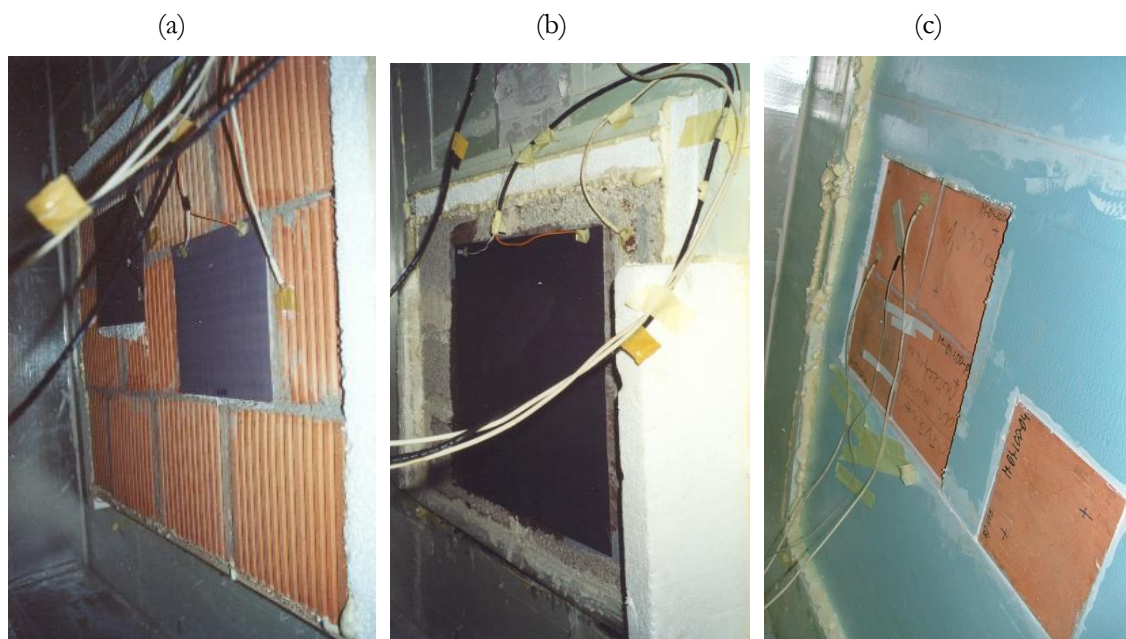
Pateicoties loga heterogēnai konstrukcijai, kas sastāv no daļām ar atšķirīgām siltuma izolējošām īpašībām, siltuma plūsma caur konstrukciju ir izteikti telpiska un mērījumos pārsvarā tiek lietota integrālā pieeja. Paralēli integrālai metodei lietotā siltuma plūsmas sensoru pieeja dod atšķirīgus kopējās siltuma caurlaidības koeficienta rezultātus atkarībā no sensoru novietojuma uz stikla paketes un rāmja un ir lietojama tikai atsevišķu loga daļu lokālās siltuma plūsmas vērtības noteikšanai un galvenās metodes rezultātu kontrolei. Tā, siltuma plūsmu mērījumi tipiska PVC trīs kameru loga vērtnei un rāmim, kā bija sagaidāms, parādīja, ka vērtnei siltuma caurlaidība vidusdaļā par 4%, bet stūrī pat par 8% pārsniedza rāmja (fiksētās daļas) vidējo siltuma caurlaidību. Savukārt, U vērtība rāmja stūrī ir par 6% lielāka nekā tā vidusdaļā - to nosaka rāmja salaiduma vietas konstruktīvās īpatnības. Tika salīdzināti arī rezultāti, kas vienam un tam pašam būvelementam iegūti lietojot dažāda tipa (biezuma) siltuma plūsmu mērsensorus, bet tie kļūdas robežās neatšķirās.

Termiskajā kamerā tika veikti eksperimentālie siltuma caurlaidības mērījumi arī dažādu veidu gataviem ārējo būvelementiem. Piem., dažāda sastāva dobiem keramzītbetona un putu betona blokiem, ievērojot arī šuvju starp tiem aizdares atšķirīgo siltuma pretestību, kas, tādējādi, ļāva noteikt siltuma caurlaidības koeficientu U un atbilstošo efektīvo siltuma vadītspēju λ_{ef} (2.34) no tiem mūrētajai sienai. Tā kā siltuma pretestības īpašības pateicoties šuvju vietām šādai sienai ir izteikti nehomogēnas, tad tika lietota integrālā mērmetodika, kurai paralēli tika izmantoti arī dažādu izmēru plūsmas sensori (attēls 2.69). Bloku un ķieģeļu nelīdzena virsma apgrūtināja sensoru nostiprināšanu un labāka termiskā kontakta nodrošināšanai uz sienas virsmas tika uzklāta akrila masas kārtā, kas kalpoja kā izlīdzinošs un vienlaicīgi adhezīvs slānis, bet tā nelielais biezums un relatīvi maza siltuma pretestība manāmi neietekmēja rezultātu precizitāti.

Svarīgs rezultāts, kas tika iegūts keramzītbetona bloku un ķieģeļu mērījumos ir atšķirīgas siltuma izolējošo īpašību vērtības atkarībā no laika perioda pēc to iemūrēšanas standā. Tā, veicot mērījumus dažas dienas pēc to izgatavošanas, rezultējošā siltuma caurlaidības koeficienta vērtība sasniedza 2,0 W m⁻² K⁻¹, bet pēc vairākām nedēļām – jau tikai 1,6 W m⁻² K⁻¹. Tas ir izskaidrojams ar mitruma satura samazināšanos būvkonstrukcijā un mūrjavas izžūšanu. Savukārt dobiem KERATERM ķieģeļiem, kuru sastāvā ir daudz gaisa ieslēgumu (skat. attēlu 2.61), siltuma izolējošās īpašības ir ievērojami labākas un siltuma caurlaidība jāvai žūstot mainās maz, pēc izžūšanas sasniedzot 0,7 W m⁻² K⁻¹.

Siltuma caurlaidības un efektīvās siltuma vadīšanas koeficientu vērtības laboratorijā testētiem KERATERM blokiem (attēls 2.69a), keramzītbetona blokiem (attēls 2.69b) un mikroporainām (ar gāzes ieslēgumiem) LODE keramiskā materiāla ~2 cm biežām plāksnēm (attēls 2.69c) apkopotas tabulā 2.6. Siltuma vadīšanas koeficienta aprēķina precizitāti 2 cm plāksņu gadījumā būtiski

samazināja paraugu nevienmērīgais biežums – maksimālā biežumu starpība dažādos parauga stūros sasniedza pat 20%, tāpēc tika veikti vairāki atkārtoti eksperimenti gan vienai plāksnei, gan arī no tām mūrētai sienai (attēls 2.69c). Paralēli veiktie mērījumi ar siltuma plūsmas sensoriem visos eksperimentos notika paraugu vidusdaļā, ja tie ir homogēni, vai arī dažādās vietās, ja tika pētīta no tiek veidotā siena, kā gadījumā ar KERATERM blokiem (attēls 2.69a) – pašam būvelementam un sienai fragmentam iekļaujot šuvju vietas.



Attēls 2.69. Dobto KERATERM bloku (a), keramzītbetona bloku (b) un LODE keramikas plāksņu (c) siltuma caurlaidības mērījumi ar 25×25, 50×50 un 3×10 cm siltuma plūsmas sensoriem attiecīgi.

Kā redzams no tabulā 2.7 apkopotiem eksperimentu rezultātiem, dobtie un porainie materiāli nodrošina mazākus siltuma zudumus, ko pamatā nosaka gaisa ieslēgumi ar palielinātu siltuma pretestību. Dobto ķieģeļu rezultējošo λ_{ef} ietekmē vairāki faktori, kas nosaka siltuma pārnesi (Čertoks, 1999):

- drumstalas siltuma vadītspēja, kas ir atkarīga no blīvuma (porainības) un tiek uzlabota ar speciāliem piejaukumiem vai poru veidotājiem, bet tas, savukārt, samazina bloku stiprību;
- siltuma vadītspējas samazināšana, optimizējot siltuma izplatīšanas ceļu ķieģelī (palielinot kopējo makroskopisko tukšumu daudzumu, samazinot starpsienu biežumu, optimizējot dobumu formu);
- ķieģeļu mūra javas palielināta siltuma pretestība un šuves forma ar iedobumiem.

Mūrjavas ietekme uz rezultējošo siltuma caurlaidību apkopota tabulā 2.8 (Čertoks, 1999). Kā viegli redzēt, vienāda biežuma materiālam atsevišķos gadījumos starpība var sasniegt 50%, tāpēc javas izvēle var izrādīties būtiskāka nekā paša celtniecības materiāla siltumfizikālās īpašības.

Tabula 2.7. Dažādu materiālu eksperimentāli noteikto siltumizolācijas īpašību salīdzinājums.

Paraugs	Biezums, cm	$U, \text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$	$\lambda_{\text{ef}}, \text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
KERATERM bloki	51	0,7	0,36
Keramzītbetona bloki (mitri)	45	2,0	0,90
Keramzītbetona bloki (sausī)	45	1,6	0,72
LODE 2 cm porainā keramiskā materiāla plāksnes	2	8,5	0,17

Tabula 2.8. Javas nozīme sienas siltumizolācijai.

Ārsienas veids	Līvānu celtniecības ķieģelis		Keramzītbetona bloki	
	Sienas biezums, cm	$U, \text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$	Sienas biezums, cm	$U, \text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$
ar cementa javu	38	0,96	20	1,16
ar vieglo javu	38	0,58	20	0,76
ar cementa javu	51	0,79	40	0,64
ar vieglo javu	51	0,43	40	0,41

Kaut arī termiskajā kamerā netiek uzturēti tādi paši apstākļi kā dabā un vispārīgā gadījumā siltuma atdeves koeficienti α nav dabiski, tomēr variējot to vērtības, var salīdzināt un analizēt minēto lielumu ietekmi uz rezultējošo siltuma caurlaidības koeficienta vērtību. Tā, pieņemot pēc kārtas mazāko un lielāko no standartizētajām α vērtībām (tabula 2.3), kas atbilst iekštelpu un ārgaisa konvekcijas apstākļiem, iegūto gala rezultātu izkliede būvizstrādājumam ar $U_{\text{tiešais}} = 2,8 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ pārsniedz 25%. Taču gadījumā, ja siltuma caurlaidības koeficienta vērtība ir maza, piem., ($U_{\text{tiešais}} = 0,4 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$), rezultātu izkliede atkarībā no α vērtībām ir tikai 5%.

Integrālās un diferenciālās metodes lietojumi izveidotajā termiskajā kamerā ļauj veikt dažāda veida eksperimentālos un pētnieciskos siltuma caurlaidības mērījumus gatavām būvkonstrukcijām un atsevišķiem materiāliem jebkurā laikā neatkarīgi no klimatiskajiem un citiem blakus faktoriem, kas parasti nosaka reālos apstākļos veicamo mērījumu pielietojšanas iespējas. Tomēr gadījumā, ja ir jāveic eksperimenti jau uzceltajās ēkās un tās būvkonstrukciju vai tās daļu siltuma izolējošās īpašības nevar tikt noteiktas laboratorijas apstākļos, ir nepieciešami mērījumi reālos ēku ekspluatācijas apstākļos, jeb t.s. „lauka mērījumi” (angļu literatūrā – *field measurements* vai *in-situ*), kas tiek apskatīti nākamajā sadaļā.

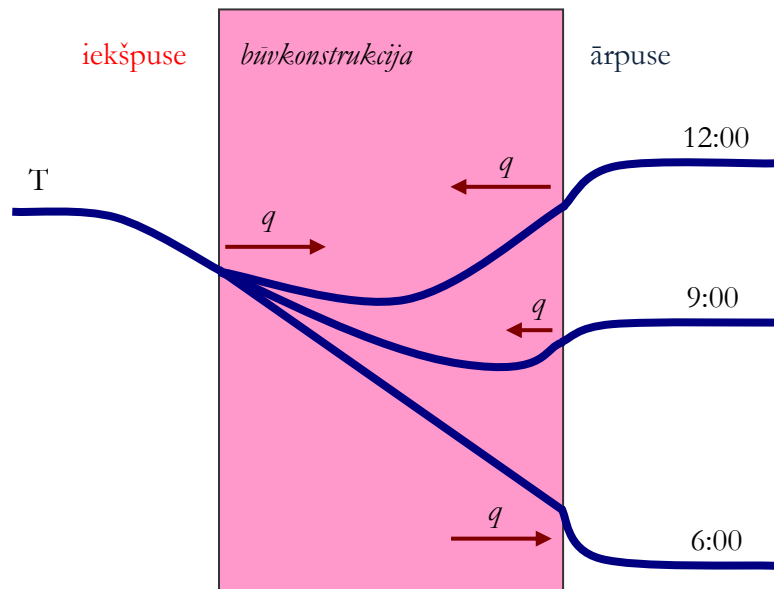
2.2.3. Mērījumi nestacionāros apstākļos ekspluatācijā esošās ēkās

Eksperimentālos pētījumos praksē ir pārbaudīts, ka ēku būvkonstrukciju izmērītās siltuma caurlaidības koeficienta vērtības var būtiski atšķirties no analītiski aprēķinātām, ko var noteikt, zinot materiālu siltuma vadītspējas un normētos siltuma atdeves koeficientus saskaņā ar (2.24). Bieži vien

šādi aprēķini vispār nav iespējami, jo nav zināma būvkonstrukciju uzbūve vai to sastāvs. Papildus tam, laikā mainoties būvkonstrukciju materiālu īpašībām (piem., iesūcoties tajos mitrumam), mainās arī to siltuma vadītspēja. Tāpēc ir nepieciešami ēku norobežojošo konstrukciju mērījumi reālos ekspluatācijas apstākļos, ko veic, lietojot speciālu pieeju iegūto datu pēcaprādei un siltuma caurlaidības koeficienta aprēķinam. Šāda ir nestacionāros apstākļos veikto mērījumu minimizācijas metodika, kas ir izstrādāta VTPMM laboratorijā un kura ļauj aprēķināt būvkonstrukciju siltuma caurlaidības koeficientu U , veicot eksperimentā noteiktās un uz matemātiskās modelēšanas bāzes skaitliski aprēķinātās siltuma plūsmu starpības minimizāciju.

Iemesls, kāpēc tika attīstīta speciālā pieeja datu aprādei, ir procesa nestacionāra daba un eksperimenta laika ierobežojums (sevišķi veicot mērījumus dzīvojamās telpās), kas neļauj izmantot vienkāršo vidējošanas pieeju. Ja gaisa temperatūra pie būvkonstrukcijas virsmas ir laikā mainīga, tad laikā mainās arī siltuma plūsmas caur konstrukciju. Pieaugot temperatūrai vienā pusē pakāpeniski pieaugs arī materiāla temperatūra un pēc zināma laika šīs temperatūras izmaiņas iespaidu varēs konstatēt arī uz pretējās virsmas, mainīsies arī siltuma plūsma caur šo virsmu. Līdz ar to nestacionārā procesā ir iespējamās situācijas, kad siltuma plūsmas uz materiāla vai konstrukcijas virsmām ir atšķirīgas un pat pretēji vērstas materiālam sasilstot vai atdziestot (attēls 2.70). Šī procesa ātrums ir būtiski atkarīgs no materiāla temperatūras vadītspējas a (2.8) un to raksturo ar termiskās inerces laiku τ (h), kas tiks apskatīta turpmāk. Tādējādi, lai tuvināti noteiktu siltuma caurlaidības koeficienta vērtību U nestacionāros temperatūras apstākļos, mērījumu kopējam periodam $t \gg \tau$, bet laika intervālam starp atsevišķiem mērījumiem $\Delta t \ll \tau$. Līdz ar to mērījumiem konstrukcijās ar mazu temperatūras vadītspēju dabiskos temperatūru maiņas apstākļos var būt nepieciešamas vairāku dienu un pat nedēļu ilgs mērperiods. Tomēr, ja objekts var tikt transportēts un pētīts laboratorijas apstākļos ar maksimāli stacionāru temperatūru režīmu, mērījumiem nepieciešamais periods var tikt ievērojami samazināts, izmantojot iepriekšējās sadaļās aprakstītās “karstās plates” iekārtu vai termisko kameru.

Siltuma caurlaidības eksperimentālie pētījumi ekspluatācijā esošās ēkās VTPMM laboratorijā tika aizsākti kā pirmie pētījumi energoefektivitātes jomā 90-to gadu vidū. Sākotnēji mērījumi nestacionāros apstākļos tika veikti ilgāku laiku ekspluatācijā esošās ēkās veco norobežojošo konstrukciju stāvokļa novērtējumam, kas ļāva uzkrāt ievērojamu pieredzi šāda veida mērījumos un, kas ir būtiski, izveidot ievērojamu tipveida dzīvojamo māju konstrukciju siltuma caurlaidības koeficientu datu bāzi. Pēdējos gados eksperimenti tika veikti arī no jauna uzceltās ēkās. Laika gaitā lietotā mēraparatūra un programmnodrošinājums tika attīstīti un uzlaboti. Kā pirmo publikāciju šajā jomā var minēt (Jakovičs *et.al.*, 1997), kā vienu no pēdējā laika – (Gendelis, Jakovičs, 2005).



Attēls 2.70. Nestacionāra siltuma apmaiņas procesa shematisks attēlojums, mainoties temperatūrai vienā konstrukcijas pusē.

Patlaban laboratorijā ir izveidota un plaši tiek lietota viena siltuma caurlaidības pētījumiem paredzētā mērsistēma, vēl trīs analogiskās mērsistēmas tika izgatavotas un nodotas Latvijas Lauksaimniecības universitātes un Lietuvas Lauksaimniecības universitātes pētnieciskām vajadzībām. Ar darba autora piedalīšanos ir aprobēta un kalibrēta jaunākās paaudzes mērsistēma ar distances (bezvadu) sensoru pieslēguma veidu (VTPMML, 2007). Tāpat paralēli tiek lietota arī rūpnieciski izgatavota autonoma universālā ierīce. Abas sistēmas tiek izmantotas eksperimentālo datu uzkrāšanai, bet to pēcapstrādei siltuma caurlaidības koeficienta iegūšanai tiek izmantota oriģinālā metodika un atbilstošais programmnodrošinājums.

2.2.3.1. Metodes apraksts

Saskaņā ar (2.25) un (2.31), stacionārā viendimensionālā siltumapmaiņas procesā būvkonstrukcijas rezultējošo siltuma caurlaidības koeficienta vērtību U ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$) var aprēķināt, lietojot siltuma plūsmas blīvuma q (W m^{-2}) un gaisa temperatūru starpību ΔT (K) tās abās pusēs ārpus termiskajiem robežslāņiem (tādējādi iekļaujot tos): $U = q/\Delta T$. Kaut arī daudzos gadījumos lokālais siltumapmaiņas process pietiekama izmēra necaurspīdīgās būvkonstrukcijās var tikt uzskatīts var viendimensionālu, dabiskos apstākļos tā raksturs parasti ir nestacionārs mainīgo ārējo meteoroloģisko apstākļu dēļ un tāpēc U aprēķinam momentānās siltuma plūsmas un temperatūru vērtības nevar izmantot.

Kā vienu no vienkāršotām pieejām U aprēķinam var minēt t.s. kumulatīvo metodi (2.62), kas tiek izmantota arī iepriekš aprakstītajos kvazistacionāros mērījumos termiskajā kamerā. Lietojot šo

pieeju, siltuma caurlaidības koeficienta aktuālā vērtība pēc noteikta mērperioda tiek aprēķināta no visām līdz šim brīdim reģistrētajām n vērtībām un tās rezultāti var būt apmierinoši relatīvi nelielu temperatūras izmaiņu vai vairāku nedēļu ilgu mērperiodu gadījumā (Doran, 2000; ISO 9869,1994).

Kumulatīvās metodes pielietojums reālos klimatiskos apstākļos parādīja, ka mērījumiem nepieciešams vairāku nedēļu ilgs mērījumu periods un U vērtības konverģence ievērojami pasliktinās, samazinoties būvkonstrukcijas siltuma caurlaidībai un pieaugot tās siltumietilpībai. Gadījumā, ja mērījumos temperatūru starpība ir maza vai siltuma plūsma maina zīmi, vidējošanas metodes lietojumi pat ilgākā laika periodā nedod korektu rezultātu. VTPMML laboratorijā ir izstrādāta principiāli cita iegūto siltuma plūsmas blīvuma un temperatūru eksperimentālo datu apstrādes un U koeficienta aprēķina metodika, kas ļauj eksperimentāli noteikt ēku norobežojošo konstrukciju siltuma caurlaidību pietiekami īsā laika periodā ēku reālos ekspluatācijas apstākļos (Jakovičs *et.al.*, 1997; Krievāns, 2000).

Attīstītās metodes pamatā ir pieņēmums, ka pētāmās būvkonstrukcijas biezums ir daudz mazāks par pārējām divām dimensijām. Tāpēc fizikālo parametru (piemēram, temperatūras) izmaiņas perpendikulāri virsmai ir daudz lielākas nekā citos virzienos un tuvināti var pieņemt, ka tajos fizikālie parametri ir konstanti. Izejot no šiem apsvērumiem, tiek risināta siltuma caurlaidības koeficienta noteikšanas problēma vienas dimensijas gadījumā, kā izejas dati kalpo siltuma plūsmas blīvums caur būvkonstrukciju no tā siltākās virsmas un temperatūru starpība. Problēmas risinājumus ir siltuma plūsmas kā funkcijas no temperatūru starpības laikā atrašana, kas ir atkarīga arī no kādiem papildparametriem, ar kuru palīdzību var iegūt koeficientu U . Tādējādi, minimizējot teorētiski aprēķinātās un eksperimentāli noteiktās siltuma plūsmas starpību pēc šiem parametriem, var tuvināti atrast šo parametru un siltuma caurlaidības koeficienta faktiskās vērtības.

Apskatīsim nestacionāru viendimensijas siltumvadīšanas vienādojumu homogēnā vidē:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (2.67)$$

kur $t \in [0, +\infty)$ – laiks, $x \in [0, l]$ – koordināte, $T = T(x, t)$ – temperatūra pētāmā apgabala iekšienē. Robežnosacījumus uzdod, izmantojot temperatūru mērījumu eksperimentālos datus abās sienas pusēs mērījumu laika intervālā:

$$T(0, t) = T_1(t) \text{ un } T(l, t) = T_2(t). \quad (2.68)$$

Sākuma nosacījumus uzdod vispārīgā veidā, neprecizējot funkcijas $f(x)$ izskatu:

$$T(x, 0) = f(x). \quad (2.69)$$

Apzīmēsim $T(0, 0) = T_1(0)$ un $T(l, 0) = T_2(0)$.

Lai atrisinātu uzstādīto problēmu, vispirms transformējam vienādojumu (2.67) ar Laplasa transformāciju metodes (Riekstiņš, 1964) palīdzību. Apzīmējam temperatūras attēlu ar $\bar{T}(x, p)$ un iegūstam šādus attēlus:

$$\begin{aligned} L[T(x, t)] &= \int_0^{\infty} T(x, t) e^{-pt} dt = \bar{T}(x, p) \\ L\left[\frac{\partial T(x, t)}{\partial x}\right] &= \frac{d\bar{T}(x, p)}{dx} \\ L\left[\frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2}\right] &= \frac{d^2\bar{T}(x, p)}{dx^2} \\ L\left[\frac{\partial T(x, t)}{\partial t}\right] &= -T(x, 0) + p\bar{T}(x, p) \end{aligned} \quad (2.70)$$

Tagad transformēto siltumvadišanas vienādojumu ar temperatūras sākuma nosacījumu (2.69) var pierakstīt šādā formā:

$$a^2 \frac{d^2\bar{T}(x, p)}{dx^2} - p\bar{T}(x, p) = -f(x). \quad (2.71)$$

Atradīsim šī otrās kārtas nehomogēnā diferenciālvienādojuma vispārīgo atrisinājumu. Vispirms atradīsim atbilstošā homogēnā diferenciālvienādojuma $\frac{d^2\bar{T}}{dx^2} - \frac{p}{a^2}\bar{T} = 0$ vispārīgo atrisinājumu – to meklēsim kā funkciju $\bar{T} = e^{kx}$ lineāru kombināciju, tad raksturīgais vienādojums būs $k^2 - p/a^2 = 0$, un saknes būs: $k_{1,2} = \pm 1/a\sqrt{p}$. Tādējādi iegūstam divus atrisinājumus, kas ir lineāri neatkarīgi, un tāpēc homogēnā diferenciālvienādojuma vispārīgo atrisinājumu varam uzrakstīt šādā formā:

$$\bar{T}_h(x, p) = C_1 \exp\left(\frac{\sqrt{p}}{a}x\right) + C_2 \exp\left(-\frac{\sqrt{p}}{a}x\right) = C_1\bar{T}_{1k} + C_2\bar{T}_{2k}, \quad (2.72)$$

kur C_1 un C_2 pagaidām nenoteiktas konstantes. Atradīsim tagad nehomogēnā vienādojuma (2.71) vispārīgo atrisinājumu

$$\bar{T}(x, p) = \bar{T}_h(x, p) + \bar{T}^*(x, p), \quad (2.73)$$

kur $\bar{T}^*(x, p)$ ir nehomogēnā vienādojuma partikulārais atrisinājums. Atradīsim to, lietojot Lagranža nenoteikto koeficientu metodi $\bar{T}^*(x, p) = C_1(x)\bar{T}_{k1} + C_2(x)\bar{T}_{k2}$. Iegūstam šādas konstanšu C_1, C_2 vērtības:

$$\begin{cases} C_1(x) = -\int_0^x \frac{f(\zeta)}{2a\sqrt{p}} \exp\left(-\frac{\sqrt{p}}{a}\zeta\right) d\zeta \\ C_2(x) = \int_0^x \frac{f(\zeta)}{2a\sqrt{p}} \exp\left(\frac{\sqrt{p}}{a}\zeta\right) d\zeta \end{cases} \quad (2.74)$$

Tālāk, pēc algebriskiem pārveidojumiem, no (2.73) iegūstam šādu temperatūras attēla izteiksmi:

$$\bar{T}_h(x, p) = C_1 e^{\frac{\sqrt{p}}{a}x} + C_2 e^{-\frac{\sqrt{p}}{a}x} + \frac{1}{2a\sqrt{p}} \int_0^x e^{-\frac{\sqrt{p}}{a}(x-\zeta)} f(\zeta) d\zeta + \frac{1}{2a\sqrt{p}} \int_x^l e^{-\frac{\sqrt{p}}{a}(\zeta-x)} f(\zeta) d\zeta. \quad (2.75)$$

Konstanšu C_1, C_2 noteikšanai izmantojam transformētus temperatūru robežnosacījumus:

$$\begin{cases} L[T_1(t)] = \bar{T}_1(p) = \bar{T}(0, p) \\ L[T_2(t)] = \bar{T}_2(p) = \bar{T}(l, p) \end{cases} \quad (2.76)$$

Izmantojot (2.75) un (2.76), iegūsim, šādas konstanšu C_1 un C_2 vērtības:

$$\begin{cases} C_1 = \frac{\bar{T}_1 e^{-\frac{\sqrt{p}}{a}l} - \bar{T}_2 - \frac{1}{2a\sqrt{p}} \int_0^l e^{-\frac{\sqrt{p}}{a}(l-\zeta)} f(\zeta) d\zeta + \frac{1}{2a\sqrt{p}} \int_0^l e^{-\frac{\sqrt{p}}{a}(l+\zeta)} f(\zeta) d\zeta}{\exp\left(-\frac{\sqrt{p}}{a}l\right) - \exp\left(\frac{\sqrt{p}}{a}l\right)} \\ C_2 = \frac{\bar{T}_2 - \bar{T}_1 e^{\frac{\sqrt{p}}{a}l} + \frac{1}{2a\sqrt{p}} \int_0^l e^{\frac{\sqrt{p}}{a}(l-\zeta)} f(\zeta) d\zeta - \frac{1}{2a\sqrt{p}} \int_0^l e^{-\frac{\sqrt{p}}{a}(l-\zeta)} f(\zeta) d\zeta}{\exp\left(-\frac{\sqrt{p}}{a}l\right) - \exp\left(\frac{\sqrt{p}}{a}l\right)} \end{cases} \quad (2.77)$$

Novērtēsim sākuma nosacījumu ietekmi laikā uz temperatūru sadalījumu pētāmajā apgabalā.

Sākumā problēmu (2.67)-(2.69) sadalīsim divās pamatproblēmās:

$$\begin{cases} \frac{\partial u_1}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2} - \left\{ T_1'(t) + \frac{x}{l} (T_2'(t) - T_1'(t)) \right\} \\ u_1|_{t=0} = 0 \\ u_1|_{x=0} = u_1|_{x=l} = 0 \end{cases} \quad (2.78)$$

un

$$\begin{cases} \frac{\partial u_2}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 u_2}{\partial x^2} \\ u_2|_{t=0} = f(x) - w(x, 0) = \varphi(x), \\ u_2|_{x=0} = u_2|_{x=l} = 0 \end{cases} \quad (2.79)$$

kur $w(x,t) = T_1(t) + \frac{x}{l} [T_2(t) - T_1(t)]$ un funkcija $T(x,t) = u_1(x,t) + u_2(x,t) + w(x,t)$ būs sākotnējās problēmas (2.67)-(2.69) atrisinājums. Kā ir redzams, sākotnējie sākuma nosacījumi $f(x)$ ieiet tikai funkcijas $u_2(x,t)$ izteiksmē. Tāpēc pietiek aplūkot tikai problēmu (2.79), lai izpētītu temperatūras atkarību no sākuma nosacījumiem. Atrisinot šo problēmu, iegūstam

$$u_2(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} c_n \sin \frac{n\pi}{l} x \cdot \exp\left(-a^2 \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 t\right), \quad (2.80)$$

kur $\varphi(x) = \sum_{n=1}^{\infty} c_n \sin \frac{n\pi}{l} x$.

Novērtēsim rindas (2.79) summu:

$$u_2(x,t) \leq \sum_{n=1}^{\infty} c_n \sin \frac{n\pi x}{l} \exp\left(-\frac{a^2 t}{l^2}\right) = \varphi(x) \cdot \exp\left(-\frac{a^2 t}{l^2}\right). \quad (2.81)$$

Ir redzams, ka sākuma nosacījumu ietekme uz temperatūru sadalījumu sistēmā laikā eksponenciāli dīkst, un laika momentos, kas daudz lielāki par sistēmas raksturīgo laika konstanti $\tau_0 = l^2/a^2 = l^2 \rho c / \lambda$, sākuma nosacījumu loma kļūst nenozīmīga. Tomēr, lai tie būtu pēc iespējas vienkāršāki un tajā pat laikā atbilstu realitātei, var izvēlēties lineāru temperatūru sadalījumu sākuma laika momentā starp izmērītām temperatūrām uz virsmām $T_1(0)$ un $T_2(0)$:

$$f(x) = \frac{T_2(0) - T_1(0)}{l} x + T_1(0), \quad (2.82)$$

kas atbilst stacionāram stāvoklim homogēnā materiālā.

Siltuma plūsmas blīvuma q izteiksmi iegūst, izmantojot izteiksmes (2.75), (2.77) un (2.78).

Vispirms definē siltuma plūsmas blīvuma attēlu punktā $x = 0$:

$$\bar{q}_1 = -\lambda \left. \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} \right|_{x=0}. \quad (2.83)$$

Izmantojot iepriekš iegūtās sakarības var parādīt, ka

$$\bar{q}_1 = p \frac{\bar{T}_1 A}{B} - p \frac{\bar{T}_2}{B} + \frac{T_2(0)}{B} + \frac{\lambda}{p} \frac{T_1(0) - T_2(0)}{l} - \frac{T_1(0) A}{B}, \quad (2.84)$$

kur koeficienti A un B nosakāmi no šādām izteiksmēm: $A = cb \left(\frac{\sqrt{p}}{a} l \right)$ un $B = \frac{a\sqrt{p}}{\lambda} sb \left(\frac{\sqrt{p}}{a} l \right)$.

Veicot inverso Laplasa transformāciju, gala rezultātā iegūstam, ka

$$a_1(t) = L^{-1} \left[\frac{A}{B} \right] = \frac{\lambda}{l} + \frac{2\lambda}{l} \sum_{k=1}^{\infty} e^{-\frac{t}{\tau_k}}, \quad a_2(t) = L^{-1} \left[\frac{1}{B} \right] = \frac{\lambda}{l} + \frac{2\lambda}{l} \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k e^{-\frac{t}{\tau_k}}, \quad (2.85)$$

kur $\tau_k = \left(\frac{l}{a\pi k}\right)^2$ un

$$q_1(t) = \int_0^l [T_1'(\tau)a_1(t-\tau) - T_2'(\tau)a_2(t-\tau)]d\tau - \frac{\lambda}{l}[T_2(0) - T_1(0)]. \quad (2.86)$$

Iegūtais integrālis saista temperatūru vērtības apgabala galapunktos laika intervālā līdz dotajam laika momentam un siltuma plūsmas blīvumu apgabala sākumpunktā. Bez tam, izteiksmes (2.85) un (2.86) papildus satur vēl tikai divus lineāri neatkarīgus lielumus – pirmo raksturīgo laika konstanti:

$$\tau_1 = \left(\frac{l}{a\pi}\right)^2, \quad (2.87)$$

un būvkonstrukcija tiešo siltuma caurlaidības koeficientu $U = \lambda/l$. Tādējādi integrālvienādojums (2.86) ar papildus izteiksmēm (2.85) veido noslēgtu sistēmu minēto lielumu noteikšanai.

Tālākam siltuma caurlaidības koeficienta U skaitliskam aprēķinam tiek izmantota uzlabotā datu apstrādes metode (Jakovičs *et.al.*, 1997; Krievāns, 2000), kuras pamatā ir no temperatūras mērījumu datiem saskaņā ar iepriekš aprakstīto pieeju teorētiski aprēķinātā siltuma plūsmas blīvuma un mērījumos eksperimentāli noteiktā siltuma plūsmas blīvuma starpības minimizēšana. Aprakstītā aprēķinu metode un skaitliskie algoritmi tika realizēti programmatūrā DataProc (PAIC, 2002), kas arī tiek izmantota visu pēdējos gados iegūto eksperimentālo datu pēcapstrādei un U koeficienta vērtības aprēķiniem. Atsevišķu metodes soļu paskaidrošanai tiek parādīti attēli no minētās programmatūras.

Skaitlisko aprēķinu pieejā vispirms tiek sastādīts funkcionālis

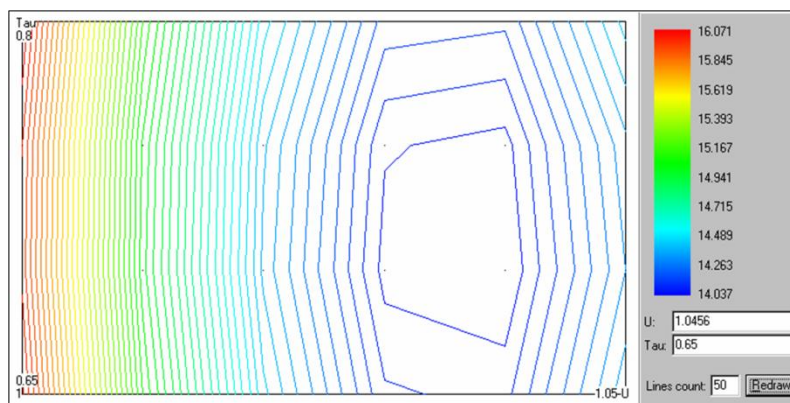
$$F(U, \tau_1) = \sum_{i=1}^N (q_{\text{num}}[U, \tau_1, i] - q_{\text{exp}}[i])^2, \quad (2.88)$$

kur $q_{\text{exp}}[i]$ ir eksperimentāli izmērītais siltuma plūsmas blīvums laika momentā t_i , bet $q_{\text{num}}[U, \tau_1, i]$ – skaitliski aprēķinātais siltuma plūsmas blīvums šajā laika momentā, kas ir atkarīga tikai no diviem iepriekšminētajiem parametriem - pirmās raksturīgā laika konstantes τ_1 un siltuma caurlaidības koeficienta U . Summēšana notiek pa visiem laika momentiem, kuros ir veikta temperatūru vērtību galapunktos un siltuma plūsmas blīvuma vērtību vienā no galapunktiem mērījumi. Plūsmas blīvumu $q_{\text{num}}[U, \tau_1, i]$ iegūst, skaitliski integrējot izteiksmi (2.86) laikā:

$$\begin{aligned} q_{\text{num}}[U, \tau_1, i] &= \\ &= \sum_{j=1}^i \{(T_1(j) - T_1(j-1))a_1(i-j) - (T_2(j) - T_2(j-1))a_2(i-j)\} - U(T_2(0) - T_1(0)), \end{aligned} \quad (2.89)$$

$$a_1(i) = 2U \sum_{j=1}^N e^{-\frac{\Delta t \cdot i \cdot j^2}{\tau_1}} + U, \quad a_2(i) = 2U \sum_{j=1}^N (-1)^j e^{-\frac{\Delta t \cdot i \cdot j^2}{\tau_1}} + U \quad (2.90)$$

Šī funkcionāļa minimizācija sastāv no diviem etapiem. Vispirms tiek uzdots taisnstūrveida apgabals diskrētajā $\{U, \tau_1\}$ plaknē, kurā atrodas īstās šo lielumu vērtības, ko iespējama vērtību diapazons tiek uzdots pēc pieredzes vai aptuveniem aprēķiniem konstrukcijām ar zināmo uzbūvi. Praktiski jebkura pētāmā būvelementa U vērtība parasti ir intervālā $0,1 \dots 3,0 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$, bet τ_1 – intervālā $0,01 \dots 2$ diennaktis, ko var pieņemt kā pirmo tuvinājumu nezināmiem objektiem. Aprēķinu algoritmā funkcionāļa (2.88) minimālās vērtības uzdotajā apgabalā tiek meklētas uz fiksēta diskrēta režģa ar uzdotu soli pa katru no U un τ_1 asīm. Tiek noteiktas funkcionāļa vērtības punktu kopā, kas pieder sākumā uzdotajam apgabalam, un atrasts punkts, kurā funkcionāļa vērtība ir minimāla (attēls 2.71). Līdzīgu funkcionāļu minimizācijas pieeju izmanto arī citi autori, tā publikācijā (Gutschker *et.al.*, 1995) tā tiek lietota, skaitliski nosakot siltuma pretestību atkarība no siltuma vadītspējas un temperatūras vadītspējas daudzslāņainām konstrukcijām, izmantojot eksperimentālo siltuma plūsmas blīvuma mērījumus un Montekarlo metodi.



Attēls 2.71. Programmatūras DataProc logs ar funkcionāļa F vērtībām plaknes (U, τ_1) diskrētajos punktos – pirmais aprēķinu posms.

Otrajā etapā rezultāta precizēšanai pirmajā solī atrastā punkta ar minimālu funkcionāļa $F(U, \tau_1)$ vērtību apkārtnē tiek veikta turpmāka izteiksmes (2.88) minimizācija, izmantojot gradiento nolaišanās metodi, ar pakāpenisku soļa samazināšanu (Bahvalov *et.al.*, 1975). Šī operācija tiek turpināta, līdz solis vai kļūda kļūst mazāki par to uzdotajām minimālajām vērtībām, ko ir iespējams mainīt. Minētās gradientās minimizācijas procesā tālākie funkcijas $F(\vec{x}) = F(U, \tau_1)$ tuvinājumi $F(\vec{x}_{n+1})$, kur $n > 0$, tiek iegūti no iepriekšējiem, pārvietojoties funkcijas $F(\vec{x})$ gradientam pretējā virzienā. Tādējādi katru nākamo tuvinājumu var uzrakstīt formā:

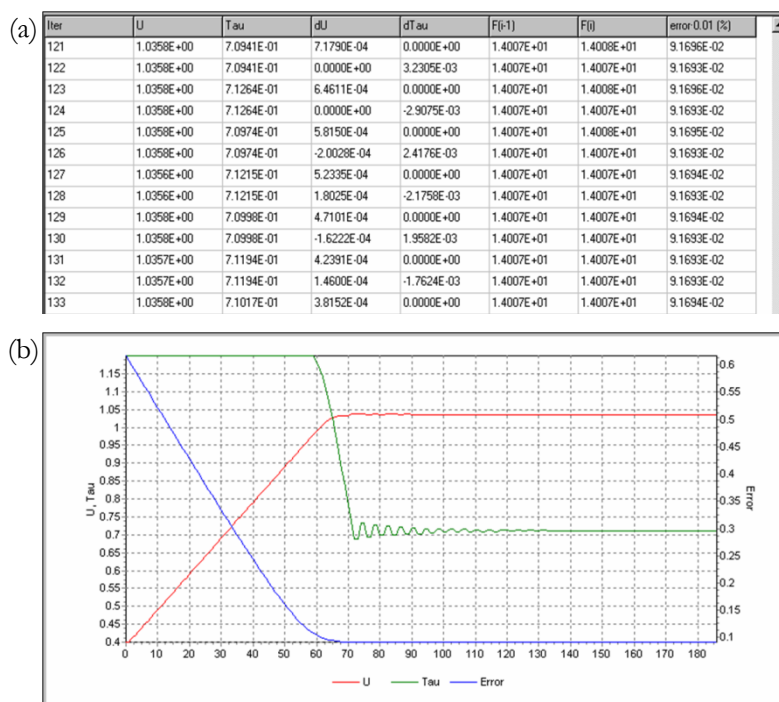
$$\vec{x}_{n+1} = \vec{x}_n - \delta_n \text{grad} F(\vec{x}_n). \quad (2.91)$$

Parametru δ_n izvēlas no šāda minimuma nosacījuma:

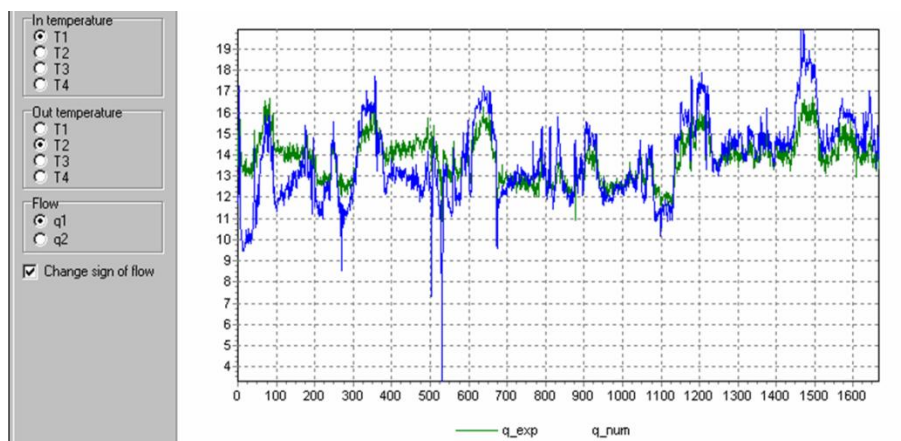
$$F(\vec{x}_n - \delta_n \text{grad} F(\vec{x}_n)) = \min. \quad (2.92)$$

Ja tādu virzienu, kurā funkcija samazinās, nevar atrast, tad solis tiek samazināts un virziena

meklēšana tiek atkārtota. Šis aprēķinu process tiek iteratīvi atkārtots, līdz starpība starp funkcijas vērtībām divos sekojošos punktos kļūst mazāka par uzdoto vērtību (attēls 2.72). Vizuāli izmērītā un skaitliski aprēķinātā siltuma plūsmas blīvuma salīdzinājums vienā grafikā parādīts attēlā 2.73.



Attēls 2.72. Programmatūras DataProc logs ar gradientās minimizācijas procesa aprēķiniem (a) un tā parametru vizualizāciju (b) – otrais aprēķinu posms.



Attēls 2.73. Programmatūras DataProc logs ar skaitliskās un eksperimentālās siltuma plūsmas vizualizāciju.

Aprakstītās analītiskās pieejas skaitliskais algoritms tiek realizēts programmatūrā, kas paredz iespēju pirms aprēķiniem kontrolēt un mainīt sekojošus skaitliskos parametrus:

- locekļu skaits rindās (2.90) un virzienu, kuros punkta apkārtnē tiek noteiktas minimizācijas funkcionāļa $F(U, \tau_1)$ vērtības, skaits;
- U un τ_1 soļa garumi un to vērtību intervāls, kurā tiks meklētas šo lielumu vērtības,

- standarta kvadrātiskā novirze starp $q_{\text{exp}}[i]$ un $q_{\text{num}}[U, \tau_1, i]$, pie kuras aprēķini tiks pārtraukti.

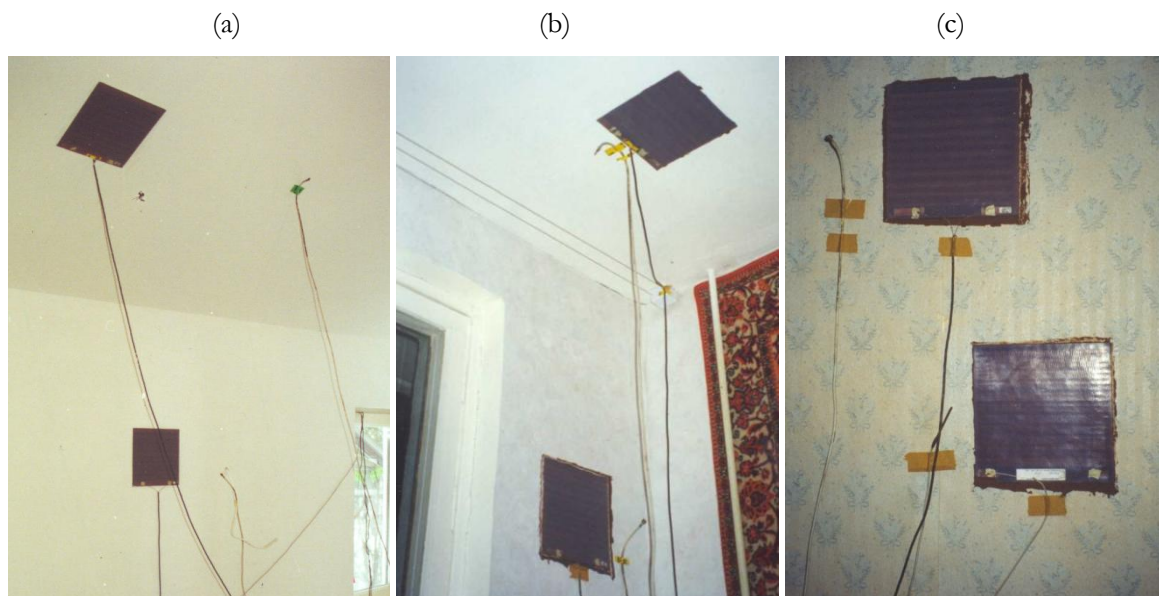
Iepriekš aprakstītā skaitliskā datu apstrādes metodika ir paredzēta eksperimentālo siltuma plūsmas blīvuma un temperatūras mērījumu datu, kas iegūti ēku reālos ekspluatācijas apstākļos, apstrādei. Principiāli tā izstrādāta 90-to gadu otrajā pusē un vēlāk tajā ar autora līdzdalību tika veikti uzlabojumi, kas ir saistīti ar algoritma ātrdarbību un lietojuma ērtumu. Savukārt eksperimentālās iekārtas, kas tiek izmantotas mērījumos datu iegūšanai un uzkrāšanai, tiek izmantotas dažādas. Neatkarīgi no tā, vai tiek izmantota rūpnieciski izgatavota mēriekārta vai arī ir oriģinālais izstrādājums, pamatprincipi un to funkcionalitāte pamatā ir nemainīgi – veikt fizikālo lielumu mērījumus un iegūto datu uzkrāšanu tālākai to pēcapstrādei. Apskatīsim šādu mērsistēmu darbības pamatprincipus un lietojumu īpatnības.

Kā norādīts iepriekš, siltuma caurlaidības koeficienta U noteikšanai ir nepieciešams reģistrēt siltuma plūsmas blīvumu q (W m^{-2}) caur pētāmo būvkonstrukciju un temperatūru starpību tās abās pusēs $\Delta T = T_{\text{iekšā}} - T_{\text{ārā}}$ ārpus termiskajiem robežslāņiem. Siltuma plūsmas blīvuma reģistrācijai tiek izmantoti iepriekšējā sadaļā aprakstītie dažādu izmēru sensori (skat. attēlus 2.62 un 2.63) ar zināmām kalibrācijas konstantēm. Laba termiskā kontakta nodrošināšanai ar virsmu, uz kuras sensori tiek nostiprināti, tāpat kā mērījumos termiskajā kamerā, tiek lietots plāns akrila slānis. Dažas virsmas (piem., papīra tapetes) akrila masa sabojā, tāpēc gludām virsmām ir ieteicams izmantot arī piespiešanas paņēmienu (King, 2000). Praktiskajos mērījumos pētāmie objekti parasti ir pietiekami liela izmēra un tāpēc visbiežāk tiek lietoti sensori ar izmēriem 25×25 cm (attēls 2.74), retāk tiek izmantoti citu izmēru sensori. Temperatūras mērījumiem tiek izmantoti kalibrētie k -tipa NiCr-Ni termopāri, kas tiek nostiprināti siltuma plūsmas sensora tuvumā dažu centimetru attālumā no virsmām (attēls 2.74).

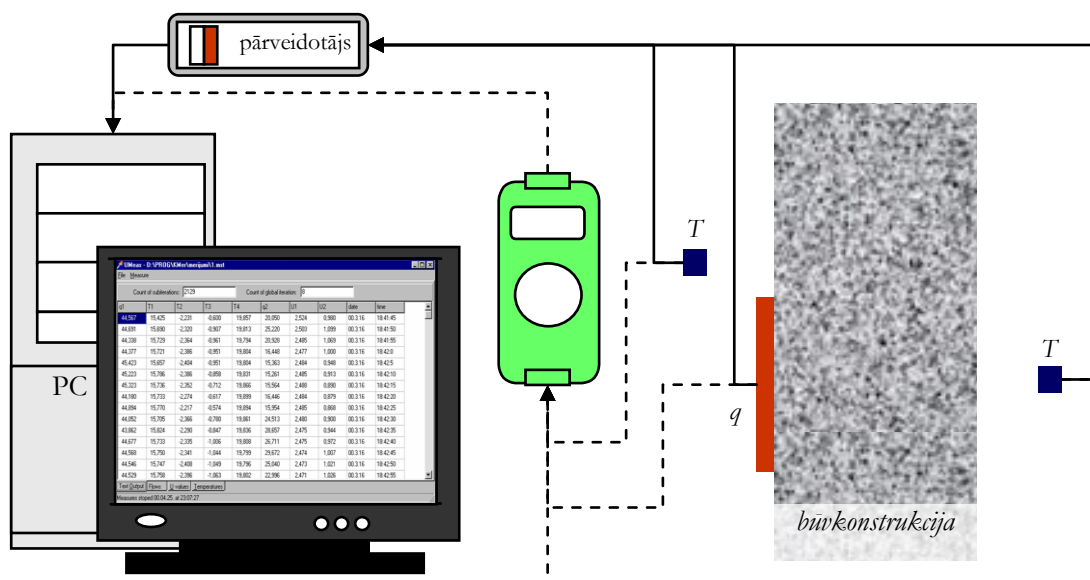
Parasti, ja to atļauj mērsistēmas pieslēguma veids, paralēli tiek veikti 2 mērījumi dažādām norobežojošām būvkonstrukcijām (piem., ārsienai un jumta/bēniņu konstrukcijai - attēls 2.74a, b), tādējādi samazinot ēkas apsekojumam nepieciešamo laiku. Situācijās, kad ārgaisa temperatūras mērījumi nav iespējami divām konstrukcijām, abu siltuma plūsmas sensoru mērījumus ir lietderīgi veikt vienam objektam papildus rezultātu kontrolei (attēli 2.74c).

Parasti eksperimentus veic, izmantojot speciāli izgatavotu mērsistēmu ar iespēju pieslēgt 2 siltuma plūsmas sensorus un līdz 4 temperatūras sensoriem, tādējādi nodrošinot vienlaicīgu 2 dažādu būvkonstrukciju neatkarīgu mērījumu veikšanu. Kā alternatīva datu reģistrēšanas un uzkrāšanas ierīce mērījumos tiek izmantota Almemo tipa datu uzkrāšanas iekārta (Ahlborn Mess- und Regelungstechnik, 2003, 2004), kas nenodrošina augstu siltuma plūsmas blīvuma mērījumu precizitāti (sevišķi pie nelielām un mainīgām siltuma plūsmām), bet ir daudz kompaktāka un var tikt

izmantota arī bez elektrotīkla pieslēguma. Abos gadījumos iegūto datu pēcapstrādei un siltuma caurlaidības koeficienta U aprēķinam ar iepriekš aprakstītās metodes palīdzību eksperimentālie dati tiek apstrādāti ar datora un programmatūras DataProc palīdzību. Shematiskais abu mērsistēmu kopskats parādīts attēlā 2.75, to svarīgākās komponentes apkopotas tabulā 2.9, bet fotogrāfijas mērījumu laikā – attēlā 2.76.



Attēls 2.74. Siltuma plūsmas sensori un temperatūras sensori eksperimentālos mērījumos āršienai un savietotam jumtam (a), āršienai un bēniņu pārsegumam (b) un āršienai (c).



Attēls 2.75. Siltuma plūsmas un temperatūru mērsistēmu svarīgākās komponentes.

Tabula 2.9. Siltuma plūsmu un temperatūru mēriekārtu svarīgākās komponentes.

Komponente	Tīps	Skaitis
Dators vai datu uzkrāšanas iekārta	personālais dators vai Almemo 2290-8	1
Mērkarte vai programmēts spraudnis	NI AT MIO-16XE-50 vai Almemo tipa	16
Integrējošs siltuma plūsmas sensors	W-150 S (25×25 vai 50×50 cm ²)	1-2
Temperatūras mērsensori	Termopretestības Pt100 vai NiCr-Ni	2-10

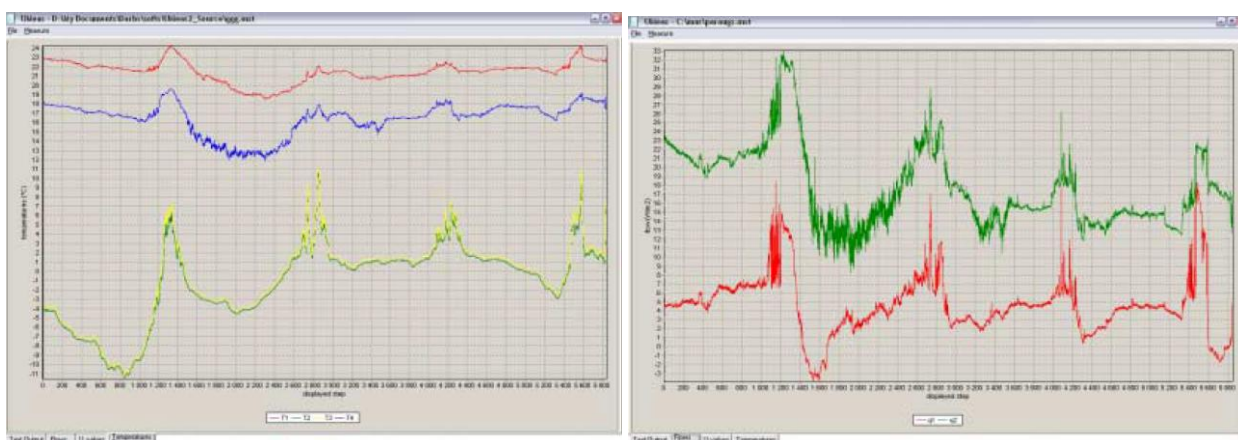


Attēls 2.76. Siltuma plūsmas blīvuma un temperatūras mērījumi. Eksperimentālo datu reģistrēšanai tiek izmantota datorsistēma (pa kreisi) un autonoma iekārta Almemo (pa labi).

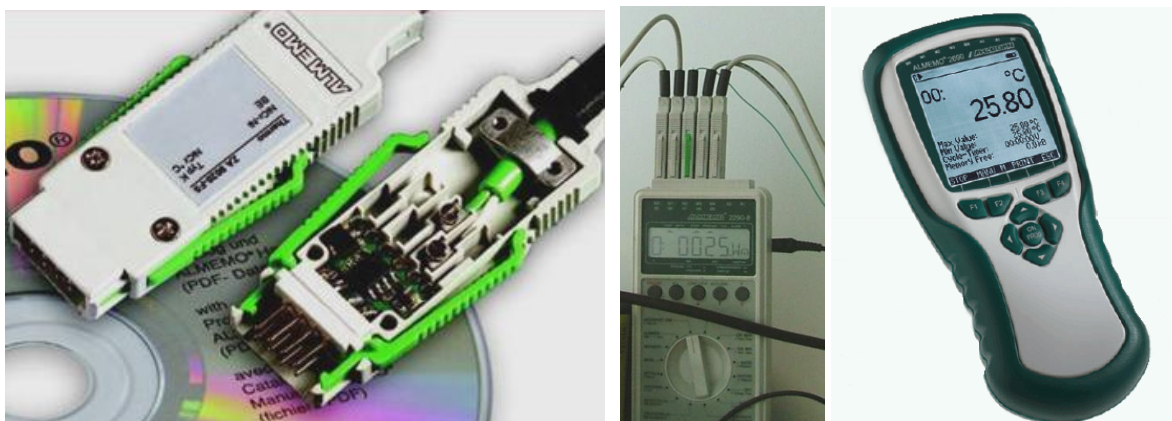
Mērsistēmas pamatelementi ir signālu apstrādes iekārta un dators ar integrētu mērmoduli PCI (pirmajiem sistēmai modeļiem - ISA) kartes veidā, kas satur signālu multiplexoru, pastiprinātāju un analogi/digitālo (A/D) pārveidotāju. Tā kā siltuma plūsmas sensora izejas signāla līmenis ir daudz mazāks nekā termokompensācijas slēgumam, tad mērījumiem tiek izvēlētas augstjutīgās elektroniskās National Instrument kartes. Pie maksimālā pastiprinājuma mērintervāls ir 10 mV un A/D pārveidojums tiek veikts ar 16 bitu izšķiršanu, tad minimālais reģistrējams signāls ir 0,003 mV. Siltuma plūsmas sensora neprecizitātes (līdz 5%) izraisītās sprieguma svārstības pie raksturīgā 1 mV liela izejas signāla var sasniegt 0,05 mV, tādējādi vairāk nekā par kārtu pārsniedzot pārveidošanas kļūdu. Līdz ar to lietotās mērkartes var vērtēt kā piemērotas veicamajam uzdevumam.

Eksperimentālo datu reģistrācijai, mērījumu parametru iestādīšanai un procesa kontrolei mērījumos ar datorsistēmu tiek izmantota ierīce jau apskatītā UMeas programmatūra (PAIC, 2003). Ar minētās programmatūras palīdzību ir iespējams iestādīt pievienoto siltuma plūsmas blīvuma un temperatūras sensoru kalibrācijas konstantes, laika intervālu starp mērījumiem un uz ekrāna attēlojamo pēdējo iegūto datu punktu skaitu vizuālai mērījuma kontrolei (attēls 2.77). Temperatūru un plūsmu sensori mērījumi tiek veikti vairākas reizes sekundē, bet, lai samazinātu uzkrājamo datu daudzumu un atvieglotu to tālāko apstrādi, šie dati tiek vidējoti pa uzdotiem laika intervāliem. Datu vidējošanas un, attiecīgi, ierakstu intervāli parasti tiek izvēlēti no 1 līdz 5 minūtēm.

Gadījumā, ja eksperimentālo datu reģistrēšana notiek ar Almemo tipa autonomo datu uzkrāšanas iekārtu, visu sensoru kalibrācijas konstantas jau rūpnieciski ir ieprogrammētas attiecīgajos savienojuma konektoros (attēls 2.78), ko nepieciešamības gadījumā ir iespējams arī viegli pārprogrammēt. Ierakstu intervāls parasti tiek uzdots līdzīgi kā mērsistēmas gadījumā – no 1 līdz 5 minūtēm, bet tas ir ierobežots ar pieejamās atmiņas daudzumu – jo vairāk lielumi tiek mērīti vienlaicīgi, jo mazāk datu punkti var tikt pierakstīti iekārtās atmiņā. Veicot vienas siltuma plūsmas un divu temperatūras sensoru paralēlos mērījumus ar 1 minūtes intervālu, kopējais eksperimenta ilgums pārsniedz 5 dienas, kas lielākā gadījumu daļā ir pietiekams. Ierīces atmiņā ierakstītie eksperimentālo mērījumu dati tiek eksportēti uz datoru ar termināla palīdzību tālākai to apstrādei un siltuma caurlaidības koeficienta U noteikšanai ar apskatīto programmatūru DataProc.



Attēls 2.77. Temperatūru (pa kreisi) un siltuma plūsmas blīvuma (pa labi) mērījumi reālajā laikā UMeas programmatūrā.

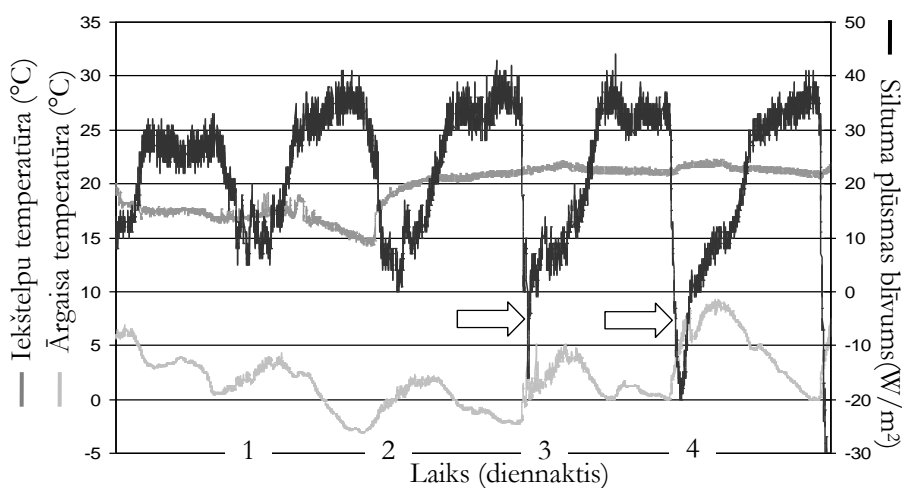


Attēls 2.78. Programmējamie sensoru savienojuma konektori un datu uzkrāšanas ierīces.

2.2.3.2. Raksturīgie mērījumu piemēri

Veicot mērījumus dzīvojamās ēkās, vai ēkās, kas atrodas aktīvā ekspluatācijā, jāreķinās ar specifiskām problēmām un blakus faktoriem, kas var negatīvi ietekmēt mērījumu norisi vai pat

padarīt tos nekorektus. Kā spilgtāku piemēru var minēt siltuma plūsmas blīvuma sensora jutību: jebkuru siltu ķermeņu atrašanās to tuvumā ienes savu korekciju siltuma starojuma dēļ (piem., cilvēks, kas atrodas blakus sensoram) un nav saistīts ar siltuma plūsmas caur mērobjectu palielinājumu, bet ar sensora virsmas papildus sildīšanu. Līdzīgie iemesli, kas ietekmē mērījumu precizitāti un var samazināt precizitāti, ir klimatoloģiskie faktori, īpaši Saules starojums. Gadījumā, ja siltuma plūsmas sensors atrodas uz caurspīdīgās virsmas, tādas kā logs, Saules tiešais starojums izmaina plūsmas, kas tiek reģistrēta, virzienu (attēls 2.79). Tas neatbilst mērījumu mērķim, jo tādā veidā tiek mērīts nevis no iekštelpām izejošais, bet radiācijas ceļā pienākošais siltuma daudzums, kas ir attiecināts pret ārējās gaisa temperatūru ($U = q/\Delta T$). Saules tiešais starojums var papildus uzsildīt arī ārējās gaisa temperatūras sensorus, ja tie nav aizsargāti no tiešiem stariem.

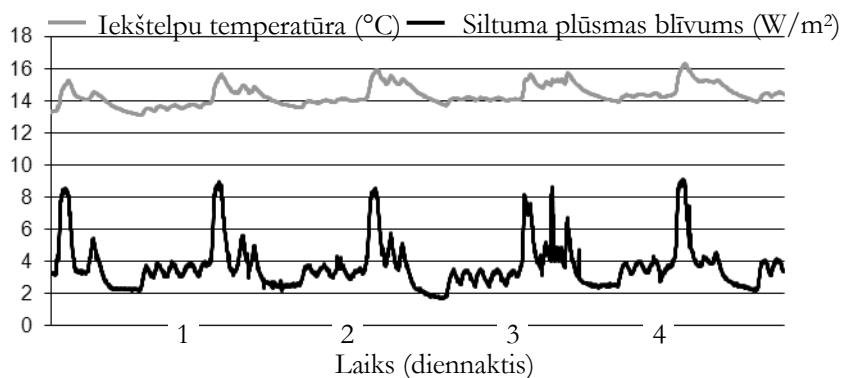


Attēls 2.79. Saules starojuma izraisītās siltuma plūsmas izmaiņas.

Veicot iegūto datu pēcapstrādi, acīmredzami kļūdainus datu posmus ar tiešā Saules starojuma efektu vai cilvēku klātbūtnes izraisītās siltuma plūsmas lēcienus var „izgriezt” datu apstrādes programmatūrā DataProc un neiekļaut U aprēķinā. Bet tādā gadījumā vairs nav korekta termiskā laika konstantas τ vērtība, kas raksturo laiku, kāds ir nepieciešams, lai siltuma impulss izietu cauri būvkonstrukcijai. Tā kā pamatā mērījumi notiek ar mērķi noteiktu siltuma caurlaidības koeficientu, kas ir mazāk jutīgs pret tāda veida datu redukciju, tad šādas darbības var tikt veiktas, un netiek uzlikta tik stingras prasības mērījuma apstākļiem, kaut arī paliek spēkā prasība par pietiekošu plūsmas lielumu. Tomēr caurspīdīgu būvelementu mērījumiem ir ieteicams izvēlēties ēkas ēnas pusi un apmākušās dienas, bet vislabāk ir veikt standartizētos mērījumus iepriekš apskatītajā termiskajā kamerā (sadaļa 2.2.2), lai pilnībā izslēgtu nevēlamo faktoru ietekmi uz mērījumu precizitāti.

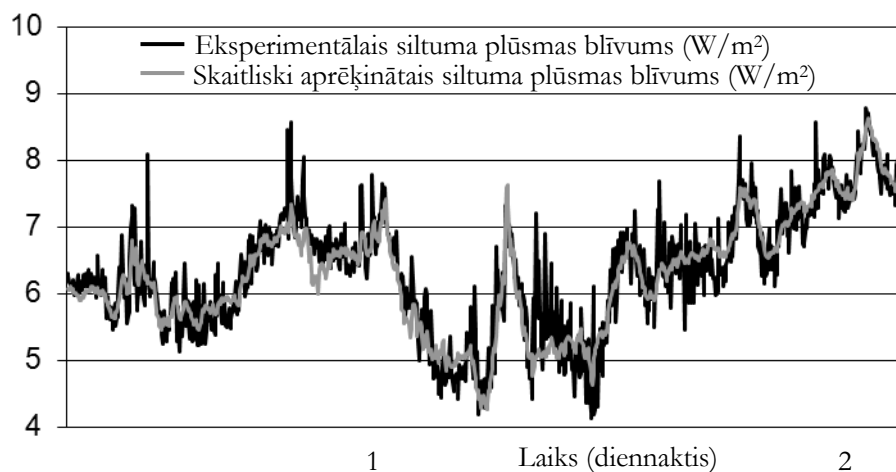
Tā kā siltuma plūsmas sensori parasti tiek novietoti pētāmo norobežojošo konstrukciju iekšpusē, tad to rādījumi ir cieši saistīti ar iekštelpu gaisa temperatūras svārstībām un pat mazākās tās izmaiņas praktiski uzreiz, bez laika nobīdes, tiek reģistrētas arī kā siltuma plūsmas svārstības (attēls

2.80). Savukārt, ievērojams laika periods ir nepieciešams, lai izmaiņas ārējais temperatūrā ietekmētu siltuma plūsmas vērtību, kas ir izskaidrojams ar būvkonstrukciju ievērojamo termisko inerci. Nelielas temperatūras izmaiņas pētāmās konstrukcijas ārpusē ar periodu, kas nepārsniedz laika konstantes vērtību, ar iekštelpā novietoto siltuma plūsmas blīvuma sensoru praktiski netiek reģistrētas.



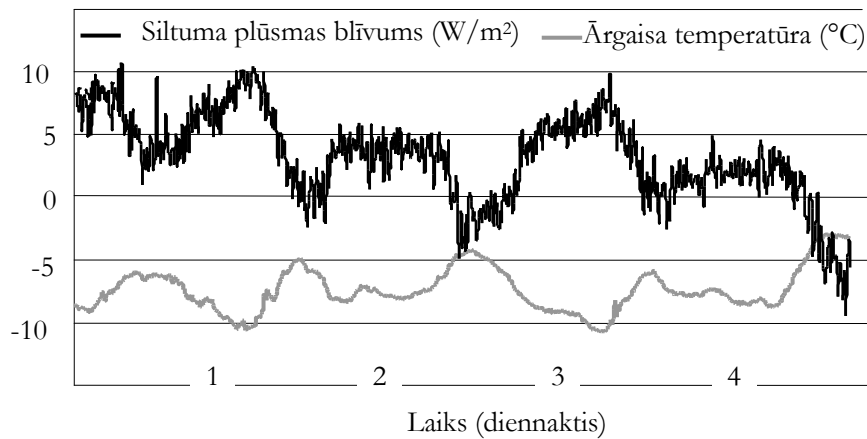
Attēls 2.80. Iekštelpu gaisa svārstību izraisītās siltuma plūsmas blīvuma izmaiņas.

Kā parādīja virkne veikto eksperimentu, mērījumu dati situācijās ar nelielu un pat īslaicīgi pretēji vērstu temperatūru starpību var tikt izmantoti korektai siltuma caurlaidības koeficienta U vērtības noteikšanai ar iepriekš aprakstīto aprēķina skaitlisko algoritmu, bet tiem nepieciešams mērperiods var būt ievērojami īsāks nekā lietojot kumulatīvo pieeju. Tā, mērījumu perioda ilguma ķieģeļu ārsienai nelielas temperatūru starpības gadījumā samazinājums no 30 līdz 7 dienām izmainīja iegūto rezultātu no 1,59 uz 1,58 $W m^{-2} K^{-1}$, izmaiņa ir daudz mazāka par mērsistēmas precizitāti. Piemērs eksperimentāli izmērītam un skaitliski aprēķinātam siltuma plūsmas blīvumam ārsienas būvkonstrukcijai nelielu temperatūru starpību gadījumā parādīts attēlā 2.81. Kā ir labi redzams, mazu siltuma plūsmas blīvuma vērtības gadījumā skaitliskā aprēķinu pieeja ļauj atrast atrisinājumu, kas labi sakrīt ar eksperimentu. Tomēr jāatzīmē, ka ΔT ir daudz lielāka nozīme būvkonstrukciju ar mazu siltuma caurlaidību aprēķinos un šajos gadījumos eksperimentu veikšanai ir jā sagaida vai jānodrošina lielāka temperatūru starpība, vismaz 10...15 °C.



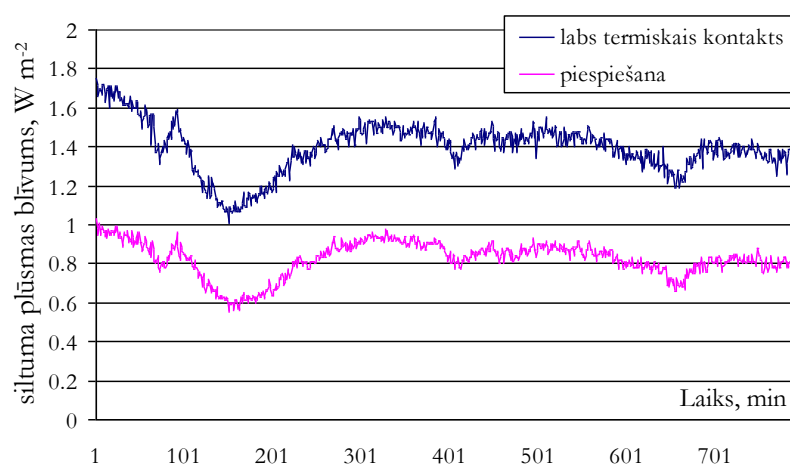
Attēls 2.81. Siltuma plūsmu salīdzinājums nelielas temperatūru starpības gadījumā.

Ļoti neliela termiskā inerce ir raksturīga praktiski visām t.s. vieglajām konstrukcijām, kas sastāv no metāla nesošām konstrukcijām un izolācijas materiāla, piem., akmens vates, pildījuma. Šādas konstrukcijas ir relatīvi lētas un to siltuma izolējošās īpašības atbilst Latvijas Būvnormatīva LBN 002-01 prasībām, tādēļ tās sastāda lielāku daļu no pēdējā desmitgadē masveidā ceļamajām ražošanas un tirdzniecības būvēm. Ēkā ar tāda veida norobežojošām konstrukcijām fāzu nobīde starp siltuma plūsmu iekšpusē un ārējās temperatūras svārstībām laikā ir maza. Tāpat maza termiskā inerce ir raksturīga arī tipiskām stikla konstrukcijām – logiem. Attēlā 2.82 parādīts eksperimentālā mērījuma piemērs būvkonstrukcijai ar mazu termisko inerci, iekštelpās noteiktais siltuma plūsmas blīvums šajā gadījumā mainās praktiski reizē ar ārējās temperatūras izmaiņām. Viens no nopietniem ēku ar tādām norobežojošām konstrukcijām trūkums ir nepārtraukta iekštelpu gaisa temperatūras regulēšanas sistēmas darbība, kas bojājuma gadījumā var izsaukt ātrās nokontrolējamās temperatūras izmaiņas. Tajā pat laikā konstrukcijas ar lielu termisko inerci palīdz saglabāt iekštelpas temperatūru nemainīgu pat relatīvu lielu ārējās temperatūras svārstību gadījumā (gan ziemā, gan vasarā). Kā piemēru var minēt mūsdienīgās slāņainās būvkonstrukcijas no betona vai līdzīgiem materiāliem ar akmens vates starpslāņiem, kam vienlaicīgi piemīt gan labas siltuma izolējošās īpašības, gan arī ievērojama termiskā inerce.



Attēls 2.82. Ārgaisa temperatūras un iekštelpā mērītā siltuma plūsmas svārstības mazas būvkonstrukcijas termiskās inerces gadījumā.

Lai demonstrētu laba termiskā kontakta starp siltuma plūsmas sensoru un pētāmā objekta virsmu nozīmīgumu, apskatīsim grīdas pārseguma uz vedināmu pagrabu mērījumu rezultātus. Veiktajos eksperimentos paralēli tika izmantoti divi 25×25 cm sensori, viens no kuriem ir pielīmēts pie grīdas parketa virsmas ar akrila masas palīdzību, bet otrs – vienkārši piespiests, kas nenodrošina ideālu termisko kontaktu visai tā virsmai. Pētījumiem tika izvēlēts grīdas pārsegums ar mazu siltuma caurlaidību, lai uzskatāmi parādītu izmaiņas, ko ienes kontakta nenodrošināšana – būvelementos ar lielāku U vērtību efekts nebūtu tik izteikts. Vairāku dienu eksperimentos iegūtās siltuma plūsmas vērtības ir parādītas attēlā 2.83, kā redzams, atšķirības starp divu sensoru rādījumiem sasniedz 40%, kas pie vienādām temperatūras starpībām nozīmē arī proporcionālu atšķirību starp siltuma caurlaidības vērtībām.



Attēls 2.83. Siltuma plūsmas blīvuma atšķirības sensoram ar labu termisko kontaktu un bez tāda.

Pirmie ēku norobežojošo būvkonstrukciju eksperimentālie siltuma caurlaidības koeficienta mērījumi tika aizsākti vairāk kā pirms 15 gadiem un regulāri tiek veikti katru apkures sezonu. Sākumā

tie bija vecu ēku mērījumi ar mērķi noskaidrot to stāvokli un novērtēt dažādu faktoru ietekmi uz siltumfizikālā stāvokļa izmaiņām, pēdējos gados eksperimenti pārsvarā tiek veikti jaunceļamām vai renovētām ēkām. Detalizētāk apskatīsim raksturīgāko un interesantāko mērījumu piemērus.

Ievērojams siltuma caurlaidības koeficienta eksperimentu skaits (vairāki desmiti) tika veikts Rīgas un Liepājas 20. gs. otrajā pusē celtos daudzdzīvokļu namos, tādējādi izveidojot sava veida padomju dzīvojamā fonda norobežojošo konstrukciju datu bāzi (Jakovičs *et.al.*, 2003-2004). Pamatā tika testētas ārsienu konstrukcijas, iespēju robežās veikti arī bēniņu un pagraba pārsegumu mērījumi. Lielāka daļa no tiem parādīja, ka saskaņā ar standarta (LVS EN ISO 6946, 2003) prasībām aprēķinātā siltuma caurlaidība un ēku dokumentācijā minētās vērtības stipri atšķiras no eksperimentāli noteiktajām. Eksperimentos iegūtās vērtības vienmēr bija lielākas. Arī citi līdzīgu pētījumu autori konstatēja eksperimentālo un teorētisko U vērtību nesakritību, tā, (King, 2000) norāda uz lielākām atšķirībām tieši saliktām un dobtām ārsienu konstrukcijām un mazāku izkliedi koka konstrukcijām. Jāatzīmē, ka šī darba autori lieto dažu nedēļu vidējoto datu aprēķinu metodi. Starpības starp teorētisko aprēķināto (LVS EN ISO 6946, 2003) un eksperimentēti noteikto siltuma caurlaidības koeficientu vērtībām raksturošanai var ievest labojumus, kas ievērotu materiālu siltuma vadītspējas un biezumu neprecizitāšu ietekmi, kā arī dažādu veidu siltuma tiltu un nehomogenitāšu ievērošanai.

Raksturīgākie veikto mērījumu rezultātu piemēri un atbilstošās Latvijas Būvnormatīva LBN 002-01 prasības apkopoti tabulā 2.10. Kā redzams, visi mērījumu rezultātā iegūtie dati standartelementiem atšķirtas no būvnormatīva prasībām pat vairākkārtīgi un ir nepieciešama šo konstrukciju siltināšana, lai novērstu virsnormatīvos siltuma zudumus, tādējādi samazinot apkurei nepieciešamās enerģijas patēriņu. Dažām ārsienu konstrukcijām vēlāk celtās ēkās ir iestrādāts izolācijas slānis, tomēr, kā rāda eksperimenti, tā izpildījuma kvalitāte ir neapmierinoša un ar laiku tas zaudē savu funkcionālo nozīmi – materiāls sablīvējas slāņa apakšējā daļā, kā rezultātā augšējā daļa ir piepildīta ar gaisu, bet tas samazina siltuma pretestību konvekcijas dēļ. Logu mērījums tabulā minēts salīdzināšanas nolūkos, jo to precīzie mērījumi tiek veikti termiskajā kamerā un tas parasti netiek mērīts dabā.

Pēdējā laikā, veicot ēku siltināšanas darbus, parādās jauni defekti, kuri agrāk netika konstatēti. Spilgts piemērs ir tehnoloģiski nepareiza siltuma izolējošā materiāla ieklāšana – netiek noblīvētas spraugas to salaiduma vietās, kā rezultātā siltuma caurlaidības koeficienta vērtības var atšķirties vienai un tai pašai konstrukcijai atkarībā no vēja stipruma un virziena. Kā piemērus šāda tipa defektiem var minēt mērījumu rezultātus vienas daudzstāvu pētnieciskās iestādes ēkai un vienas viesnīcas augstceltnes daļai, kas tika veikti pēdējo gadu laikā, rezultātus. Vienā gadījumā ēka atradās no vēja neaizsargātā vietā upes krastā un tāpēc ār sienai, kura tika vērsta uz valdošo vēju pusi, atšķirības bija izteiktas: bezvēja laikā $U \approx 0,55 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$, bet stipra vēja laikā U sasniedza pat $1,1 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$, kas liecina par to, ka vēja izolācijas materiāls nav pareizi ielikts vai noblīvēts. Tādām ēkām ir lietderīgi veikt arī gaisa apmaiņas mērījumus, ar kuriem detalizētāk var iepazīties nākošajā sadaļā.

Tabula 2.10. Raksturīgās Rīgas un Liepājas daudzdzīvokļu namos eksperimentāli noteiktās U_{eks} un Latvijas Būvnormatīvā LBN 002-01 normatīvās U_{RN} vērtības dzīvojamām mājām.

Būvkonstrukcijas raksturojums	U_{eks} ($W m^{-2} K^{-1}$)	U_{RN} ($W m^{-2} K^{-1}$)
Dubultstikla logi ar koka rāmi	3,0	1,8
Betona/keramzīta ārsienas panelis (30 cm)	2,0	0,3
Silikāta ķieģeļu ārsiena (45 cm)	1,8	0,3
Loga panelis (464. sērija)	1,6	0,3
Dzelzsbetona ārsienas panelis (464. sērijas ēka)	1,4	0,3
Pagraba pārsegums ķieģeļu ēkā (467. sērijas ēka)	1,4	0,25
Pagraba pārsegums (104. sērijas ēka)	1,3	0,25
Ārsienas panelis (464. sērijas projekta ēka)	1,3	0,3
Balto silikāta ķieģeļu mūris (104. sērijas ēka)	1,3	0,3
Ķieģeļu ārsiena (318. sērijas ēka)	1,3	0,3
Gala ķieģeļu siena panelu ēkā (103. sērijas ēka)	1,2	0,3
Ārsienas panelis (104. sērijas ēka)	1,2	0,3
Apmesta ķieģeļu ārsiena (316. sērijas ēka)	1,1	0,3
Gala sienas panelis (467. sērijas ēka)	1,1	0,3
Augšstāva/bēniņu pārsegums (464. sērijas projekta ēka)	1,1	0,2
Bēniņu pārsegums (103. un 104. sērijas ēkas)	1,1	0,2
Pagraba pārsegums (103. un 104. sērijas ēka)	1,1	0,25
Starplogu pildījums (104. sērijas ēka)	1,0	0,3
Sarkano māla ķieģeļu mūris (104. sērijas ēka)	0,9	0,3
Bēniņu pārsegums (316. un 318. sērijas ēkas)	0,8	0,2
Ārsienas dzelzsbetona panelis (103. sērijas ēka)	0,8	0,3
Bēniņu pārsegums ar betona slāni ķieģeļu ēkā (467. sērijas ēka)	0,6	0,2
Uzlabotais ārsienas panelis ar iekšēju siltuma izolāciju (119. sērija)	0,6	0,3
Ar 5cm akmens vati siltināts ārsienas panelis (104. sērijas ēka)	0,3	0,3

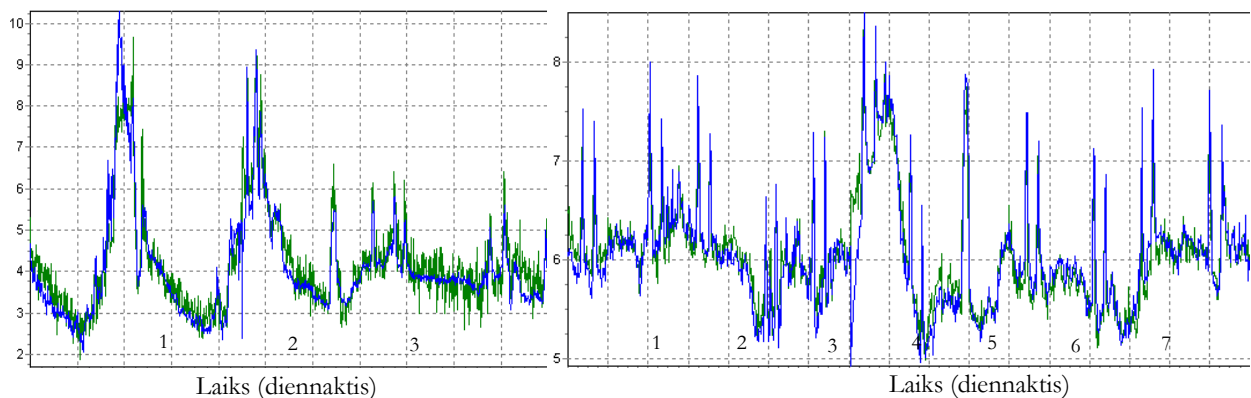
Gadījumā, ja norobežojošo konstrukciju siltināšana tiek realizēta no iekšpuses, arī var parādīties dažāda rakstura siltuma izolācijas defekti – piem., tāda tipa ēkas veiktajos mērījumos vienai ārsienai rezultātu izkliede bija no 0,25 līdz pat 0,35 $W m^{-2} K^{-1}$, kas ir izskaidrojams ar izteiktām nehomogenitātēm akmens vates siltinājuma slānī un līdz ar to arī visas konstrukcijas siltuma caurlaidībā. Bet visbiežāk sastopams defekts, siltinot daudzstāvu ēkas no iekšpuses ir siltuma jeb termiskie tilti, kas veidojas starpstāvu pārsegumu vietās, ja tas nav pareizi papildus siltinātas – rezultātā temperatūra pie griestiem vai grīdas ir pazemināta un pastāv kondensāta rašanās risks. Šāda veida defektus var viegli atklāt ar termogrāfiskā apsekojums palīdzību no ārpuses (skat. attēlu 2.15.). Jāatzīmē, ka sērijveida ēku dzīvokļu siltināšana no iekšpuses var būt relatīvi nedārgs veids, kā

paaugstināt iekštelpu temperatūru gadījumā bez termoregulatora, bet tas būtiski paaugstina iespējamo mitruma uzkrāšanās risku, jo izveidot kvalitatīvu tvaika barjeru iekšpusē nav vienkārši.

Kā piemēru koeficienta U iepriekš aprakstītā skaitliskā aprēķina algoritma lietojumam mazas siltuma plūsmas gadījumā var minēt 2004. gadā veiktos mērījumus privātmājas jaunbūves ārsienai 1. stāvā (attēls 2.84). Būvkonstrukcijas lielā siltuma pretestība un relatīvi siltie laika apstākļi noteica nelielas siltuma plūsmas blīvuma vērtības (zem 10 W m^{-2}). Eksperimentu veikšanas vietas tuvumā periodiski uzturējās celtnieki, kas izraisīja jau tā mazās un izteikti nestacionārās siltuma plūsmas papildus svārstības (skat. attēlu 2.85). Mērījumi tika veikti divas reizes ar vairāku nedēļu intervālu, pirmajā gadījumā tie ilga 7 dienas, atbilstošā kumulatīvās un plūsmu minimizācijas rezultātā iegūtā vērtība tika noteiktas $0,42$ un $0,41 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ attiecīgi. Veicot otro mērījumu, eksperimentiem atvēlēts periods tika samazināts līdz nepilnām 4 diennaktīm, temperatūru starpība bija ievērojami mazāka un siltuma plūsmas blīvuma svārstības palielinājās vairākkārtīgi (att. 2.85). Kā arī varēja sagaidīt, lietojot kumulatīvu (vidējoto) aprēķina metodi, siltuma caurlaidības koeficienta vērtība būtiski atšķīrās no pirmajā mērījumā noteiktā un sastādīja $0,65 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$. Savukārt, lietojot izstrādāto aprēķinu algoritmu, rezultāts mērsistēmas kļūdas robežās sakrita ar iepriekšējo – $0,39 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$. Abu mērījumu eksperimentāli iegūtās un skaitliski aprēķinātās siltuma plūsmas pēc to minimizācijas parādītas attēlā 2.85. Kā redzams, abos gadījumos atbilstība ir pietiekami laba, ieskaitot īslaicīgus maksimumus, kas ir saistīti ar cilvēku klātbūtni sensoru tuvumā.

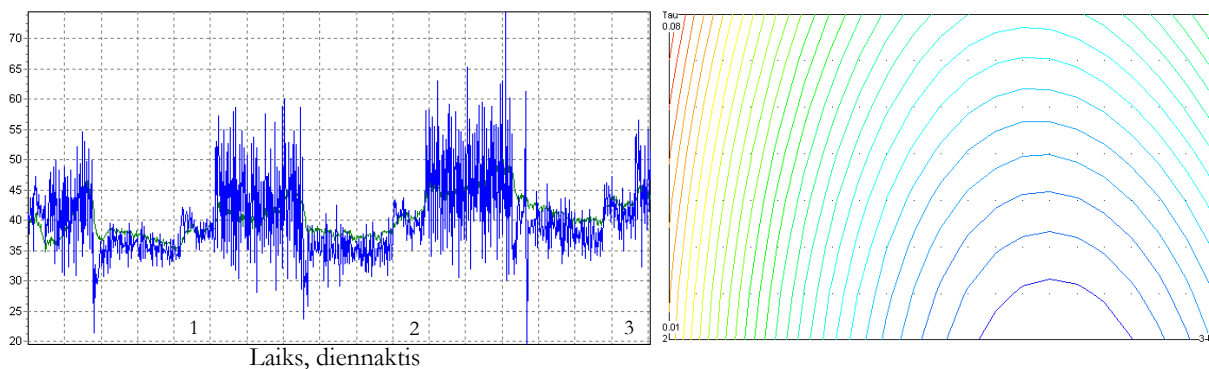


Attēls 2.84. U mērījumi jaunbūves 1. stāvā: siltuma plūsmas un temperatūras sensori iekšpusē (pa kreisi), ārējais temperatūras sensors (pa labi).



Attēls 2.85. Eksperimentāli izmērītie (zaļā likne) un skaitliski aprēķinātie (zilā likne) siltuma plūsmas blīvumi q (W m^{-2}) pēc to minimizācijas 4 (pa kreisi) un 8 (pa labi) diennakts garajiem mērperiodiem āršienas mērījumā.

Kaut arī visa loga kā būvelementa siltuma caurlaidības koeficienta mērījumi nevar tikt veikti ēkas reālos ekspluatācijas apstākļos, to tuvinātu novērtējumu var iegūt, veicot stiklotās daļas siltuma caurlaidības mērījumus. Šajā gadījumā liela loma korektu rezultātu iegūšanā ir tiešajam Saules starojumam – ja tāds nav reģistrēts lielāku daļu no eksperimenta laika (debess apmākušās vai eksistē nojume, kas aizsargā sensorus no tieša starojuma), U koeficienta vērtība var tikt noteikta. Lai iegūtu tuvinātu novērtējumu, pietiek ar siltuma plūsmas mērījumiem stiklojuma centrālajā daļā, bet stūra efektu novērtēšanai un precīzākai rezultējošā U koeficienta noteikšanai nepieciešami papildus mērījumi arī citās vietās. Parasti stiklotām virsmām siltuma caurlaidība ir relatīvi liela, kas nozīmē arī lielu siltuma plūsmas blīvumu un īsāku nepieciešamo mērperiodu – kā rāda pieredze, tas ir robežās no dažām stundām līdz 2-3 diennaktīm. Attēlā 2.86 parādīts stikla paketes eksperimentāli iegūtās un skaitliski aprēķinātās siltuma plūsmas salīdzinājums pēc to minimizācijas un atbilstošā minimizējamā funkcionāļa $F(U, \tau_1)$ vērtības. Gan kumulatīvā pieeja, gan skaitliskās plūsmu minimizācijas algoritms dod vienādus rezultātus – $2,6 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$, lielas siltuma plūsmas gadījumā kumulatīvā vidējošanas metode parasti dod kvalitatīvi pareizus rezultātus, ko arī parāda šis piemērs. Kā redzams no funkcionāļa vērtību apgabala, vislabākā plūsmu sakrišana (minimāla starpība) ir novērojama pie $U \approx 2,6; \tau_1 \approx 0,01$. Termiskās laika konstantas mērvienība grafikā ir diennakts un tās vērtība 0,01 ir mazāka par aprēķinu diskretizācijas soli, tāpēc varam pieņemt, ka τ_1 skaitliski ir mazāks par divām stundām, kas pilnībā atbilst eksperimentāliem novērojumiem.

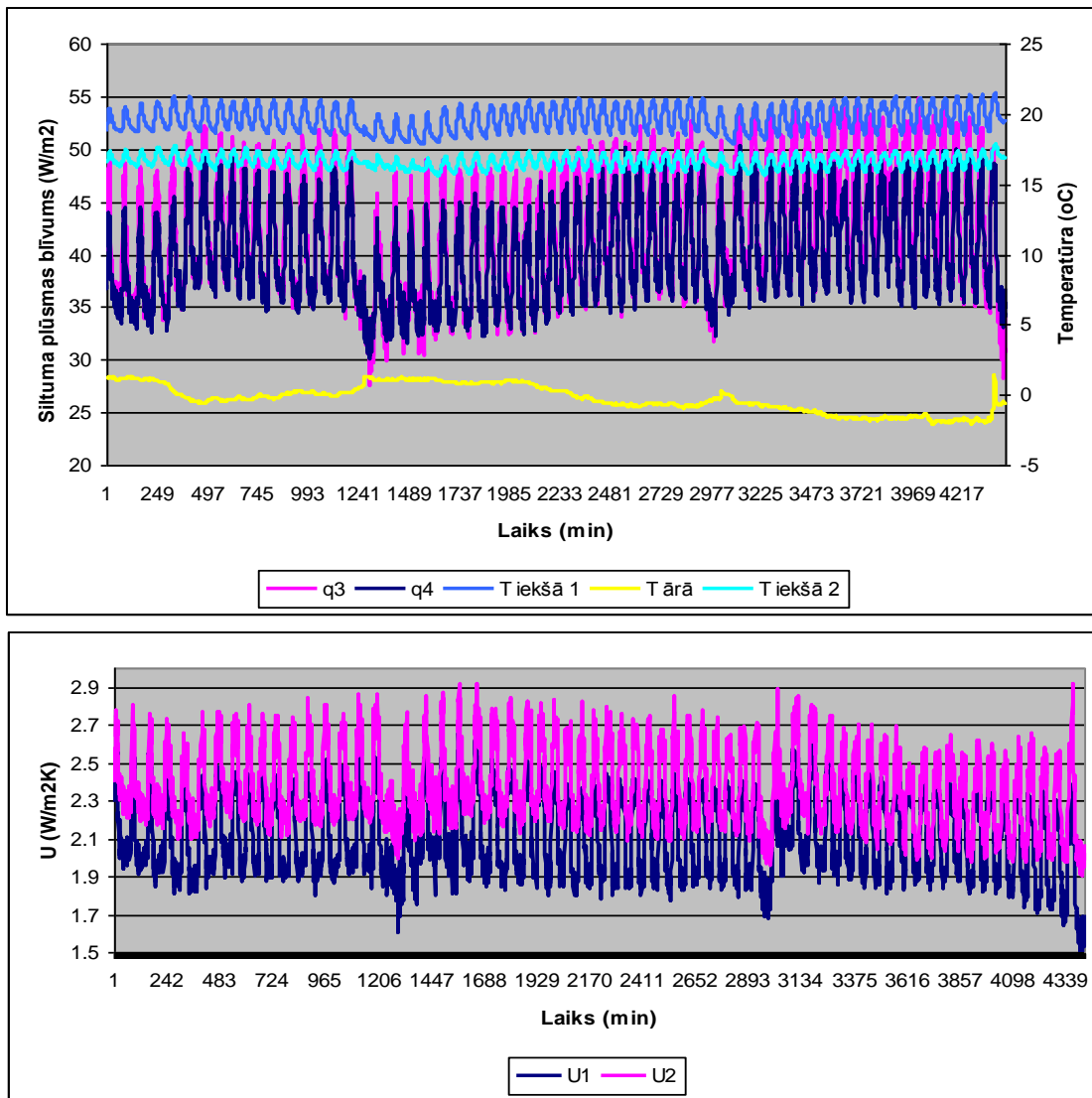


Attēls 2.86. Eksperimentāli izmērītie (zaļā līkne) un skaitliski aprēķinātie (zilā līkne) siltuma plūsmas blīvumi q (W m⁻²) pēc to minimizācijas (pa kreisi) un attiecīgā funkcionāļa $F(U, \tau_1)$ vērtības stikla paketes mērījumā.

Ja vecu koka logu gadījumā ārējais temperatūras sensoru novietošana ārā un savienotājvadu iestiprināšana parasti nesagādā grūtības, tad mūsdienīgu logu un stikla konstrukciju gadījumā tas var izrādīties neiespējami. Viens no šīs problēmas risinājumiem ir distances (bezvadu) termodevēju lietošana, kas tika realizēts jaunākās paaudzes mērsistēmā. Pašlaik kā alternatīva bezvadu risinājumiem eksperimentos paralēli datorsistēmai, kas nodrošina datu reģistrēšanu iekšējā, tiek lietota arī iepriekš minētā autonoma datu uzkrāšanas ierīce. Abas sistēmas tiek darbinātas neatkarīgi, bet rezultējošā U vērtības aprēķinā iegūtie dati tiek apvienoti vienā failā, saskaņojot mērījumu laikus. Piemēri šāda veida eksperimentiem parādīti attēlā 2.87 – tie ir neveramo stikla pakešu un stikloto jumta konstrukciju mērījumi. Abos gadījumos ārējais temperatūra tika reģistrēta neatkarīgi no iekšējās siltuma plūsmas un temperatūras mērījumiem. Vienā no šiem mērījumiem iegūtie dati un atbilstošās koeficienta U vērtību momentānās izmaiņas parādītas attēlā 2.88. Kā redzams, temperatūras režīma regulācija iekšējā ir ar izteiktu periodu, kas iespaido arī siltuma plūsmas vērtības un nosaka momentānā siltuma caurlaidības koeficienta svārstības.

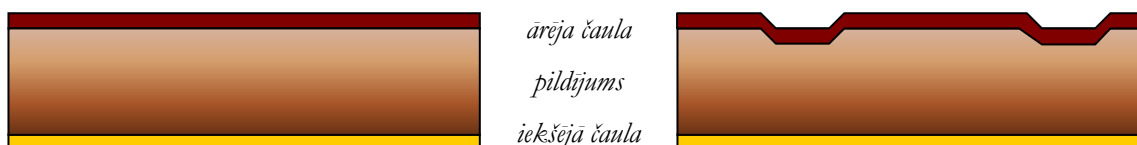


Attēls 2.87. Neveramo stikla pakešu (pa kreisi) un stiklotās jumta konstrukcijas (pa labi) mērījumi.



Attēls 2.88. Stikla paketes mērījumu dati (augšā) un momentānās U koeficienta vērtības (apakšā).

Bez tādiem izolācijas materiāliem kā putuplasts, putu polistirols vai akmens vate, kas tiek izmantoti kā papildus siltuma izolējošs slānis, pēdējā laikā Latvijas būvniecības tirgū ienāk gatavie ēku norobežojošo konstrukciju risinājumi, kas tiek aktīvi izmantoti tirdzniecības centru un noliktavu būvē. Tie pamatā ir dažādu veidu ārsienu un jumta paneļi, kas sastāv no siltuma izolējošās pildījuma daļas un dažādu materiālu slāņiem abās pusēs, kas var tikt veidoti ar dažādām virsmas formām (skat. att. 2.89). Parasti tie nepilda nesošo konstrukciju funkciju, bet tiek stiprināti pie tām – skat. attēlu 2.90. Šāda veida paneļu ražotāji deklarē siltuma caurlaidības koeficientu, kas praktiski vienmēr atbilst Latvijas Būvnormatīva LBN 002-01 prasībām. Tomēr, kā parādīja termogrāfiskais apsekojums (skat. attēlu 2.14), defekti paneļu veida konstrukcijās ir iespējami, tāpēc tika veikti arī vairāki to siltuma caurlaidības koeficienta mērījumi. To rezultāti apstiprināja, ka šo paneļu siltuma pretestība atbilst Būvnormatīvam LBN 002-01, kaut arī atsevišķu paraugu īpašības var atšķirties.



Attēls 2.89. Celtniecības paneļu raksturīgā uzbūve.

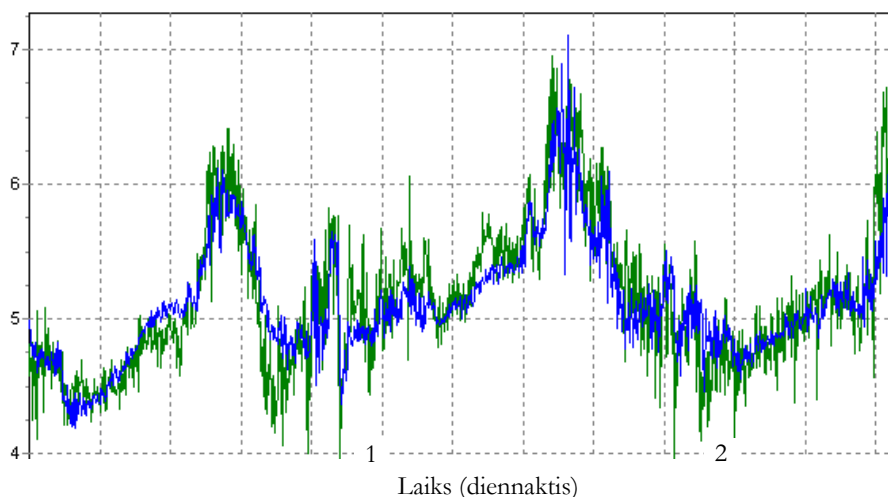
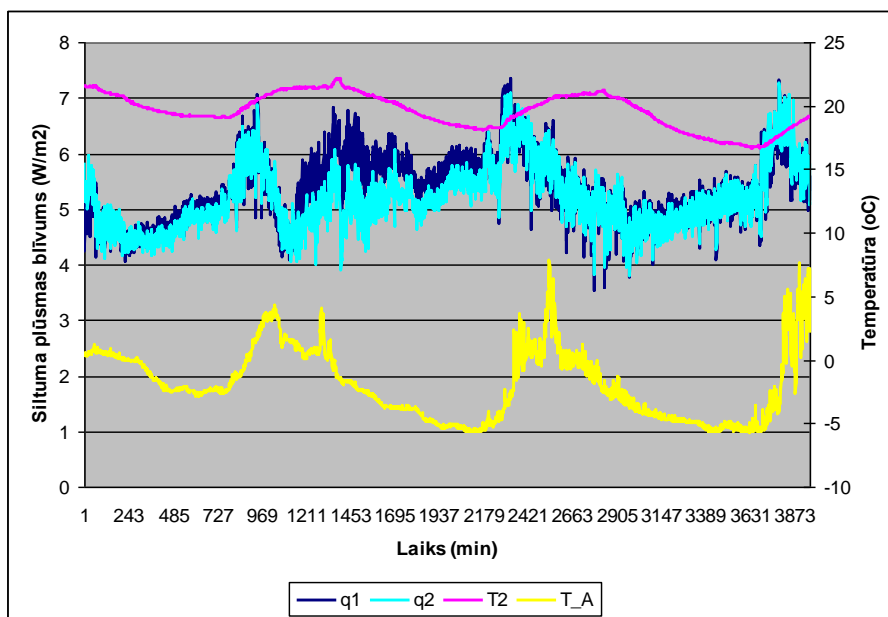


Attēls 2.90. Celtniecības paneļu piestiprināšana pie ārējas un jumta nesošiem karkasiem.

Viens no pirmajiem izolācijas paneļu mērījumiem ekspluatācijā esošām ēkām tika veikts 2004. gadā jaunuzceltajā tirdzniecības kompleksa ēkā Tukumā. Vairāku eksperimentu sēriju rezultātā ir iegūti siltuma caurlaidības koeficienti jumta paneļa vidusdaļā un salaiduma vietas tuvumā. Kā jau varēja sagaidīt, savienojuma vietā siltuma plūsmas vērtības bija nedaudz lielākas nekā vidū (tabula 2.11) un šāda tendence ir novērota arī citu būvkonstrukciju salaiduma vietās šuvju palielinātās siltuma caurlaidības dēļ. Kā redzams no tabulas, vidējotais siltuma caurlaidības aprēķins un skaitliskā algoritma lietojumi dod praktiski vienādus rezultātus šajā nepilnu 3 diennakšu garajā mērperiodā, kas ir uzskatāmi ilustrēti arī ar eksperimentālās un skaitliski aprēķinātās funkciju minimizācijas rezultātu attēlā 2.91. Jāatzīmē, ka U vērtību starpība ir tuva mērsistēmas precizitātei un to noteikšanu ietekmē arī neliels siltuma plūsmas blīvums caur paneli, kas pat pie pietiekami lielas temperatūru starpības – 25 °C tika reģistrēts tikai 4...7 W m⁻² robežās (attēls 2.91).

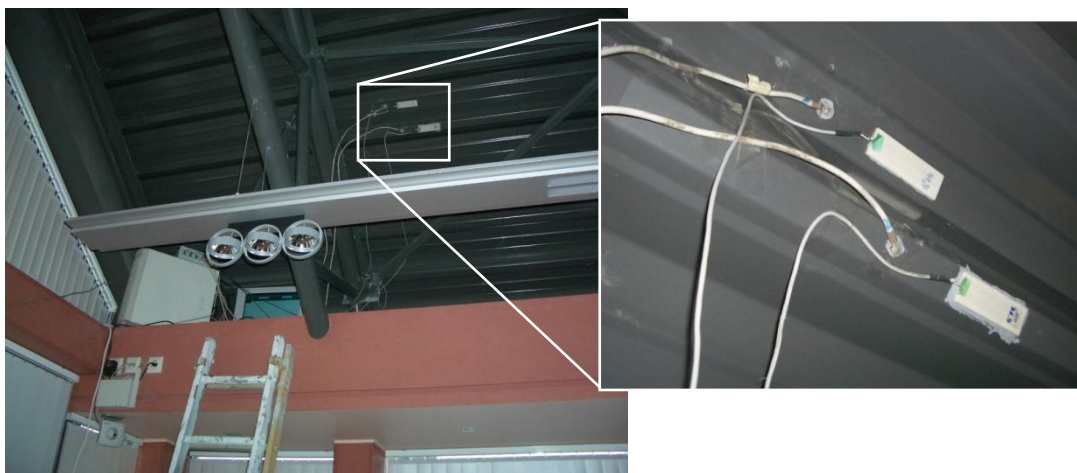
Tabula 2.11. Iegūto U vērtību salīdzinājums dažādām jumta paneļa daļām.

Mērījuma vieta	U kumulatīvi (vidēji)	U skaitliski (plūsmu minimizācija)
	(W m ⁻² K ⁻¹)	(W m ⁻² K ⁻¹)
Jumta panelis šuves tuvumā	0,24...0,28	0,24...0,28
Jumta panelis tā vidusdaļā	0,23...0,25	0,23...0,24



Attēls 2.91. Piemēri jumta paneļa mērījumu datiem (augšā). Izmērītā (zaļā līkne) un skaitliski aprēķinātā (zilā līkne) siltuma plūsmas blīvuma q (W m^{-2}) atbilstība pēc minimizācijas (apakšā).

Līdzīgu jumta paneļu mērījumi tika veikti arī Rīgas centrā jaunuzceltās administratīvās ēkā jumta stāvā, telpā ar slīpo savietoto jumtu, kura biezums ir atšķirīgs dažādās vietās (attēls 2.92). Vadoties no jumta konstrukcijas projekta dokumentācijas, kur paredzēta PAROC jumta siltumizolācijas plāksņu ar kopējo biezumu 17 cm izmantošana, aprēķinā tika noteikta tuvināta konstrukcijas siltuma caurlaidības vērtība $U_{\text{aprēķina}}=0,22 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$. Latvijas Būvnormatīvā LBN 002-01 publiskajām ēkām noteikta jumta konstrukciju siltuma caurlaidības normatīvā vērtība $U_{\text{RN}}=0,25 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ un maksimāli pieļaujamā vērtība, kuru nedrīkst pārsniegt - $U_{\text{RM}}=0,35 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$. Eksperimentālos mērījumos atšķirīgā biezuma jumta konstrukcijas daļās tika iegūts rezultāts $U=0,18...0,21 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$, kas nav pretrunā ar atbilstoši jumta konstrukcijas projekta dokumentācijai aprēķinātajām šo konstrukciju siltuma caurlaidības vērtībām un atbilst arī Būvnormatīva nosacījumiem.



Attēls 2.92. Jumta paneļa mērījumi vietās ar dažādu tā biežumu.

Veiktie eksperimenti un praktiskā testēšanas pieredze parāda, ka izgatavotās mērsistēmas kopā ar siltuma plūsmu minimizācijas algoritma programmatūru, nodrošina pietiekami labu mērījumu precizitāti, kā arī ir lietojami tādos apstākļos, kad citas metodes nevar izmantot, tādējādi var tikt plaši pielietotas siltuma caurlaidības koeficienta noteikšanai reālos ēku ekspluatācijas apstākļos. Metode efektīvi lietojama gan nevienmērīgiem un daudzslāņu būvelementiem, gan nelielu temperatūras starpību un mainīga siltuma plūsmas virziena gadījumā. Atšķirībā no apskatītās infrasarkanā staru termogrāfijas, kura gan ļauj operatīvi kvalitatīvi salīdzināt siltuma zudumus dažādās ēkas zonās un elementos, bet kurai nepieciešama dārga aparatūra, izveidotās metodikas realizēšanai lietojamās aparatūras izmaksas ir vismaz par kārtu mazākas. Tas arī nosaka plašas šīs sistēmas lietojumu iespējas U vērtības noteikšanai, plānojot ēku siltināšanu un kontrolējot šo darbu izpildes rezultātu.

Laikā no 90-to gadu otrās puses, kad tika lietota pirmā izstrādātā mērsistēma un pirmā datu apstrādes programmatūras versija, koeficients U eksperimentāli tika noteikts vairākiem simtiem ēku norobežojošo konstrukciju – ārsienām, jumtiem, bēniņu un pagraba pārsegumiem, kā arī stiklotām konstrukcijām gan vairākus gadu desmitus vecām mājām, gan tikko uzbūvētajām. Apkopojot raksturīgākos piemērus, var secināt, ka atsevišķām mūsdienu konstrukcijām ir pat līdz 5 reizēm labākas siltuma izolējošās īpašības pie būtiski mazāka biezuma un svara, tajā pat laikā ievērojami mazāks termiskās inerces laiks, kas izraisa virkni rindu ar iekšgaisa temperatūras regulēšanu saistītas problēmas. Savukārt praktiski visas padomju laikā celtās ēkas ir mūsdienu prasībām neatbilstošas siltuma saglabāšanas ziņā un to siltumtehniko parametru uzlabošanas nepieciešamību nosaka nepamatoti lielās apkures izmaksas.

Uzlabot norobežojošo konstrukciju nepietiekamo siltuma pretestību var, papildinot to ar siltuma izolācijas materiāla slāni. To var veikt trijos veidos – aizpildot ārsienās esošo gaisa starpslāni, kā arī siltinot konstrukciju no iekšpuses vai ārpuses. Gaisa starpslāņa pildīšana bieži ir grūti realizējama un nevar tikt lietota visām konstrukcijām, tajā pat laikā tās rezultātā paliek nemainīgs gan

ārsienas ārējais un iekšējais izskats, gan arī tās biezums. Iekšējā siltināšana parasti izmaksā mazāk nekā ārējā un var tikt veikta arī tikai atsevišķām telpām, bet tā ievērojami samazina nelielu iekštelpu izmērus, kā arī prasa tvaika barjeras lietošanu un pārsegumu daļēju papildus siltināšanu, lai novērstu iespējamās siltuma tiltus. Ēkas siltuma izolācija no ārpuses var tikt veikta bez iemītnieku darba un dzīves režīma traucēšanas, var tikt veikta visai būvei un parasti neprasa lielas papildus izmaksas (piem., tvaika barjeras lietošanu), tomēr to nevar izmantot, ja ir jā saglabā ēkas fasāde. Gadījumā, ja ir zināma būvkonstrukcijai nepieciešamā papildus siltuma pretestība R ($\text{m}^2 \text{K W}^{-1}$), izolācijas slāņa biezumu d (mm) ar zināmu siltuma vadītspējas koeficientu λ ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$) tuvināti var noteikt pēc sakarības: $d = R \cdot \lambda \cdot 1000$, precīzām aprēķinām jāievēro arī šajā slānī esošie stiprinājumi un siltuma tilti. Daži piemēri ēkas norobežojošo konstrukciju siltuma caurlaidības koeficienta samazināšanai apkopoti tabulā 2.12.

Tabula 2.12. Tipiskie piemēri esošo konstrukciju siltuma caurlaidības samazināšanai.

Konstrukcija	Tipiskais U ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$)	Uzlaboējuma veids	Iegūtais U ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$)
25+12 cm bieza dobo ķieģeļu ārsiena ar 5 cm gaisa šķirtkārtu	1,1	Šķirtkārtas aizpildīšana ar beramo siltumizolācijas vati	0,5
25 cm bieza silikātķieģeļu ārsiena	2,2	Ārējā siltināšana ar 10 cm biezu akmens vates slāni	0,31
1. stāva betona grīda uz neapkurinātu pagrabu	1,2	Pagraba griestu siltināšana ar 8 cm polistirola plāksnēm vai poliuretānu	0,35
Darvots neizolēts jumts (dzelzsbetona paneli)	1,9	2 akmens vates slāņu (10+5 cm) ievietošana starp sijām un zem tām	0,26
Vienstikla koka logs (ievērojot rāmja daļu)	4,7	Nomaina pret pakešlogiem ar selektīvo pārklājumu (ievērojot rāmja daļu)	$\leq 1,6$

2.2.4. Secinājumi

Ievērojamu daļu no ēku siltuma zudumiem veido vadīšanas ceļā pārnests siltuma daudzums caur tās norobežojošām konstrukcijām un tā daudzuma raksturošanai izmantoto divus lielumus – siltuma vadīšanas koeficientu λ un siltuma caurlaidības koeficientu U . Pirmais raksturo homogēnu materiālu siltuma izolējošās īpašības un tā noteikšanai ir izveidota standartizēta eksperimentālā „karstās plates” iekārta, ar kuras palīdzību ir veikti vairāku desmitu būvniecībā bieži izmantojamo materiālu pētījumi. Tāpat ir izveidota pieeja, kas ar šīs iekārtas palīdzību ļauj novērtēt materiālu temperatūras vadītspēju. Koeficients U raksturo nehomogēnas uzbūves būvkonstrukcijas kopumā, kas var sastāvēt no vairākiem atšķirīgiem objektiem iekļaujot caurspīdīgās daļas, tāpēc tas ietver sevī siltuma pārnesi ne tikai vadīšanas ceļā, bet arī konvekcijas un siltuma starojuma daļas. Šī koeficienta

noteikšana var tikt veikta kā laboratorijas apstākļos – izveidotajā termiskajā kamerā, tā arī ēkās, kas jau atrodas ekspluatācijā, lietojot speciālu pārvietojamu mērsistēmu un iegūto datu matemātiskās apstrādes algoritmu. Vairāku simtu mērījumu rezultātā tika iegūta plaša U koeficientu datu bāze dažādu veidu mūdienu logu konstrukcijām un lielākai daļai no sērijveida dzīvojamo ēku norobežojošām konstrukcijām.

Ekspierimenti parādīja ēkās izmantojamo būvkonstrukciju un materiālu lielu siltuma vadīšanas zudumu raksturojošo koeficientu diapazonu, kas pamatā ir atkarīgs no būves celtniecības gada un tās izmantošanas mērķa. Praktiski visām vecajām ēkām ir nepieciešama norobežojošo konstrukciju papildus siltuma izolācija un logu nomaiņa, lai nodrošinātu atbilstību Latvijas Būvnormatīva „Ēku norobežojošo konstrukciju siltumtehnika” prasībām un samazinātu kopējo siltuma zudumu daudzumu. Lai atrastu optimālu uzlabojumu veidu, ir nepieciešams novērtēt ēkas pašreizējo stāvokli, ko var izdarīt vecot apskatītos mērījumus. Daudzos gadījumos ir nepieciešama ēkas norobežojošo būvkonstrukciju siltuma pretestības uzlabošana, ko var izdarīt vai nu siltinot tās (piem., ārsienas, jumts) vai arī nomainot (piem., logi, durvis). Tomēr, bez siltuma vadīšanas zudumiem caur ēkas ārējo čaulu, tās siltuma zudumi un kopējā energoefektivitāte ir būtiski atkarīga arī no citu veidu siltuma pārneses. Kā rāda pieredze un veiktie eksperimentālie mērījumi, agrāk būvētām ēkām daudz lielāki enerģijas zudumi ir tieši konvekcijas ceļā caur neblīvējumiem un atverēm norobežojošās konstrukcijās. Arī tos ir iespējams novērtēt, veicot eksperimentālos mērījumus.

2.3. Konvekcijas siltuma zudumi

Jebkurai dzīvojamai ēkai ir raksturīga gaisa apmaiņa, jo cilvēks savas darbības rezultātā patērē skābekli un izdala ogļskābo gāzi un ūdeni, tādēļ ir nepieciešams gaisu mainīt – telpas ventilēt. Minimālā nepieciešamā gaisa apmaiņas intensitāte ir atkarīga no daudziem faktoriem, piem., cilvēku skaita telpā un to aktivitātes. Gaisa apmaiņas apjoms dzīvojamo namu telpās ir definēta Latvijas Būvnormatīvā LBN 211-08 (LBN 211-08, 2008), bet tās intensitāte uz vienu cilvēku atkarībā no telpas tipa un tās izmantošanas veida ir detalizēti aprakstīts standartā (ANSI/ASHRAE Standard 62, 2001), prasības dažiem izplatītiem telpu veidiem apkopotas tabulā 2.13.

No otras puses, gaisa apmaiņa ar ārgaisu lielas temperatūru starpības gadījumā ir saistīta ar ievērojamiem siltuma zudumiem, kas var tikt kontrolēti regulējamās piespiedu ventilācijas un rekuperācijas sistēmās, bet nav kontrolējamā brīvās ventilācijas gadījumā caur neblīvējam vietām un atverēm ēkas čaulā, kad tā ir atkarīga no vēja izraisītā spiediena starpības un t.s. skursteņa efekta.

Tabula 2.13. Raksturīgo dzīvojamo telpu prasības (ANSI/ASHRAE Standard 62, 2001).

Telpas veids	Cilvēku skaits uz 100m ²	Gaisa apmaiņa m ³ h ⁻¹ uz 1 cilvēku
Bibliotēka	22	10,5
Mācību klase	54	10,5
Birojs	8	14
Sporta zāle	32	14
Konferenču zāle	54	14
Kafejnīca, restorāns	108	14
Teātris	161	14
Smēķētāju istaba	75	42

Attēlā 2.93 parādītas tipiska privātmājas skice ar vēja rezultātā izraisītiem dažāda spiediena reģioniem. Spiedienu p (Pa) uz ēkas ārējās čaulas un spiedienu starpību Δp (Pa) starp ēkas ārējo čaulu un iekštelpu ir iespējams noteikt pēc sakarībām (Hagentoft, 2003):

$$p = C_p \frac{\rho v^2}{2}, \quad \Delta p = (C_p - C_{pi}) \frac{\rho v^2}{2}, \quad (2.93)$$

kur ρ (kg m⁻³) ir gaisa blīvums, v (m s⁻¹) – vēja ātrums norādītajā references augstumā, bet C_p (-) un C_{pi} (-) ir attiecīgi empīriskie vēja spiediena un iekšgaisa spiediena koeficienti. Atkarībā no fasādes novietojuma pret vēja virzienu, koeficients C_p būs ar stāvu skaitu līdz 3 mainās robežās no -0,5 līdz 0,4, savukārt koeficienta C_{pi} vērtība ēkās ar vienmērīgi sadalītu gaisa noplūžu vietām ir aptuveni vienāda ar -0,3, tādējādi tas ļauj tuvināti novērtēt spiedienu starpību.

Otrs process, kas izsauc intensīvu gaisa apmaiņu, ir t.s. skursteņa efekts, kurš veidojas pateicoties temperatūras starpībai (blīvuma atšķirībām) starp iekštelpu gaisu un ārgaisu, kas, savukārt, izsauc vertikālu spiedienu diferenci. Šī parādība ir ilustrēta attēlā 2.94 – spiediens iekštelpā un ārā ir vienādi uz „neitrālā spiediena plaknes”, siltajam gaisam ar mazāku blīvumu ceļoties uz augšu veidojas vilkme, kas sekmē gaisa izplūšanu augšdaļā un ārgaisa ieplūdi apakšdaļā. Analītiski spiedienu starpība Δp attālumā z no „neitrālā spiediena plaknes” var tikt atrasta pēc sakarības (Hagentoft, 2003):

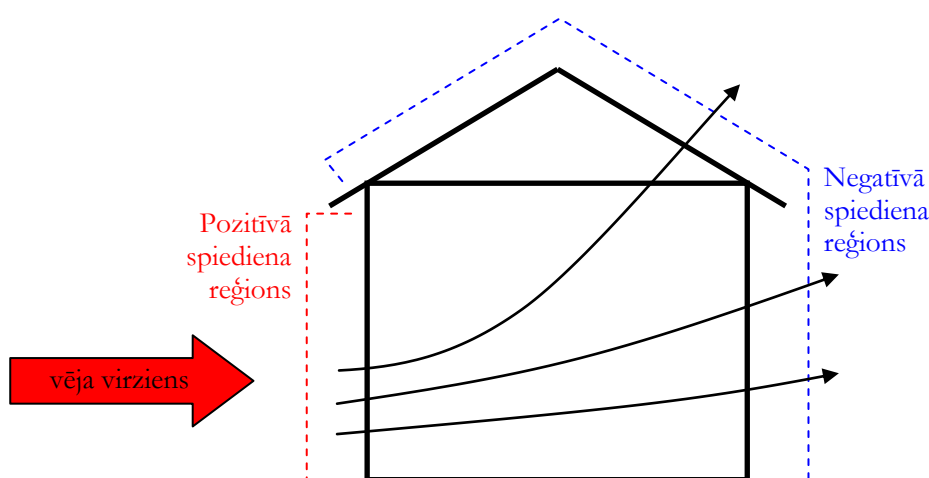
$$\Delta p = z \cdot \Delta \rho \cdot g = z \cdot 3456 \cdot \left(\frac{1}{T_{\text{ārā}}} - \frac{1}{T_{\text{iekšā}}} \right), \quad (2.94)$$

kur $\Delta \rho$ (kg m⁻³) ir ārgaisa un iekšgaisa blīvumu starpība, bet temperatūras ir dotas Kelvina grādos (K). Augstām ēkām bez starpstāvu vēja izolācijas šī efekta ietekme uz konvektīvo gaisa apmaiņu un siltuma zudumiem var būt ļoti nozīmīga.

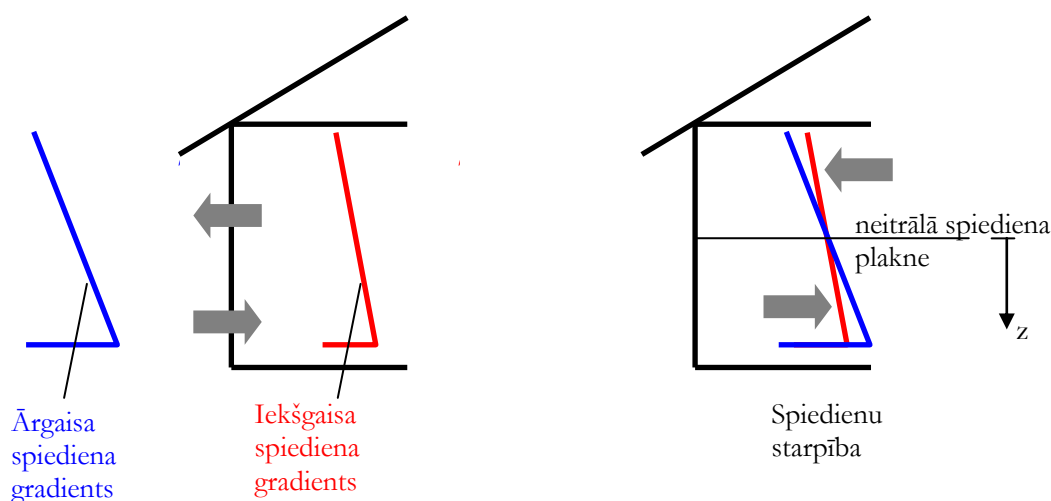
Siltuma plūsma Q (W) līdz ar kustīgā gaisa masām var noteikta aprēķināta pēc sakarības:

$$Q = c \cdot \rho \cdot \Delta T \cdot v \cdot S, \quad (2.95)$$

kur c ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$) un ρ (kg m^{-3}) ir attiecīgi gaisa siltuma ietilpība un blīvums, ΔT (K) – temperatūru starpība starp gaisa pārvietošanās punktiem telpas iekšpusē, v (m s^{-1}) – gaisa plūsmas ātrums un S (m^2) – gaisa spraugu laukums. Šajā gadījumā latentā siltuma efekti netiek ņemti vērā. Ja pieņem, ka gaisa īpašības ir maz mainīgas, tad siltuma zudumus konvekcijas ceļā pamatā nosaka tā pārvietošanās ātrums (jeb spiedienu starpība), ārējais temperatūra (pieņemot, ka iekšējais temperatūra ir nemainīga) un neblīvo vietu izmēri. Tieši daudzas neblīvās vietas logu un durvju ailēs nosaka konvekcijas siltuma zudumu dominējošo lomu vecu ēku kopējā siltuma bilancē. Vietas, pa kurām notiek pastiprināta ārējais ieplūde iekšējās vai siltā gaisa izplūde, visefektīvāk ir iespējams atklāt, lietojot termogrāfisko metodi (skat. sadaļu 2.1.2.).



Attēls 2. 93. Vēja ietekmē izveidojušies atšķirīgu spiedienu apgabali ap ēku.



Attēls 2.94. Skursteņa efekta rašanās shēma: spiedienu sadalījumi un rezultējošā diference.

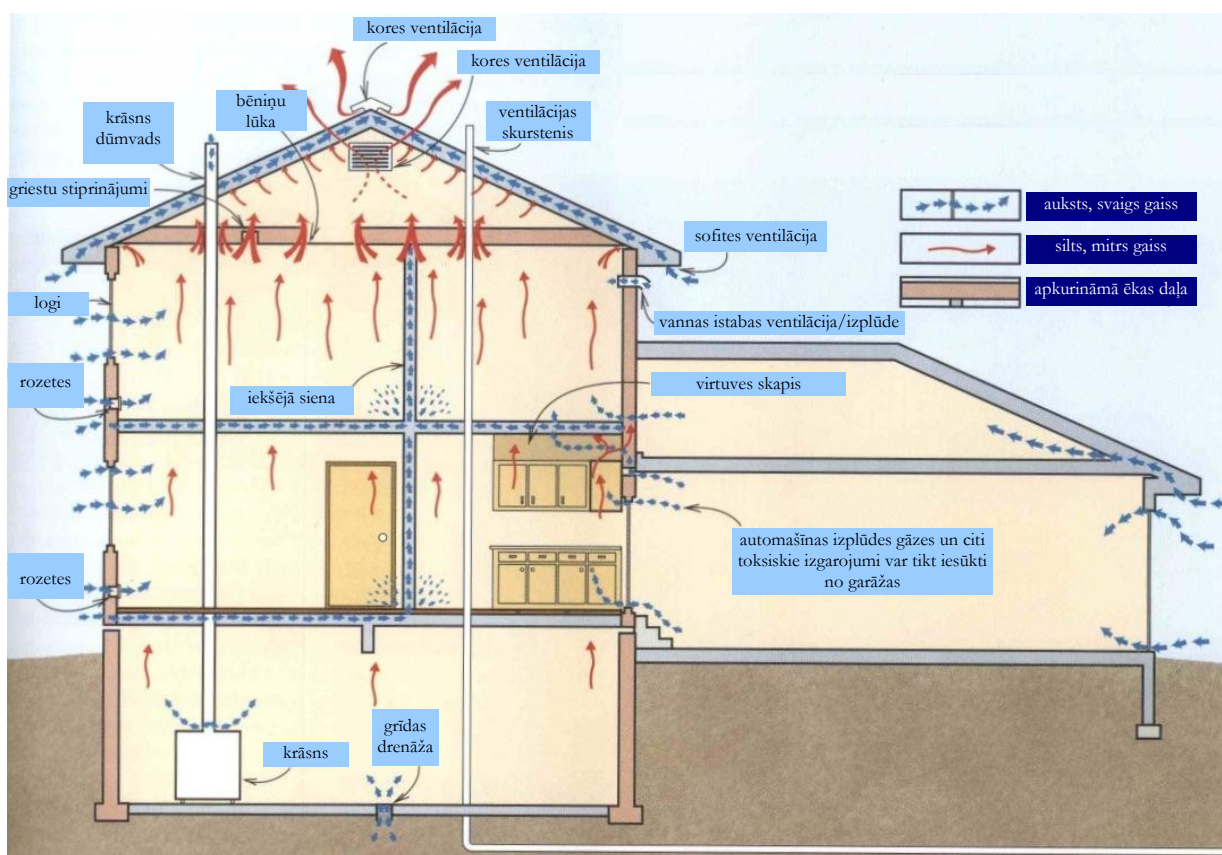
Tāpēc gaisa apmaiņas intensitātei ēkās ir jāatrodas noteiktās robežās, kas no vienas puses nodrošina nepieciešamo gaisa apmaiņu, bet no otras puses nerada nekontrolējamus siltuma zudumus. Gaisa apmaiņas intensitāti telpā raksturo ar atbilstošu koeficientu, kas dažādos standartos var tikt normēts uz dažādiem lielumiem, bet tas parasti ietver gaisa tilpumu, kas noteiktā laikā tiek

infiltrēts caur ēkas ārējo čaulu, ar šo pašu koeficientu raksturo arī kādas atsevišķas telpas gaisa apmaiņas intensitāti (piem., tabula 2.14). Kā viegli saprast, atsevišķu telpu gaisa apmaiņas intensificēšanai ir nepieciešama ievērojama svaiga gaisa pieplūde, ko var efektīvi nodrošināt tikai ar piespiedu ventilācijas sistēmas palīdzību.

Apskatot kādu ēku, tās gaisa apmaiņu raksturojošais koeficients ir integrāls lielums visai būvei un ietver gaisa apmaiņas procesus gan caur ēkas ārējo čaulu, gan arī tās iekšējās un konstrukcijās (skat. attēlu 2.95), tāpēc tā analītiskā noteikšana ir apgrūtināta un to var novērtēt tikai tuvināti. Kvantitatīvai gaisa apmaiņas ēkā vai tās blokā (telpā) eksperimentālai noteikšanai tiek izmantota standartizēta mērmetodika un atbilstošā iekārta.

Tabula 2.14. Raksturīgo telpu iekšgaisa apmaiņas intensitātes (McMullan, 2002).

Telpa	Gaisa apmaiņas intensitāte
Restorāns, kafejnīca	10-15 reizes stundā
Mācību klases	3-4 reizes stundā
Biroja telpas	2-3 reizes stundā
Dzīvojamās telpas	1 reize stundā
Citas telpas	8 litri sekundē uz vienu cilvēku



Attēls 2.95. Ēkas gaisa apmaiņas vispārējā shēma bezvēja gadījumā.

2.3.1. Ēkas gaisa apmaiņas koeficients

Gaisa apmaiņas intensitāti pie noteiktas spiedienu starpības starp iekštelpu gaisu un ārējo gaisu raksturo ar gaisa apmaiņas koeficientu n (angl. *air exchange rate*). Tas raksturo laiku, kurā viss gaisa tilpums, kas atrodas telpā, nomainās ar ārējo gaisu, tā mērvienība ir (h^{-1}) un tas ir normēts uz gaisa tilpumu (LVS EN 13829, 2002; ISO 9972, 2006). Latvijas Būvnormatīvā LBN 002-01 tiek definēts analogisks lielums, ko sauc par ēkas gaisa caurlaidību, tas tiek normēts nevis uz ēkas gaisa tilpumu, bet gan uz tās norobežojošo konstrukciju kopplatību, turpmāk apzīmēsim šo lielumu ar n_{LBN} (m h^{-1}). Abus minētos standartizētos koeficientus iegūst, eksperimentāli pie spiedienu starpības starp iekšējo gaisu un ārējo gaisu $\Delta p = 50 \text{ Pa}$ mērot gaisa plūsmu V' ($\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$), kas ieplūst vai izplūst no objekta (tādā gadījumā lieto indeksu 50):

$$n_{50} = \frac{V'}{V}, \quad n_{\text{LBN}, 50} = \frac{V'}{S} \quad (2.96)$$

kur V – gaisa tilpums ēkā vai telpā (m^3), bet S – ēkas ārējās čaulas laukums (m^2). Šie standartizētie lielumi raksturo gaisa apmaiņu pie ievērojamas spiedienu starpības 50 Pa, kas dabiskos apstākļos nekad netiek sasniegta. Tāpēc siltuma zudumu novērtēšanai ēkas reālos ekspluatācijas apstākļos nepieciešamo lielumu aprēķina, koeficientus n un n_{LBN} pareizinoš ar empīrisko t.s. ēkas vēja aizsargātības koeficientu e (-), kas brīvi stāvošām ēkām tiek pieņemts vienāds ar 0,1, bet vēja aizsargātām – ar 0,04. Tādējādi faktiski tiek pieņemts, ka vidējā spiedienu starpība Δp dabiskos apstākļos mainās no 2 līdz ar 5 Pa. Šāda pieeja atspoguļo reālu gaisa apmaiņu bez mākslīgi radītās spiedienu starpības tuvināti, precīzākai to noteikšanai var izmantot iezīmētās gāzes (angl. *tracer gas*) ilgtermiņa monitoringa metodi (LVS EN ISO 12569, 2009), kas šajā darbā netiek apskatīta. Šīs metodes pamatā ir iezīmētās gāzes (piem., He, CO₂, SF₆) koncentrācijas telpā vai ievadītā apjoma mērījumi ilgākā laika periodā, ēku ekspluatējot parastajā režīmā.

Saskaņā ar standartu (DIN V 4108-7, 2001) maksimāli pieļaujamā n_{50} vērtība ēkām bez piespiedu ventilācijas ir 3 h^{-1} , bet ēkām ar uzstādīto ventilācijas sistēmu tās blīvējums var būt ievērojami augstāks un gaisa apmaiņa $n_{50} < 1,5 \text{ h}^{-1}$. Savukārt, pasīvo dzīvojamo māju sertifikācijas kritēriji (Passivhaus Institut, 2012) maksimālo n_{50} rādītāju ierobežo ar $0,6 \text{ h}^{-1}$. Turpretim daudzie veiktie mērījumi dažādās sabiedriskajās un dzīvojamajās ēkās Latvijā pirms to rekonstrukcijas parāda ievērojami lielākas gaisa apmaiņas koeficienta vērtības $n_{50} = 10 \dots 14 \text{ h}^{-1}$, bet atsevišķos gadījumos (piem., kāpņu telpās) var būt vēl lielāks. Tādās ēkās pastāv būtiski palielināti virsnormatīvie siltuma zudumi, kas ietekmē arī kopējo siltuma bilanci.

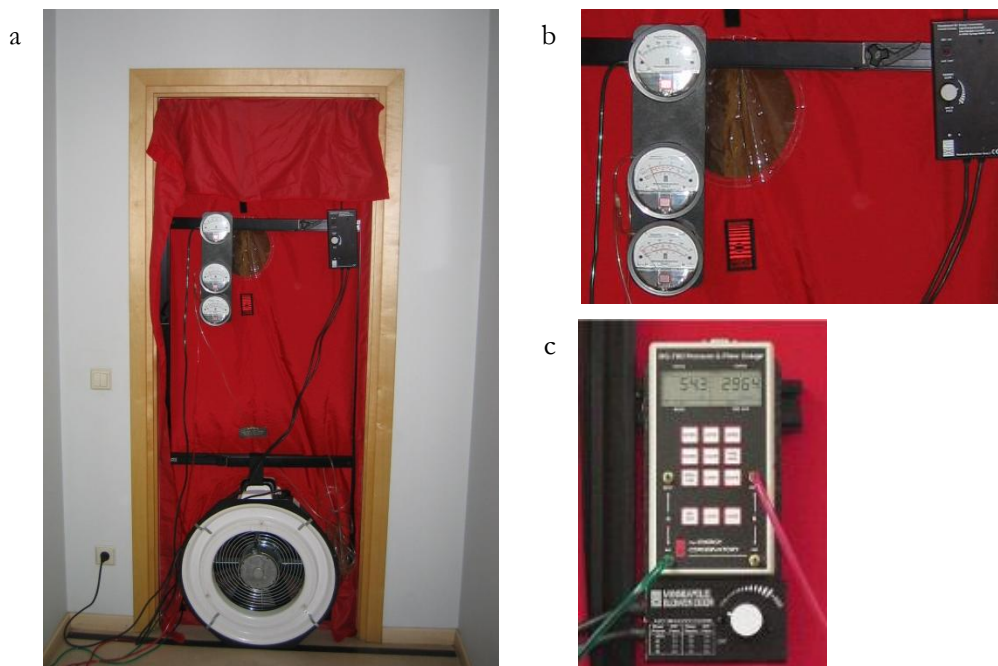
Latvijas Būvnormatīvs LBN 002-01 nosaka, ka būvelementu gaisa caurlaidība visai ēkai vai tās daļai, izteikta kā gaisa noplūde uz ēkas ārējās čaulas virsmas laukumu $\frac{\text{m}^3}{\text{h m}^2}$ pie 50 Pa spiedienu

starpības telpās un ārā nedrīkst pārsniegt noteiktas maksimālās vērtības n_{LBN} , kas atšķiras dažādām ēku kategorijām:

- dzīvojamām mājām, pansionātiem, slimnīcām un bērnudārziem $n_{LBN, 50}=3 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \text{ m}^{-2}$;
- publiskām ēkām izņemot pansionātus un slimnīcas $n_{LBN, 50}=4 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \text{ m}^{-2}$;
- ražošanas ēkām $n_{LBN, 50}=6 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \text{ m}^{-2}$.

Minēto prasību var nepiemērot ražošanas ēkām, ja pierāda, ka konkrētajai ēkai šī prasība nav būtiska.

Noteikt ēkas vai tās daļas gaisa apmaiņas koeficientu un tās atbilstību standartiem var, veicot atbilstoši standartu (LVS EN 13829, 2002; ISO 9972, 2006) prasībām eksperimentālos mērījumus, izmantojot speciālu iekārtu BlowerDoor (The Energy Conservatory, 2012), kas ir paredzēta standartizētās spiedienu starpības 50 Pa radīšanai un gaisa plūsmas V' nodrošināšanai. Mērījumiem sagatavotās iekārtas kopskats parādīts attēlā 2.96a, tās galvenās sastāvdaļas ir spiedienus starpības Δp un ventilatora ražības (jeb gaisa plūsmas) V' mērierīces, kā arī speciāls ventilators ar nepārtraukti regulējamu apgriezību skaitu, kas ar rāmja un auduma palīdzību tiek iestiprināts kādā no pētāmās ēkas atverēm – logā vai durvīs. BlowerDoor iekārta tiek ražota ar analogām vai digitālām lielumu Δp un V' noteikšanas ierīcēm (attēli 2.96b,c), pirmais variants tika izmantots visos šī darba ietvaros veiktajos ēku gaisa apmaiņas eksperimentālos pētījumos.

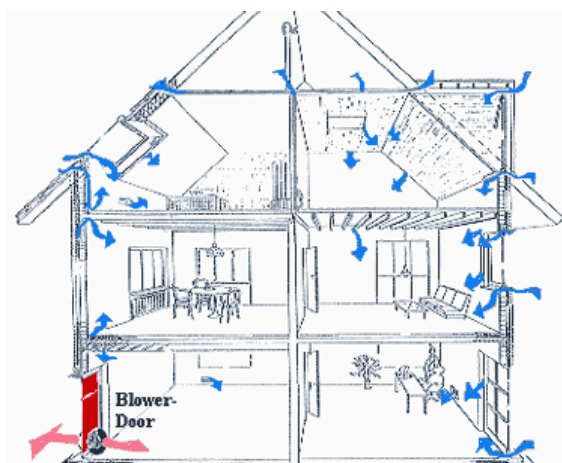


Attēls 2.96. Iekārtas BlowerDoor kopskats (a) un tajā lietotās analogās (b) vai digitālās (c) mērierīces.

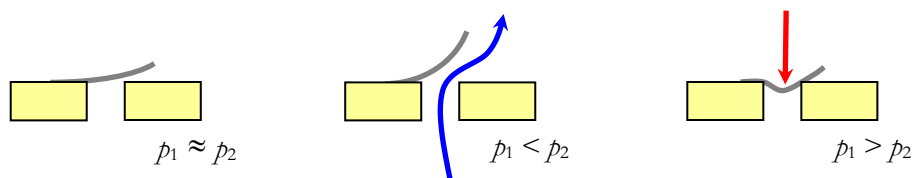
Mērījumu laikā ar iestiprinātās iekārtas palīdzību tiek nodrošināta kontrolējamā gaisa plūsma V' no vai uz ēku (ventilatora ražība), kas stacionārā gadījumā ir vienāda ar gaisa izplūdi vai ieplūdi caur ēkas norobežojošām konstrukcijām. Tāpat ar lokanu cauruļu palīdzību tiek mērīta arī spiedienu

starpība gaisā telpas iekšpusē un ārā Δp . Zinot šos lielumus un ēkas ģeometriskos parametrus, gaisa apmaiņas koeficienti var tikt aprēķināti pēc sakarībām (2.96). Gaisa cirkulācijas shēma gaisa apmaiņas koeficienta noteikšanas mērījumu laikā nelielai ēkai ar tajā radītu zemspiedienu parādīta attēlā 2.97.

Tā kā ēkas norobežojošajās konstrukcijās var būt konstruktīvie objekti un detaļas, kuru gaisa caurlaidība ir atkarīga no spiedienu starpības (piem., attēlā 2.98 parādīts gadījums), tad arī eksperimentu rezultātā aprēķinātā gaisa apmaiņas vērtība būs atkarīga no BlowerDoor iekārtas radītās spiedienu starpības virziena. Arī gadījumā, ja mērījumu laikā uz ēkas vienu fasādi pūš vējš, rodas papildus spiediens, kas ietekmē rezultātu. Tādos gadījumos ir ieteicams veikt divus mērījumus – radot iekštelpās 50 Pa lielu pārspiedienu un zemspiedienu, tas ļauj izslēgt no rezultātiem sistemātisko vēja radīto papildus spiediena ietekmi un atklāt dažādus no spiedienu starpības virziena atkarīgus efektus. Arī lielas temperatūras starpības starp iekšpusi un ārpusi, kas rada papildus konvektīvo gaisa kustību ietekmi uz rezultātu, iespējams mazināt, veicot gan pārspiediena, gan arī zemspiediena testus.



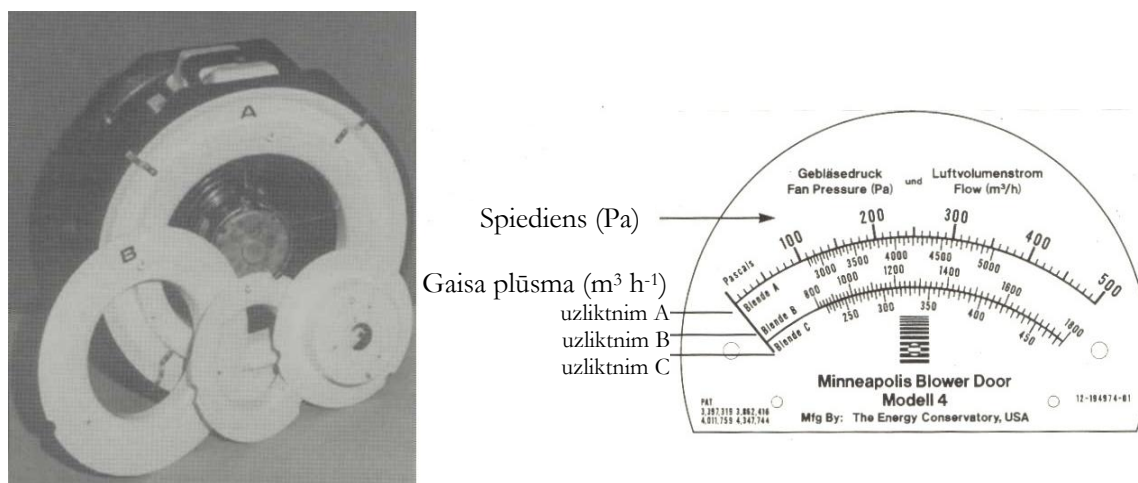
Attēls 2.97. Gaisa cirkulācija ēkā BlowerDoor mērījumu laikā ar telpās radītu zemspiedienu.



Attēls 2. 98. Konstruktīvā elementa piemērs, kura gaisa caurlaidība ir atkarīga no spiedienu starpības.

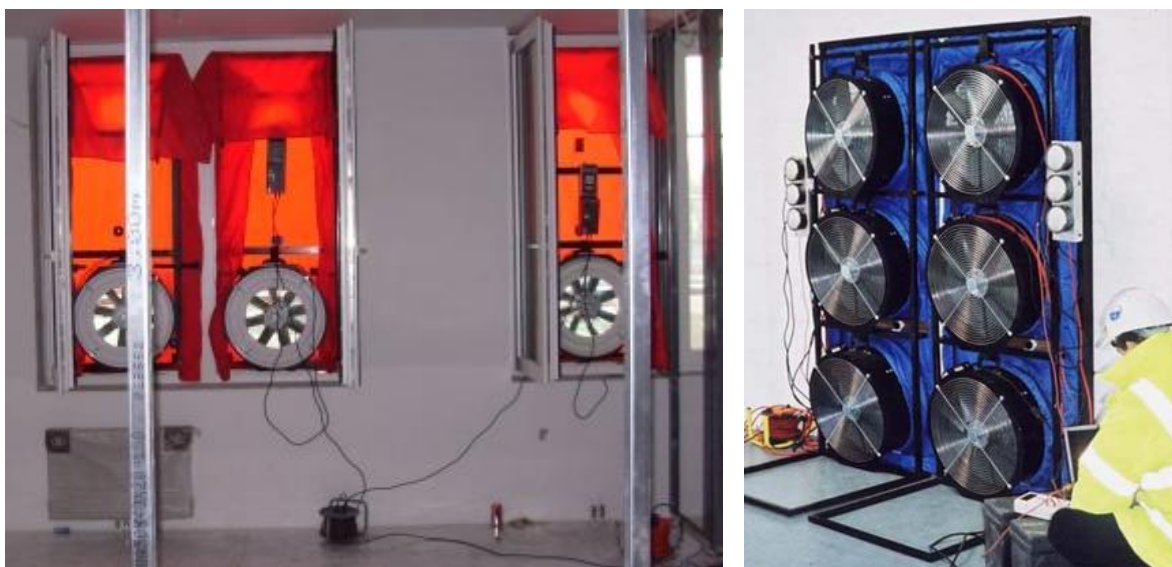
BlowerDoor mēriekārtas komplektā ietilpst arī 3 dažādi ventilatora uzliktņi, kas ir paredzēti gaisa plūsmas samazināšanai gadījumā, ja mērījumu objekts ir pietiekami blīvs un pie spiedienu starpības 50 Pa ir jānodrošina ļoti neliela gaisa plūsma. Vienas skalas gadījumā tas nozīmētu gaisa plūsmas lieluma nolasišanu skalas sākumā, kas palielinātu kļūdu, tāpēc tiek lietotas mehāniskās

barjeras – uzliktņi, kas samazina gaisa plūsmu pie pietiekami liela apgriezību skaita ar tām atbilstošām skalām (attēls 2.99).



Attēls 2.99. Dažādi ventilatora uzliktņi un attiecīgās skalas vērtību nolāšanās uz mērierīces.

Savukārt ēkām ar lielu gaisa tilpumu vai ļoti vāji noblīvētām ēkām (piem., ar lielām spraugām logos) vienas BlowerDoor iekārtas ražība var izrādīties nepietiekama, lai radītu standartizētu 50 Pa spiedienu starpību. Tad praksē var lietot vairākas iekārtas, vienlaicīgi īpašā veidā saskaņojot to darbināšanu (attēls 2.100), vai arī mērījumus veikt gaisa apmaiņas ziņā atdalītiem šīs ēkas blokiem. Šajā gadījumā standarti (LVS EN 13829, 2002; ISO 9972, 2006) pieļauj veikt mērījumus arī pie 2 reizes mazākas spiedienu starpības (25 Pa) un rezultātus pārrēķināt, ievērojot, ka tuvināti $V' \sim \Delta p$ (skat. arī nākamo sadaļu).



Attēls 2.100. Vairākas BlowerDoor iekārtas dažādās (pa kreisi) vai vienā (pa labi) atverē ēkas čaulā.

Lai nodrošinātu mērījumu precizitāti, jāievēro virkne papildus nosacījumu. Būtiskākais no tiem ir prasība, ka atmosfēras parādību (temperatūru starpību izraisīto konvektīvo gaisa plūsmu un vēja) izraisītās spiedienu starpības starp telpu un āru nedrīkst pārsniegt 5 Pa. Dažādo ēkas gaisa apmaiņu ietekmējošo faktoru eksperimentālie pētījumi (Schmidt *et.al.*, 1999) rāda, ka visvairāk tā ir atkarīga no temperatūru starpības ($n \sim \sqrt{\Delta T}$), tāpēc no šī viedokļa gaisa apmaiņas pārbaudēm piemērotāks ir siltais gada laiks, kad temperatūru atšķirības starp telpām un āru ir nelielas.

Ēkas telpu sagatavošana eksperimentam ir atkarīga no mērījumu mērķa un būves stāvokļa:

- ja mērījumu veic pirms ēkas nodošanas ekspluatācijā, tad kļūdainu rezultātu novēršanai jāpārbauda, vai ēkas ārējā čaula ir noslēgta un jānoblīvē arī sanitāro mezglu atveres, ja tās vēl nav piepildītas ar ūdeni;
- lai noteiktu tieši ēkas ārējās čaulas blīvējumu, jāizslēdz piespiedu ventilācija un jānoblīvē ventilācijas sistēmas atveres. Savukārt lai pētītu pieplūdes un noplūdes ventilācijas sistēmu efektivitāti, tās jādarbina uzdotā režīmā;
- lai veiktu mērījumus ēkas daļā, jāpārbauda un jānoblīvē iespējamās atveres uz pārējo ēkas daļu. Šādi veicot mērījumus vienā vai vairākās atsevišķās telpās principā var noteikt arī logu un durvju iebūvēšanas blīvējuma kvalitāti.

Lai lokalizētu neblīvo vietu (atveru un spraugu) novietojumu ēkas ārējā čaulā, īpaši ieteicams pārspiediena un zemspiediena mērījumus veikt vienlaicīgi pielietojot

- īpašu dūmu “mašīnu” vai kompakto dūmu iekārtu (attēls 2.101), kas ļauj saskatīt vietas ēkas čaulā caur kurām izplūst gaiss;
- termogrāfisko diagnostiku (skat. sadaļu 2.1).



Attēls 2.101. Stacionārā (pa kreisi) un kompakta (pa labi) dūmu mašīnas gaisa plūsmu vizualizēšanai.

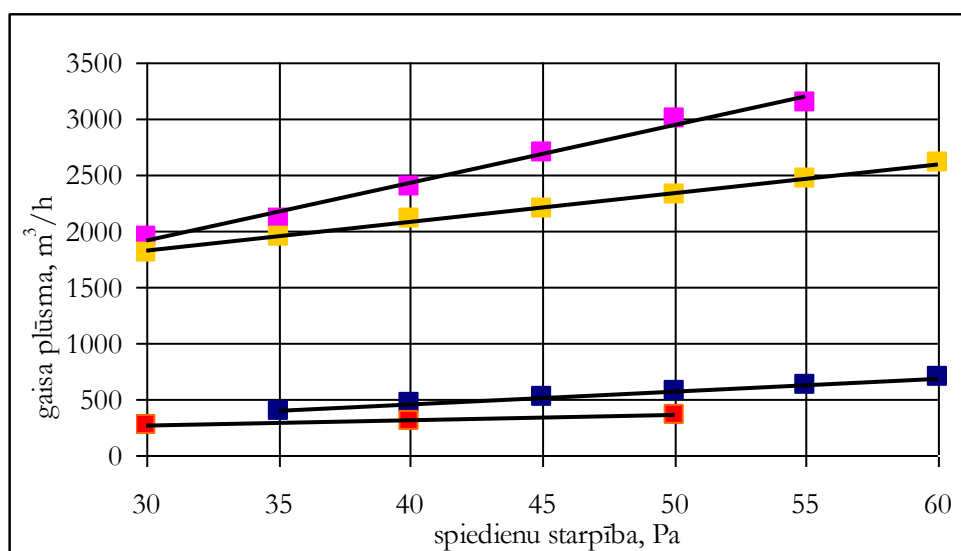
Zemspiediena apstākļos telpā ieplūst aukstais ārējais gaiss, kas attiecīgajās vietās pazemina būvkonstrukciju iekšējo virsmu temperatūru, ko termogrāfiski var ērti konstatēt. Savukārt, ja telpā radīts pārspiediens, siltā gaisa izplūžu vietas termogrāfiski būs ērti diagnosticējamas apsekojot ēku no

ārpuses. Visbeidzot, salīdzinot ēkas vienu un to pašu ārējo norobežojošo virsmu termogrāfijās, kas iegūtas bez spiedienu starpības un spiedienu starpības apstākļos, var nošķirt tās vietas, kur lielus siltuma zudumus nosaka pašu būvkonstrukciju liela siltuma caurlaidība un tādas, kur ir siltā gaisa noplūdes vai aukstā gaisa ieplūdes (skat. arī attēlus 2.24 un 2.25).

2.3.2. Raksturīgie mērījumu piemēri

VTPMM laboratorijas BlowerDoor iekārta ir bijusi pirmā Latvijā un vairākus gadus arī vienīgā šāda tipa iekārta, tāpēc 90-to gadu beigās un šī gadsimta sākumā veiktie pētījumi ir vienīgie eksperimentālie rezultāti, kas tika iegūti Latvijā šajā laika periodā. Ar minēto mēriekārtu kopumā ir veikti vairāki desmiti ēku un telpu gaisa apmaiņas koeficienta un gaisa caurlaidības mērījumi, kā arī tā tika izmantota termogrāfiskās ēku apskates laikā (sadaļa 2.1). Lielākā daļā gadījumu senāk uzcelto daudzdzīvokļu namu telpu gaisa apmaiņas rādītāji neatbilda normatīvu prasībām, bet atsevišķos gadījumos pat nebija iespējams sasniegt vajadzīgo 50 Pa spiedienu starpību. Jaunuzceltajām ēkām un mājām pēc renovācijas gaisa apmaiņas koeficients n_{50} vairākos eksperimentos tika noteikts robežās no 1 līdz 5 h⁻¹. Jāatzīmē, ka dažās telpās ar nomainītiem pakešlogiem, bet bez ventilācijas sistēmas, gaisa apmaiņas intensitāte ir tik neliela, ka nodrošināt nepieciešamo svaigā gaisa pieplūdi var tikai atverot logus. Tas savukārt izsauc papildus siltuma zudumus, kuru samazināšanai logu maiņa tika veikta. Tādējādi mērķtiecīgi logu nomaiņu būtu jāveic vienlaicīgi ar ventilācijas/rekuperācijas sistēmas izbūvi.

Praktiski visu gaisa apmaiņas koeficienta eksperimenti ir veikti, pakāpeniski palielinot spiedienu starpību starp iekštelpu gaisu un ārgaisu no 0 līdz 50 Pa (ja šāds lielums varēja tikt sasniegts). Visos mērījumos tika konstatēta lineāra gaisa plūsmas V' atkarība no spiedienu starpības Δp , kas ir parādīta attēlā 2.102. Kā redzams attēlā, gaisa plūsmas vērtības pie noteiktām spiedienu starpībām atšķiras, kas norāda uz telpu atšķirīgo blīvējumu vai tilpumu, bet lineāra sakarība saglabājās. Tas ļauj veikt eksperimentālo datu ekstrapolāciju, ja standartizētā 50 Pa liela spiedienu starpība nevar tikt sasniegta telpās ar lielu platību vai sliktu blīvējumu.



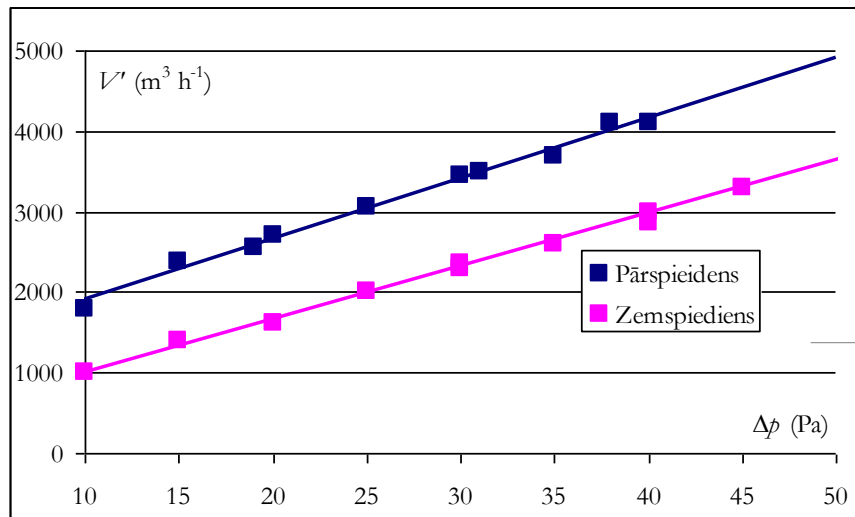
Attēls 2.102. Gaisa plūsmas lineāra atkarība no spiedienu starpības atšķirīgām telpām.

Tā, veicot mērījumu 9-stāvu daudzdzīvokļu paneļu mājas kāpņu telpā vienā no jaunākajiem Rīgas mikrorajoniem ar vienu BlowerDoor iekārtu, maksimālā spiedienu starpība, ko izdevās iegūt, bija tikai 10 Pa, kas izskaidrojams ar nepietiekoši noblīvētiem vienstikla logiem visos stāvos, durvīm ļoti sliktā stāvoklī gan uz āru, gan uz bēniņiem un atkritumu vada esamību, kā arī dažu dzīvokļu durvju nepietiekamu blīvējumu. Šajā gadījumā ļoti efektīvi darbojas arī t.s. skursteņa efekts. Tā kā mērījums pie 50 Pa spiedienu starpības nebija iespējams, gaisa apmaiņas koeficients n_{50} tika tuvināti noteikts ekstrapolācijas ceļā un tas pārsniedza 10 h^{-1} . Šajā gadījumā ēkas konvektīvie siltuma zudumi ir būtiski lielāki par siltuma vadīšanas zudumiem un izsauc arī nepamatoti zemu temperatūru kāpņu telpā, tajā ieplūstot aukstajam ārgaisam. Līdzīga situācija ir raksturīga lielai daļai no daudzstāvu ēku kāpņu telpām un šī problēma ir jāatrisina pirmkārt, optimizējot ēkas kopējo siltuma patēriņu. Konstruktīvās BlowerDoor iekārtas rāmja risinājums ļauj ievietot to gan telpas durvīs, gan arī logā, kas tika darīts minētajā eksperimentā (attēls 2.103).

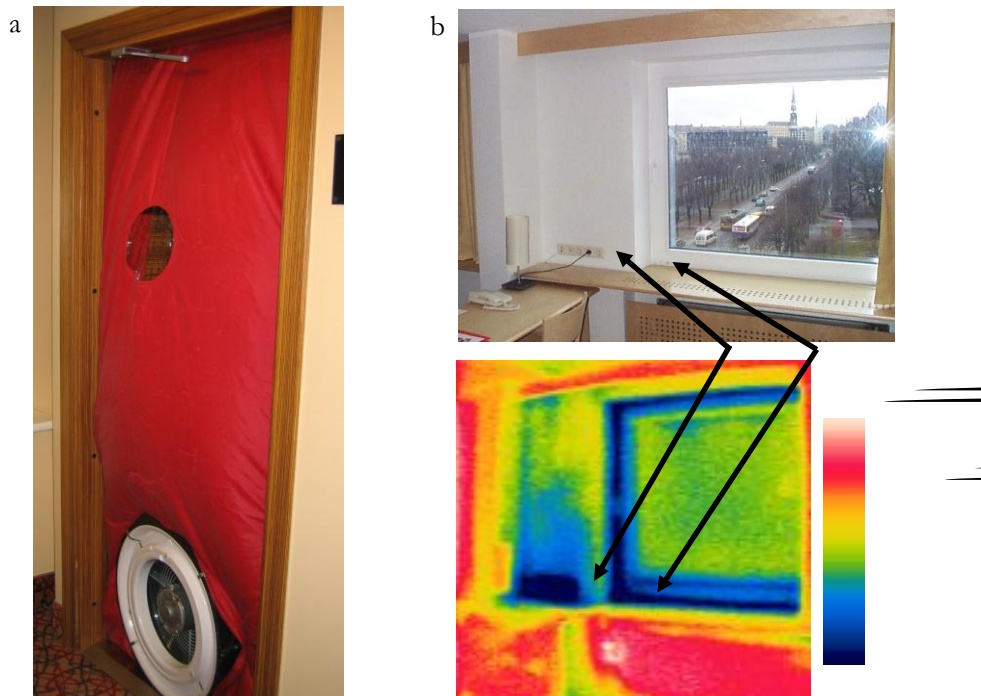


Attēls 2.103. Logā ievietotās BlowerDoor iekārtas kopskats mērījumu laikā.

Raksturīgs piemērs ēkas gaisa apmaiņas mērījumiem ir gaisa plūsmas V' atkarība no spiedienu starpības virziena. Attēlā 2.104. parādīti mērījumu rezultāti telpai viesnīcas augstceltnes daļā, kurā tika veikti gan pārspiediena, gan zemspiediena testi. Šai ēkai ir raksturīga siltuma zudumu strauja palielināšanās vēja ietekmē. Kā redzams attēlā, līknes $V'(\Delta p)$ zemspiediena un pārspiediena gadījumos atšķiras, iemesls tam ir dažādu spraugu atvēršanās atkarībā no gaisa plūsmas virziena (skat. arī attēlu 2.98). Zemspiediena gadījumā, pie 50 Pa lielas spiedienu starpības, telpā rodas retinājums, ko var redzēt arī pēc durvīs iestiprinātā BlowerDoor iekārtas auduma deformācijas (attēls 2.105a) un telpā intensīvi ieplūst auksts gaiss pa dažādām atverēm (spraugas pie loga, elektrības kontakti) ar ātrumu līdz 2 m s^{-1} . Ilgstoši darbinot mēriekārtu, ieplūstošais ārgaiss ievērojami pazemina virsmu temperatūru, ko uzskatāmi parāda arī attiecīgais termogrāfiskais telpas uzņēmums - attēls 2.105b. Ņemot vērā maksimālo reģistrēto gaisa plūsmu, gaisa apmaiņas koeficienta vērtības šai telpai tika noteiktas sekojošas: normējot uz tilpumu, saskaņā ar (LVS EN 13829, 2002; ISO 9972, 2006) – $n_{50}=1,0 \text{ h}^{-1}$, bet normējot uz čaulas laukumu, saskaņā ar (LBN 002-01, 2001) – $n_{\text{LBN}, 50}=8,0 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \text{ m}^{-2}$, kas pārsniedz maksimāli pieļaujamās prasības. Pieņemot vidējo spiedienu starpību vienādu ar 5 Pa, kas atbilst vēja aizsargātības koeficientam $e=0,1$, ir iespējams novērtēt ar nekontrolējamo gaisa plūsmu siltuma zudumus naudas izteiksmē, kas visā ēkā ar kubatūru $V=84000 \text{ m}^3$ sastāda vairāk kā 15000 Ls apkures sezonas laikā.



Attēls 2.104. Zemspiediena un pārspiediena mērījumu piemērs.

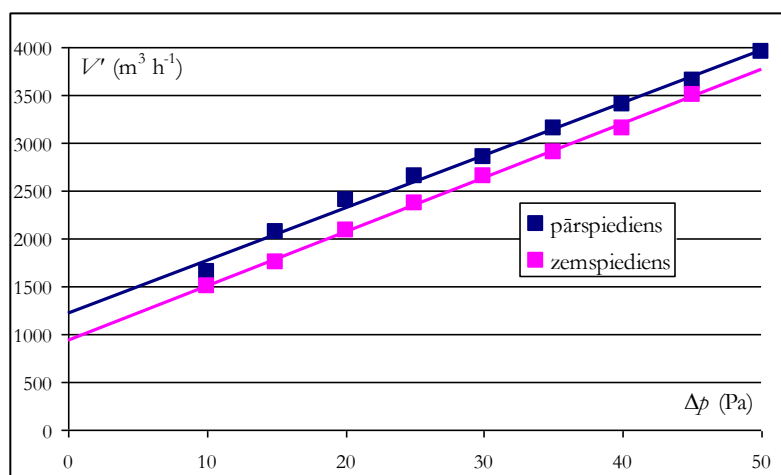


Attēls 2.105. Pazeminātā spiediena viesnīcas numurā (a) izraisītā aukstā gaisa ieplūde (b).

Cita parādība, kas ir raksturīga liela tūluma ēkām ar nenoslēgtām telpām, kas var aizņemt vairākus stāvus, ir skursteņa efekta izraisītā nekontrolējamā gaisa ieplūde un izplūde bez piespiedu spiedienu starpības radīšanas. Šādām ēkām raksturīga palielināta dabīgās gaisa cirkulācijas intensitāte, ko var konstatēt arī eksperimentos ar BlowerDoor iekārtu. Veicot gaisa apmaiņas eksperimentus jauncelāmajā privātmājā, kuras sastāvā ietilpa liela halle visas būves jeb 2.5 stāvu augstumā, pārspiediena un zemspiediena testi parādīja relatīvi labu tās blīvējumu. Tajā pat laikā ekstrapolējot pie dažādām spiedienu starpībām iegūtos gaisa plūsmas rezultātus, abas $V'(\Delta p)$ līknes krusto Δp asi pie gaisa plūsmas V' vērtībām, kas ir lielākas par 0 (attēls 2.106). Uz pastāvošo gaisa cirkulāciju norādīja arī mēriekārtas ventilatora griešanās pie izslēgta motora pastāvošo plūsmu dēļ. Tāpēc tādām

Ēkām ir ļoti būtiski nodrošināt labu blīvējuma kvalitāti, lai minimizētu nekontrolējamus konvektīvos siltuma enerģijas zudumus.

Kā tika minēts, BlowerDoor iekārtu atsevišķos gadījumos ir lietderīgi izmantot kopā ar dūmu mašīnām, kas rada viegli vizualizējamus baltus dūmus. Tas palīdz lokalizēt atveres ēkas vai telpas norobežojošās konstrukcijās caur kurām pastāv lielāka gaisa plūsma. Dūmu izmantošana ir neaizstājama arī gadījumos, kad ir nepieciešams noskaidrot gaisa plūsmas ceļus aiz slēgtām konstrukcijām vai tajās (piem., piekaramie griesti). Tā, vienā no eksperimentiem neliela izmēra jaunbūves telpā tika konstatēta nepamatoti liela gaisa apmaiņas intensitāte, ko izdevās izskaidrot, telpu piepildot ar dūmiem un tajā nodrošinot pārspiedienu, tādējādi izsaucot gaisa izplūdi no tās. Rezultātā blakus esošajā telpā ap apgaismes ķermeņu instalācijas vietām tika reģistrēti izplūstošie dūmi (attēls 2.107), kas norādīja uz telpu savienojumiem aiz piekārtajiem griestiem. Tas izslēdza nepareizu iegūto gaisa apmaiņas koeficienta rezultātu interpretāciju testējamai telpai, kas nebija saistīta ar nepietiekamu ārējo norobežojošo konstrukciju blīvējumu.



Attēls 2.106. Zemspiediena/pārspiediena mērījumu rezultāti (pa kreisi) ēkai ar liela augstuma halli (pa labi).



Attēls 2.107. Dūmi no testējamās telpas nonāk blakus telpas griestos un norāda uz to savienojumu.

2.3.3. Secinājumi

Konvektīvos siltuma zudumus raksturojošs parametrs – gaisa apmaiņas koeficients jeb ēkas blīvējuma pakāpe parāda iekštelpu gaisa apmaiņas intensitāti un raksturo ar to saistīto siltuma daudzumu. No vienas puses cirkulācijai ir jābūt pietiekošai, lai nodrošinātu cilvēka darbībai nepieciešamo gaisa apmaiņu, no otrās puses tā ir jāierobežo, lai mazinātu siltuma enerģijas zudumus, ko nosaka atšķirīgu temperatūru gaisa pārvietošanās caur būvkonstrukcijām. Ēkas vai tās daļas gaisa apmaiņas kontrolei var izmantot Latvijas Būvnormatīva LBN 002-01 „Ēku norobežojošo konstrukciju siltumtehnika” vai ārzemju standartu prasības.

Veikto eksperimentālo pētījumi pagājušā gadsimta otrajā pusē celtām daudzstāvu dzīvojamām ēkām parāda neadekvāti lielus siltuma enerģijas zudumus tieši konvekcijas ceļā, kam pamatā ir neblīvas vietas vecajos logos un durvīs ar koka rāmjiem. Praktiski neviena eksperimenta rezultāts, kas ir ticis veikts šāda tipa ēkām, neapmierināja neviena no minētajiem normatīviem dokumentiem prasības, bet atsevišķos gadījumos (piem., kāpņu telpās) tas atšķīrās par kārtu. Salīdzinot ar siltuma vadīšanas zudumiem caur tādu ēku norobežojošām konstrukcijām, praktiski visos gadījumos konvektīvā siltuma enerģijas pārnese ir lielāka. Tāpēc visefektīvākais veids, kā ievērojami samazināt apkures siltuma vajadzību, ir logu un durvju nomaiņa vai kvalitatīva to blīvēšana, kam ir arī visīsākais atmaksāšanās periods. Ērti novērtēt kādu noteiktu uzlabojumu ietekmi uz kopējo ēkas siltuma bilanci var, izmantojot visas ēkas matemātisko modeli, kas tiks apskatīts darba otrajā daļā.

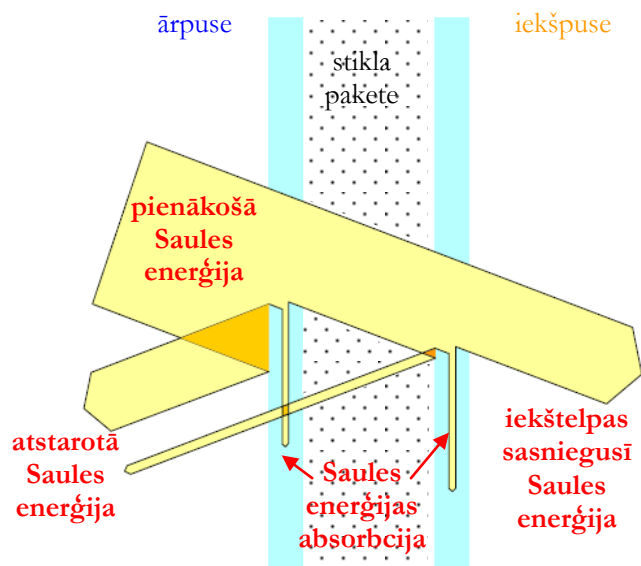
Veiktie eksperimenti ēkām pēc to renovācijas parāda lielu rezultātu izkliedi atkarībā no darbu izpildījuma kvalitātes un lietotiem konstruktīviem risinājumiem, kas ne vienmēr nodrošina vēlamu efektu. Pie kļūdām var pieskaitīt gan nepietiekami uzlabotu ēkas blīvējumu, kas pamatā ir saistīts ar dažādām savienojuma detaļām (elektriķas rozetes, piekārtu griestu konstrukcijas u.c.), tā arī ar pārāk blīvu ārējo čaulu, kas nespēj nodrošināt minimālo cilvēkam vajadzīgo gaisa apmaiņu (vecu logu nomaiņa pret pakešlogiem telpās bez ventilācijas sistēmas). Otrajā gadījumā gaisa cirkulācijas nodrošināšanai parasti pietiek ar logu atvēršanu, kas plaši arī tiek novērots renovētās ēkās, bet šādu darbību rezultātā ievērojami pieaug siltuma zudumi no telpām un, tādējādi, arī no visas ēkas. Līdzīgas kļūdas ir eksperimentāli atklātas arī dažām jaunceltnēm, bet lielākajā daļā to gaisa apmaiņas rādītāji bija iepriekš minēto normu robežās.

Praktiski visām dažādu tipu ēkām Latvijas klimatiskajos apstākļos lielākā daļa no siltuma apmaiņas starp ēku un apkārtējo vidi notiek siltuma vadīšanas un konvekcijas ceļā, kas arī nosaka apkures siltuma vajadzību. Savukārt, starojuma siltuma pārneses loma ir mazāk svarīga un var būt nozīmīga tikai ēkām ar būtisku caurspīdīgo norobežojošo konstrukciju daļu tās ārējā čaulā, kā arī saulainās dienās, kad komforta iekštelpu temperatūras nodrošināšanai var būt nepieciešama kondicionēšana.

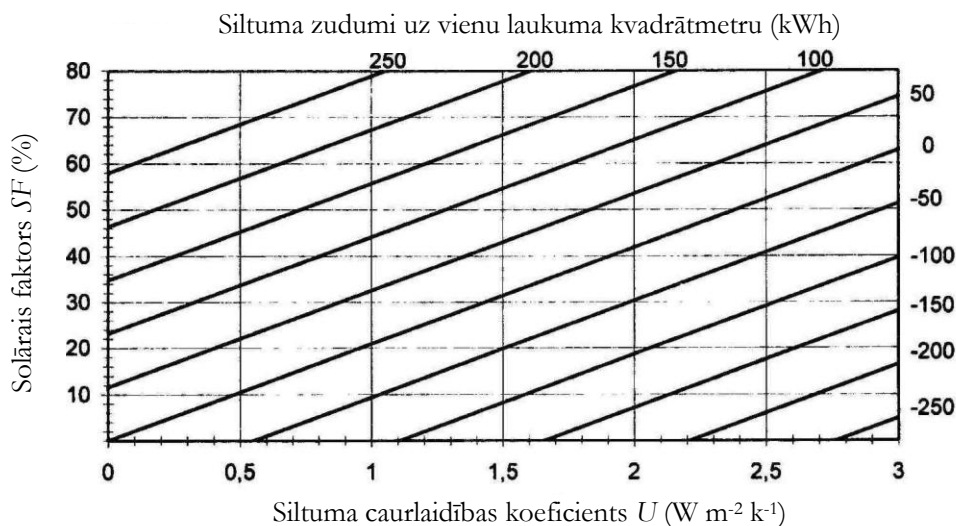
2.4. Saules enerģijas caurlaidība

Kā tika atzīmēts iepriekš, logu un citu caurspīdīgo objektu siltuma caurlaidību raksturo ar koeficientu U , kurā tiek iekļauta arī starojuma pārnese. Bet tikai Saules enerģijas caurlaidību viļņu garumu diapazonā no 300...2500 nm raksturo arī ar t.s. solāro faktoru jeb solāro caurlaidību SF (%), ko izteiktu daļās bieži apzīmē arī ar g (-). To nosaka tiešais Saules starojums, kas caur būvkonstrukciju nonāk telpas iekšienē, gan arī siltuma pārnese uz telpu starojuma un konvekcijas ceļā no caurspīdīgajā ārsienas elementā absorbētās Saules starojuma enerģijas. Jo mazāka solārā faktora vērtība, jo mazāka enerģijas daļa nonāk telpas iekšpusē: maksimālā iespējamā šī faktora vērtība $SF=100\%$, raksturīga šī parametra vērtība divstiklu paketei ar gaisa pildījumu ir 80%, bet paketei ar argona pildījumu un zemas emisijas stikla virsmas pārklājumu – 65%. Vizuāli Saules enerģijas ceļš caur divstiklu paketi parādīts attēlā 2.108.

Lielākai daļai no mūsdienu stiklotām konstrukcijām ir ievērojami (atsevišķos gadījumos līdz 50%) samazināts solārās enerģijas daudzums, kas nonāk telpā. Ja vasaras periodā samazināta SF vērtība nodrošina attiecīgu kondicionēšanas jaudu samazinājumu un labākus termiskā komforta apstākļus telpās, tad ziemas periodā tas attiecīgi samazina solārās enerģijas izmantošanas efektivitāti un var palielināt apkurei nepieciešamo siltuma daudzumu. Lai to kompensētu, ir nepieciešams samazināt izmantotā stiklojuma siltuma caurlaidību U , kuru būtiski nosaka starojums garo infrasarkanā viļņu diapazonā no 3...50 μm . Optimizējot stikloto virsmu koeficientu SF un U vērtības, ir iespējams izveidot siltuma zudumu atkarības grafiku no šiem parametriem, ko analizējot var izvēlēties finansiāli un fizikāli piemērotāko variantu. Piemērs šāda veida atkarībai parādīts attēlā 2.109 (Nielsen *et.al.*, 2000), tas ir izveidots vertikāli novietotam stiklojumam ēkas dienvidu fasādē un parāda siltuma enerģijas zudumus caur to apkures sezonas laikā.



Attēls 2.108. Atstarotā, absorbētā un pārnestā Saules starojuma enerģija divstiklu paketes gadījumā.



Attēls 2.109. Siltuma enerģijas zudumu caur vertikālu dienvidu fasādes stiklojumu apkures sezonas laikā (Nielsen *et.al.*, 2000).

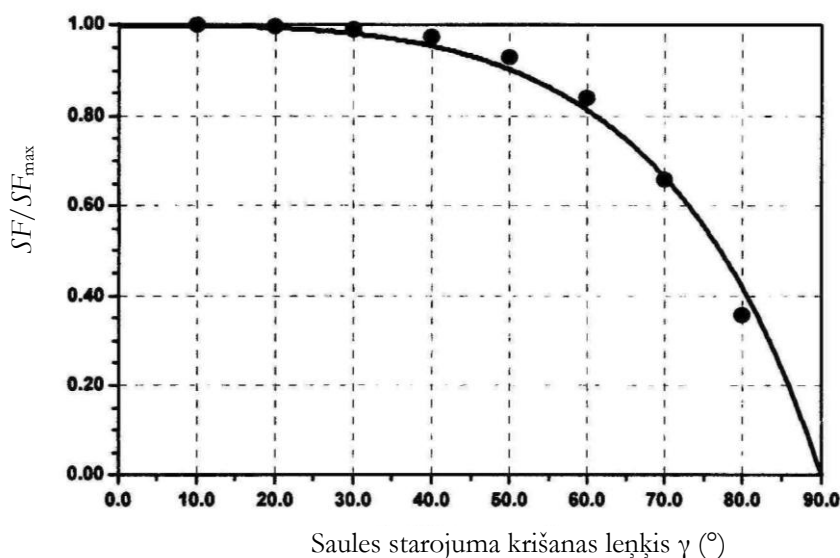
Ir publicēti arī daudzi eksperimentālie darbi, kuru autori pievēršas ēku ar lielu stikloto konstrukciju laukumu apkures un it sevišķi kondicionēšanas problēmām, analizējot būvkonstrukciju fizikālo un klimatisko parametru ietekmi un kopējo siltuma bilanci un telpu komforta apstākļiem. Pamatā pētījumu objekti atrodas platuma grādos, kur Saules starojuma intensitāte un citi klimatiskie apstākļi būtiski ietekmē telpas siltuma bilanci. Piem., publikācijā (Li *et.al.*, 2004) tiek detalizēti analizēts Honkongas augstceltnes biroja telpu enerģijas patēriņš, jo tieši kondicionēšanas ierīces un apgaismojums ir lielākie elektroenerģijas patērētāji vasaras periodā. Tika eksperimentāli konstatēts, ka speciālu plēvju lietojumi stiklotām konstrukcijām ļāva samazināt dzesēšanas sistēmas jaudu un apgaismojuma enerģijas patēriņu līdz pat 15 kWh uz vienu biroja kvadrātmetru mēnesī. Jāatzīmē, ka palielinātu apgaismojumam nepieciešamās elektroenerģijas daudzumu noteica fakts, ka maksimālā

Saules starojuma periodos (Saules krišanas leņķis perpendikulārs loga virsmai) žalūzijas telpās bija aizvērtas, kas prasīja papildus apgaismojumu diennakts gaišajā laikā.

Palielinoties Saules krišanas leņķim γ , samazinās arī solārās enerģijas daudzums, kas nokļūst telpā, faktiskās SF vērtības attiecību pret maksimālo SF_{\max} perpendikulārā starojuma gadījumā var aprakstīt ar sakarību (Nielsen *et.al.*, 2000)

$$\frac{SF}{SF_{\max}} = \left(1 - \tan^3\left(\frac{\gamma}{2}\right)\right), \quad (2.97)$$

kas grafiski kopā ar eksperimentāliem datiem parādīta attēlā 2.110.



Attēls 2.110. Analītiskā Saules enerģijas caurlaidības faktora atkarība no Saules starojuma krišanas leņķa un eksperimentālie mērījumu dati (Nielsen *et.al.*, 2000).

Kaut arī Latvijas klimatiskajos apstākļos Saules starojums pamatā nesagādā problēmas, atsevišķām ēkām ar lielu stikloto fasāžu laukumu tas var būt kritisks. Vienā no šāda tipa daudzstāvu ēkām, kuras praktiski visas norobežojošās konstrukcijas ir veidotas no stikla, 2006. gadā tika veikti vairāki eksperimentālie pētījumi, kurus apskatīsim detalizēti.

Lai kompensētu Saules starojuma caur ēkas stiklotajām ārsienas konstrukcijām termisko jaudu saulainā laikā, kas būtiski paaugstina temperatūru telpās, ir nepieciešamas ļoti lielas kondicionēšanas sistēmu maksimālās jaudas. Bet, ievērojot ēkas ārējo stikloto konstrukciju mazo termisko inerci, kondicionēšanas režīmus var būt nepieciešams strauji mainīt, ko var izsaukt dažādi faktori, piem., nepastāvīga mākoņainība. Eksistējošo iekšējo žalūziju lietojums nedod efektīvu ieguldījumu problēmas risinājumā, jo lielākā siltuma daudzuma daļa joprojām tiek absorbēta telpas iekšpusē un žalūzijas darbojas kā sekundārais siltuma avots (sildķermenis). Ārējo žalūziju, kas varētu būt efektīvs problēmas risinājums, uzstādīšana ļoti būtiski izmainītu ēkas vizuālo tēlu un būtu arī ļoti dārgs

pasākums, tāpēc vienīgais veids problēmas atrisināšanai ir izvērtēt speciālu starojumu reflektējošu plēvju lietojumu iespējas.

Eksperimentāliem pētījumiem un salīdzinošai analīzei tika izvēlētas vairāku ražotāju un tipu no iekšpuses līmējamās plēves, jo ārējo plēvju izmantošanu arī ierobežo vairāki faktori (sarežģīta uzklāšana, augstākas izmaksas, mazāka ilgmūžība). Lai kvalitatīvi un kvantitatīvi izvērtētu dažādu speciālo plēvju izmantošanas lietderību Saules siltuma starojuma intensitātes samazināšanai caur pētāmās ēkas stiklotajām ārsienu konstrukcijām, laika periodā no aprīļa līdz jūnijam tika veikti izvēlētu vairāku piegādātāju un tipu plēvju parametru pētījumi ēkas ekspluatācijas apstākļos.

Lai raksturotu kādas plēves lomu solārās caurlaidības SF samazināšanā, kombinējot to ar stikla paketi, tiek lietots solārā starojuma redukcijas koeficients RC (%), kuru aprēķina no sakarības:

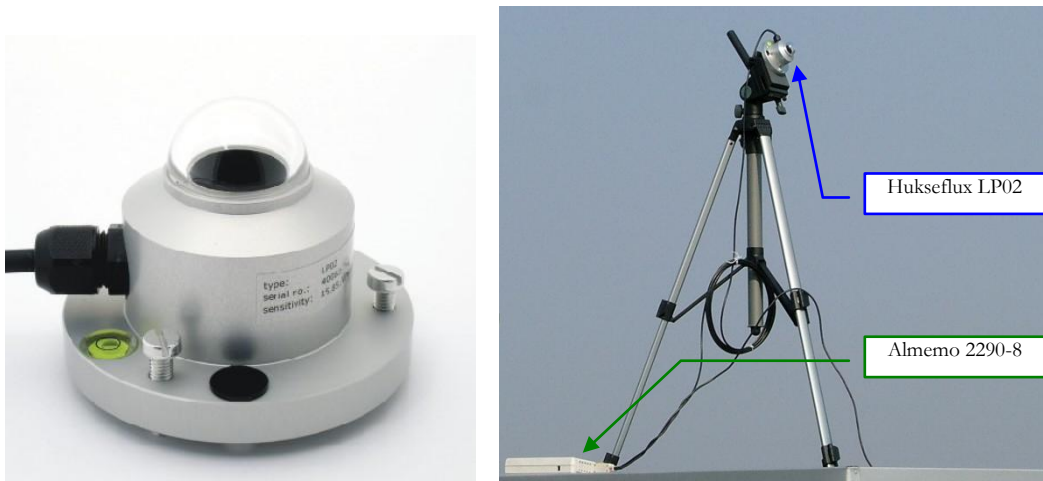
$$RC = \frac{(SF_{\text{pakete}} - SF_{\text{pakete+plēve}})}{SF_{\text{pakete}}}, \quad (2.98)$$

kur SF_{pakete} un $SF_{\text{pakete+plēve}}$ ir solārie faktori stikla paketei bez ar plēvi attiecīgi. Dati par eksperimentāli pētāmām plēvēm, to izvietojuma augstceltnē ar atbilstošo ražotāja sniegto informāciju par to redukcijas faktoru ir apkopotas tabulā 2.15.

Lai nodrošinātu vienādus mērījumu apstākļus, visas apskatītās plēves tika uzlīmētas telpās ar līdzīgu telpisko orientāciju, bet dažādos ēkas stāvos. Saules starojuma intensitātes mērījumi ārā un aiz stiklotajām konstrukcijām tika veikti ar kalibrētu solārās radiācijas sensoru Hukseflux LP02, kura jutīgums ir praktiski nemainīgs viļņu garumu diapazonā 300 – 2000 nm, bet reģistrējamais siltuma plūsmas blīvums ir līdz 2000 W m^{-2} (Hukseflux Thermal Sensors, 2012). Sensora signāla apstrādei un reģistrēto datu uzkrāšanai tiek izmantota iepriekš aprakstītā autonomā Almemo 2290-8 ierīce (Ahlborn Mess- und Regelungstechnik, 2003). Hukseflux LP02 sensora kopskats un tas kopā ar datu uzkrāšanas ierīci darba stāvoklī uzstādīts uz statīva parādīts attēlā 2.111.

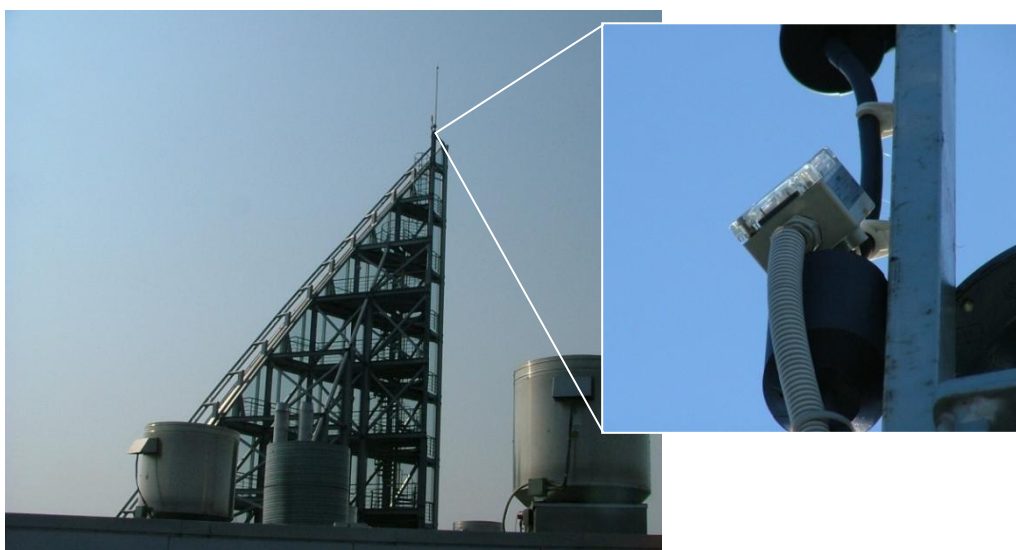
Tabula 2.15. Informācija par dažu speciālo plēvju izvietojumu eksperimentālai pārbaudei.

Plēves apzīmējums	Stāvs, kurā plēve uzlīmēta	Solārā starojuma redukcijas faktors RC % ar 3 mm stiklu (ražotāja informācija)
R SILVER 50 (M 50)	12.	37
SS 35	15.	58
SUDRABS 35 (RLW150S35)	17.	65
SS 20	3.	74
RE 20 SIARL	21.	77



Attēls 2.111. Saules siltuma plūsmas blīvuma sensora Hukseflux LP02 kopskats (pa kreisi) un tā instalācija eksperimentālos mērījumos kopā ar Almemo 2290-8 datu uzkrāšanas ierīci (pa labi).

Mērījumu kontrolei, ārā iegūtie Saules starojuma intensitātes dati tika salīdzināti ar rādījumiem no cita uz ēkas jumta stacionāri uzstādītā sensora Siemens QLS60, kas kalpo ēkas kondicionēšanas sistēmas darbības kontrolei (attēls 2.112). Vairākkārtējos mērījumos tika konstatēts, ka abu sensoru rādījumu atšķirības nepārsniedz 10%, kas ļāva stacionārā sensora rādījumus izmantot turpmākos aprēķinos, eksperimentāli mērot saules starojuma intensitāti iekšējās telpās un sinhronizējot abu mērierīču laikus. Tā kā ārējā sensora orientācija telpā bija fiksēta, tad, veicot mērījumus telpās, pārvietojamais mērsensors Hukseflux LP02 tika orientēts telpā tāpat kā ārā sensors (attēls 2.113). Lai nodrošinātu maksimālo iespējamo mērījumu precizitāti, tie tika veikti saulainā laikā bez mākoņiem, kad Saules starojuma intensitāte ir maksimāla un sasniedz $800 \dots 900 \text{ W m}^{-2}$. Katra mērījumu sērija ilga no 15 līdz 25 minūtēm, ierakstot momentānos mērījumu datus autonomā uzkrāšanas iekārtā. Vienas dienas laikā tika veikta viena mērījumu sērija dažādās telpās ar un bez plēvēm, šādi eksperimenti tika atkārtoti vairākkārt ar vairāku dienu intervālu, mainot pētāmo objektu secību.

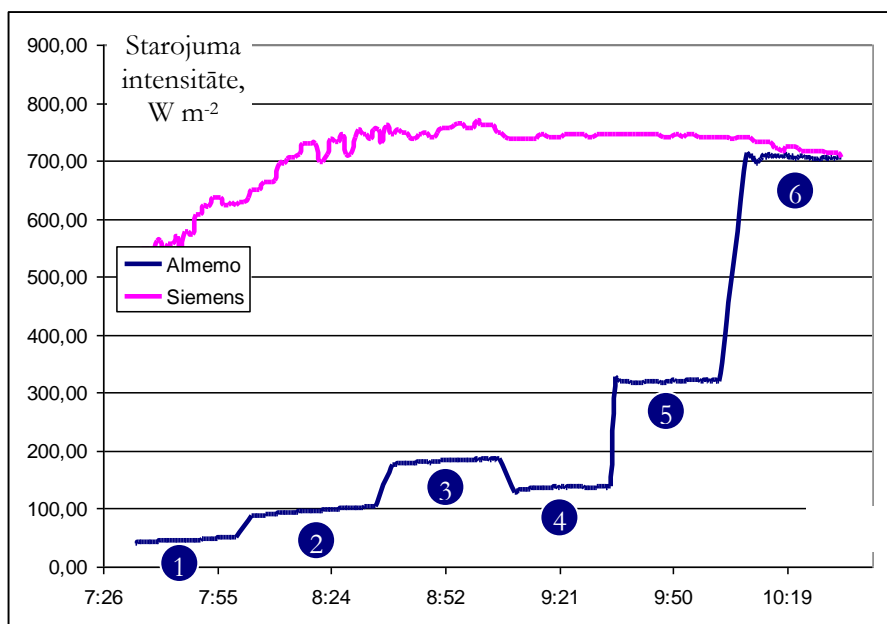


Attēls 2.112. Stacionāri uzstādīts Saules starojuma intensitātes mērsensors Siemens QLS60.

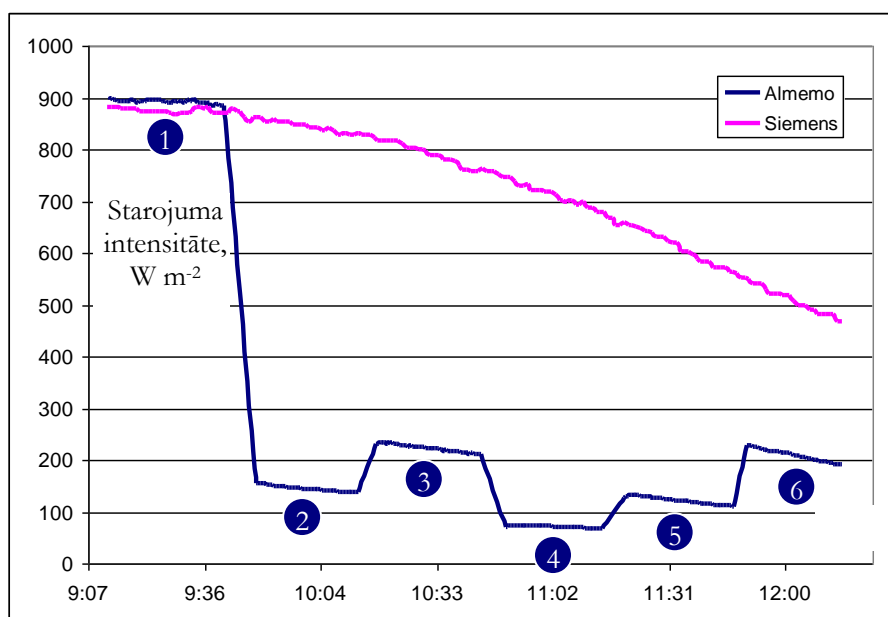


Attēls 2.113. Mērsistēma ar sensoru Hukseflux LP02 un datu uzkrāšanas ierīci Almemo 2290-8 mērījumu laikā.

Iegūtās tipiskās Saules starojuma intensitātes mērījumu datu sērijas parādītas attēlos 2.114 – 2.116, arī izmērītā intensitāte ir apzīmēta ar violetas krāsas līkni (Siemens), bet iekštelpās noteiktā – ar zilās krāsas līkni (Almemo). Ir redzams, ka starojuma krišanas leņķis, kas eksperimenta veikšanas laikā mainās, ļoti būtiski ietekmē reģistrētā signāla vērtību, pie fiksētas sensora orientācijas reģistrētā starojuma intensitāte plkst. 9:00 no rīta ir 900 W m^{-2} , bet pusdienlaikā, plkst. 12:30, tā ir tikai 450 W m^{-2} (attēls 2.115), t.i., 2 reizes mazāka. Saules starojuma intensitātes maksimums ir novērots laika periodā no plkst. 8 līdz 10, tieši šajā laikā arī ir veikti visi eksperimenti.



Attēls 2.114. Starojuma intensitātes ārā (līkne Siemens) un intensitātes, kas izmērītas dažādās telpās aiz stiklotajām ārsienām 3. stāvā (1), 17. stāvā (2), 12. stāvā (3), 15. stāvā ar (4) un bez (5) plēves un uz ēkas jumta (6) ar pārvietojamo Hukseflux sensoru (līkne Almemo).

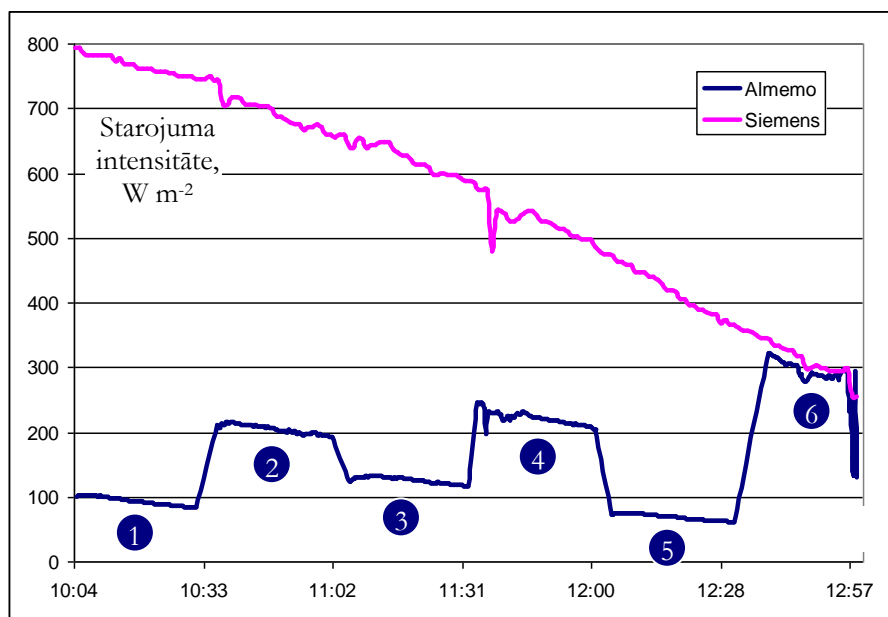


Attēls 2.115. Starojuma intensitātes ārā (līkne Siemens) un intensitātes, kas izmērītas uz ēkas jumta (1) un dažādās telpās aiz stiklotajām ārsienām 17. stāvā (2), 12. stāvā (3), 3. stāvā (4), 15. stāvā ar (5) un bez (6) plēves ar pārvietojamo Hukseflux sensoru (līkne Almemo).

Ja sensori visu laiku būtu orientēti pret Sauli (tie mainītu savu orientāciju tā, lai atrastos perpendikulāri krītošiem stariem), tad šīs izmaiņas dienas gaitā saulainā laikā būtu daudz mazākas. Tas parāda arī stacionāri instalētā, pret Daugavu vērstā Siemens sensora trūkumus – tā sniegtā informācija faktiski nevar tikt efektīvi izmantota kondicionēšanas jaudu regulēšanai ēkā dažādās dienas stundās. Attēlā 2.116 ir labi redzama arī mainīgās mākoņainības ietekme uz reģistrētā Saules starojuma intensitāti (ap plkst. 11:40 un pēc 12:55).

Solārais faktors SF stikla paketēm ar dažādām plēvēm un bez tām tika noteikts, izmantojot divas sekojošas aprēķinu pieejas, kuru iegūtie rezultāti sakrita 5% kļūdas robežās:

- starojuma plūsmas blīvums, ko iegūst vidējot Hukseflux pārvietojamā sensora mērījumu rezultātus aiz attiecīgās paketes un plēves, tiek dalīts ar atbilstoši orientētā stacionārā sensora Siemens vidējotajiem plūsmas blīvuma datiem attiecīgajā laika intervālā;
- starojuma plūsmas blīvums, ko iegūst vidējot Hukseflux pārvietojamā sensora mērījumu rezultātus aiz attiecīgās paketes un plēves, tiek dalīts ar tā paša sensora mērījumu datiem, kas attiecīgajam laika intervālam iegūti, veicot dažādos laika intervālos vairākkārtīgi veikto mērījumu ārpus ēkas datu interpolāciju.



Attēls 2.116. Starojuma intensitātes ārā (likne Siemens) un intensitātes, kas izmērītas dažādās telpās aiz stiklotajām ārsienām 3. stāvā (1), 12. stāvā (2), 15. stāvā ar (3) un bez (4) plēves, 17. stāvā (5) un uz ēkas jumta (6) ar pārvietojamo Hukseflux sensoru (likne Almemo).

Visas eksperimentāli testētās plēves bija uzlīmētas uz viena veida stikla paketēm, kuru solārā starojuma caurlaidība $SF=43\%$ arī tika noteikta šajos eksperimentos. Šī caurlaidības vērtība ir nedaudz mazāka nekā ražotāja specificētā ($SF=50\ldots52\%$). Atšķirības galvenais iemesls ir saistīts ar stiklojuma ārējās virsmas tīrību, jo tā būtiski ietekmē gan redzamās gaismas, gan arī kopējā solārā starojuma caurlaidību. Šo faktu apstiprina solārā faktora mērījums stikla paketēm nevis iekštelpās, bet uz ēkas jumta (attēls 2.117), kuras bija ļoti netīras – šeit tika noteikta vēl būtiski mazāka SF vērtība - tikai 25%.



Attēls 2.117. Starojuma intensitātes mērījumi netīrām stikla paketēm uz ēkas jumta.

Ēkā veikto stikla pakešu ar dažādām plēvēm solārā faktora SF mērījumu rezultātu kopsavilkums atspoguļots tabulā 2.16. Kā redzams, lietojot efektīvākās no plēvēm (RE 20 SIARL un SS 20) telpā nonāk mazāk par 10% no Saules siltuma enerģijas, jeb aptuveni 5 reizes mazāk enerģijas

nekā caur stikla paketi bez plēves: ja tipiska enerģijas plūsma saulainā laikā ārā bija 800...900 W m⁻², tad telpā, lietojot šīs plēves, nonāk mazāk nekā 90 W m⁻² enerģijas. Savukārt, lietojot vismazāk efektīvo no plēvēm *M 50*, telpā nonāk siltuma plūsma ar blīvumu līdz 250 W m⁻², t.i., gandrīz 3 reizes vairāk. Koeficienta *RC* aprēķinos pēc sakarības (2.98) stikla paketes bez plēves solārā starojuma caurlaidības ir pieņemta ar eksperimentos noteikto 43%.

Veiktie dažādu speciālo plēvju solārās enerģijas caurlaidības eksperimentālie pētījumi parāda, ka vismazākā solārā starojuma caurlaidība (solārais faktors *SF*) no salīdzināšanai izvēlētajām plēvēm ir RE 20 SIARL un SS 20, kas kombinācijā ar ēkā esošajām stikla paketēm sākotnējo starojuma plūsmas blīvumu samazina vairāk nekā 10 reizes. Savukārt, plēvju ar lielu solārā starojuma caurlaidību izmantošana nav lietderīga, jo mazāk aizsargā telpu pret Saules starojumu (telpā nonāk vairāk nekā 1/4 daļa no pienākošās siltuma plūsmas), bet to instalēšanas izmaksas būtiski neatšķiras. Salīdzinot iegūtos rezultātus ar ražotāju vai piegādātāju sniegto specifikāciju, dati pārsvarā saskaņojas ar eksperimentāli noteiktajām *SF* vērtībām, tomēr dažām plēvēm tika konstatētas arī nelielas novirzes. Ar detalizētāku minēto mērījumu izklāstu, kā arī to salīdzinošo analīzi ar plēvju mērījumiem laboratorijas apstākļos var iepazīties atskaitē (Jakovičs *et.al.*, 2006).

Kaut arī plēvju ietekme uz stikla pakešu rezultējošo siltuma caurlaidību *U* ir neliela, tomēr plēves būtiski samazina telpas iekšienē nonākošo Saules starojuma plūsmu un tādējādi ēkas siltuma bilanci ietekmē negatīvi – vasaras periodā samazina kondicionēšanai nepieciešamās jaudas, bet apkures sezonas laikā palielina apkurei nepieciešamo siltuma daudzumu.

Tabula 2.16. Stikla pakešu ar speciālām plēvēm un pašu plēvju *SF* un *RC* koeficientu eksperimentālo mērījumu ekspluatācijas apstākļos rezultātu kopsavilkums.

Plēves apzīmējums (tips)	Stikla paketes ar plēvi solārā starojuma caurlaidība <i>SF</i> (%)	Plēves solārā starojuma redukcijas koeficients <i>RC</i> (%)	
		mērījums	ražotāja informācija
SS 20	9	79	74
SS 35	20	53	58
RLW150S35 (Sudrabs 35)	17	60	65
M 50 (R silver 50)	27	37	74
RE20SIARL	9	79	77
Pakete bez plēves	43	-	-

2.5. Secinājumi

Saskaņā ar izveidotās ēku energoefektivitātes analīzes koncepciju (attēls 1.1), pirmais bloks ir saistīts ar ēkas esošā stāvokļa novērtēšanu. Siltuma zudumu novērtēšanai un to atbilstības

pastāvošiem standartiem un normatīviem pārbaudei tika veikti kvalitatīvie apsekojumi un siltuma apmaiņas procesus raksturojošo lielumu kvantitatīvie mērījumi vairākos desmitos būvju.

Sākotnējais vizuālais siltumtehnikā stāvokļa kvalitatīvais novērtējums parādīja būtiskus ar neapbruņoti aci pamanāmus defektus, kas pamatā ir raksturīgi vecajām dzīvojamām mājām – būvelementu nepietiekams blīvējums, mitruma uzkrāšanās vietas vai mehāniskie defekti konstrukcijās. Šāds norobežojošo konstrukciju apsekojums gan no ārpuses, gan no iekšpuses deva vispārīgu priekšstatu par būves kopumā un tās atsevišķu būvkonstrukciju stāvokli. Pēc tāda veida vizuāliem apsekojumiem var ieteikt uzlabojumus, kas ievērojami samazina ēkas siltuma patēriņu bez būtisku remontdarbu veikšanas un turpmākiem mērījumiem – piem., vienstikla logu nomaiņa pret dubultstikliem, logu un durvju rāmjos noblīvēšana un apkures cauruļu izolācija pagrabos utml.

Nākošā pētījumu daļa ir kvalitatīvie ēkas norobežojošo konstrukciju virsmas temperatūras mērījumi jeb termogrāfiskā diagnostika. Šādu apsekojumu rezultātā tika atklāti īpaši pazeminātās vai paaugstinātās virsmas temperatūras defekti ēkās, ko nav iespējams atklāt vizuālās apskates gaitā. Vecajām ēkām raksturīgi ir logi ar izteikti lielāku virsmas temperatūru, kas norāda uz to mazu siltuma pretestību un ar to saistītiem siltuma zudumiem. Bet vēl lielākus siltuma zudumus ēkās ar veciem logiem nosaka gaisa cirkulācija caur neblīvām vietām to rāmjos, ko parāda arī daudzās uzņemtas termogrammas. Lietojot šo metodi, tika atklāti arī palielināti siltuma zudumi caur būvelementu zonām ar paaugstinātu siltuma caurlaidību, kas ir saistīti ar siltuma tiltiem (piem., materiālu ar krasi atšķirīgām siltuma izolējošām īpašībām – metāla karkass un akmens vates pildījums vai caurejošie metāla savienojumi). Ēkām pēc to renovācijas un jaunuzceltām būvēm ar termogrāfiskās metodes palīdzību visbiežāk atklātie defekti ir saistīti ar nekvalitatīvi veiktiem siltināšanas darbiem vai nepietiekami noblīvētām konstrukciju salaidumu vietām, kas nosaka aukstā gaisa ieplūdi iekštelpās pa ceļiem norobežojošās konstrukcijās, to lokalizēt palīdz arī papildus spiedienu starpības radīšana starp ēku un ārpagaisu. Bieži vien mākslīgi paaugstināts vai pazemināts iekšgaisa spiediens termogrāfiskās apskates laikā palīdzēja atklāt pie nelielas spiedienu starpības nepamanāmus defektus.

Vizuālās apskates un termogrāfiskās diagnostikas rezultātā tika atklāti vienkārši un bez lieliem kapitāliem ieguldījumiem labojami defekti un nepilnības, kā arī noteikti raksturīgie elementi norobežojošās konstrukcijās. Šādu ēkas būvelementu un konstrukciju siltumfizikālo īpašību noteikšanai ir veikti kvantitatīvie mērījumi, kā rezultātā iegūti dati, kas raksturo elementu vadīšanas siltuma zudumu daudzumu. Izveidotā „karstās plates” iekārta ļauj ātri veikt dažādu būvniecībā izmantojamo homogēnu materiālu ar noteiktu izmēru siltuma vadītspējas standartizētus mērījumus ar augstu precizitāti, kā arī noteikt materiālu siltuma ietilpību. Nehomogēnu un lielu izmēru objektu siltuma caurlaidības koeficienta noteikšanai kvazistacionārā režīmā tika izveidota speciālā termokamera, kurā pārsvarā notika dažādu izmēru un konstrukcijas logu mērījumi, iegūtie rezultāti parādīja plašu iegūto vērtību diapazonu. Kopumā standartizētos eksperimentos iegūtās logu siltuma

caurlaidības vērtības atbilda Latvijas Būvnormatīva samērā vajājam prasībām, ko nevar teikt pa ēku ārsienām, bēniņu un jumtu pārsegumiem, kas tika eksperimentāli pētīti reālos ekspluatācijas apstākļos. Minēto būvkonstrukciju eksperimenti tika veikti, izmantojot izveidoto mērsistēmu un eksperimentu gaitā iegūto nestacionāro datu īpašu matemātiskās apstrādes algoritmu. Lielākajā gadījumu daļā pagājušajā gadsimtā celto ēku norobežojošo konstrukciju U vērtības pārsniedza normatīvās prasības vairākkārtīgi, kas nozīmē būtiski palielinātus siltuma zudumus un paaugstinātu ēkai nepieciešamā apkures siltuma daudzumu. To samazināšanai ir nepieciešama papildus izolācija un atsevišķos gadījumos būvelementu nomaiņa.

Cita veida siltuma zudumi ir saistīti ar ēkas gaisa plūsmām, kas izraisa siltuma daudzuma pārvietošanās starp ēkas iekštelpām un āru. Šāda tipa zudumus raksturojoša gaisa apmaiņas koeficienta standartizētie eksperimentālie mērījumi ar speciālu BlowerDoor iekārtu ļāva novērtēt gan atbilstību normatīviem, gan arī ar to saistītos siltuma zudumus. Praktiski visām padomju laikā celtām ēkām, ievērojot neblīvās vietas norobežojošās konstrukcijās, pārsvarā logu un durvju rāmjos, gaisa apmaiņas intensitāte ir vairākkārt lielāka par maksimāli pieļaujamo. Tas ne tikai palielina apkures siltuma daudzumu, bet arī pasliktina komforta apstākļus telpās, samazinoties temperatūrai un palielinoties gaisa kustības intensitātei. Savukārt, renovētām ēkām un jaunbūvēm bieži ir konstatēta nepietiekama gaisa apmaiņa, pateicoties blīvajiem pakešlogiem, kas reducē siltuma zudumus, bet būtiski samazina cilvēkam nepieciešamā skābekļa piegādi.

Siltuma starojuma enerģijas pārnesei Latvijas klimatiskajos apstākļos ir mazāk svarīga loma ēku kopējā siltuma bilancē, tomēr gadījumā, ja būves konstrukcija paredz ievērojamus caurspīdīgo elementu laukumus, tas var būt būtiski. Eksperimentos ir konstatēts, ka starojuma siltuma enerģijas izraisītās iekštelpu temperatūras palielināšanos efektīvi var samazināt, lietojot speciālās selektīvās plēves, kas reducē Saules enerģijas ieplūdi līdz 10 reizēm. Vasaras periodā tas ļauj būtiski samazināt kondicionēšanai nepieciešamo enerģijas patēriņu, bet ziemā efektam var būt negatīvs rezultāts – lai kompensētu atstaroto solāro starojumu, ir jāpaaugstina apkures sistēmas jauda.

Iegūtie dažādu siltuma pārnese veidu kvantitatīvie rādītāji ļauj noteikt konkrētu būvelementu vai visas ēkas atbilstību noteiktu normatīvu un standartu prasībām, bet neļauj apskatīt visas ēkas kā viena objekta siltuma bilanci un novērtēt tās kopējo energoefektivitāti, kā arī optimizēt siltuma zudumus tajā. Tādēļ ir nepieciešams izveidot visas ēkas kā viena siltuma enerģijas patēriņa objekta modeli, kas tiek aprakstīts nākamajā sadaļā.

3. Ēkas siltuma bilances analītiskie aprēķini.

Siltuma vadīšana caur norobežojošām konstrukcijām un konvekcija ir procesi, ar kuru palīdzību apkures sezonas laikā lielākā enerģijas daļa tiek pārnesta no ēkas uz apkārtējo vidi. Tie arī ir galvenie un noteicošie faktori, kas ietekmē ēkas siltuma zudumus, tos reglamentē arī Latvijas Būvnormatīvs LBN 002-01. Ir ļoti svarīgi zināt tos raksturojošo parametru skaitliskās vērtības, kas, lai pareizi novērtētu visas ēkas energoefektivitāti, var tikt noteiktas eksperimentāli (skat. iepriekšējo sadaļu). Arī citi faktori atstāj iespaidu uz kopējo siltuma enerģijas bilanci, piem., solārais starojums, iekšējie siltuma avoti, enerģijas zudumi ar aizplūstošo silto ūdeni utt., taču to ietekme ir daudz mazāka un tos parasti var novērtēt tuvināti.

Tomēr jāatzīmē, ka dažreiz vairāku šķietami nelielu energoefektivitātes uzlabojumu veikšana var veicināt ēkas kopējā enerģijas patēriņa ekonomiju, kas ir salīdzināma ar norobežojošo būvkonstrukciju siltināšanu vai gaisa apmaiņas samazināšanu. Piem., termisko tiltu likvidēšana, optimālā ēkas stiklotu konstrukciju projektēšana, kas ļauj maksimāli izmantot solāro starojumu (samazinot logu laukumu ziemeļu pusē), Saules enerģijas izmantošana ūdens uzsildīšanai, efektīvās apkures sistēmas lietošana un siltuma sūkņu izmantošana, ekonomisko apgaismes ķermeņu lietošana reizē ar kustības detektoriem gaitenēs, garāžās, pagrabos utml. (Oehme, 2003).

Analizējot visas ēkas kopējo siltuma bilanci un zudums, kā arī atsevišķu būvelementu ieguldījumu kopējā bilancē, var objektīvi novērtēt eksistējošās vai projektējamās ēkas stāvokli un atrast enerģijas zudumu aspektā būtiskos elementus tās norobežojošās konstrukcijās. Variējot dažādu faktoru ietekmi, piem., būvelementu laukumu proporcijas un to siltuma pretestības, var atrast tādu ēkas celtniecības vai renovācijas projekta variantu, kas nodrošina optimālo energoekonomijas un investīciju proporciju. Gadījumā, ja kādu iemeslu dēļ nav iespējams izveidot visas ēkas modeli, tas var tikt veidots arī kādam objekta blokam (daļai).

Tiek lietotas dažādas pieejas ēkas siltuma bilances modelēšanai, sākot no pašām vienkāršākajām, ko ir iespējams realizēt ar dažu formulu pierakstu, un beidzot ar nestacionāro aprēķinu programmpaketēm, kuru apraksts aizņemt vairākus lapaspušu simtus un kurās ieejošie parametri bieži vien ir grūti nosakāmi, bet tikai tuvināti novērtējami – vēja virziens, mākoņainība, iedzīvotāju aktivitāte u.c. Kāda jauna parametra ieviešana komplicētā bilances modelī prasa arī to pārbaudīt ar eksperimentiem, kas pierādītu to atbilstību faktiski patērētai apkures jaudai (Tuomaala, 2002). Tomēr parasti ēkas energoefektivitātes stāvokļa analīzei kopumā nav nepieciešamas detaļas, kas ietekmē kādas noteiktas dienas vai pat stundas siltuma bilanci, bet tiek lietotas to vidējotās ietekmes rādītāji, piem., vidējā iekšējo siltuma avotu jauda, ko nosaka elektroierīču lietošanas biežums un cilvēku uzturēšanās telpās.

Daudzās pasaules un Eiropas valstīs ir spēkā standarti un normatīvi, kas reglamentē jauncelāmo un renovējamo ēku siltuma un kopējās enerģijas patēriņu, lielākoties tie ir komplicēti un detalizēti aprēķini. Piem., Vācijā tas ir ēku energoetaupījuma noteikumi *Energieeinsparverordnung* (Energieeinsparverordnung–EnEV, 2007), saskaņā ar kuriem būvju siltuma bilance tiek noteikta atbilstoši standarta (DIN, 2003) norādījumiem un prasībām. Minētā metode tiek balstīta uz ēkas mēneša siltuma bilances aprēķiniem un tā tiks detalizēti apskatīta turpinājumā.

Šveicē visām jaunām un renovējamām ēkām ir spēkā normatīvs *MINERGIE* (Association MINERGIE, 2007), kas paredz maksimālā siltuma enerģijas patēriņa ierobežojumu, izņemot speciālas telpas (piem., serveru telpas). Tā, jaunām dzīvojamām ēkām kopējais enerģijas patēriņš nevar pārsniegt 54 kW h m^{-2} gada laikā, bet ēkām, kas ir aprīkotas ar ūdens/ūdens siltuma sūkņiem – pat 37 kW h m^{-2} , renovējamām dzīvojamām ēkām tie ir 60 kW h m^{-2} . Tiek noteikta maksimāli pieļaujamā ventilācijai un karstā ūdens sagatavošanai patērētā enerģija. Sertifikātu par atbilstību šim normatīvam uz 2011. gada beigām bija saņēmušas vairāk par 20000 ēku.

Apvienotā Karalistē spēkā ir dzīvojamo ēku enerģijas patēriņa noteikšanas procedūra *Standard assessment procedure for energy rating of dwellings* (SAP 2005, 2005), kurā iekļauti arī tādi procesi, kā ūdens sildīšana ar Saules enerģiju un apgaismojums. Aprēķinu rezultātā tiek iegūts ne tikai ēkas enerģijas patēriņš gadā, bet arī noteikts CO_2 emisijas daudzums (kg/gadā) un kopējās enerģijas patēriņa izmaksas atkarībā no apkures veida. Kā svarīgākais minētās procedūras rezultāts tiek noteikta ēkas enerģijas klase, kas ir atkarīga no kopējā enerģijas patēriņa un ēkas telpu grīdas laukuma.

Arī daudzās citās valstīs tiek lietoti atšķirīgas detalizācijas modeļi nosacītās ēkas energopatēriņa klases noteikšanai, ko parasti apzīmē ar latīņu alfabēta burtiem no *A* līdz vismaz *G*, bet šīs klases dažādām pieejām var būt atšķirīgas, tāpēc to salīdzināšana nav viennozīmīga. Dažādu ēkas siltuma bilances modeļu salīdzinājums ēkas enerģijas patēriņa klases piešķiršanai dažādās Eiropas valstīs ir apkopots darbā (Poussard, 2003), šajā darbā tiek apskatīta arī vienkāršotā klases noteikšana pieceja, kas ir bāzēta uz noteiktu punktu skaitu piešķiršanu par dažādu faktoriem – ēkas kompaktnumu, izolācijas slāņu esamību, stiklojuma daudzumu, ēkas orientāciju pret debess pusēm, apkures un ventilācijas tipu u.c. Latvijā nav pieņemti normatīvie dokumenti, kas reglamentētu kādas klašu skalas lietošanu, bet ar pieredzi citu valstu klasifikācijas lietojumos būvju energoefektivitātes analīzē var iepazīties darbā (Petrovs *et.al.*, 2006).

Arī Latvijā sakarā ar Latvijas Būvnormatīva LBN 002-01 pieņemšanu un ēku apkures izmaksu pieaugumu pēdējo gadu laikā ir pieaugusi interese par siltuma bilances modelēšanu. Kā piemēru var minēt projektu “Ekomāja” ēku energoefektivitātes pasākumu noteikšanai (<http://www.ekomaja.lv>) vai ēkas atbilstības LBN 002-01 prasībām noteikšanu, izmantojot noteiktus celtniecības un izolācijas materiālus (<http://www.modlab.lv/PAROC>) – abi projekti ir realizēti kā Interneta aplikācija. Pieaug arī publikāciju skaits, kas ir tieši vai netieši saistītas ar šo problēmu un kas tiek publicētas kā populārajās,

tā arī zinātniskos žurnālos, piem., par t.s. „pasīvajām mājām”, kuru enerģijas patēriņš ir minimāli iespējama, tiek modelētas ar speciālu programmatūru palīdzību publikācijā (Blumberga, Kamenders, 2006).

Detalizēti apskatīsim divas atšķirīgas ēkas siltuma bilances modelēšanas pieejas, kuras ir realizētas VTPMM laboratorijā sadarbībā ar SIA „PAIC” izstrādātajā programmatūrā HeatMod (PAIC, 2006); kuras izstrādē, aprobācijā un testēšanā vairākus gadus piedalījās šī darba autors. Pirmā metode ir balstīta uz vienkāršotu ēkas siltuma bilances aprēķinu, kas ļauj noteikt objekta atbilstību Latvijas Būvnormatīva LBN 002-01 prasībām. Otrā pieeja ir detalizētāks ēkas siltuma apmaiņas procesu modelis, kura pamatā tiek izmantots uz mēneša siltuma bilances bāzēts standarts (Energieeinsparverordnung–EnEV, 2007) un (DIN, 2003), šo pieeju sauksim arī par pilno aprēķinu metodi. Abu metožu salīdzinājumam tiek apskatīti daži ēku modeļu piemēri, kas ir veikti ar minētās programmatūras HeatMod palīdzību.

Pašreiz minētā programmatūra tiek modernizēta, ir paredzēts nodrošināt detalizētu aprēķinu veikšanu tiešsaistē (<http://www.heatmod.lv>) atbilstoši Latvijā spēkā esošajai „Ēkas energoefektivitātes aprēķina metodei” (Ministru kabinets, 2009).

3.1. Siltuma bilance atbilstoši Latvijas Būvnormatīva LBN 002-01 prasībām

2001. gada beigās pieņemtais (ar 2010. gada labojumiem) Latvijas būvnormatīvs LBN 002-01 „Ēku norobežojošo konstrukciju siltumtehnika” (LBN 002-01, 2001) kā vienu no ēkas energoefektivitātes parametriem reglamentē ēku siltuma zudumu koeficientu, kas ir nosakāms uz visu ēkas norobežojošo konstrukciju laukumu un atbilstošo siltuma caurlaidības bāzes.

3.1.1. Metodes apraksts

Saskaņā ar LBN 002-01 normatīva II sadaļas prasībām, visai ēkai kopumā vai tās atsevišķi apskatītam blokam (dalījumu blokos piemēri tiks minēti vēlāk) tiek aprēķināts siltuma zudumu koeficients H_T ($W K^{-1}$), kas norāda enerģijas zudumus (W) caur ārējo čaulu, kas sastāv no i būvelementiem ar laukumiem S_i (m^2) un siltuma caurlaidības koeficientiem U_i ($W m^{-2} K^{-1}$) pie 1 K temperatūru starpības uz pretējām virsmām:

$$H_T = \sum_i U_i S_i + \sum_j \psi_j l_j + \sum_k \chi_k, \quad (3.1)$$

kur ψ_j – lineārā termiskā tilta j aprēķina siltuma caurlaidība ($W m^{-1} K^{-1}$), l_j – lineārā termiskā tilta j projektējama garums (m) un χ_k – punktveida termiskā tilta k aprēķina siltuma caurlaidība ($W K^{-1}$).

Šeit ar termisko tiltu saprot jebkuru paaugstinātas siltumvadītspējas konstruktīvu ieslēgumu būvelementā. Aprēķinā ieejošo būvelementu laukumus un to siltuma caurlaidības uzdod saskaņā ar jauncelāmās ēkas būvprojekta datiem vai nosaka eksperimentāli.

Iegūto H_T koeficientu salīdzina ar normatīvo siltuma zudumu koeficientu H_{TR} ($W K^{-1}$), ko nosaka līdzīgi, faktisko siltuma caurlaidības koeficientu vietā ievietojot normatīvās vērtības:

$$H_{TR} = \sum_i U_{RN,i} S_i + \sum_j \psi_{RN,j} l_j, \quad (3.2)$$

kur $U_{RN,i}$ – būvelementa i normatīvais siltuma caurlaidības koeficients ($W m^{-2} K^{-1}$), bet $\psi_{RN,j}$ – lineārā termiskā tilta j normatīvā siltuma caurlaidība ($W m^{-1} K^{-1}$), ko nosaka saskaņā ar tabulu 3.1. Šāda metodes nostādne pieļauj būvelementu siltuma caurlaidības koeficientu variācijas, piem., lietojot logus ar labākām siltuma izolējošām īpašībām, sienu siltuma pretestība var būt nedaudz sliktāka par normatīvo vērtību. Tomēr šo variāciju amplitūda ir ierobežota ar maksimāli pieļaujamiem atsevišķu būvelementu un lineāro tiltu siltuma caurlaidībām U_{RM} ($W m^{-2} K^{-1}$) un ψ_{RM} ($W m^{-1} K^{-1}$), kas dažādiem ēku tipiem ir apkopotas tabulā 3.2.

Tabula 3.1. Normatīvo siltuma caurlaidības koeficientu U_{RN} un termisko tiltu ψ_{RN} vērtības.

Būvelementi	Dzīvojamās mājas, pansionāti, slimnīcas un bērnodārzi	Publiskās ēkas, izņemot pansionātus, slimnīcas un bērnodārzus	Ražošanas ēkas
Jumti un pārsegumi, kas saskaras ar āra gaisu	0,2 κ	0,25 κ	0,35 κ
Grīdas uz grunts	0,25 κ	0,35 κ	0,5 κ
Sienas ar masu < 100 kg m ⁻²	0,25 κ	0,35 κ	0,45 κ
Sienas ar masu ≥ 100 kg m ⁻²	0,3 κ	0,4 κ	0,5 κ
Logi, durvis un stiklotas sienas	1,8 κ	2,1 κ	2,4 κ
Termiskie tilti ψ_{RM}	0,2 κ	0,25 κ	0,35 κ

Tabula 3.2. Maksimālo siltuma caurlaidības koeficientu U_{RM} un termisko tiltu ψ_{RM} vērtības.

Būvelementi	Dzīvojamās mājas, pansionāti, slimnīcas un bērnodārzi	Publiskās ēkas, izņemot pansionātus, slimnīcas un bērnodārzus	Ražošanas ēkas
Jumti un pārsegumi, kas saskaras ar āra gaisu	0,25 κ	0,35 κ	0,5 κ
Grīdas uz grunts	0,35 κ	0,5 κ	0,7 κ
Sienas ar masu < 100 kg m ⁻²	0,3 κ	0,4 κ	0,5 κ
Sienas ar masu ≥ 100 kg m ⁻²	0,4 κ	0,5 κ	0,6 κ
Logi, durvis un stiklotas sienas	2,7 κ	2,9 κ	2,9 κ
Termiskie tilti ψ_{RM}	0,25 κ	0,35 κ	0,5 κ

Normatīvo un maksimālo siltuma caurlaidības koeficientu vērtību aprēķinā figurē temperatūras faktors κ (-), kas kalpo siltuma caurlaidības zudumu lieluma korekcijai gadījumā, ja iekštelpu gaisa un ārgaisa temperatūras atšķiras no normatīviem $T_{\text{iekšā}}=20$ °C un $T_{\text{ārā}}=-1$ °C attiecīgi. Šo koeficientu aprēķina pēc sakarības:

$$\kappa = \frac{19}{T_{\text{iekšā}} - T_{\text{ārā}}}. \quad (3.3)$$

Gadījumā, ja modelējamā ēkā eksistē telpas ar atšķirīgām iekštelpu temperatūrām, piem., noliktava un biroji, tie ir jāapskata atsevišķi.

Bez aprakstītās normatīvās siltuma zudumu koeficienta H_{TR} noteikšanas metodes (3.2), dzīvojamām mājām, pansionātiem, slimnīcām un bērnudārziem ir pieļaujama arī cita, vienkāršotā, aprēķina formula:

$$H_{\text{TR}} = b_A \cdot S, \quad (3.4)$$

kur S ir ēkas apkurināmo grīdas laukumu summa visos stāvos (m^2), bet b_A – ēkas viena kvadrātmetra īpatnējo siltuma zudumu koeficients ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$), kas vienkāršotā un divstāvu ēkām ir vienāds ar 1,1, trīsstāvu un četrstāvu ēkām – 0,9, piecu un vairāk stāvu ēkām – 0,7. Gadījumā, ja apskatāmai ēkai eksistē daļas ar dažādu stāvu skaitu un tām ir jālieto atšķirīgs b_A koeficients, visu objektu sadala atsevišķos blokos, katram no tiem H_{TR} nosaka atsevišķi.

Galvenais nosacījums apskatītās ēkas atbilstībai LBN 002-01 normatīva prasībām ir tās aprēķina siltuma zudumu koeficients H_T (3.1), kas nedrīkst pārsniegt normatīvā siltuma zudumu koeficienta vērtību, ko nosaka pēc ar sakarībām (3.2) vai (3.4).

Veidojot ēkas modeli, jāņem vērā, ka normatīvās un maksimālās vērtības U_{RN} un U_{RM} grīdām, kas saskaras ar āra gaisu, ir tādas pašas kā jumtiem, bet grīdām virs neapkurinātiem pagrabiem – tādas pašas kā grīdām uz grunts.

Savukārt, logu vai citu stiklotu virsmu laukumi, kurus ņem vērā, veicot normatīvā siltuma zudumu koeficienta H_{TR} aprēķinus, nevar pārsniegt 20% no katra stāva apkurināmās grīdas laukuma. Tomēr logu laukumu palielinājumu var kompensēt ar zemākām logu vai citu būvelementu siltuma caurlaidības koeficientu vērtībām. Kā izņēmums ir pirmo divu stāvu logi un ārdurvis veikalos un līdzīgās telpās, kurām funkcionāli nepieciešami lieli logi vai stikla sienas, kam šīs prasības nav obligātas.

Kā ir redzams no sakarības (3.1), ēkas siltuma zudumu koeficienta noteikšanas metodē saskaņā ar 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, par aprēķinu metodi jāizvēlas uz mēneša bilances bāzes veidots modelis.

3.1.2. Aprēķinu piemēri

Ēku siltuma bilances modelis saskaņā ar LBN 002-01 tiek realizēts izstrādātajā programmatūrā HeatMod (PAIC, 2006), tas ir pietiekami vienkāršs un ieejas datu par būvelementu laukumiem un atbilstošām siltuma caurlaidībām uzdošanai parasti ir vajadzīgas dažas stundas. Ēkas ar sarežģītāku ģeometriju būvelementu laukumu noteikšanai būtu vajadzīgs ilgāks laiks. Kā pirmo apskatīsim piemēru divstāvu privātmājai ar neapkurnātiem bēniņiem, aukstu pagrabu un garāžu. Visu modelī ieejošo norobežojošo konstrukciju siltuma caurlaidības ir apkopotas tabulā 3.3, kur tiek norādītas arī būvelementu normatīvās un maksimālās siltuma caurlaidības U_{RN} un U_{RM} . Temperatūru starpība starp ēkas iekštelpu gaisu un ārgaisu ir vienāda ar 19 °C (18 °C iekštelpas un -1 °C ārā attiecīgi), apsildāmās daļas grīdu laukums ir 186 m².

Tabula 3.3. Apskatītās ēkas būvelementu siltuma caurlaidība un salīdzinājums ar LBN 002-01.

Nosaukums	U (W m ⁻² K ⁻¹)	U_{RN} (W m ⁻² K ⁻¹)	U_{RM} (W m ⁻² K ⁻¹)
Grīda	0,18	0,25	0,35
Durvis	1,60	1,80	2,70
Jumts uz bēniņiem	0,18	0,20	0,25
Logi	1,60	1,80	2,70
Ārsiena	0,29	0,30	0,40
Siena uz neapkurinātu telpu	0,29	0,30	0,40

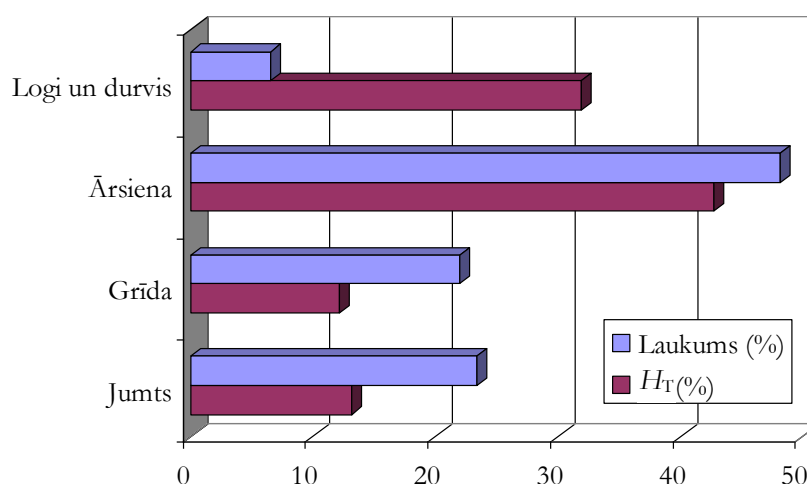
Veicot ēkas siltuma zudumu koeficienta aprēķinu saskaņā ar sakarību (3.1), iegūstam rezultātu $H_T = 210,3 \text{ W K}^{-1}$. Savukārt, normatīvais siltuma zudumu koeficients H_{TR} tiek aprēķināts saskaņā ar formulām (3.2) un (3.4), jo ēka ir dzīvojamā māja, tāpēc ir pieļaujams arī vienkāršotais aprēķins, iegūtās vērtības ir 223,7 W K⁻¹ un 148,8 W K⁻¹ attiecīgi. Salīdzinot šos skaitļus ar H_T , redzams, ka vismaz viens no aprēķiniem dod rezultātu, kas atbilst normatīva prasībām un tādējādi apskatītā ēka atbilst Latvijas Būvnormatīva „Ēku norobežojošo konstrukciju siltumtehnika” prasībām.

Faktiski vienīgā ēkas energoefektivitātes analīzes iespēja šajā modelī ir būvelementu laukumu un atbilstošo siltuma zudumu proporciju salīdzinājums, kas ir parādīts tabulā 3.4 un attēlā 3.3. No grafiski attēlotiem datiem ir viegli redzēt, ka pateicoties lielai siltuma caurlaidībai, vislielākie siltuma vadišanas zudumi ir caur logiem un durvīm, kuri tajā pat laikā aizņem vismazāko laukuma daļu ēkas

ārējā čaulā. Tāpēc visefektīvākais veids ēkas siltuma zudumu samazināšanai ir tieši šo objektu siltuma pretestības uzlabošana. Pretējā situācija ir ar labi izolētiem grīdas un bēniņu pārsegumiem, kas kopējā siltuma bilanci spēlē nenozīmīgu lomu, kaut arī kopumā sastāda 45% no ēkas ārējās čaulas laukuma. Ārsienai, kuras siltuma caurlaidības koeficienta vērtība ir tuva normatīvai, siltuma zudumu daudzums un aizņemtais laukums ir tuvināti vienādi.

Tabula 3.4. Ēkas būvelementu grupu laukumu un siltuma zudumu sadalījums apskatītam piemēram.

Būvelementa tips	Laukums (m ²)	Laukums (%)	H_T (W K ⁻¹)	H_T (%)
Jumts	150,4	23,4	27,7	13,2
Grīda	141,8	22,0	25,5	12,1
Ārsiena	309,9	48,1	89,9	42,7
Logi un durvis	42,0	6,5	67,2	32,0
Kopā	644,0	100	210,3	100



Attēls 3.1. Ēkas būvelementu grupu laukumu un siltuma zudumu attiecība apskatītam piemēram.

Kā citu piemēru apskatīsim piecstāvu daudzdzīvokļu dzīvojamās mājas vadīšanas siltuma zudumu samazināšanas iespēju analīzi, mainot dažādu būvkonstrukciju siltuma caurlaidības koeficientu vērtības, tādējādi modelējot to siltināšanu. Sākuma dati ēkas būvkonstrukciju U vērtībām tika noteiktas eksperimentālos mērījumos. Modelējamās ēkas ārējās norobežojošās čaulas būvelementi ar to laukumiem un proporcijām ir apkopoti tabulā 3.5.

Lai modelētu siltuma zudumu minimizācijas iespējas, apskatīsim vairākus iespējamus siltināšanas variantus, katrā no tiem uzlabosim tikai kāda viena veida būvkonstrukciju līdz visas elementu grupas atbilst Latvijas Būvnormatīva LBN 002-01 prasībām. Bez sākuma varianta ēkas esošajā stāvoklī (variants I) izveidosim četrus papildus modeļus, katrā nākamajā tiek papildinās iepriekšējā varanta izmaiņas (skat. tabulu 3.5):

- variants II: tiek nomainīti logi un durvis, $U=1,8 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$,
- variants III: tiek nosiltināti arī bēniņi, $U=0,2 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$,
- variants IV: tiek nosiltināts arī pagraba pārsegums, $U=0,25 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$,
- variants V: tiek nosiltinātas arī ārsienas, $U=0,3 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$.

Kā redzams, vislielākie siltuma zudumi sākotnējā stāvoklī ir ieejas durvju zonai un kāpņu telpas logiem, bet vismazākie – bēniņu pārsegumam, tajā pat laikā neviens no būvelementiem neatbilst minētā Normatīva prasībām. Visu apskatīto modelēšanas variantu rezultējošās siltuma zudumu koeficienta vērtības H_T ir grafiski atspoguļotas attēlā 3.2.

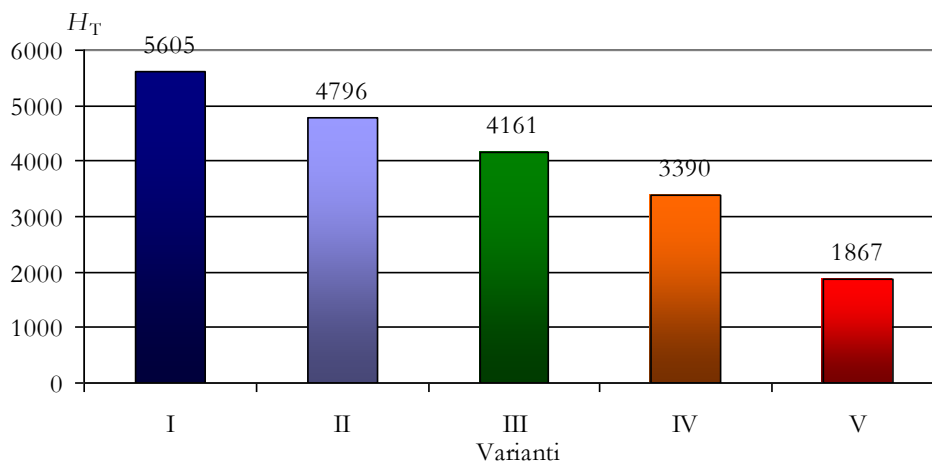
Tabula 3.5. Ēkas būvelementi, to siltuma caurlaidības un laukumi.

Būvelementa nosaukums	Laukums (m ²)	Laukums (%)	U (W m ⁻² K ⁻¹) dažādos variantos				
			I	II	III	IV	V
Bēniņu pārsegums	719,0	19,9%	1,0	1,0	0,2	0,2	0,2
Fasāde balkonu pusē	608,7	16,8%	1,3	1,3	1,3	1,3	0,3
Fasāde ieejas pusē	598,9	16,6%	1,3	1,3	1,3	1,3	0,3
Ieejas durvju zona	18,4	0,5%	4,0	1,8	1,8	1,8	1,8
Kāpņu telpas jumts	76,2	2,1%	1,0	1,0	0,2	0,2	0,2
Kāpņu telpas logi	72,6	2,0%	4,0	1,8	1,8	1,8	1,8
Ķieģeļu siena austrumos	157,7	4,4%	1,3	1,3	1,3	1,3	0,3
Ķieģeļu siena rietumos	157,7	4,4%	1,3	1,3	1,3	1,3	0,3
Logi ieejas pusē	212,8	5,9%	3,0	1,8	1,8	1,8	1,8
Logi un durvis balkonu pusē	294,0	8,1%	3,0	1,8	1,8	1,8	1,8
Pagraba pārsegums	700,0	19,4%	1,35	1,35	1,35	0,25	0,25

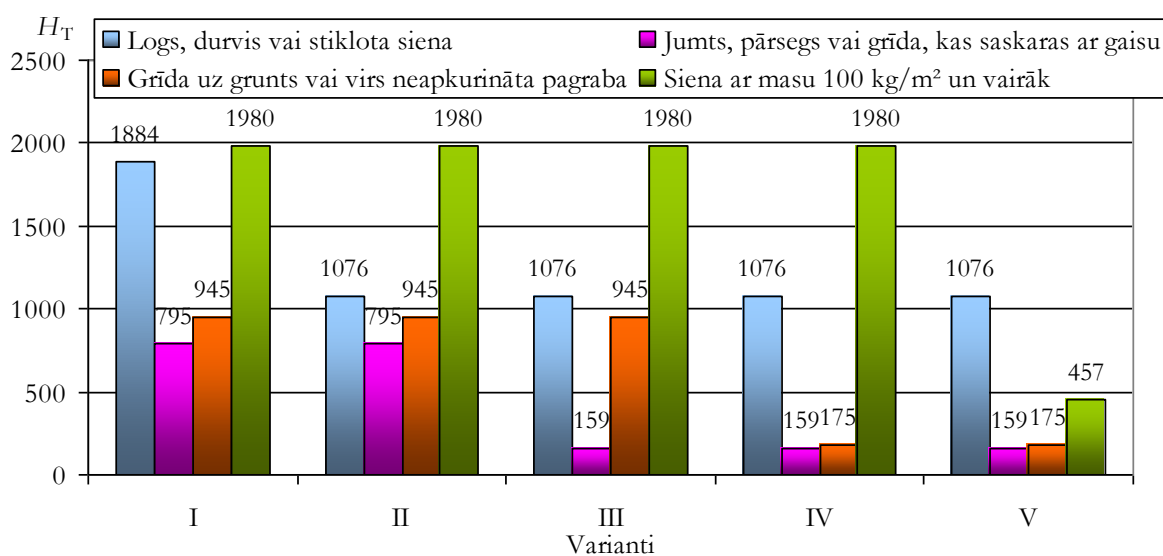
Tā kā lietotais vienkāršotais modelis ietver tikai siltuma vadīšanas zudumus, tad variantā II veiktā logu un ieejas durvju nomainīšana samazina kopējo siltuma zudumu koeficientu tikai par 14% (attēls 3.2) pateicoties relatīvi nelielai šo būvelementu laukuma daļai. Tajā pat laikā tikai logu un durvju siltuma zudumu koeficients samazinās proporcionāli to siltuma caurlaidības samazinājumam – par 43% (attēls 3.3). Ir jāatzīmē, ka līdz ar tāda veida nomainīšanu praktiski vienmēr samazinās siltuma zudumi konvekcijas ceļā, kas bieži vien spēlē noteicošo lomu ēkas kopējā siltuma bilancē. Tāpēc precīzākai uzlabojumu ietekmes un siltuma bilances kontrolei ir jāizmanto citi modeļi, piem., nākamajā sadaļā apskatītais, kur ievēroti arī konvektīvie siltuma zudumi.

Nākamie modelēšanas varianti (III un IV) ievēro bēniņu un pagraba pārsegumu siltināšanu, samazinot konkrētā būvelementa siltuma zudumu koeficientu pat par 80% no sākotnējā atbilstoši siltuma caurlaidības koeficienta izmaiņai. Bet, tā kā to laukumu daļa kopējā čaulā ir neliela, tad katrs no tiem samazina kopējo siltuma zudumu koeficientu attiecīgi par 13% un 18% attiecīgi (tabulā 3.4

un attēls 3.2). Veicot arī ārējo siltināšanu atbilstoši Latvijas Būvnormatīva LBN 002-01 prasībām, t.i. samazinot siltuma caurlaidību līdz $0,3 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$, to siltuma zudumu koeficients proporcionāli samazinās par 77%, bet ēkai kopumā $H_T = 1867 \text{ W K}^{-1}$, kas sastāda tikai 33% no sākotnēji noteiktā (attēli 3.2 un 3.3).



Attēls 3.2. Modelēšanas variantu I-V aprēķinātie visas ēkas siltuma zudumu koeficienti.



Attēls 3.3. Modelēšanas variantu I-V aprēķinātie būvelementu grupu siltuma zudumu koeficienti.

3.2. Uz mēneša patēriņa balstītā siltuma bilance

Lai pilnīgāk modelētu siltuma apmaiņas procesus ēkā un precīzāk noteiktu tās siltuma bilanci un apkures siltuma vajadzību gada laikā, ir jāizmanto modelis, kas ietvertu sevī visus būtiskos enerģijas apmaiņas procesus. Par pamatu var izmantot norādījumus (Energieeinsparverordnung–EnEV, 2007), kas bāzējās uz standarta (DIN, 2003) pamatnostādņēm, tas atbilst arī standarta (LVS EN ISO 13790, 2009) nosacījumiem. Vispārīgi var izdalīt 5 svarīgākās ēkas apkures siltuma patēriņu noteicošo faktoru grupas:

- siltuma vadīšanas un starojuma zudumi caur ārējiem būvelementiem (sienas, logi, jumts utt.) un siltuma atdeve no to virsmas. Šos zudumus raksturo ar attiecīgo būvelementu siltuma caurlaidības koeficienta vērtībām U ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$);
- konvektīvie siltuma zudumi, siltajam iekštelpu gaisam apmainoties ar zemākas temperatūras ārgaisu (ventilācija, plūsmas caur spraugām utt.). Šos zudumus raksturo ar ēkas gaisa apmaiņas koeficientu n ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$);
- saules radiācijas avoti, ko nosaka tiešais starojums caur caurspīdīgiem elementiem 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;
- pārējie siltuma zudumi, ko nosaka siltā ūdens patēriņš, kanalizācija, gaisa mitrums utml., kas parasti ir mazi salīdzinājumā ar pārējiem.

Gan konvektīvie zudumi, gan arī iekšējie siltuma avoti ir būtiski atkarīgi no cilvēku paradumiem un sabiedrisko vai rūpniecisko telpu izmantošanas rakstura, tāpēc precīzi tos noteikt ir problemātiski un ir jālieto kādi pēc eksperimentālo novērojumu statistiskās analīzes veikti vidējoti pieņēmumi par tipisko enerģijas ģenerāciju dažās ēkās, piem., (Energieeinsparverordnung–EnEV, 2007). Ēku elementu siltuma akumulācija, kura stingri stacionāras analīzes gadījumā nav būtiska, tiek ievērota saistībā ar saules enerģijas un iekšējo siltuma avotu izmantošanas efektivitāti.

3.2.1. Metodes apraksts

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_{ie} uzturēšanai vajadzīgo siltuma daudzumu. Tādējādi metode ļauj aprēķināt ēkas siltuma vajadzību Q_{H} , kas jānodrošina ar apkures sistēmas dažādo elementu (centrālapkures radiatoru, elektriskie sildītāji utt.) palīdzību. Summējot visu mēnešu pozitīvās siltuma vajadzības, iegūst gada kopējo vajadzību.

Metodika šajā formulējumā ir lietojama ēkām, kuras iespējams sadalīt telpu blokos, katrā no tiem temperatūra tuvināti ir nemainīga un tās svārstības nepārsniedz 4 °C . Visai būvei vai katram tādām blokam tiek veidota atsevišķa siltuma bilance un iegūtās siltuma vajadzības tiek summētas. Tā ir iespējams ievērot reāli eksistējošās temperatūru atšķirības, piem., kāpņu telpās un dzīvokļos. Tuvināti iespējams ievērot arī uzdotu temperatūras režīmu, piem., temperatūras pazemināšanu naktīs ietekmē, bet nav paredzēts ievērot reāli eksistējošās iekštelpu temperatūru svārstības neprognozējamu āra temperatūru vai apkures jaudu izmaiņu dēļ ēkās bez siltuma padeves regulācijas.

Konkrētā mēnesī apsildīšanai nepieciešamā siltuma enerģija $Q_{H,M}$ (kW h) tiek noteikta no siltuma bilances ēkas zonām ar atšķirīgām raksturīgajām iekštelpu temperatūrām:

$$Q_{H,M} = Q_{V,M} - \eta_M \cdot Q_{G,M}, \quad (3.5)$$

kur $Q_{V,M}$ un $Q_{G,M}$ attiecīgi ir mēneša siltuma zudumi un avoti (kW h); η_M - avotu izmantošanas efektivitāte (-). Zudumus $Q_{V,M}$ nosaka īpatnējie siltuma zudumi H ($W K^{-1}$), iekšējo un ārējo temperatūru T_{ic} un $T_{a,M}$ starpība un mēneša M dienu skaits t_M

$$Q_{V,M} = 0.024[\text{diennaktis}] \cdot H \cdot (T_{ic} - T_{a,M}) \cdot t_M. \quad (3.6)$$

Īpatnējos siltuma zudumus nosaka siltuma vadīšanas H_T un konvekcijas H_V siltuma zudumu summa.

Ēkas īpatnējie siltuma vadīšanas zudumi H_T ēkai izsakāmi šādu summu veidā:

$$H_T = \sum_i r_i (U_i S_i) + \sum_i r_i (\psi_{l,i} l_{l,i}) + \sum_i r_i \chi_{p,i} + \Delta H_{T,S}, \quad (3.7)$$

kur U_i - i-tā būvelementa siltuma caurlaidības koeficients ($W m^{-2} K^{-1}$), S - laukums (m^2), r_i - temperatūras redukcijas faktors (-); $\psi_{l,i}$ ($W m^{-1} K^{-1}$) un $\chi_{p,i}$ ($W K^{-1}$) - attiecīgi lineārus un punktveida siltuma tiltus raksturojošie koeficienti, $l_{l,i}$ - lineāra tilta garums (m); $\Delta H_{T,S}$ - īpatnējie siltuma zudumi elementos ar integrētu sildīšanu ($W K^{-1}$). Siltuma tiltus svarīgi ievērot labi izolētās ēkās un tie var veidoties būvkonstrukciju (piem., sienu un griestu vai grīdu, logu rāmju un aplodas) salaiduma vietās. Tos raksturojošās vērtības ir tabulētas (LVS EN ISO 14683, 2008), bet var arī tikt noteiktas, veicot skaitliskos aprēķinus (LVS EN ISO 10211, 2008) noteiktām savienojumu vietām - pieejas izvēli nosaka iespējas un aprēķina precizitātes prasības. Turpmāk tiks norādītas tikai orientējošās šo parametru vērtības.

Siltuma zudumu uz citas temperatūras telpu blokiem un neapkurinātām telpām (pagrabi, verandas, bēniņi utt.) vai caur virsmām, kas robežojas ar grunti, īpatnējo siltuma vadīšanas zudumu aprēķinam (3.7) tiek izmantots temperatūras redukcijas faktors

$$r_i = (T_{ic} - T_{ic, \text{citai telpai}}) / (T_{ic} - T_{ārā}), \quad (3.8)$$

kura vērtības var tikt precīzi noteiktas telpām ar zināmu temperatūru vai arī var izmantot tā standartvērtības (tabula 3.6).

Ēkas konvektīvie siltuma zudumi H_V ir būtiski atkarīgi no vēja ātruma un virziena, no āra un iekšas temperatūru starpības, no ēkas formas, gaisa apmaiņas, kā arī no iedzīvotāju vēdināšanas ieradumiem un no ventilācijas sistēmas darbības īpatnībām. Šos zudumus raksturo ar ēkas gaisa apmaiņas koeficientu n (h^{-1}), kas ir aprakstīts augstāk, sadaļā 2.3. Tad īpatnējiem konvektīvajiem siltuma zudumiem H_V iegūstam:

$$H_V = \rho_L \cdot c \cdot n \cdot V_N \approx 0,34 [\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}] \cdot n \cdot V_N, \quad (3.9)$$

kur ρ_L (kg m^{-3}) un c ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$) ir attiecīgi vidējās gaisa blīvuma un siltuma ietilpības vērtības, V_N (m^3) – iekštelpu gaisa tilpums, ko tuvināti var noteikt arī pēc ēkas ārējiem izmēriem, pieņemot, ka gaiss vidēji aizņem 80% no ēkas ārējās čaulas tilpuma V : $V_N = 0,8 \cdot V$.

Tabula 3.6. Temperatūras redukcijas faktora vērtības dažādiem būvelementiem (DIN, 2003).

Būvelementa tips	Temperatūras redukcijas faktors r_i
Ārsiena vai jumts	1,0
Bēniņu pārsegums	0,8
Siena uz neapkurinātu telpu	0,5
Caurspīdīgā virsma ar vienu stiklu	0,7
Caurspīdīgā virsma ar dubulto stiklojumu	0,6
Caurspīdīgā virsma ar izolācijas stiklojumu	0,5
Siena/pārsegums uz neapkurināmu pagrabu vai bēniņiem	0,4-0,5
Siena vai grīda uz zemi ar laukumu līdz 100 m^2	0,5
Siena vai grīda uz zemi ar laukumu līdz 8000 m^2	0,12

Koeficienta n standartvērtība telpām ar nepiespiestu ventilāciju ir $0,8 \text{ h}^{-1}$, bet, kā rāda veiktie eksperimentālie mērījumi (skat. sadaļu 2.3), atkarībā no ēkas norobežojošo konstrukciju stāvokļa tas var atšķirties vairākkārtīgi un tā precīzai noteikšanai ir nepieciešami mērījumi. Mehānisku ventilācijas sistēmu gadījumā šī koeficienta vērtība aprēķināma, ievērojot sistēmas efektivitāti un to darbināšanas vidējo laiku.

Ēkas kopējā siltuma avotu enerģija $Q_{G,M}$ ir atkarīga no solārā starojuma $\Phi_{S,M}$ (W) jaudas un iekšējo siltuma avotu $\Phi_{I,M}$ (W) jaudas:

$$Q_{G,M} = 0.024 [\text{diennaktis}] \cdot (\Phi_{S,M} + \Phi_{I,M}) \cdot t_M \quad (3.10)$$

Saules starojuma pievadīto siltuma daudzumu nosaka vidējā Saules starojuma intensitāte uz būvelementu virsmām atkarībā no to orientācijas pret debess pusēm un slīpuma, caurspīdīgo elementu siltuma enerģijas caurlaidība, noēnojums un saules aizsargu esamība, kā arī necaurspīdīgo būvelementu siltuma absorbcijas pakāpe (Yao, Yan, 2011; Ministru kabinets, 2009; DIN, 2003; DIN EN 832, 2003). Tā kā Saules starojums parasti nekrīt perpendikulāri stiklotajām virsmām, tad dažādiem stiklojuma veidiem to enerģijas caurlaidības koeficienta SF vērtības aprēķinos tiek papildus samazinātas par 15%. Ja koeficients nav zināms, var izmantot raksturīgās vērtības: vienkāršam stiklojumam 0,87, dubultstiklam 0,76, bet siltumizolējošām paketēm 0,6...0,7.

Vidējo mēneša siltuma ieguvumu $\Phi_{S,M}$ (W) no saules starojuma enerģijas summē no caurspīdīgu un necaurspīdīgu elementu siltuma ieguldījumiem. Vislielāko ieguldījumu dod avoti caur caurspīdīgiem elementiem $\Phi_{S,M}^{aursp.}$, kas tiek noteikti no sakarības:

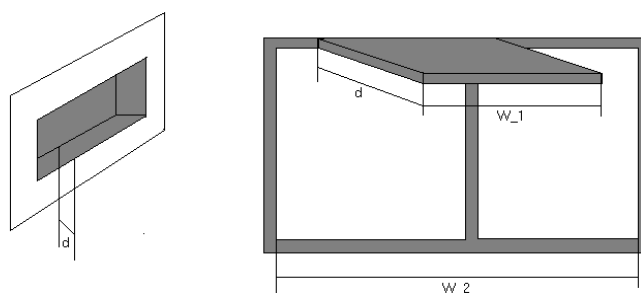
$$\Phi_{S,M}^{aursp.} = \sum_j I_{S,M,j} \cdot \left(\sum_i Z_i \cdot f_i \cdot SF_i \cdot A_i \right), \quad (3.11)$$

kur indekss i norāda uz būvelementu, j – uz tā orientāciju pret debess pusēm; koeficients Z_i ir saulsarga ietekmi ievērtējošs redukcijas faktors (-), f_i – būvelementa caurspīdīgā daļa kopējā laukumā ($0 \leq f_i \leq 1$), SF_i – solārās siltuma enerģijas caurlaidība (-), S_i – tā laukums (m^2) un $I_{S,M,j}$ (W m^{-2}) – no gada mēneša un būvelementa orientācijas atkarīga Saules starojuma intensitāte (LBN 003-01, 2001). Noēnojuma koeficienta vērtības dažādos gadījumos apkopotas tabulā 3.7, bet aprēķinu paskaidrojošā skice parādīta attēlā 3.4. Nepārtraukts noēnojums, ko izraisa blakusesošā apbūve, reljefs vai izvirzīti ēku fasāžu elementi var būtiski samazināt Saules enerģijas ieguldījumu ēkas siltuma bilancē.

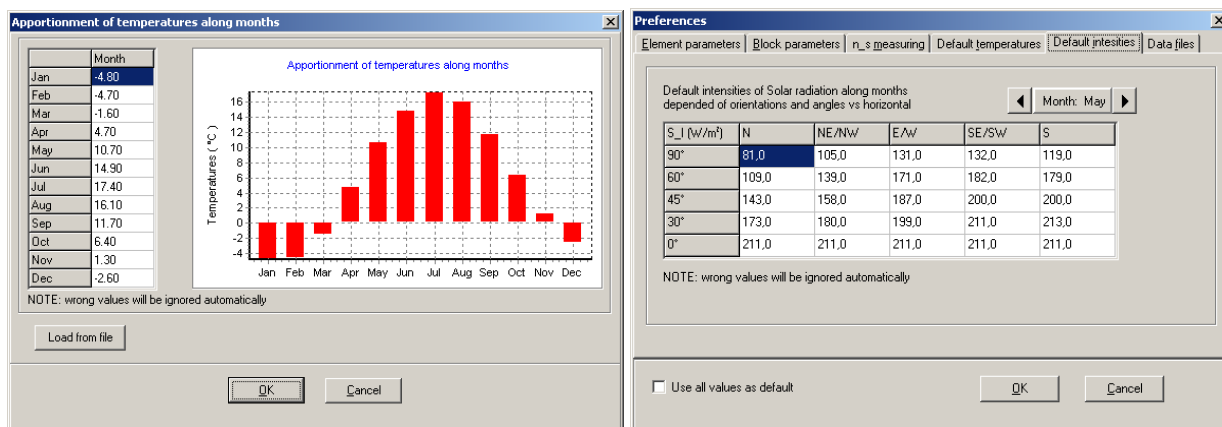
Piemērs vidējām mēneša temperatūrām un starojuma intensitātes datiem parādīta attēlā 3.5.

Tabula 3.7. Noēnojuma koeficienta noteikšana (DIN, 2003). Parametri paskaidroti attēlā 3.4.

Dziļums (m)	Noēnojuma faktors horizontālās un vertikālās dziļuma un orientācijas gadījumā		Noēnojuma faktors tikai horizontālā dziļuma gadījumā		
	Dienvidi	Ziemeļi	<0,6	0,6 – 0,8	>0,8
< 1,0	0,5	0,4	0,9	0,8	0,7
1,0 – 1,5	0,4	0,3	0,8	0,7	0,6
1,5 – 2,0	0,4	0,3	0,7	0,6	0,5
2,0 – 3,0	0,3	0,2	0,6	0,5	0,4
> 3,0	0,2	0,1	0,5	0,4	0,3



Attēls 3.4. Parametri elementa noēnojuma koeficienta noteikšanai.



Attēls 3.5. Piemērs mēneša vidējām temperatūrām (pa kreisi) un solārā starojuma intensitātēm (pa labi) atkarībā no orientācijas un leņķa.

Siltuma enerģijas ieguvumu necaurspīdīgos būvelementos $\Phi_{S,M}^{necaursp.}$ (W) nosaka analogiski formulai (3.11), tikai SF_i vietā izmantojot ekvivalento solārās siltuma enerģijas caurlaidības koeficienta vērtību SF_{ekv} (-), kas pilnīgi necaurspīdīgiem elementiem ir

$$SF_{ekv} = a_N \cdot U \cdot \frac{1}{\alpha_{\bar{a}r\bar{a}}} \quad (3.12)$$

Šeit a_N (-) ir necaurspīdīgā būvelementa vidējais starojuma absorbcijas koeficients, kas atkarīgs no elementa virsmas veida un tās nokrāsas (skat. tabulu 3.8), U ($W m^{-2} K^{-1}$) – siltuma caurlaidības koeficients, $\alpha_{\bar{a}r\bar{a}}$ ($W m^{-2} K^{-1}$) – siltuma atdeves koeficients ārpusē.

Tabula 3.8. Starojuma absorbcijas koeficienti necaurspīdīgiem būvelementiem (DIN, 2003).

Virsmas tips	Necaurspīdīgā būvelementa starojuma absorbcijas koeficients a_N
gaišs apmetums	0,4
tumšs apmetums	0,8
gaišs mūris	0,8
tumšs mūris	0,5
sarkans jumts	0,5
metālisks jumts	0,2
bitumens jumts	0,4
sarkanais ķieģelis	0,5

Ēkas iekšējo siltuma avotu jauda $\Phi_{I,M}$ (W) ir būtiski atkarīga no būves izmantošanas rakstura, cilvēku skaita, kas tajā uzturas, kā arī no tās tehniskā aprīkojuma un šī aprīkojuma izmantošanas intensitātes. Mēneša M iekšējo siltuma avotu iegūst, uz tilpuma vienību normētu avotu jaudas vidējo

vērtību \dot{q} (W m^{-3}) pareizinot ar ēkas tilpumu V (m^3):

$$\Phi_{l, M} = \dot{q} \cdot V. \quad (3.13).$$

Tā kā \dot{q} vērtības eksperimentāla noteikšana ir sarežģīta, var izmantot standartizētus lielumus (DIN, 2003): dzīvojamām ēkām $1,75 \text{ W m}^{-3}$, administratīvām ēkām – $2,2 \text{ W m}^{-3}$.

Ēkas gada kopējo siltuma patēriņu iegūst, saskaitot mēnešu M ar pozitīvu siltuma bilanci $Q_{H, M}$ siltuma patēriņu:

$$Q_H = \sum_{M=1}^{12} \frac{Q_{H, M} + |Q_{H, M}|}{2}. \quad (3.14)$$

Modelis šādā formulējumā parāda tikai apkurei nepieciešamo enerģijas patēriņu un neievēro gaisa dzesēšanas nepieciešamību vasarā, kad iekštelpu temperatūra pārsniedz uzdoto vērtību.

Visu iepriekš apskatīto parametru uzdošanai un ēkas siltuma bilances sastādīšanai var lietot shēmu, kas tiek izmantota izveidotajā programmatūrā HeatMod (PAIC, 2006), šādu secīgu soļu veidā:

- Ēkas telpu bloku ar atšķirīgām temperatūrām tilpumu, ēkas ārsienu un tās bloku ar atšķirīgām temperatūrām atdalošo iekšsienu laukumu aprēķins.
- Īpatnējo siltuma zudumu noteikšana.
- Iekšējo temperatūru fiksācija (piem., $20 \text{ }^\circ\text{C}$ dzīvojamām telpām) vai to izmaiņu režīma uzdošana dažādiem telpu blokiem, lietojot temperatūras redukcijas faktoru.
- Vidējās mēneša ārgaisa temperatūras un Saules starojuma intensitātes noteikšana attiecīgajā klimatiskajā zonā uz meteoroloģisko datu bāzes. Latvijas klimatiskajiem apstākļiem tiek izmantots Latvijas Būvnormatīvs “Būvklimatoloģija” (LBN 003-01, 2001).
- Iekšējo siltuma avotu jaudas vidējās vērtības un solārā starojuma radītā siltuma daudzuma aprēķins attiecīgajam mēnesim.
- Apkures robežtemperatūras, kuru ārgaisa mēneša vidējai temperatūrai pārsniedzot, mēnesis vairs nav pieskaitāms apkures sezonai, noteikšana.
- Mēneša siltuma patēriņa aprēķins un apkures sezonas siltuma vajadzības noteikšana.
- Ieejas datu un aprēķinu rezultātu attēlojums tabulu un diagrammu veidā.

Detalizētāku informāciju par modelī izmantotajiem parametriem, kā arī pašu aprēķinu metodiku var gūt publikācijā (Jakovičs *et.al.*, 2000).

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.

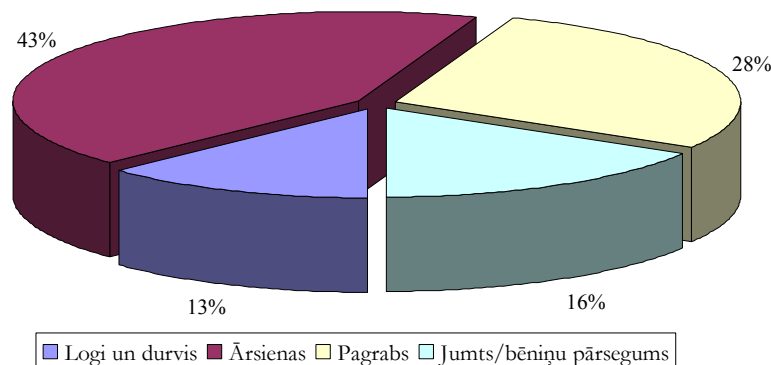
Jānorāda, ka šī pieceja tika tālāk attīstīta, veidojot aprēķinu metodiku atbilstoši 2009. gadā Latvijā pieņemtajai „Ēkas energoefektivitātes aprēķina metodei” (Ministru kabinets, 2009). Uz tās bāzes pēc Ekonomikas Ministrijas pasūtījuma ar autora līdzdalību izveidota specializēta programmatūra EfA aprēķinu veikšanai un ēku energoefektivitātes sertifikāta sagatavošanai.

Uz mēneša aprēķiniem bāzētais ēkas siltuma bilances modelis ērtā veidā ļauj novērtēt tajā ieejošo parametru un faktoru maiņas ietekmi uz kopējo siltuma bilanci un energoefektivitāti, kā arī optimizēt zudumus caur konkrētiem būvelementiem, tāpēc tas ir ērti lietojams, plānojot mājas siltināšanu vai renovāciju, kā arī izvēloties jaunceļamās būves konstruktīvos elementus un risinājumus. Lai parādītu šāda modeļa lietošanas iespējas un iegūto rezultātu analīzes efektivitāti, apskatīsim dažus reālus māju projektu modeļus.

3.2.2. Aprēķinu piemēri

Apskatītā detalizētā ēkas siltuma bilances pieceja, kas pamatā izmanto viens mēneša siltuma bilanci, tika realizēta izstrādātajā programmatūrā HeatMod (PAIC, 2006) paralēli vienkāršotam aprēķinam saskaņā ar LBN 002-01 prasībām. Izmantojot minēto programmatūru ir veikti vairāki desmiti pagājušā gadsimta otrajā pusē celtu dzīvojamo ēku siltuma bilances modeļu aprēķini, kā arī analizēti daži jaunceļamie objekti. Veco ēku siltuma bilances modeļi parādīja būtisku gaisa apmaiņas un veco koka logu mazas siltuma pretestības ietekmi uz kopējo siltuma zudumu daudzumu, tāpēc tieši logu nomaiņa praktiski vienmēr ir visefektīvākais veids energoefektivitātes uzlabošanai eksistējošās ēkās. Apskatīsim dažus uz mēneša bilances bāzes veidotus piemērus detalizēti.

Vēsturiski pirmais ēkas siltuma bilances modelis, kas tika izveidots uz mēneša aprēķinu bāzes, ir nerenovēta LU FMF laboratoriju korpusa Zeļļu ielā 8 modelis (1997. gadā). Modelēšanas rezultātu analīze minētajam piecstāvu korpusam ar sarkano ķieģeļu ārsienām, veciem koka logiem, kopējo tilpumu 10200 m³ un ārējo būvkonstrukciju laukumu 3573 m² parādīja ļoti lielu gada īpatnējo apkures siltuma vajadzību tās sākotnējā stāvoklī: $Q'_H = 49,8 \text{ kW h m}^{-3}$. Tas vairāk nekā 2 reizes pārsniedz maksimāli pieļaujamo vērtību 19,9 kW h m⁻³, kas tika noteikta saskaņā ar tā laika Vācijas aktuālo ēkas siltuma patēriņa aprēķinu Būvnoteikumi Wärmeschutzverordnung (WSVO, 1995). Aprēķinos izmantojamo dažādu būvelementu daļas ēkas ārējā čaulā parādīta attēlā 3.6.



Attēls 3.6. Būvelementu laukumu attiecības ēkas apsildāmās daļas ārējā čaulā.

Kā parādīja izveidotās siltuma bilances analīze, būtiska daļa no kopējiem siltuma zudumiem ir saistīta ar ēkas neapmierinošo blīvējuma pakāpi (īpaši ar nekvalitatīviem koka logiem), pēc novērtējumiem n pieņemts vienāds ar $1,2 \text{ h}^{-1}$. Analizējot dažādas ēkas siltuma zudumu samazināšanas iespējas, tika aprēķināta īpatnējā apkures siltuma vajadzība Q'_H arī dažādiem renovācijas darbu variantiem, kuru izpildes rezultātā būtiski mainās gan attiecīgo būvelementu siltuma caurlaidības U , gan ēkas gaisa apmaiņa n :

- variants II: Visu logu nomaiņa, kas vienlaicīga samazina arī gaisa apmaiņu ēkā, $Q'_H = 35,3 \text{ kW h m}^{-3}$.
- variants III: Papildus variantam I ir siltinātas ārsienas, bēniņu pārsegums un uzbūvēts divslīpņu jumts, $Q'_H = 20,2 \text{ kW h m}^{-3}$. Šis renovācijas projekta variants ir realizēts dabā.
- variants IV: Veikta logu nomaiņa ar siltumizolējošiem pakešu logiem, papildus siltinātas ārsienas, bēniņu pārsegums un arī apkurināmais pagrabstāvs. Īpatnējā siltuma vajadzība apkures sezonai samazinās līdz $Q'_H = 14,3 \text{ kW h m}^{-3}$.

Ieejas datu un iegūto rezultātu apkopojums minētās ēkas sākotnējā stāvokļa (I) modelim un iespējamiem trim renovācijas darbu variantiem (II, III, IV) parādīti attiecīgi tabulās 3.9 un 3.10, bet vizuālais rezultātu salīdzinājums – attēlos 3.7 – 3.11.

Analizējot II pārbūves varianta efektivitāti, var apgalvot, ka, neskatoties uz relatīvi nelielo logu daļu (13%) ēkas ārējā čaulā, to nomaiņa gandrīz par 30% samazina apkures siltuma vajadzību (attēls 3.7). Tas izskaidrojams ne tikai ar to siltuma caurlaidības U samazināšanos no $3,0$ uz $2,4 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$, bet gan galvenokārt ar būtisku ēkas gaisa apmaiņas n paaugstināšanos no $1,2$ uz $0,7 \text{ h}^{-1}$, kā rezultātā ievērojami samazinās siltuma zudumi konvekcijas ceļā caur neblīvām vietām logu rāmjos (attēli 3.8 un 3.9). Ja tam papildus veikta arī ārsienu siltināšana un jumta izbūve (variants II), tad enerģijas patēriņš ir vairs tikai 40% no sākotnējā.

Tabula 3.9. Ieejas dati ēkas modelim dažādos aprēķinu variantos.

Variants	Siltuma caurlaidības koeficients U ($W m^{-2} K^{-1}$)				Ēkas gaisa apmaiņas koeficients n (h^{-1})
	Sienas	Logi/durvis	Jumts/bēniņu pārsegums	Pagrabs	
I	1,3	3	1	1,2	1,2
II	1,3	2,4	1	1,2	0,7
III	0,3	2,4	0,7	1,2	0,7
IV	0,25	2	0,25	0,25	0,7

Tabula 3.10. Iegūtie modelēšanas rezultāti ēkas modelim dažādos aprēķinu variantos.

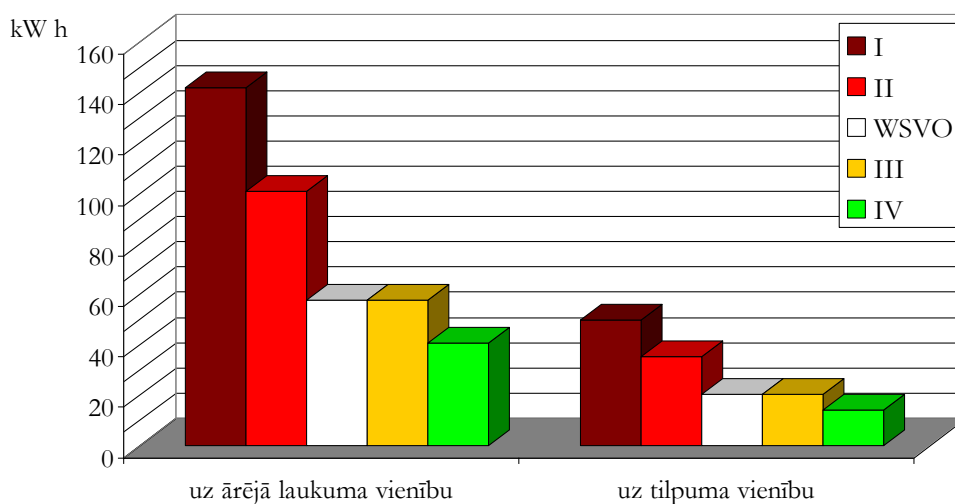
Variants	Visas ēkas gada siltuma zudumi ($MW h$)	Īpatnējā apkures siltuma vajadzība ($kW h m^{-3}$)	Gada siltuma zudumi ($MW h$) caur			
			sienām	logiem/durvīm	jumtu/bēniņu pārsegumu	pagrabu
I	705,2	49,8	192,3	82,9	56,9	47,2
II	522,6	35,3	181,4	63,7	53,7	44,5
III	332,5	20,3	42,9	60,4	16,8	42,3
IV	270,0	14,3	35,2	49,4	6,4	8,8

Attēli 3.8 un 3.10 uzskatāmi parāda, ka daļu no siltuma zudumiem sedz iekšējie un solārie siltuma avoti. Laba siltinājuma gadījumā (IV) šie avoti kompensē gandrīz pusi no ēkas siltuma zudumiem. Mainoties ēkas siltuma zudumu daudzumam, mainās arī noteiktais apkures perioda ilgums (attēls 3.11). Ja ēka sākotnējā stāvoklī optimālu temperatūras apstākļu nodrošināšanai ($T=2$ °C) būtu jākurina arī septembrī un maijā, tad pilnīgas siltināšanas rezultātā (atbilstoši aprēķinu variantam IV) apkures periods saīsinās un apkure Latvijas klimatiskajos apstākļos būtu nepieciešama tikai no oktobra līdz martam. Tā rezultātā gan arī nedaudz samazinās siltuma ieguvumi caur ārsienām un logiem apkures periodā, bet tas būtiski nepasliktina ēkas siltuma bilanci.

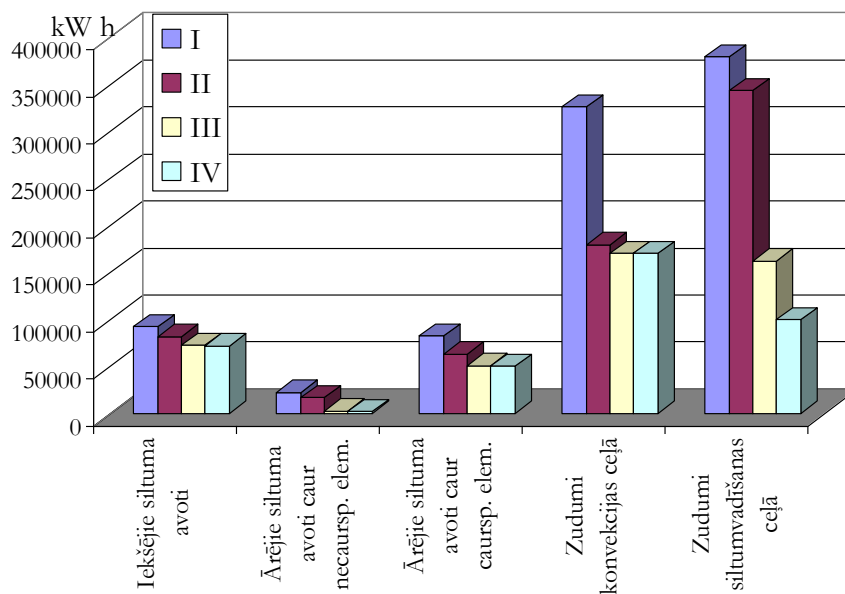
Aprēķinu variantos III un IV tiek modelēta divslīpņu jumta izbūve, kas reāli arī tika realizēta dabā, un tas dod ne tikai zināmu ieguldījumu siltuma zudumu samazināšanā (attēli 3.7 un 3.9), bet galvenokārt nodrošina būvkonstrukciju labāku aizsargātību pret mitruma iedarbību un rada papildus izmantojamo platību. Tādēļ šīs izbūves efektivitāti nevar vērtēt tikai no siltuma enerģijas taupīšanas viedokļa. Bez tam, plānojot investīcijas, ir svarīgi novērtēt arī citus faktoros, it īpaši projektējamo pasākumu lomu būvkonstrukciju ilgmūžības nodrošināšanai, kā arī sociālos un humānos aspektus. Jau variantā III iegūtā ēkas siltuma vajadzība Q'_H ir aptuveni vienāda ar Vācijas Būvnoteikumu Wärmeschutzverordnung (WSVO, 1995) maksimāli pieļaujamo vērtību, bet variantā IV ir pat par 20% mazāka par to (attēls 3.7).

Jāuzsver, ka šāda rakstura sabiedriski izmantojamām ēkām ļoti būtiski ir rekonstruēt arī ventilācijas sistēmu un izbūvēt piespiedu ventilāciju, ja tādas nav, jo:

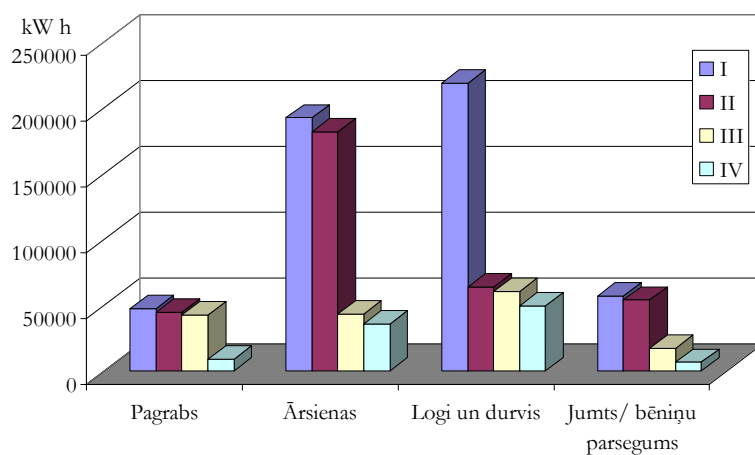
- efektīvi regulējamas ventilācijas iespējas atbilstoši telpu izmantošanas raksturam ļauj palielināt ēkas kopējo blīvējuma pakāpi un tādējādi būtiski samazināt konvektīvos siltuma zudumus;
- ēkās bez regulējamās ventilācijas sistēmas pēc logu blīvēšanas un ārsienu siltināšanas bieži vērojams, ka logi tiek atvērti, lai nodrošinātu pieņemamus siltuma un ventilācijas apstākļus;
- tas ļauj nodrošināt optimālus termiskā komforta apstākļus telpās.



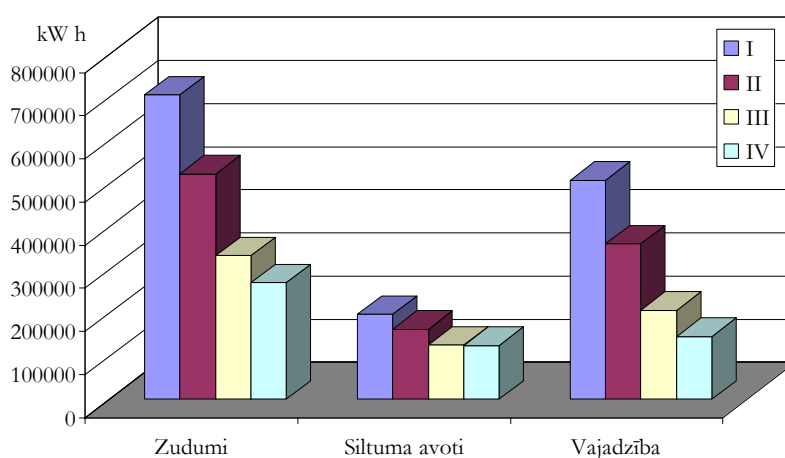
Attēls 3.7. Variantu I-IV normēto siltuma vajadzību salīdzinājums ar robežvērtībām WSWO (WSVO, 1995).



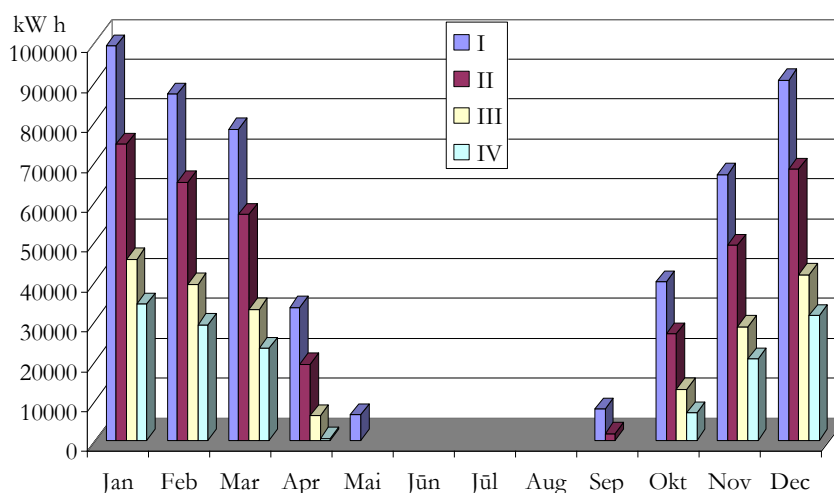
Attēls 3.8. Gada siltuma zudumu un siltuma avotu sadalījums pa veidiem variantos I-IV.



Attēls 3.9. Gada siltuma zudumu sadalījums pa ēkas ārējās čaulas elementiem variantos I-IV.



Attēls 3.10. Uz ēkas telpumu normētās gada apkures siltuma vajadzības variantos I-IV.



Attēls 3.11. Siltuma vajadzība apkures sezonas mēnešos aprēķinu variantos I-IV.

Kā citu piemēru apskatīsim siltuma bilances modelēšanu daudzdzīvokļu sērijveida ēkām, kas tika veikti pēc to norobežojošo konstrukciju siltuma caurlaidības mērījumiem (skat. sadaļu 2.2.3). Praktiski visām ēkām tika konstatēta palielināta gaisa apmaiņas intensitāte, kas arī nosaka konvektīvo

siltuma zudumu lielo īpatsvaru kopējā bilancē. Atsevišķi apskatīsim vienas 318. sērijas trīsstāvu ēkas modeli, kuras vienas fasādes kopskats parādīts attēlā 3.12. Mērījumos tika noteikta salīdzinoši liela ārsienu siltuma caurlaidība $U=1,25 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$, ko labi var redzēt arī termogrāfiskā uzņēmumā (attēls 3.12), kur paaugstināta virsmas temperatūra ir konstatēta radiatoru novietojumu vietās, kas norāda uz ārsienu lielu siltuma caurlaidību.



Attēls 3.12. Modelējamā 318. sērijas daudzdzīvokļu māja (pa kreisi) un termogrāfiskais ār sienas uzņēmums ar paaugstinātu virsmas temperatūru radiatoru novietojumu vietās (pa labi).

Tabulā 3.11. apkopoti dati, kas tiek izmantoti esošās ēkas (variants I) un divu iespējamo ēkas renovācijas variantu (II, III) modelēšanā. Šo renovācijas projektu izmaksas, atbilstošais siltuma patēriņa samazinājums un investīciju atmaksāšanās periods parādīts tabulā 3.12. Kā redzams, ir vajadzīgi vismaz 10 gadi, lai ēkas siltināšanā ieguldītie līdzekļi atmaksātos. Renovācijas projekts II ietver divas lētākās un efektīvākās siltuma zudumu samazināšanas iespējas – logu nomainīšanu pret pakešlogiem un bēniņu siltināšanu ar minerālvati. Savukārt, pilns ēkas siltināšanas cikls ir atspoguļots variantā III, kur papildus tiek siltināts arī pagraba pārsegums, bet tādu būvdarbu izmaksas ir daudz augstākas pie salīdzināmas vai mazākas siltuma ekonomijas.

Kā jau bija sagaidāms, visnozīmīgākos siltuma enerģijas ietaupījumus pie minimāliem renovācijas darbiem dod logu/durvju nomainīšana un bēniņu pārseguma siltināšana (variants II), bet izmaksas ārsienu un pagraba pārseguma siltināšanai ir ievērojami lielākas (variants III), tāpēc ierobežotā finansiālā situācijā ieteicams izvēlēties variantu II. Tā kā abos renovācijas variantos tiek nomainīti logi, tad rezultātā samazinās ne tikai vadīšanas siltuma zudumi, bet tiek normalizēta arī gaisa apmaiņa ēkā, koeficients n samazinās no 1 uz $0,7 \text{ h}^{-1}$. Atbilstoši aprēķinam sagaidāms, ka pēc pilna siltināšanas darbu cikla realizācijas (variants III) ēkas apkures siltuma patēriņš samazināsies gandrīz 3 reizes, bet atmaksāšanās periods šāda veida uzlabojumam sasniedz 14 gadus.

Kā vēl vienu piemēru uz mēneša siltuma bilances balstītās aprēķinu metodes lietojumam apskatīsim gadījumu, kad ir nepieciešams novērtēt tikai ēkas gaisa caurlaidības maiņas ietekmi uz

kopējiem siltuma zudumiem. Piem., nemainot vecus koka logus, bet vienkārši noblīvējot spraugas rāmjos, var ar relatīvi nelielām izmaksām panākt ievērojamu apkures siltuma enerģijas ekonomiju. Veiktie aprēķini vienkāršas ģeometrijas ēkai ar diviem atšķirīgiem gaisa apmaiņas koeficientiem $n=1,1 \text{ h}^{-1}$ un $0,7 \text{ h}^{-1}$ parādīja gada kopējā siltuma patēriņa samazinājumu no sākotnējiem 190 MW h līdz 122 MW h, bet apkures sezonas ilgums samazinājies no 9 uz 7 mēnešiem. Tā kā norobežojošo konstrukciju siltuma caurlaidības netika mainītas, tad iekonomētais siltuma enerģijas daudzums tiek panākts uz konvektīvās siltuma pārneses samazinājuma rēķina. Protams, tā kā īsinās apkures sezona, samazinās arī visi ar mēnešu skaitu saistītie lielumi, to apkopojums ir sniegts tabulā 3.13.

Tabula 3.11. Ieejas dati 318. sērijas ēkas modelim dažādos aprēķinu variantos.

Būvkonstrukcija	Siltuma caurlaidība U ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$)		
	Variants I	Variants II	Variants III
Balto silikātķieģeļu mūris	1,25	1,25	0,3
Augstāva pārsegums uz bēniņiem	0,8	0,2	0,2
Pagraba pārsegums	1,0	1,0	0,25
Ārdurvis un koka (pakešu) logi	3,0 (2,0)	2,0	2,0

Tabula 3.12. Ēkas siltināšanas saimnieciskā izdevīguma izvērtējums no apkures siltuma ekonomijas viedokļa.

Raksturlielums/variants	Variants II	Variants III
Gada apkures siltuma ekonomija salīdzinājumā ar bāzes stāvokli (MW h)	37,3	85,9
Gada ekonomija (Ls) atbilstoši apkures siltuma tarifam 35 Ls par 1 MW h	1312	3007
Attiecīgo renovācijas darbu aptuvenas izmaksas (Ls)	12700	42100
Atmaksāšanās periods (gados)	≈10	≈14

Tabula 3.13. Iegūtie modelēšanas rezultāti ēkai ar atšķirīgām gaisa apmaiņas koeficienta vērtībām

Uzdots vai aprēķināts lielums	Ēka ar veciem logiem	Ēkas ar noblīvētiem veciem logiem
Ēkas gaisa apmaiņas koeficients n (h^{-1})	1,1	0,7
Īpatnējie ēkas siltuma vadīšanas zudumi gadā (kW h m^{-3})	12,7	11,5
Īpatnējie ēkas konvektīvie siltuma zudumi gadā (kW h m^{-3})	29,6	17,1
Īpatnējie ēkas iekšējie siltuma avoti gadā (kW h m^{-3})	9,0	7,1
Īpatnējie ēkas solārie siltuma avoti gadā (kW h m^{-3})	4,9	3,3

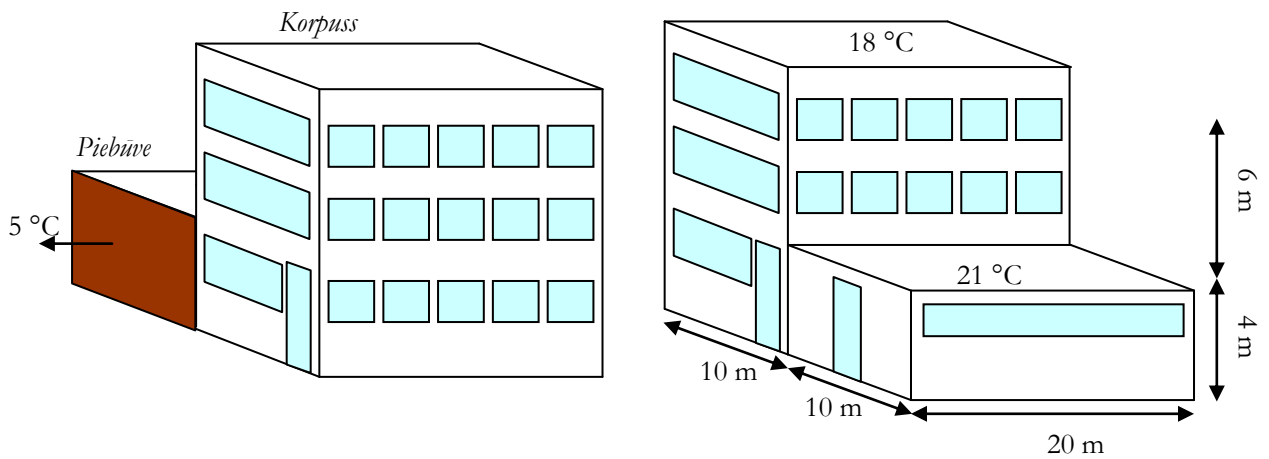
Šāda veida modeļi, kas ir veidoti uz ēkas viena mēneša siltuma bilances modeļa pamata, ir ērti lietojami ne tikai jaunceļamo māju apkures siltuma vajadzības noteikšanai, bet arī eksistējošo ēku renovācijas projektu analīzei ar mērķi izvēlēties optimālāko variantu gan siltuma ekonomijas ziņā, gan arī ieguldīto līdzekļu atmaksāšanās perioda aprēķinam. Tie ļauj arī izvēlēties jaunceļamo ēku būvkonstrukciju parametru vērtības ar mērķi sasniegt kādu noteiktu siltuma patēriņa līmeni. Papildus modelis var tikt lietots arī būvju apkures sistēmu jaudas noteikšanai un attiecīgo sistēmu izvēlei.

3.3. Abu metožu salīdzinājums. Secinājumi.

Katrai no iepriekš apskatītām metodēm ēkas siltuma bilances noteikšanai ir savas priekšrocības un trūkumi. Tā, tuvināti novērtējot vadīšanas siltuma zudumu sadalījumu starp būvelementiem vai nosakot ēkas atbilstību Latvijas Būvnormatīva „Ēku norobežojošo konstrukciju siltumtehnika” (LBN 002-01, 2001) prasībām, var izmantot vienkāršoto metodi, kas neprasa padziļinātas zināšanas par ēkas projektu un siltuma apmaiņas procesiem tajā. Savukārt, gadījumā, ja ir nepieciešama detalizēta mājas siltuma zudumu un apkures vajadzības analīze, ir jālieto komplicēta un precīzāka un mēneša siltuma bilances veidotā aprēķinu metode.

Lai salīdzinātu abu apskatīto modeļu iegūtos rezultātus un novērtētu to praktisko pielietojumu ēku energoefektivitātes jomā, apskatīsim piemēru – ēkas modeli divos variantos, kas atšķiras ar norobežojošo konstrukciju siltuma caurlaidību vērtībām. Modelējamā māja parādīta attēlā 3.13, tā sastāv no diviem blokiem – trīsstāvu korpusa ar iekštelpu temperatūru 18 °C un vienkārtīgas piebūves ar paaugstinātu iekštelpu temperatūru (21 °C), kuras viena sienu (attēlā apzīmēta ar brūnu krāsu) robežojas ar neapkurināmu telpu, piem., garāžu, kas modelī nav iekļauta. Trīsstāvu korpusa stiklotā daļa (logi) pārsniedz 20% no katra stāva grīdas laukuma, bet piebūvei loga daļa ir mazāka par 20%. 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.

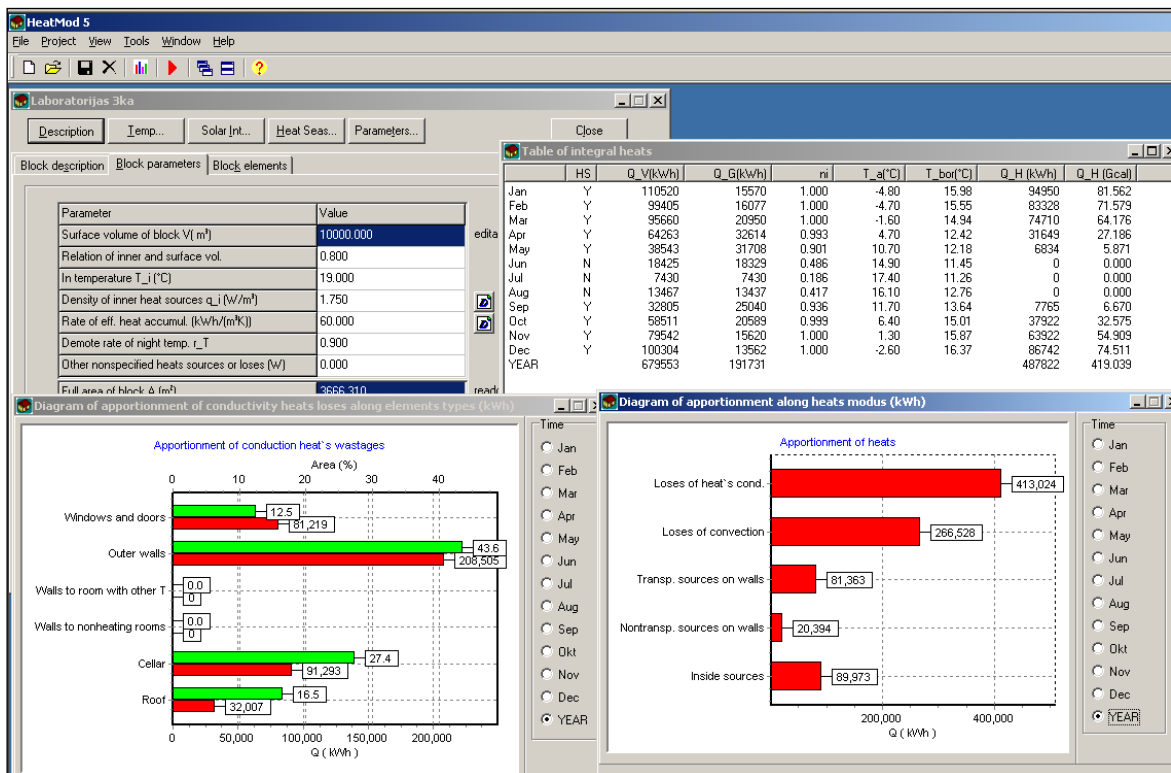
Būvkonstrukcijas siltuma caurlaidības aprēķinu variantam I apzināti izvēlētas neatbilstošas būvnormatīva LBN 002-01 nosacījumiem, izņemot gadījumus ar citas temperatūras telpu un piebūvi, kad ir jālieto temperatūra faktors κ (3.3), bet aprēķinu variantā II U vērtības ir uzdotas mazākas un atbilst normatīva prasībām. Ieejas dati abiem ēkas blokiem diviem modelēšanas variantiem apkopoti tabulā 3.14. Aprēķini tika veikti ar divām metodēm – saskaņā ar LBN 002-01 (nodaļa 3.1) un uz mēneša bilances modeļa (nodaļa 3.2) bāzes un izmantojot izstrādāto programmatūru HeatMod (PAIC, 2006) – skat. attēlu 3.14.



Attēls 3.13. Modelējamās ēka skice ar tās raksturīgiem izmēriem (no diviem pretējiem skatu punktiem).

Tabula 3.14. Modelējamās ēkas (attēls 3.13) bloku parametri

Elements	Elementu laukums (m ²)		U (W m ⁻² K ⁻¹)	
	Korpuss, 3 stāvi	Piebūve, 1 stāvs	Variants I	Variants II
Sienas (>100 kg/m ²)	508	96	0,4	0,3
Jumts	200	200	0,3	0,2
Grīda uz grunts	200	200	0,3	0,2
Durvis un durvis	218	24	2,7	1,3
Siena uz neapkurinātu telpu	-	40	0,4	0,3



Attēls 3.14. Siltuma bilances modelēšanas programmas HeatMod ekrāna kopija.

Tā kā aprēķiniem nepieciešamie parametri ir atšķirīgi abām metodēm, tad programmatūrā to uzdošana notiek katrai metodei atsevišķi, taču daži raksturīgie parametri paliek nemainīgi, piem., būvelementu laukumi un siltuma caurlaidības koeficients, tāpēc tās uzdot vienu reizi. Līdz ar to aprēķinam uz mēneša bilances bāzes ir nepieciešami daudz vairāk ieejas datu gan par visu ēku (piem., gaisa apmaiņa, iekšējie siltuma avoti), gan arī klimatiskos apstākļus raksturojošie parametri (piem., solārā starojuma intensitāte atkarībā no krišanas leņķa u.c.), nekā aprēķinam atbilstoši LBN 002-01, kas ir ievērojami vienkāršāks. Atbilstoši tam arī rezultāti abām metodēm sniedz lietotājam atšķirīgu informācijas daudzumu par ēkas energoefektivitāti un plānoto uzlabojumu lietderīgumu. Salīdzināsim ar abām metodēm iegūtos rezultātus un tālākās to izmantošanas iespējas.

Veicot aprēķinus atbilstoši aprakstītajai Latvijas Būvnormatīva prasībām atbilstoši metodei (sadaļa 3.1), iegūstam sekojošu informāciju:

- ēkas kopumā un tās atsevišķu bloku siltuma zudumu koeficientus H_T , kā arī atbilstošos normatīvos siltuma zudumu koeficientus H_{TR} saskaņā ar vispārīgo un vienkāršoto aprēķinu formulām (3.2) un (3.4) (attēls 3.15);
- siltuma zudumu koeficientu H_T sadalījumu pa būvelementiem (attēls 3.16);
- kopējo norobežojošo konstrukciju laukumu (attēls 3.17), kā arī lineāro siltuma tiltu kopgarumu un punktveida siltuma tiltu skaitu, ja tādi ir uzdoti;
- grafisku attēlojumu siltuma zudumu koeficientiem H_T visai ēkai kopumā un katram tās blokam (attēls 3.18);
- grafisku salīdzinājumu būvelementu siltuma zudumu koeficientiem H_T un šo elementu laukumu daļai kopējā čaulā (attēls 3.19).

Nr.p.k.	Nosaukums	Ht [W/K]	Htr1 [W/K]	Htr2 [W/K]
	Visa ēka	1151.40	985.46	760.00
1	Korpuss	912.20	831.30	540.00
2	Piebūve	239.20	154.16	220.00

Ht - Ēkas aprēķina siltuma zudumu koeficients [W/K]
Htr1 - Normatīvais siltuma zudumu koeficients atbilstoši vispārīgai formulai [W/K]
Htr2 - Normatīvais siltuma zudumu koeficients saskaņā ar vienkāršoto aprēķinu formulu dzīvojamām mājām, pensionātiem, slimnīcām un bērnudārzniešiem [W/K]

Projekts neatbilst LBN 002-01 normatīva prasībām!

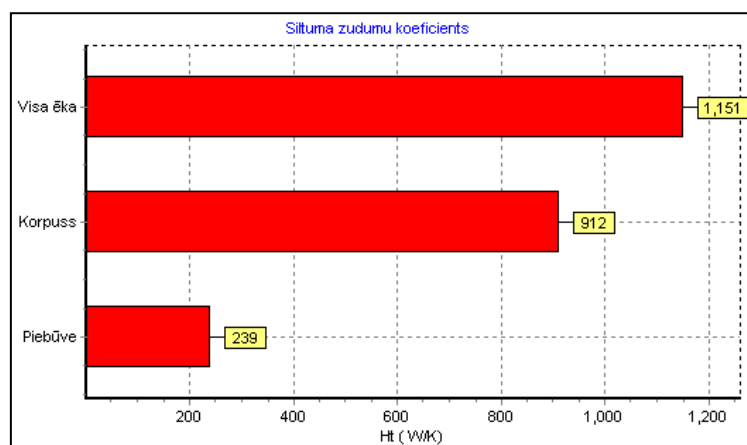
Attēls 3.15. Visas ēkas un tās bloku siltuma zudumu koeficienti un atbilstošie normatīvie siltuma zudumu koeficienti.

Nr.p.k.	Būvelementi	Ht
1	Jumts, pārsegs vai grīda, kas saskaras ar gaisu	120
2	Grīda uz grunts vai virs neapkurināta pagraba	120
3	Siena ar masu zem 100 kg/m ²	0
4	Siena ar masu 100 kg/m ² un vairāk	258
5	Logs, durvis vai stiklota siena	653
6	Lineārais termiskais tilts	0
7	Punktveida termiskais tilts	0

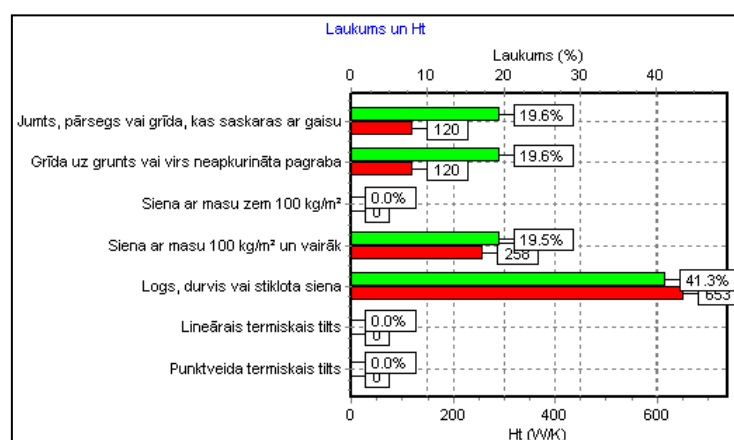
Attēls 3.16. Siltuma zudumu koeficientu sadalījums pa būvelementiem.

Nr.p.k.	Nosaukums	Ārējais laukums (m ²)
	Visa ēka	1687.00
1	Korpuss	1127.00
2	Piebūve	560.00

Attēls 3.17. Kopējo norobežojošo konstrukciju laukumi.



Attēls 3.18. Siltuma zudumu koeficientu ēkas blokiem un ēkai kopumā grafiskais attēlojums.



Attēls 3.19. Būvelementu siltuma zudumu koeficientu un to laukumu grafiskais salīdzinājums.

Aprēķinā uz pilnās mēneša siltuma bilances bāzes (sadaļa 3.2), ievērojot arī konvektīvos un radiācijas siltuma apmaiņas procesus, tiek iegūti:

- dati par ēkas kopējiem siltuma zudumiem Q_V , avotiem Q_G un patēriņu Q_H , kā arī ēkas siltuma avotu lietderības koeficients un apkures robežtemperatūra (PAIC, 2006) (attēls 3.20);
- ēkas siltuma zudumu Q_V un avoti Q_G sadalījums pa to veidiem (iekšējie avoti, avoti caur necaurspīdīgiem un caurspīdīgām būvelementiem, konvektīvie un vadīšanas zudumi) (attēls 3.21);
- siltuma vadīšanas zudumu sadalījums pa būvelementu tipiem (caur jumtu, pagrabu, sienām uz neapkurināmu/citas temperatūras telpām, ārējām sienām un logiem/durvīm) (attēls 3.22).

	HS	Q_V(kWh)	Q_G(kWh)	ni	T_a(°C)	T_bor(°C)	Q_H(kWh)	Q_H(Gcal)
Jan	Y	29551	6482	1.000	-4.80	15.85	23069	19.816
Feb	Y	26577	6582	1.000	-4.70	15.21	19996	17.176
Mar	Y	25521	8688	1.000	-1.60	14.10	16833	14.459
Apr	Y	17020	12670	0.959	4.70	10.16	4350	3.736
May	N	10031	9737	0.704	10.70	10.02	0	0.000
Jun	N	4589	4588	0.309	14.90	8.84	0	0.000
Jul	N	1593	1593	0.102	17.40	8.55	0	0.000
Aug	N	3230	3230	0.253	16.10	10.87	0	0.000
Sep	Y	8489	8147	0.741	11.70	11.98	341	0.293
Oct	Y	15446	8554	0.993	6.40	14.16	6892	5.920
Nov	Y	21163	6424	1.000	1.30	15.73	14739	12.661
Dec	Y	26780	5384	1.000	-2.60	16.72	21396	18.379
YEAR		170547	62932				107615	92.441

Attēls 3.20. Ēkas kopēji siltuma zudumi Q_V (Q_V), avoti Q_G (Q_G), siltuma avotu lietderības koeficients, uzdotā āra temperatūra, apkures robežtemperatūra un ēkas patēriņš Q_H (Q_H).

	HS	Inside sources	Nontransp. sources on walls	Transp. sources on walls	Losses of convection	Losses of conductivity
Jan	Y	3666.4	232.8	2582.5	10723.9	18827.0
Feb	Y	3311.5	286.8	2983.4	9645.1	16932.2
Mar	Y	3665.4	460.7	4562.1	9273.3	16247.7
Apr	Y	3401.5	905.6	8363.1	6210.5	10809.2
May	N	2581.5	720.6	6435.1	3697.7	6333.2
Jun	N	1098.0	359.6	3130.3	1735.9	2852.7
Jul	N	372.6	123.9	1096.8	660.5	932.7
Aug	N	928.5	226.8	2075.0	1249.8	1980.6
Sep	Y	2629.4	522.1	4996.0	3139.7	5348.9
Oct	Y	3642.1	438.6	4473.7	5646.9	9799.3
Nov	Y	3547.7	245.0	2631.7	7702.0	13461.4
Dec	Y	3666.4	145.4	1572.5	9726.6	17053.7
YEAR		27530.4	3236.9	32164.9	62068.0	108479.4

Attēls 3.21. Ēkas siltuma avotu Q_G un zudumu Q_V sadalījums pa to veidiem.

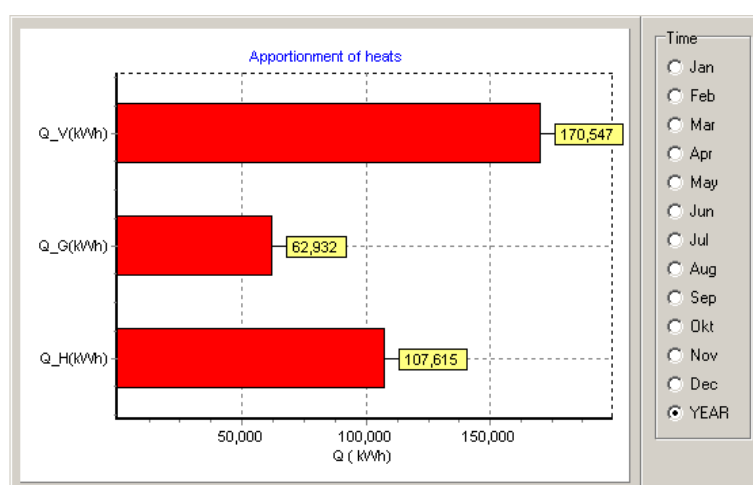
	HS	Roof	Cellar	Walls to nonheating rooms	Walls to room with other T	Outer walls	Windows and doors
Jan	Y	2169.5	1084.8	153.6	0.0	4190.8	11228.4
Feb	Y	1951.5	975.7	138.2	0.0	3769.0	10097.9
Mar	Y	1883.8	941.9	134.5	0.0	3614.6	9672.8
Apr	Y	1278.7	639.4	93.9	0.0	2400.3	6396.9
May	N	785.7	392.8	61.3	0.0	1400.1	3693.4
Jun	N	397.4	198.7	35.1	0.0	623.1	1598.4
Jul	N	187.5	93.7	21.4	0.0	193.7	436.3
Aug	N	303.6	151.8	29.2	0.0	427.8	1068.3
Sep	Y	673.9	337.0	53.6	0.0	1180.7	3103.8
Oct	Y	1169.6	584.8	86.9	0.0	2174.3	5783.7
Nov	Y	1572.5	786.2	113.5	0.0	2992.8	7996.4
Dec	Y	1973.1	986.5	140.5	0.0	3794.7	10158.9
YEAR		12672.6	6336.3	914.5	0.0	24117.1	64438.8

Attēls 3.22. Siltuma vadišanas zudumu sadalījums pa būvelementu tipiem.

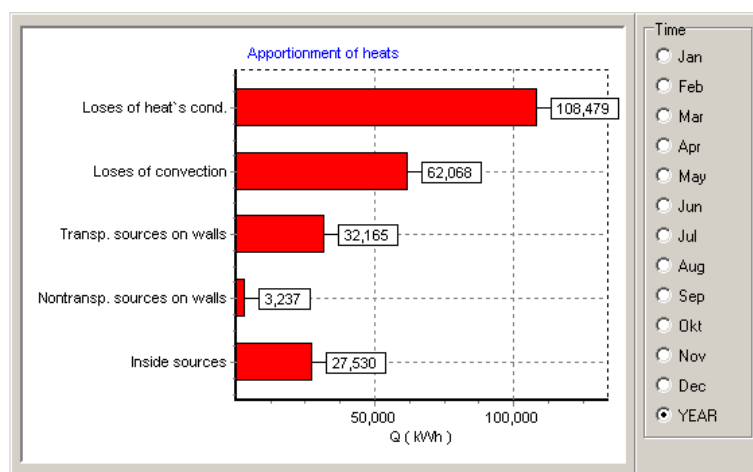
Informācija tiek apkopota un izvadīta pa mēnešiem un visas apkures sezonas laikā, kas ļauj novērtēt ne tikai katram mēnesim raksturīgos siltuma zudumus vai avotus, bet arī noteikt apkures sezonas ilgumu. Pēc noklusēšanas apkures sezona tiek rēķināta automātiski: apkure nav nepieciešama, ja ēkā ir iespējams nodrošināt temperatūru, kas ir vienāda ar uzdoto iekštelpu temperatūru bez papildus enerģijas pievadīšanas – ar iekšējiem un ārējiem siltuma avotiem, skat. arī (3.14). Mēneši, kuros apkure nav nepieciešama, tiek atzīmēti ar parametra HS (*heating season*) vērtību N (attēli 3.20-22) un kopējā ēkas siltuma vajadzība šajos mēnešos netiek ievēroti. Ir paredzēta iespēja uzdot arī fiksētu apkures sezonas dienu skaitu, kā rezultātā tiks aplūkota ēkas siltuma bilance tikai attiecīgajos mēnešos.

Bez iepriekš minēto parametru skaitlisko vērtību aprēķina, programmatūra HeatMod nodrošina arī to grafisko attēlošanu un vizuālo salīdzināšanu. Līdzīgi, kā datu tabulu izvada gadījumā, informācija var tikt apkopota gan pa mēnešiem, gan gada (apkures sezonas) garumā. Grafiski tiek attēloti sekojošie aprēķinātie ēku raksturojošie lielumi:

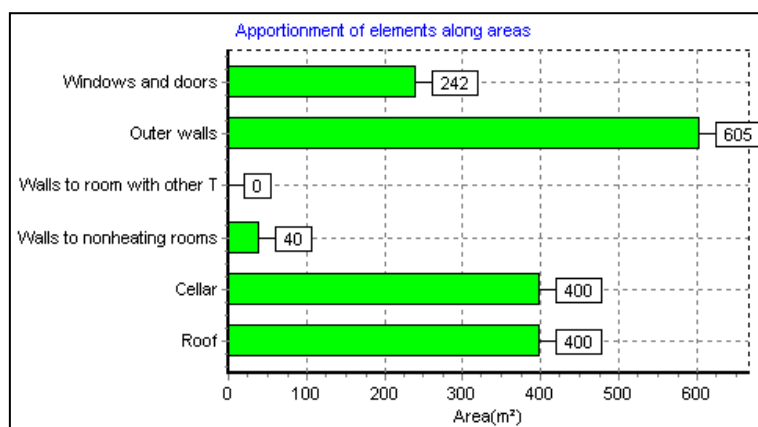
- siltuma zudumi Q_V , avoti Q_G un patēriņš Q_H (attēls 3.23);
- siltuma zudumu Q_V un avotu sadalījums pa to veidiem (attēls 3.24);
- būvelementu grupu laukumu proporcijas (attēls 3.25);
- siltuma zudumu caur dažāda veida ēkas būvelementu grupām un tiem atbilstošo laukumu salīdzinājums (attēls 3.26).



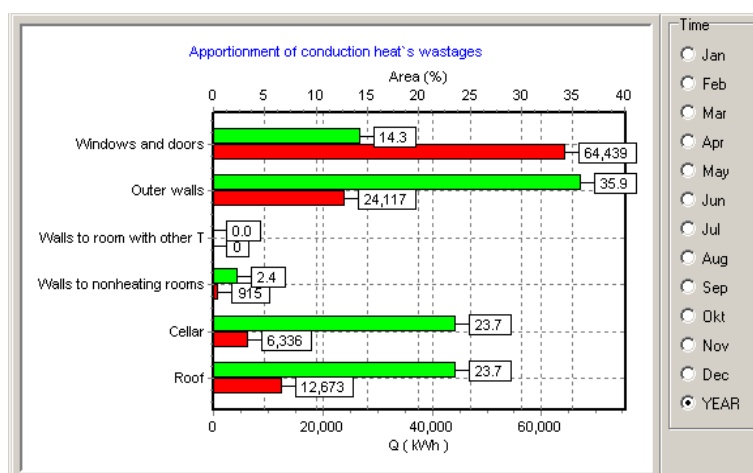
Attēls 3.23. Ēkas siltuma zudumu Q_V (Q_V), avotu Q_G (Q_G) un patēriņa Q_H (Q_H) vizualizācija.



Attēls 3.24. Ēkas siltuma avotu Q_G un zudumu Q_V sadalījuma pa to veidiem vizualizācija.



Attēls 3.25. Dažāda tipa būvelementu grupu laukumu proporciju vizuālais salīdzinājums.



Attēls 3.26. Siltuma zudumu caur dažāda veida ēkas būvelementu grupām un tiem atbilstošo laukumu salīdzinājums.

Apkoposim abu variantu (I un II) aprēķinu pamatrezultātus, kas iegūti ar katru no metodēm. Tā kā apskatītās pieejas ēkas siltuma bilances aprēķinam būtiski atšķiras un katrā no tām tiek iegūti dažādi raksturlielumi – siltuma zudumu koeficients H_T ($W K^{-1}$) saskaņā ar LBN 002-01 un siltuma vajadzība Q_H (kW h) uz mēneša siltuma bilances bāzētājā metodē, ir nepieciešams veikt pārrēķinu, lai saskaņotu rezultātus. Šim nolūkam izmantojam sakarību:

$$1000 \cdot Q_H = 24 \cdot 210 \cdot \Delta T \cdot H_T \quad (3.15)$$

kur 24 – stundu skaits diennaktī, 210 – tuvināti pieņemtais dienu skaits apkures sezonā un ΔT – temperatūru starpība starp iekštelpu gaisu un ārējo gaisu (K). Pēc šīs sakarības noteiktie un ar lietotām metodēm aprēķinātie lielumi ir atspoguļoti tabulā 3.15.

Izmantojot uz mēneša siltuma bilances bāzēto aprēķinu, kopējā ēkas siltuma vajadzība Q_H tiek izrēķināta kW h, kas arī ir siltuma daudzums, kas jāpievada ēkai tās apkures sezonas laikā. Savukārt izmantojot aprēķinu saskaņā ar LBN 002-01, ēkas siltuma zudumus raksturo specifiskais t.s. siltuma zudumu koeficients H_T . Analizējot abu aprēķinu rezultātus apskatītajai ēkai divos variantos (tabula 3.15), ir redzams, ka siltuma zuduma koeficienta vērtība otrajā modelēšanas variantā ir

samazinājusies par 42%, bet siltuma vajadzība gada laikā – tikai par 31%. Tas ir izskaidrojams ar daudzu faktoru (konvekcija, starojums, iekšējie avoti u.c.) ievērošanu, kuru ietekme uz siltuma bilanci ir būtiska, atšķirībā no vienkāršotā aprēķinu modeļa, kur rezultātu nosaka tikai būvkonstrukciju siltuma caurlaidības koeficients. Tāpēc šajā metodē tā izmaiņas vairāk ietekmē kopējo siltuma zudumu izmaiņas.

Tabula 3.15. Ar dažādām metodēm iegūtie raksturlielumi modelēšanas variantos I un II

Aprēķinu variants	Aprēķinu metode	Siltuma vajadzība gada laikā Q_H , kW h	Siltuma zudumu koeficients H_T , W K ⁻¹	%
I	Saskaņā ar LBN 002-01	110220*	1151	100
II	Saskaņā ar LBN 002-01	63968*	668	58
I	Uz mēneša bilances bāzes	170547	1781*	100
II	Uz mēneša bilances bāzes	118307	1235*	69

* - netiek tieši aprēķināti programmatūrā, bet izmantojot sakarību (3.15)

Tādējādi, veicot detalizētu ēkas energoefektivitātes analīzi, lietderīgi izmantot nevis vienkāršoto aprēķinu metodi saskaņā ar Latvijas Būvnormatīva LBN 002-01 prasībām, bet gan uz mēneša bilances bāzēto aprēķinu metodi. Tā ļauj vispusīgi analizēt gan eksistējošu ēku siltuma vajadzību un siltuma zudumu struktūru, gan arī šo raksturlielumu izmaiņas pēc dažādu renovācijas un siltināšanas pasākumu izpildes. Tas, savukārt, ļauj attiecīgo darbu projektēšanas fāzē izvērtēt investīciju ekonomisko lietderību un aprēķināt to atmaksāšanās periodu. Ir iespējams arī analizēt siltuma bilances situāciju ne tikai visas apkures sezonas garumā, bet arī lokalizēt problēmu viena vai dažu mēnešu ietvaros.

Izstrādātā programmatūra HeatMod, kuras ietvaros tiek realizētas abas metode, ir aprobēta, veicot vairākus desmitus aprēķinus daudzveidīgām dzīvojamajām, sabiedriskām un rūpnieciski izmantojamām ēkām Latvijā. Izveidotie modeļi labi saskan ar datiem par konkrēto ēku siltuma patēriņu un atsevišķos gadījumos tie palīdz novērtēt nezināmos vai grūti nosakāmos lielumus, piem., visas ēkas gaisa apmaiņas intensitāti. Kā rāda modelēšanas rezultāti, praktiski neviena no pagājušā gadsimta otrajā pusē celtām ēkām neatbilst nedz Latvijas Būvnormatīva LBN 002-01, nedz arī citu Eiropas valstu normatīvu prasībām, ir nepieciešama to energoefektivitātes uzlabošana, ko visefektīvāk plānot un analizēt ir, lietojot iepriekš aprakstītās metodes un atbilstošo programmatūru.

Līdz šim apskatītie eksperimentālo mērījumu rezultāti sniedz priekšstatu par visas ēkas vai tās būvkonstrukciju siltumfizikālo parametru īpatnībām un stāvokli, uz šiem rezultātiem tiek bāzēti ēkas siltuma bilances modeļi, kas parāda raksturīgo ēkas siltuma zudumu sadalījumu un kopējo energoefektivitātes stāvokli. Viss iepriekšminētais lielā mērā attiecas uz gatavām vai projektējamām

būvēm. Taču ne mazāk svarīgi ir novērtēt stāvokli arī katrā atsevišķā telpā, pie tam šajā gadījumā svarīgs ir ne tikai tās apkurei nepieciešamais siltuma patēriņš, bet arī fizikālie lielumi, kas nosaka klimatiskā komforta apstākļus telpās (gaisa plūsmu ātrums, temperatūra u.c.). Šos procesus ir iespējams modelēt, lai uzlabotu komforta apstākļus, vienlaicīgi minimizējot siltuma zudumus un izvērtētu reāli pielietojamos risinājumus. Nākamajās sadaļās apskatīsim atsevišķas telpas matemātisko modeli, kas uzskatāmi parādīs gaisa plūsmas un temperatūras sadalījumu izmaiņas atkarībā no dažādiem fizikālajiem apstākļiem un ģeometriskām īpatnībām.

4. Atsevišķas telpas siltuma zudumu un termiskā komforta apstākļu modelēšana

Visas ēkas energoefektivitāte ir atkarīga no siltuma pārnese procesiem un to rakstura iekštelpās. Kaut arī pamatā siltuma zudumu daudzumu nosaka apskatītie faktori – siltuma vadīšana, konvekcija un starojums, to intensitāti un ieguldījumu atsevišķas telpas siltuma bilancē var būtiski ietekmēt arī citi blakus faktori, piem., dažādi priekšmetu esamība vai sildķermeņa izvietojums, kas var izmainīt gaisa plūsmu sadalījumu telpā, izmainot temperatūras lauku. Tāpēc, lai labāk saprastu siltuma pārnese procesu īpatnības atsevišķā apsildāmā telpā un to ietekmi uz siltuma zudumiem, tika izveidots vienkāršots telpas modelis ar norobežojošām konstrukcijām un reālai situācijai atbilstošiem izmēriem. Pirmie aprēķini tika veikti 2D tuvinājumā, pieņemot, ka telpa ir simetriska, bet turpmākie aprēķini tika veikti arī telpiski, kas ļāva apskatīt arī nesimetriskus gadījumus un ievērot sānu sienu ietekmi. Detalizētāk izveidotais fizikālais modelis un tā ģeometrijas varianti, kā arī konkrētie parametri tiks aprakstīti šajā nodaļā.

Ar izveidotā modeļa palīdzību tiek novērtēts siltuma daudzums, kas ieplūst vai izplūst caur norobežojošām konstrukcijām siltuma vadīšanas, konvekcijas un arī starojuma ceļā (atkarībā no apskatītā varianta), kā arī novērtēta sildķermeņa jauda pie uzdotas tā virsmas temperatūras, kas nosaka konkrētās telpas modeļa tuvinātu siltuma patēriņu. Salīdzinot dažādu ģeometrisko konfigurāciju telpas ar atšķirīgiem to fizikālo parametru vērtībām, ir iespējams novērtēt dažādu faktoru ietekmes raksturu uz kopējo telpas siltuma bilanci un izvēlēties optimālāko. Modelējot siltuma un masas pārnese procesus telpā, var novērtēt arī siltuma atdeves koeficientus no būvkonstrukciju virsmām, ko reālos apstākļos izmērīt ir problemātiski.

Uzreiz jāatzīmē, kā līdztekus ar telpas energoefektivitātes uzlabošanas problēmu, paralēli jārisina arī cita ar to saistīta un ne mazāk svarīga problēma – kā nodrošināt un, iespēju robežās, uzlabot iemītnieku komforta apstākļus, kas bieži netiek apskatīts projektējot dzīvojamās un biroju telpas. Nenodrošinot cilvēku dzīvei un darbībai nepieciešamās komforta prasības, telpas pat ar izciliem energoefektivitātes rādītājiem visdrīzāk netiks izmantotas vai to izmantošanas raksturs mainīsies. Visizplatītākais piemērs ir logu nomaīņa pret pakešlogiem telpās bez ventilācijas sistēmām, kas ievērojami samazina gaisa apmaiņu telpā un, tāpat, skābekļa pieplūdi – logi periodiski tiek atvērti, palielinot siltuma zudumus no telpas. No visiem komforta apstākļiem, ko ir nepieciešams nodrošināt (piem., gaisa ķīmiskais sastāvs, apgaismojums, trokšņu līmenis, mitrums u.c.) atsevišķi izdalīsim termiskā komforta apstākļus, ko detalizētāk apskatīsim ēkas energoefektivitātes analīzes un uzlabošanas kontekstā. Par svarīgākiem no tiem uzskata absolūto temperatūru telpā, temperatūras diferences, un gaisa plūsmas intensitāti – šo un dažu citu parametru vērtības un to noteikšanas metodikas apskatīsim nākamajā sadaļā.

Līdz ar mūsdienu datoru ražības pieaugumu un arī relatīvi lētu daudzprocesoru sistēmu parādīšanos, arvien plašāk tiek lietota dažādu dzīvojamo un rūpniecisko telpu apstākļu matemātiskā modelēšana. Lielākoties šādi pētījumi ir orientēti uz kādas konkrētas konfigurācijas telpas analīzi rūpnieciskiem mērķiem, bet ir arī pētnieciskie darbi, piem., loga žalūziju ietekmes uz telpas siltuma bilanci modelēšana (Collins, 2004) vai ēkas gaisa apmaiņas intensitātes aprēķins atkarībā no vēja apstākļiem dabiskas ventilācijas gadījumā (Evola, Popov, 2006).

Mūsu apskatītie modelēšanas aprēķini neparedz cilvēka klātbūtnes ievērošanu, tādējādi vienkāršojot ģeometrijas izveidi un ļaujot uzskatāmāk parādīt tieši telpas ģeometrisko un fizikālo parametru vispārīgo ietekmi uz energoefektivitāti un komforta apstākļiem. Cilvēka ķermeņa modelēšana ir komplicēts uzdevums, kas ir saistīts ne tikai ar tādiem sarežģītiem fizikāliem siltuma apmaiņas procesiem, kā konvekciju un siltuma starojumu no ādas virsmas, iztvaikošanu, elpošanu, bet arī ar nezināmiem lielumiem – apģērba īpašībām, kustības intensitātes, ķermeņa temperatūras nehomogenitātēm. Uz šādu modeļu izveides un aprobācijas grūtībām norāda arī vairāku pētījumu autori, piem., (Tanabe *et.al.*, 2002) cilvēka modelis tiek konstruēts no 65 galvenajiem segmentiem temperatūru nevienādīguma ievērošanai un 4 virsmas slāņiem komplicētu apmaiņas procesu modelēšanai. Citi autori lieto arī vienkāršotus modeļus, apskatot cilvēka ķermeni kā nekustīgu no paralēlskaldņiem veidotu objektu ar konstantu virsmas temperatūru (Bojic *et.al.*, 2001).

4.1. Termiskā komforta apstākļi

Attīstītās ēku energoefektivitātes kompleksas analīzes ietvaros cilvēku termiskā komforta apstākļu noteikšanai dzīvojamā telpā izmantosim divas plaši lietotas pieejas – t.s. Fangerā termiskā komforta un caurvēja modeļus (Fanger, 1970; Fanger, Christensen, 1986; Charles, 2003). Pirmie pētījumi šajā jomā tika publicēti 80. gados, tad arī tika izveidotas minēto modeļu pamatnostādnes. Uz Fangerā modeļu bāzes ir balstīti arī termiskā komforta apstākļus reglamentējošie standarti – ASV spēkā esošs (ASHRAE, 2004) un LVS EN ISO standarts (LVS EN ISO 7730, 2006). Detalizētāk apskatīsim šo standartu definīcijas un prasības, ko pamatā izmantosim arī cilvēku termiskā komforta apstākļu analīzei modelējamā telpā.

Abu iepriekš minēto standartu prasības ir attiecināmas uz pieaugušiem cilvēkiem, kas vismaz 15 minūtes atrodas telpās ar atmosfēras spiedienu līdz 3 km virs jūras līmeņa, tādējādi tie ir piemērojami arī Latvijas ēkām. Nosakot termiskā komforta apstākļus, vērā ņem 6 sekojošus to noteicošus pamatfaktoros:

- cilvēka metabolisma pakāpe,
- cilvēka apģērba izolācijas pakāpe,

- gaisa temperatūra,
- gaisa kustības ātrums,
- gaisa mitrums,
- telpas sienu virsmu temperatūra.

Ja 4 pēdējo fizikālo lielumu noteikšana nesagādā grūtības, tad cilvēka metabolisma un apģērba izolācijas pakāpju noteikšana notiek pēc empīriski iegūto datu tabulām. Tā, metabolisma (vielmaiņas procesa) rezultātā enerģijas ģenerāciju cilvēka ķermenī raksturo ar mērvienību *met*, kas ir vienāda ar 58,2 W m⁻² un raksturo vidējā pieaugušā sēdošā cilvēka ar ādas virsmas laukumu 1,8 m² (t.s. *DuBois* laukums) enerģijas ģenerāciju. Tabulā 4.1 apkopotas *met* un attiecīgās siltuma plūsmas blīvuma vērtības dažādām cilvēka aktivitātēm. Kā redzams, ģenerētā enerģija mainoties cilvēka aktivitātei mainās plaša diapazonā no 0,7 *met* līdz vairāk nekā 7 *met*, t.i. par veselu kārtu. Ja ir nepieciešams noteikt metabolisma pakāpi cilvēkam, kas ir atšķirīgs no vidējā statistiskā, var izmantot sakarību (DuBois, DuBois, 1916), kas nosaka ādas laukumu *S* (m²) atkarībā no cilvēka masas *m* (kg) un auguma *h* (m):

$$S = 0,007184 \cdot m^{0,425} \cdot h^{0,725} \quad (4.1)$$

Cits empīriski noteikts lielums, ir cilvēka apģērba siltuma izolācija, kas ietekmē siltuma plūsmu caur to. Tā raksturošanai izmanto mērvienību *clo*, kas skaitliski atbilst siltuma pretestībai 0,155 m² K W⁻¹. Tipisko apģērbu un papildus *clo* vērtības apkopotas tabulā 4.2.

Lietojot standartu (ASHRAE, 2004) un (LVS EN ISO 7730, 2006) apzīmējumus, apskatīsim termiskā komforta apstākļus raksturojošos lielumus un to noteikšanas metodiku, kas var tikt pielietota gadījumos, ja cilvēka metabolisma pakāpe atrodas robežās no 1,0 līdz 2,0 *met*, bet apģērba izolācijas pakāpe nepārsniedz 1,5 *clo*. Šādi nosacījumi atbilst dzīvojamās vai biroja telpas apstākļiem, kuras modelis tiks apskatīts nākamajās sadaļās.

Tabula 4.1. Vidēji statistiskā cilvēka metabolisma pakāpe *met* atkarībā no aktivitātes (ASHRAE, 2004).

Aktivitāte	Metabolisma pakāpe <i>met</i>	Siltuma plūsmas blīvums no virsmas, W m ⁻²
Miegs	0,7	40
Sēdēšana	1,0	60
Stāvēšana	1,2	70
Iešana	2,0...3,8	115...220
Fizisks darbs	2,0...4,0	115...235
Aktīvās sporta spēles	5,0...7,6	290...440

Tabula 4.2. Dažādu apģērbu un papildus izolācijas pakāpes *clo* (ASHRAE, 2004).

Apģērba veids/papildus izolācija	<i>clo</i>
Apakšveļa	0,01...0,2
Apavi	0,02...0,1
Krekli	0,13...0,34
Bikses	0,06...0,49
Biroja krēsls	0,1...0,15

Viens no svarīgākiem termiskā komforta apstākļus noteicošiem faktoriem ir gaisa temperatūra. Tā kā vispārīgi komforta izjūtas pie vienādas temperatūras dažādiem indivīdiem var atšķirties, tāpēc tiek lietota statistiskā pieeja un tās ietvaros tiek ievesti divi lielumi:

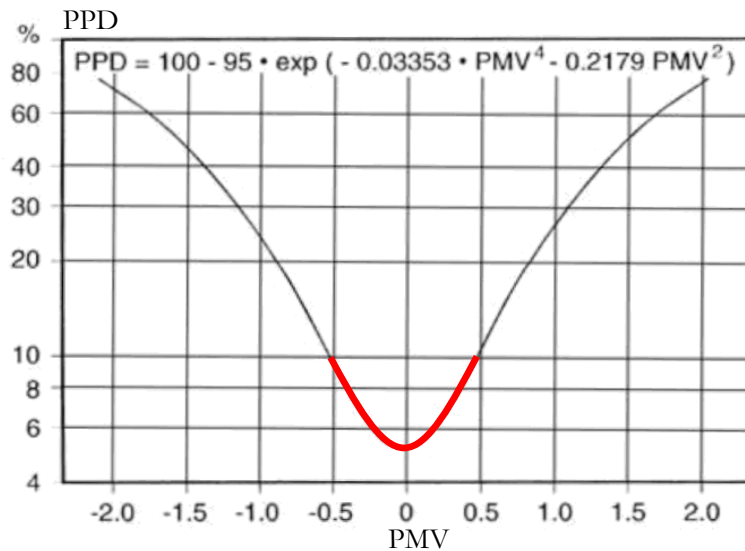
- Paredzamā vidējā balsojuma indekss *PMV* (-) (angl. *predicted mean vote*), kas ir lielas cilvēku grupas vidējais termiskā komforta izjūtas raksturojums. Katrs grupas dalībnieks novērtē savas izjūtas, izmantojot sekojošo skalu:
 - karsts (+3)
 - silts (+2)
 - nedaudz silts (+1)
 - neitrāls (0)
 - nedaudz vēss (-1)
 - vēss (-2)
 - auksts (-3)

Lielums *PMV* visai grupai tiek aprēķināts, vidējotot visu cilvēku vērtējumus.

- Paredzamā neapmierināto personu procenta indekss *PPD* (%) (angl. *predicted percentage of dissatisfied*). Tas tiek aprēķināts uz *PMV* pamata, pieņemot, ka cilvēki, kas novērtē savas termiskā komforta izjūtas ar +2, +3, -2 vai -3, ir neapmierināti, un ka *PMV* indekss ir simetrisks attiecībā pret neitrālo vērtību 0. *PPD* atkarība no *PMV* tiek izteikta ar sekojošu sakarību:

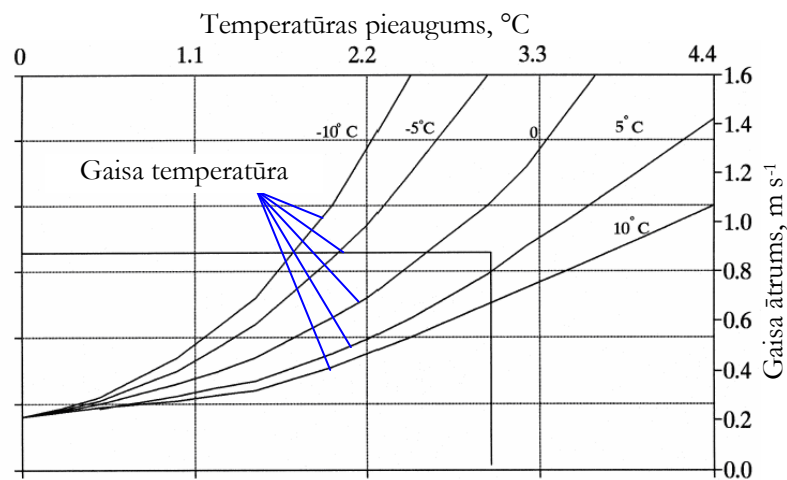
$$PPD = 100 - 95 \cdot e^{-0,03353 \cdot PMV^4 - 0,2179 \cdot PMV^2} \quad (4.2)$$

Izmantojot abu minēto parametru vērtības $PMV < 10$ un $-0,5 < PPD < 0,5$, tiek definēta t.s. komforta zona, kur temperatūra apmierina izvirzītās komforta apstākļu prasības. Vizuāli komforta zona *PMV* un *PPD* asīs ir parādīta attēlā 4.1 ar sarkanās krāsas līknes fragmentu. Kā var saprast, termiskā komforta apstākļi telpā atkarībā no cilvēku nodarbošanās (*met*) un apģērba veida (*clo*) var tikt uzskatīti par apmierinošiem, ja cilvēku grupā neapmierināti ir ne vairāk par 10% respondentu.



Attēls 4.1. Paredzamā neapmierināto personu procenta indekss *PPD* atkarībā no paredzamā vidējā balsojuma indekss *PMV* (ASHRAE, 2004).

Apskatītā pieeja tiek lietota, ja gaisa plūsma telpā nepārsniedz $0,2 \text{ m s}^{-1}$. Palielinoties ātrumiem, palielinās arī siltuma atdeves intensitāte un termiskā komforta nodrošināšanai ir nepieciešama temperatūras paaugstināšana, kuras atkarība no gaisa ātruma ir parādīta attēla 4.2. Grafiski līknes šajā attēlā parāda temperatūras pieauguma un gaisa plūsmu krustpunktus ar vienādu lielumu siltuma zudumiem no cilvēka ādas pie uzdotās gaisa temperatūras. Parādītās līknes ir spēkā viegli apgērbtam cilvēkam ar $clo=0,5\dots0,7$ un nelielu metabolisma pakāpi $met=1,0\dots1,3$, kas atbilst biroja telpām vai dzīvojamai istabai. Veicot gaisa plūsmu eksperimentālos mērījumus, ir jāņem vērā to turbulento un nestacionāru raksturu, tāpēc tiek noteikts minimālais laiks, kādā mērījumu dati ir jāvidējo – 3 minūtes katrā no mērījumu punktiem.



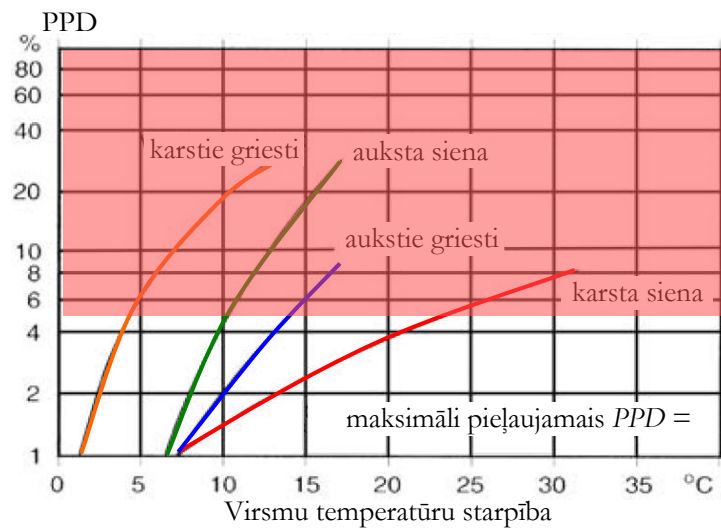
Attēls 4.2. Virsmas temperatūras pieauguma un gaisa ātruma savstarpējā kompensācija vienādu termiskā komforta apstākļu nodrošināšanai pie dažādām gaisa temperatūrām (ASHRAE, 2004).

Bez absolūtās iekštelpu gaisa temperatūras, svarīgs ir arī t.s. cilvēka ķermeņa lokālais termiskais diskomforts. To nosaka 4 sekojošie faktori (ASHRAE, 2004), kas ir apskatīti viegli apģērbtam cilvēkam ($clo=0,5...0,7$) ar nelielu metabolisma pakāpi ($met=1,0...1,3$):

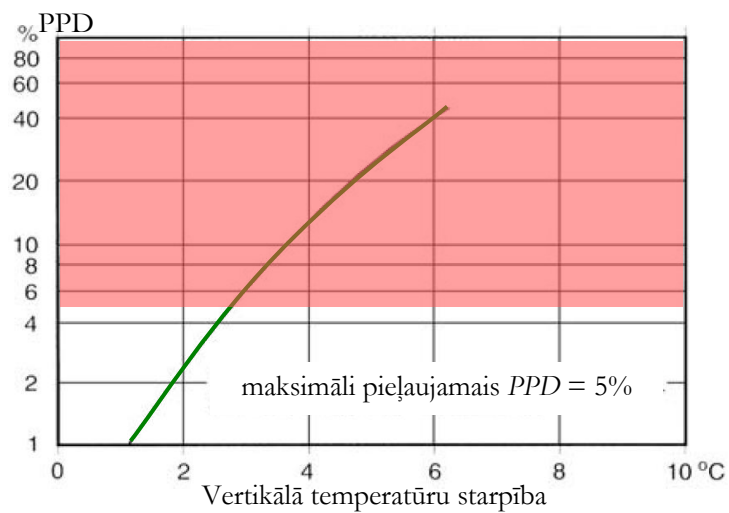
- Telpas iekšējo virsmu atšķirīgās temperatūras, kā rezultātā veidojas nesimetrisks siltuma starojuma lauks no cilvēka ādas. Kopumā cilvēki ir vairāk jutīgi pret asimetrisku starojumu starp grīdu un griestiem, nekā pret dažādu temperatūru vertikālām virsmām. Attēlā 4.3 parādīts grafiks *PPD* indeksa atkarībai no virsmu temperatūru starpības. Maksimāli pieļaujama *PPD* šajā gadījumā ir noteikta 5%, un no grafika var nolasīt attiecīgās skaitliskās vērtības: 5 °C karstajiem griestiem, 10 °C aukstajām sienām, 14 °C aukstajiem griestiem un 23 °C karstajām sienām.
- Vertikālā gaisa temperatūru starpība starp cilvēka galvu un potītēm, ko izraisa termiskā stratifikācija. Attēlā 4.4 parādīts grafiks *PPD* indeksa atkarībai no minētās temperatūru starpības. Maksimāli pieļaujama *PPD* ir noteikta 5% un no grafika nolasām tā skaitlisko vērtību: $\Delta T < 3$ °C. Parasti izteikta stratifikācija un lielāki temperatūras atšķirības pa telpas augstumu pastāv telpās ar klasiskām konvektoru sildīšanas sistēmām, bet siltās grīdas gadījumā temperatūras profils ir gandrīz vertikāls, izņemot nelielu slāni pie pašas virsmas (skat. attēlu 4.5).
- Grīdas virsmas temperatūra, kas ir pārāk auksta vai karsta. Tās ietekme uz komforta apstākļiem ir daudz lielāka nekā grīdas seguma materiālam. Attēlā 4.6 parādīts grafiks *PPD* indeksa atkarībai no grīdas temperatūras. Maksimāli pieļaujama *PPD* ir noteikta 10% un temperatūras skaitliskā vērtība stāvošam cilvēkam viegļajos apavos atrodas robežās no 19 līdz 29 °C.
- Caurvējš jeb nevēlama ķermeņa atdzišana gaisa masām pārvietojoties gar to. Caurvēja sajūta ir atkarīga no gaisa ātruma, temperatūras un turbulences intensitātes, kā arī no cilvēka aktivitātes un apģērba veida. Īpaši jutīgas daļas ir galva, kakls un pleci, kā arī kāju reģions. Maksimāli pieļaujamā gaisa plūsma ar noteikto turbulences intensitāti atkarībā no temperatūras ir parādīta attēlā 4.7. *PPD* indeksa maksimālā vērtība ir noteikta 20% un tā tiek aprēķināta saskaņā ar izteiksmi:

$$PPD = (34 - T) \cdot (v - 0,5)^{0,62} \cdot (0,37 \cdot v \cdot Tu + 3,14) \quad (4.3)$$

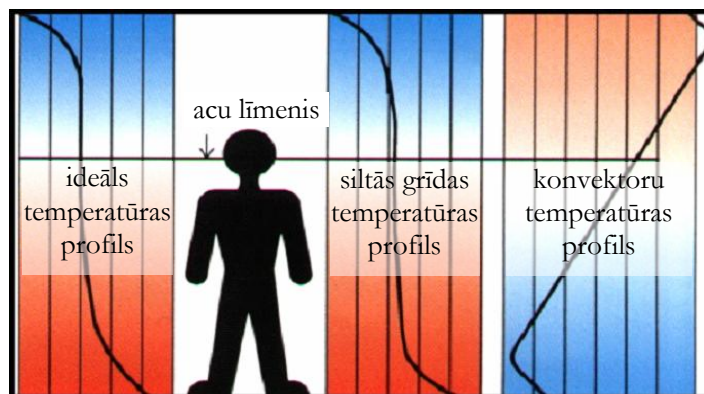
kur T (°C) – lokālā gaisa temperatūra, v ($m\ s^{-1}$) – lokālais gaisa ātrums, Tu – lokālā turbulences intensitāte (%), ko nosaka attiecība starp gaisa ātruma standartnovirzi un laikā vidējo ātrumu. Ja nav precīzas informācijas par turbulences intensitāti, var pieņemt sekojošas vērtības: 35% telpās ar piespiedu ventilāciju un 20% ar dabīgo ventilāciju.



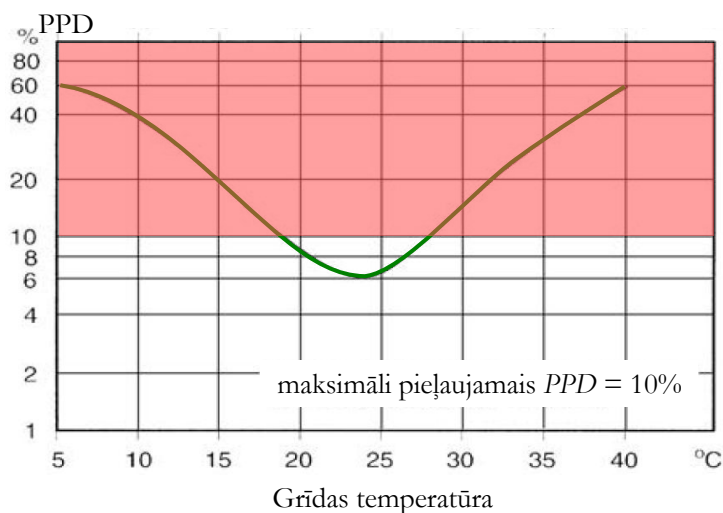
Attēls 4.3. PPD atkarībā no telpas virsmu temperatūru starpības (ASHRAE, 2004).



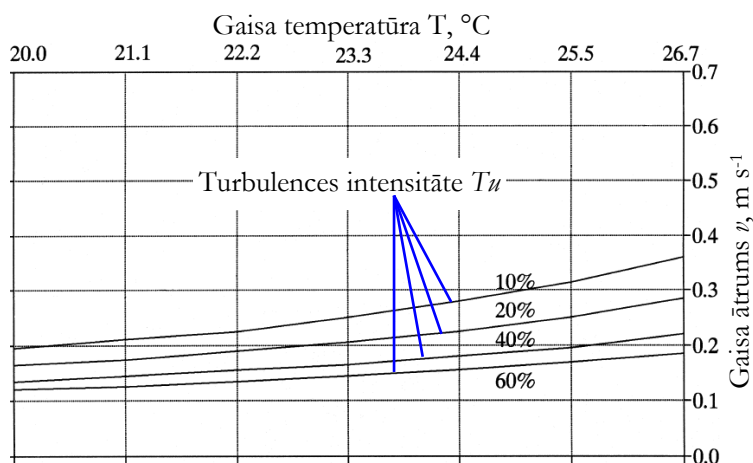
Attēls 4.4. PPD atkarībā no vertikālās temperatūru starpības (ASHRAE, 2004).



Attēls 4.5. Vertikālie temperatūras profili dažādām apkures sistēmām (©2006 PA Hydronic).



Attēls 4.6. PPD atkarībā no grīdas temperatūras (ASHRAE, 2004).



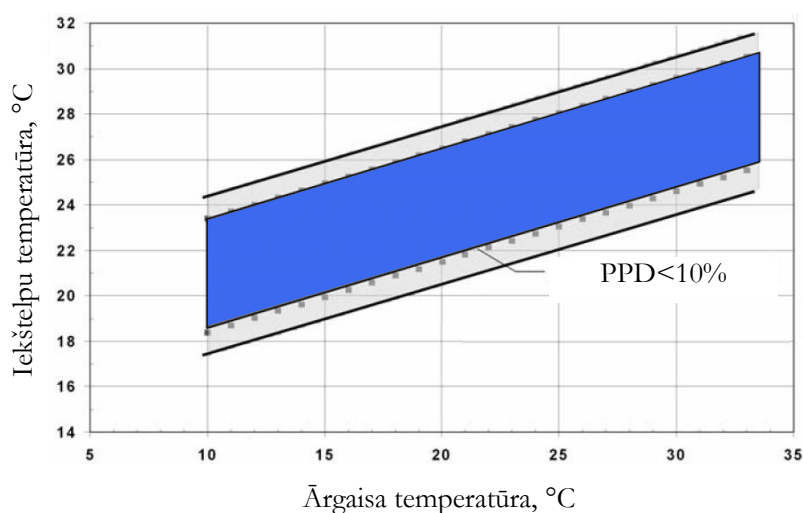
Attēls 4.7. Maksimāli pieļaujamais gaisa ātrums atkarībā no temperatūras un turbulences intensitātes (ASHRAE, 2004).

Gadījumā, ja temperatūras režīms telpās ir nestacionārs, kas var būt saistīts gan ar periodiskām temperatūras izmaiņām ārā, gan ar ventilācijas vai apkures sistēmu darbības režīmu iestādījumiem, pārāk straujas izmaiņas var negatīvi ietekmēt termiskā komforta apstākļus. Tāpēc tiek ierobežotas temperatūras svārstības, kuru lielums ir atkarīgs no laika perioda (tabula 4.3).

Telpu ar dabīgo ventilāciju gaisa temperatūras robežvērtību noteikšanai atkarībā no ārējās temperatūras vasaras mēnešos var tikt lietots grafiks, kas ir parādīts attēlā 4.8. Tajā ar zilas krāsas poligonu ir atzīmēts apgabals, kurā PPD indekss nepārsniedz noteiktos 10% (skat. arī attēlu 4.1). Grafiks ir lietojams ārējās temperatūrām virs 10 °C un standarta (ASHRAE, 2004) ietvaros nav pieļaujama tā vērtību interpolācija.

Tabula 4.3. Temperatūras svārstību ierobežojumi atkarībā no laika perioda.

Laika periods (min)	15	30	60	120	240
Maksimāli pieļaujamās temperatūras svārstības (°C)	1,1	1,7	2,2	2,8	3,3



Attēls 4.8. Iekštelpu gaisa temperatūras diapazona atkarība no ārģaisa temperatūras (ASHRAE, 2004).

Visi apskatītie termiskā komforta apstākļi un *PPD* indekss ir aprakstīti saskaņā ar standartu (ASHRAE, 2004). Atšķirībā no tā, LVS EN ISO analogs (LVS EN ISO 7730, 2006) paredz 3 kategoriju termisko komfortu – A, B un C. Vidējās B kategorijas prasības sakrīt ar ASV standartā apskatītajiem lielumiem, stingrākas prasības (piem., tikai 6% *PPD* indeksam 10% vietā) tiek izvirzītas A klases komfortam, bet aptuveni pa 50% vājākās attiecas uz C klases komfortu.

Apskatot cilvēka termiskā komforta apstākļus dzīvojamās telpās, minēto standartu ietvaros netiek uzlikti nekādi ierobežojumi uz gaisa mitrumu. Tomēr jāatzīmē, ka pārāk zems mitruma saturs var būtiski ietekmēt tādus cilvēka dzīvībai svarīgus faktorus kā acu sausumu, gļotādu izzūšanu, statiskās elektrības ģenerāciju u. c. Par pieņemamu tiek uzskatīts gaiss ar relatīvo mitrumu 40...60%.

Kā analogisku dokumentu dažādu dzīvojamo telpu termiskā komforta apstākļus noteicošo lielumu vērtību diapazona noteikšanai var minēt Krievijas Valsts standartu (GOST 30494-96, 1996), kas ir spēkā no 1999. gada 10 bijušās Padomju Savienības republikās. Atšķirībā no diviem iepriekš apskatītajiem normatīviem, šajā standartā bez gaisa un norobežojošo konstrukciju temperatūras un gaisa ātruma tiek definēts arī gaisa mitruma diapazons, bet visu lielumu kopums tiek saukts par telpu mikroklimatu. Cita būtiska atšķirība ir tā parametru noteikšana, kas nav atkarīga no cilvēka metabolisma un apģērba izolācijas pakāpes – temperatūras, mitruma un gaisa ātruma rekomendētās un maksimālās vērtības ir definētas atklātā veidā atkarībā no ēkas tipa, telpas veida un gadalaika.

GOST 30494-96 standarta ietvaros tiek definētas divu veidu mikroklimata prasības – optimālās un maksimāli pieļaujamās. Pirmās tiek noteiktas kā kombinācija, kas 80% cilvēku neizraisa diskomforta sajūtas, ilgstoši un sistemātiski atrodoties telpā pie minimālās ķermeņa termoregulācijas

(šī definīcija ir tuva PPD indeksa prasībām citos apskatītajos standartos). Savukārt, maksimāli pieļaujamās prasības atbilst kritiskām mikroklimate faktoru vērtībām, pie kurām cilvēki sāk izjust lokālu vai vispārēju diskomfortu, darbaspējas samazināšanos vai veselības pasliktināšanos, ilgstoši un regulāri atrodoties telpās. Atsevišķi tiek izdalītas dzīvojamās un sabiedriskās ēkas, pēdējās tiek dalītas vairākās kategorijās pēc to izmantošanas īpatnībām. Aukstajā gadalaikā, kad diennakts vidējā ārgaisa temperatūra ir mazāka par 8 °C, prasības atšķiras arī dažādiem telpas veidiem, bet pārējā, siltajā gadalaikā – tiek noteiktas tikai dzīvojamām telpām. Tabulā 4.4 ir apkopotas optimālās un maksimāli pieļaujamās mikroklimate vērtības dzīvojamai telpai saskaņā ar standartu GOST 30494-96. Kā redzams, pieļaujamais parametru diapazons ir pietiekami plašs, bet optimālais ir ievērojami mazāks.

Tabula 4.4. Raksturīgās mikroklimate lielumu vērtības dzīvojamai mājai saskaņā ar (GOST 30494-96, 1996).

Telpas veids	Optimālā (pieļaujamā) gaisa temperatūra T (°C)	Optimālais (maksimālais) gaisa relatīvais mitrums φ (%)	Optimālais (maksimālais) gaisa kustības ātrums v (m s ⁻¹)
Aukstais gadalaiks			
Vannas istaba	24...26 (18...26)	nav noteikts	0,15 (0,2)
Dzīvojamā istaba	20...22 (18...24)	30-45 (65)	0,15 (0,2)
Virtuve	19...21 (18...26)	nav noteikts	0,15 (0,2)
Kāpņu telpa	16...18 (16...22)	nav noteikts	0,2 (0,3)
Siltais gadalaiks			
Dzīvojamā istaba	22...25 (20...28)	30-60 (65)	0,2 (0,3)

Lai objektīvi salīdzinātu dažādu telpu termiskā komforta apstākļus saskaņā ar viena vai cita standarta prasībām, gaisa fizikālo lielumu (temperatūra, gaisa ātrums) mērījumiem ir jānotiek noteikta augstuma vietās tālu no ārējām norobežojošām konstrukcijām un sildķermeņiem. Prasība šajā aspektā Eiropas, ASV un Krievijas standartiem ir līdzīga. Vertikālajā plaknē tie ir vismaz 3 punkti – cilvēka pēdu, vidukļa un kakla līmeņi, kas stāvošam cilvēkam ir 0,1, 1,1 un 1,7 m augstumā, bet sēdošiem – attiecīgi 0,1, 0,6 un 1,1 m. Parametru noteikšanas vietas ir ierobežotas arī telpiski ar t.s. „dzīvojamā zonu”, jeb telpas daļu, kur cilvēks uzturas visvairāk, tā vertikālā plaknē tiek ierobežota ar grīdu un 1,8 m augstuma līmeni (GOST 30494-96 standartā 0,1 un 2,0 m attiecīgi), bet horizontālā plaknē tā atrodas 1 m attālumā no ārsienām, logiem, sildķermeņiem vai kondicionieriem un 30 cm attālumā no iekšējām starpsienām (GOST 30494-96 standartā 0,5 m no jebkurām vertikālām konstrukcijām ar atšķirīgu virsmas temperatūru). Krievijas Federācijas standarts paredz arī atsevišķas prasības pret fizikālo parametru izmaiņām „dzīvojamās zonas” ietvaros – maksimāli pieļaujamā

temperatūras izkliede ir 3 °C, vertikāla temperatūru starpība 2 °C, gaisa ātruma izmaiņas <0,1 m s⁻¹, bet mitruma izmaiņas zonas ietvaros nevar pārsniegt 15%.

Visu minēto standartu prasības tiek bieži citētas publikācijās, kas ir veltītas dažādu veidu telpu termiskā komforta apstākļu noteikšanai telpās un ēkas gan eksperimentāli, gan arī veidojot modeļus. Pēdējā, matemātiskās modelēšanas pieeja, ir svarīga komponente izstrādātās kompleksas ēku energoefektivitātes analīzes metodē (attēls 1.1), tā ļauj optimāli izvēlēties dažādu fizikālo un ģeometrisko dzīvojamās telpas parametrus, uzlabojot gan termiskā komforta apstākļus, gan arī samazinot izvēlētās telpas un visas ēkas siltuma patēriņu. Lielākajā publikāciju daļā termiskā komforta nosacījumi tiek apskatīti kopā ar citiem cilvēka dzīvībai svarīgiem parametriem, piem., CO₂, CHO koncentrāciju iekštelpu gaisā, un pamatā tiek veikti kādas noteiktas konfigurācijas telpas aprēķini. Praktiski nav atrodami darbi, kas būtu veltīti tādu faktoru kā norobežojošo konstrukciju siltuma caurlaidības, sildķermeņa novietojuma, gaisa spraugu esamības loga konstrukcijā, solārās enerģijas avota u.c. ietekmes kompleksai analīzei uz telpas kopējo energoefektivitāti (siltuma zudumiem no tās) un termisko komfortu. Turpmāk aprakstītie telpas modeļi ir orientēti tieši dažādo faktoru ietekmes uz fizikālo lauku sadalījumiem izvērtējumu stacionārā stāvoklī.

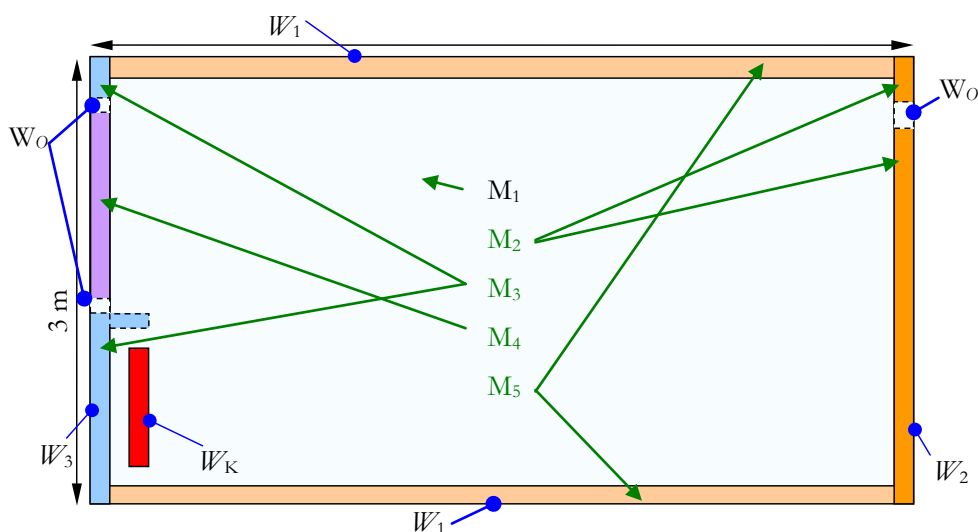
4.2. Fizikālā modeļa formulējums

Atsevišķas telpas energoefektivitātes un termiskā komforta nosacījumu modeļi tika veidoti, izmantojot divus atšķirīgus programmproduktus, ko noteica gan pieejamie datorresursi, gan arī to atbilstība konkrētajam uzdevumam. Pirmo modeļu izveidē un aprēķinos 2000-2002 gg. tika izmantota programmatūras pakete ANSYS/FLOTRAN (Ansys Inc., 1999), ar kuras palīdzību tika izveidoti turpmāk apskatītie 2D modeļi, bet turbulences aprakstam izmantots k - ϵ modelis. Uz to brīdi pieejamie skaitļošanas tehnikas resursi (0.6 GHz procesors) neļāva pilnvērtīgi strādāt ar telpiskiem modeļiem, bet minētais turbulences modelis tiek plaši izmantots kā pirmais tuvinājums telpu gaisa kustības aprakstam (Krafft, Shah, 1995; Desta *et.al.*, 2004; Evola, Popov, 2006). Vēlāk darbs tika turpināts jau ar jaunāko modelēšanas programmatūru ANSYS/CFX (Ansys Inc., 2005) un ir izveidoti telpiskie modeļi, bet kā turbulences modelis tika lietota kombinētā pieeja, kas ir pazīstama ar nosaukumu *Shear Stress Transport* (SST). Daudz ražīgāki datori (3 GHz procesors) un pieejamā programmatūras licence noteica 3D modeļu izveides un aprēķinu iespējas. Savukārt, lietotā SST turbulences metode kombinē labākās vienkāršu modeļu īpašības un nodrošina labu precizitāti, un to lietoto dzīvojamo telpu un cilvēku modelēšanai arī citi autori piem., (Deevy *et.al.*, 2007).

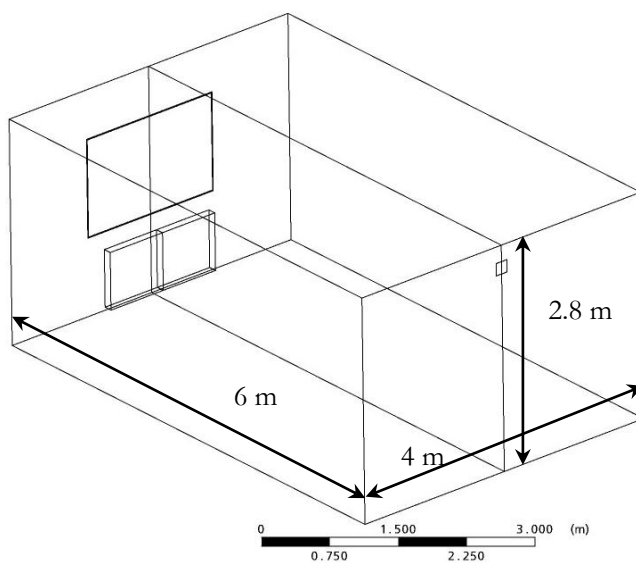
Kaut arī dažādos modelēšanas variantos tiek mainīta virkne parametru (skat. nākamās sadaļas), pamatā apskatītās telpas fizikālais formulējums atbilst dzīvojamai vai biroja telpai ar realitātei

maksimāli tuvinātiem nosacījumiem, ko apskatīsim detalizēti. Modelējamās telpas 2D bāzes skice ar raksturīgiem izmēriem parādīta attēlā 4.9, bet 3D modeļa skice – attēlā 4.10. Kopumā telpas modeli atkarībā no konkrētā aprēķinu varianta tiek izmantoti sekojošie dažādu materiālu objekti (tabula 4.5):

- gaiss (materiāls M_1), kura fizikāli parametri ir apkopoti tabulā 4.6 un
- līdz četriem dažādiem norobežojošo konstrukciju materiāliem M_2 - M_5 . Tos raksturo ar siltuma vadīšanas koeficientiem λ ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$), ko izvēlas, eksperimentāli noteiktās būvkonstrukciju siltuma caurlaidības koeficientu U ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$) vērtības attiecinot uz 10 cm biezumu d (m^{-1}): $\lambda = U \cdot d$. Atkarībā no aprēķinu varianta loga un ārsienas siltuma vadīšana tiek variēta atbilstoši dažu konstrukciju eksperimentāli noteiktajām vērtībām.



Attēls 4.9. Modelējamās telpas 2D skice ar raksturīgiem parametriem (apzīmējumus skat. tabulās 4.5 un 4.7).



Attēls 4.10. Modelējamās telpas 3D skice ar raksturīgiem parametriem.

Tabula 4.5. Modeļos lietoto materiālu (konstrukciju) apzīmējumi saskaņā ar attēla 4.9 apzīmējumiem.

Apzīmējums	Materiāls vai būvkonstrukcija
M_1	Gaiss
M_2	Siena uz kāpņu telpu
M_3	Ārsiena un palodze
M_4	Logs
M_5	Telpas griesti un grīda

Tabula 4.6. Modeļos izmantotie gaisa fizikālie parametri.

Parametrs	Vērtība
Blīvums ρ	1,11 kg m ⁻³
Dinamiskā viskozitāte η	2·10 ⁻⁵ kg m ⁻¹ s ⁻¹
Telpiskās izplešanas koeficients β	0,0034 K ⁻¹
Siltuma vadīšanas koeficients λ	0,02454 W m ⁻¹ ·K ⁻¹
Siltuma ietilpība c	1007 J kg ⁻¹ ·K ⁻¹

Dzīvojamās telpas modeļa dažādos variantos tiek uzdoti sekojošie robežnosacījumi (attēls 4.9 un tabula 4.7):

- konvekcijas robežnosacījumi uz norobežojošo konstrukciju ārējām virsmām:

$$q = \alpha(T - T_\infty), \quad (4.4)$$

kur q (W m⁻²) – siltuma plūsmas blīvums; α (W m⁻² K⁻¹) – standartizētie siltuma atdeves koeficienti no virsmas (tabula 2.3), kas ir atkarīgi no siltuma plūsmas virziena; pašas virsmas temperatūras T (°C) un sekojošām apkārtējās vides temperatūrām T_∞ (°C):

- 20 °C blakus telpās (nosacījums W_1),
- 15 °C kāpņu telpā (nosacījums W_2),
- -10 °C ārā (nosacījums W_3).

Blakus telpu temperatūras ir izvēlētas atbilstoši praktiskai pieredzei, bet ārgaisa temperatūra atbilst visaukstākā mēneša vidējai minimālajai gaisa temperatūrai Latvijā (LBN 003-01, 2001). Visos 3D modeļos (skat. attēlu 4.10) siena uz kāpņu telpu M_2 , sienas uz blakus telpām, kā arī telpas griestu un grīdas pārsegumi M_5 netiek atsevišķi apskatīti. 3D modeļos ar solārās radiācijas avotu tieši netiek apskatīti temperatūras sadalījumi arī ārsienā un logā – šo būvkonstrukciju siltuma pretestība $R = 1/U$ tiek ievērota, iekļaujot to attiecīgo robežnosacījumu rezultējošā siltuma atdeves koeficientā α_{rez} , kombinējot R to ar pašas virsmas standartizēto siltuma atdeves koeficientu α : $\alpha_{rez} = 1/(1/\alpha + R)$.

- uz apkures sistēmas konvektora (sildķermeņa) virsmas tiek uzdota konstanta temperatūra T (°C) (nosacījums W_K), kas tuvināti atbilst karstā ūdens ar noteiktu temperatūru padevei un tās standartlielums 50 °C ir variēts dažos aprēķinu variantos. Virsmas temperatūra tiek uzdota arī siltās grīdas apkures gadījumā;

- lai maksimāli tuvinātu modeli situācijai reālā telpā, dažos variantos tiek modelēta arī gaisa infiltrācija caur neblīvām vietām pa loga rāmja konstrukcijas perimetru ar spraugas platumu 1 cm un caur 15×15 cm ventilācijas sistēmas atverī pretējā sienā (attēls 4.10). Šādos gadījumos kā robežnosacījums uz atverēm telpas pretējās sienās tiek uzdoti atvērtie robežnosacījumi, kas pieļauj gaisa pārvietošanos jebkurā virzienā. Uz atverēm pretējās sienās ar relatīvā spiediena vērtības uzdošanu tiek fiksēta spiedienu starpība $\Delta p=0$ Pa vai $\Delta p=\pm 1$ Pa (nosacījumi W_O). Tādas un lielākas (vējainā laikā līdz 5 Pa un vairāk) vērtības ir normāla parādība dabā un tās ievērošana ļauj precīzāk novērtēt gaisa plūsmas un temperatūras sadalījumu telpā ar neblīvām norobežojošām konstrukcijām, kas ir bieža parādība daudzās Latvijas dzīvojamās ēkās;
- dažos no 3D modeļu variantiem tiek ievērota arī solārā radiācija caur logu, kurai konstanta intensitāte un dažādi krišanas leņķi tiek uzdoti uz loga virsmas. Starojuma intensitātes lielums atbilst eksperimentāli noteiktajam (500 W m^{-2}), bet leņķa vērtības ir 30° , 45° un 60° ;
- tā kā telpas modelī tiek lietots gaiss, kas tiek ierobežots ar sienām, tad uz visām cietām virsmām tiek uzdoti t.s. pielīpšanas nosacījumi: $\nu = 0$. Izņēmums ir atveres, caur kurām notiek gaisa cirkulācija, ja telpa nav noslēgta.

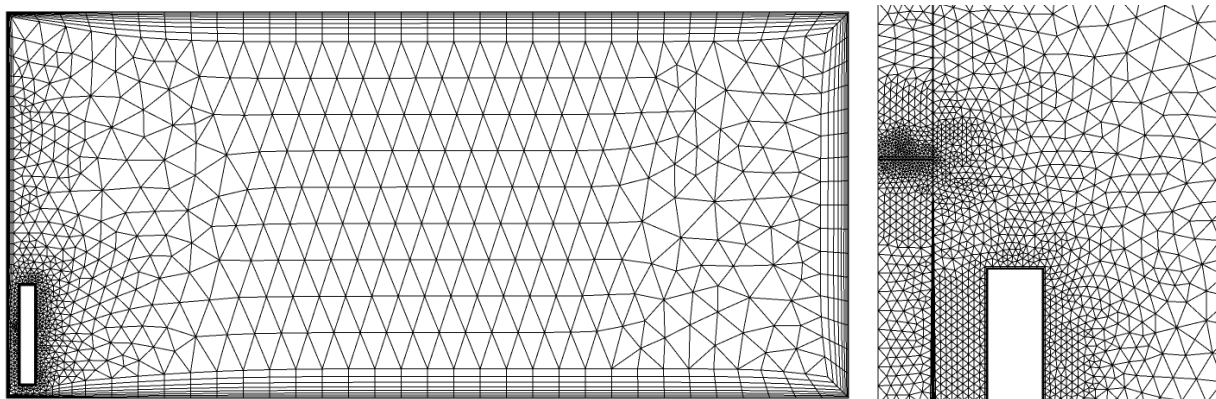
Tabula 4.7. Modeļos lietoto robežnosacījumu apzīmējumi saskaņā ar attēlu 4.9.

Apzīmējums	Robežnosacījums
W_1	Konvekcijas blakus telpā ($\alpha, \text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ un $T_\infty, ^\circ\text{C}$)
W_2	Konvekcija kāpņu telpā ($\alpha, \text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ un $T_\infty, ^\circ\text{C}$)
W_3	Konvekcija ārpusē ($\alpha, \text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ un $T_\infty, ^\circ\text{C}$)
W_K	Virsmas temperatūra ($T, ^\circ\text{C}$)
W_O	Relatīvais spiediens (p, Pa)

Bez fizikālo lielumu izmaiņām, dažādos modeļos tiek mainīts arī sildķermeņa novietojums (pie loga, pie pretējās sienas, pie sānu sienas vai grīdas apkure) un palodzes platums. Kā rāda turpmākās sadaļās apkopotie rezultāti, abu šo faktoru ietekme uz siltuma pārneses procesiem telpā un energoefektivitātes ir būtiska.

Kā minēts iepriekš, telpas modeļa izveidei, skaitlisko risinājumu veikšanai un rezultātu pēcapstrādei tik izmantotas ANSYS/FLOTRAN (Ansys Inc., 1999) un ANSYS/CFX (Ansys Inc., 2005) programmatūras paketes. Ar to palīdzību pēc apgabala un materiālu uzdošanas, apskatāmā telpa tika diskretizēta, samazinot režģa elementu izmērus virsmu, kur ir sagaidāmi ievērojami temperatūras un plūsmas ātruma izmaiņas, tuvumā. Tādējādi tiek ievēroti t.s. robežslāņi pie

sildķermeņu virsmām, spraugā pie loga un gar telpas sienām. Telpas diskretizācija ir nepieciešama, jo aprakstītie saglabāšanās vienādojumi, kas tiek formulēti parciālo diferenciālvienādojumu veidā, tiek skaitliski risināti noteiktajos telpas režģa punktos. Katram telpas modelim ar atšķirīgiem ģeometriskajiem parametriem diskretizācijas režģis tiek konstruēts atsevišķi. Viena no apskatāmajiem modeļa variantiem raksturīgais galīgo elementu režģis ar robežslāņu detalizētāku diskretizāciju sildītāja un sienas tuvumā, kā arī spraugā starp logu un ārsienu parādīts attēlā 4.11. Raksturīgais viena elementa izmērs telpas vidusdaļā sastāda 10...25 cm, bet spraugā pie loga tas nepārsniedz 0,3 mm.



Attēls 4.11. Raksturīgs diskretizācijas režģis gaisā (pa kreisi) un robežslāņu tuvumā (pa labi).

Veicot pirmos modeļu aprēķinus, tika pieņemts, ka telpas šķērsvirzienā fizikālie parametri nemainās, kas ļāva lietot divdimensionālo modeli, tādējādi radikāli samazinot galīgo elementu metodes režģa mezglu punktu skaitu un veikt aprēķinus ar uz to brīdi pieejamiem nelielas veikspējas datoriem. Kopējais elementu skaits atkarībā no aprēķinu varianta sasniedz $1,7 \cdot 10^4$ 2D gadījumā un $5 \cdot 10^6$ – telpiskā modeļa gadījumā. Šādam elementu skaitam viena varianta 2D aprēķinu veikšanai nepieciešamais mašīnlaiks uz ~ 1 GHz procesora sastādīja no 20 līdz 80 stundām. Līdzīgs laiks bija nepieciešams arī telpisko modeļu aprēķiniem, kas tika veikti ar trīsreiz ātrāku procesoru. Bez samērā liela elementu skaita, konverģences procesu ievērojamu palēnināja arī 3. veida (konvektīvie) robežnosacījumi uz telpas ārējām konstrukcijām (4.4), kas ietver arī pašas virsmas temperatūras. Tāpat būtiska ietekme uz aprēķiniem nepieciešamo laiku ir arī nenoslēgtās telpas gaisa apmaiņas procesiem pie uzdotās spiedienu starpības.

Telpas gaisu norobežojošiem materiāliem – sienām un arī logam (kas vienkāršības dēļ arī tiek uzskatīts par cietu homogēnu materiālu) tiek pielietots siltuma vadīšanas vienādojums (Incropera, DeWitt, 2002). Pieņemot, ka materiāls, no kā sastāv būvkonstrukcija, ir homogēns, stacionārā gadījumā bez iekšējiem siltuma avotiem siltuma vadīšanas vienādojumu (skat. sadaļu 2.2) var pierakstīt formā

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0. \quad (4.5)$$

Rezultātā tiek iegūts lineārs temperatūras sadalījums sienas šķērsgrīzumā. Robežnosacījumi uz materiāla malām tiek uzdoti vai aprēķināti (konstanta temperatūra uz sildķermeņiem, konvekcija uz blakus telpām un ārgaisu vai arī telpas gaisa temperatūra pie virsmas).

Savukārt, siltuma un vielas pārnese procesu gāzveida apgabalā apraksts ir sarežģītāks. Gaisa masu konvekcija tajā notiek gravitācijas laukā ($g=9,8 \text{ m s}^{-2}$). Gāze tiek modelēta kā nespīējama, bet tās kustību izraisa termiskās izplešanas koeficienta ievērošana, aprakstot cēlejspēku Businesska tuvinājumā – blīvums ir atkarīgs no temperatūras, bet tā, savukārt, ir atšķirīga dažādās telpas vietās, tas arī izraisa gaisa masu pārvietošanos. Nenoslēgtās telpas modeļa variantos papildus gaisa masu kustība rada arī spiedienu starpība starp atverēm pretējās sienās.

Gaisa plūsmas problēma tiek risināta skaitliski, lietojot masas saglabāšanās, kustības daudzuma saglabāšanas jeb Navjē-Stoksa un enerģijas saglabāšanas likumus (Bejan, Kraus, 2003; Samarskiy, Vabishchevich, 2002; Ansys Inc., 2006). Detalizētāk apskatīsim katru no tiem. No masas saglabāšanas likuma seko nepārtrauktības vienādojums:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{v}) = 0, \quad (4.6)$$

kur: ρ ir blīvums, t – laiks un \vec{v} – ātrums. Modelējamā situācijā telpas gaisa plūsmas salīdzinājumā ar skaņas izplatīšanās ātrumu ir nelielas un gāze pamatoti var tikt uzskatīta par nespīejamu. Tādā gadījumā vienādojums 4.6 vienkāršojas, un to Dekarta ortogonālā koordinātu sistēmā (x, y, z) var pārrakstīt, ar (v_x, v_y, v_z) apzīmējot ātruma vektora komponentes:

$$\text{div}(\vec{v}) = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0. \quad (4.7)$$

Viskozās vides (šķidruma vai gāzes) kustības daudzuma jeb Navjē-Stoksa vienādojumi komponentu pierakstā izskatās sekojoši:

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial t} + \vec{v} \cdot \text{grad}(v_x) \right) &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \sigma_{xx} + \frac{\partial}{\partial y} \sigma_{xy} + \frac{\partial}{\partial z} \sigma_{xz} + \rho f_x \\ \rho \left(\frac{\partial v_y}{\partial t} + \vec{v} \cdot \text{grad}(v_y) \right) &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \sigma_{yx} + \frac{\partial}{\partial y} \sigma_{yy} + \frac{\partial}{\partial z} \sigma_{yz} + \rho f_y, \\ \rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + \vec{v} \cdot \text{grad}(v_z) \right) &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \sigma_{zx} + \frac{\partial}{\partial y} \sigma_{zy} + \frac{\partial}{\partial z} \sigma_{zz} + \rho f_z \end{aligned} \quad (4.8)$$

kur p – spiediens, ar σ_{ij} ir apzīmētas simetriskā viskozo spriegumu tenzora komponentes, bet $\vec{f} = (f_x, f_y, f_z)$ ir masas spēku vektors. Nespīejamam Ņūtona šķidrumam, par kādu šādos apstākļos var tikt uzskatīts arī gaiss, sprieguma tenzora komponentes ir

$$\begin{aligned}\sigma_{xx} &= 2\eta \frac{\partial v_x}{\partial x}, & \sigma_{yy} &= 2\eta \frac{\partial v_y}{\partial y}, & \sigma_{zz} &= 2\eta \frac{\partial v_z}{\partial z}, \\ \sigma_{xy} &= \eta \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right), & \sigma_{xz} &= \eta \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right), & \sigma_{yz} &= \eta \left(\frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right),\end{aligned}\quad (4.9)$$

kur η ir dinamiskās viskozitātes koeficients.

Homogēnai videi, kad tās īpašības ir nemainīgas, sakarības vienkāršojas un vektorformā to var pierakstīt sekojoši:

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \operatorname{grad} \vec{v} \right) = -\operatorname{grad} p + \eta \Delta \vec{v} + \rho \vec{f}. \quad (4.10)$$

Apskatītais nepārtrauktības vienādojums un Navjē-Stoksa vienādojumi apraksta vides kustību, bet siltuma vadīšanas procesu aprakstam šķidrumā vai gāzē izmanto attiecīgo enerģijas saglabāšanas vienādojumu, kas nesaspiežamās vielas gadījumā tiek pierakstīts sekojošā formā:

$$c \rho \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \operatorname{grad} T \right) = \operatorname{grad}(\lambda \operatorname{grad} T) + \eta \Phi, \quad (4.11)$$

kur c ir īpatnējā siltumietilpība, T – temperatūra, λ – siltumvadītspēja un $\eta \Phi$ – locekļis, kas nosaka enerģijas disipāciju viskozās berzes rezultātā.

Disipatīvā funkcija Φ nesaspiežamās vides gadījumā tiek izteikta sekojoši:

$$\begin{aligned}\Phi &= 2 \left[\left(\frac{\partial v_x}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_y}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_z}{\partial z} \right)^2 \right] + \\ &+ \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right)^2.\end{aligned}\quad (4.12)$$

Tādējādi, viskozā homogēnā šķidruma vai gāzes konvektīvo plūsmu aprēķinam tiek izmantoti vienādojumi (4.7), (4.10) un (4.11), sekojošie mainīgie temperatūra T , spiediens p un ātrums \vec{v} , kā arī atbilstošie robežnosacījumi uz apskatāma apgabala robežām.

Lai novērtētu konvektīvo (ar gaisa masām) un vadīšanas (molekulāro) siltuma pārnesei, aplūkosim bezdimensionālo Peklē skaitli Pe , kas raksturo minēto siltuma pārnesei attiecību (Incropera, DeWitt, 2002):

$$Pe \equiv \frac{v d}{a} = \frac{c \rho v d}{\lambda}, \quad (4.13)$$

kur v ir gāzes vai šķidruma raksturīgais ātrums (m s^{-1}), d – apgabala raksturīgais izmērs (m), $a = \lambda / c \rho$ – temperatūras vadītspējas koeficients ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$). Novērtējot gaisa plūsmas telpā iegūstam, kā Peklē skaitlis ir ar kārtu desmit tūkstoši un tāpēc apskatāmajā dzīvojamā telpā noteicošā loma siltuma pārnesei ir konvekcijai.

Cits bezdimensionāls parametrs – Prandtļa skaitlis Pr raksturo attiecību starp kustības daudzuma molekulārās pārneses un siltuma pārnesi siltumvadīšanas ceļā intensitātēm (jeb ātrumu un temperatūru laukiem plūsmā). Tas sastāv tikai no fizikāliem parametriem un ir atkarīgs no vides termodinamiskā stāvokļa (Incropera, DeWitt, 2002):

$$Pr \equiv \frac{\nu}{a} = \frac{\eta c}{\lambda}, \quad (4.14)$$

kur: $\nu = \eta / \rho$ – kinemātiskās viskozitātes koeficients ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$). Prandtļa skaitlis parāda attiecību starp termisko un ātruma robežslāņiem, pie $Pr=1$ robežslāņi sakrīt. Gadījumā, ja šis skaitlis ir mazs, temperatūra izplatās ātrāk par impulsa izplatīšanās ātrumu un termiskā robežslāņa biezums ir daudz lielāks par ātruma robežslāņi, piem., šķidros metālos. Divatomu gāzēm un gaisam apskatītā telpā tā Pr vērtība ir $\sim 0,72$, bet trīsatomu un vairākatomu gāzēm robežās no 0,75 līdz 1,0. Tādējādi var izdarīt secinājumus, ka temperatūras un ātruma robežslāņu biezumi laminārā plūsmā ir salīdzināmi.

Ir ļoti svarīgi novērtēt arī trešo bezdimensionālo līdzības kritēriju – Reinoldsa skaitli Re , ko izmanto plūsmas hidrodinamiskā režīma noteikšanai, tas pēc definīcijas ir attiecība starp inerciāliem spēkiem un molekulāro berzi jeb viskoziem spēkiem (Incropera, DeWitt, 2002):

$$Re \equiv \frac{v l}{\nu} = \frac{v l \rho}{\eta}, \quad (4.15)$$

kur l ir raksturīgais garums/izmērs (m). Reinoldsa skaitli var izteikt arī kā divu iepriekšminēto skaitļu attiecību: $Re = Pe / Pr$. Pie maziem Re skaitļiem gāzes vai šķidrums plūsmas režīms ir laminārs, sasniedzot kritisko lielumu iestājas pārejas režīms, bet pie lieliem skaitļiem plūsma kļūst turbulenta. Atkarībā no plūsmas veida pāreja var notikt pie dažādām Re skaitliskām vērtībām, piem., apaļā caurulē pie $Re > 2000$ un atsevišķos gadījumos šis kritērijs var būt arī lielāks – līdz pat 10000 un vairāk, taču tādās plūsmās ir ļoti nestabilas, pāreja uz turbulento režīmu notiek pie mazākās perturbācijas.

Pie modelējamās telpas raksturīgā izmēra 3 m, gaisa blīvuma un viskozitātes no tabulas 4.6 un sagaidāmiem raksturīgiem ātrumiem ar kārtu 5 cm s^{-1} izriet, ka Reinoldsa skaitlis pārsniedz 8000, vēl lielākās vērtības raksturo plūsmas pie sildītāja virsmas vai spraugās gar loga rāmi. Gaisa plūsmas režīms pie šādiem Re lielumiem ir turbulents un ir nepieciešams izmantot kādu no turbulences modeļiem. Izveidotajos modeļos tiek izmantotas divas pieejas – agrāk plaši izmantotais $k-\varepsilon$ turbulences modelis 2D aprēķinu gadījumā, kas bija implementēts ANSYS/FLOTRAN programmatūrā, un SST modelis jaunākos telpas modeļa 3D variantos, lietojot jaunākās paaudzes programmatūru ANSYS/CFX. Apskatīsim minēto turbulences modeļu pamatprincipus.

Plaši izmantotais pusempīriskais $k-\varepsilon$ modelis ir bāzēts uz turbulentās kinētiskās enerģijas k un tās disipācijas ātruma ε pārneses vienādojumu risinājumu. Šī modeļa pamatā ir pieņēmums, ka

plūsma ir pilnīgi turbulenta un molekulārās viskozitātes efekti ir nenozīmīgi, tāpēc pie maziem Re skaitļiem šī pieceja nav lietojama.

Minētie lielumi k un ε tiek iegūti, risinot to pārneses vienādojumus. Turbulentās kinētiskās enerģijas k pārneses vienādojumu var pierakstīt formā:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j k)}{\partial x_j} = P_k - \rho \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right), \quad (4.16)$$

bet turbulentās kinētiskās enerģijas disipācijas ātruma ε vienādojumu –

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j \varepsilon)}{\partial x_j} = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right). \quad (4.17)$$

Tiek lietoti sekojošie apzīmējumi: $\Gamma_k = \eta + \frac{\eta_t}{\sigma_k}$, $\Gamma_\varepsilon = \eta + \frac{\eta_t}{\sigma_\varepsilon}$; $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, σ_k un σ_ε ir konstantas,

bet lielums P_k reprezentē turbulentās kinētiskās enerģijas ģenerāciju ātrumu gradientu rezultātā:

$$P_k = \eta_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j}. \quad (4.18)$$

Šajos vienādojumos ar U_i un U_j tiek apzīmēti u_x, u_y, u_z , ar x_i un $x_j - x, y, z$ un pa indeksiem i un j notiek summēšana, δ_{ij} ir Kronekera simbols. Ar η_t tiek apzīmēta turbulentā viskozitāte

$\eta_t = C_\eta \rho \frac{k^2}{\varepsilon}$, kur C_η ir konstanta. k - ε turbulences modelī lietoto konstanšu skaitliskās vērtības ir

iegūtas eksperimentālos mērījumos un datoroptimizācijas rezultātā, tās ir sekojošas:

$$C_{\varepsilon 1} = 1,44, \quad C_{\varepsilon 2} = 1,92, \quad C_\eta = 0,09, \quad \sigma_k = 1,0, \quad \sigma_\varepsilon = 1,3. \quad (4.19)$$

Ar detalizētāku modeļa aprakstu var iepazīties darbos (Frost, Moulden, 1980; Chung, 2002; Vieser *et.al.*, 2002).

Otrs samērā plaši lietotais ir k - ω turbulences modelis, kurā ar k apzīmē turbulento kinētisko enerģiju, bet tās disipācijas ātrumu – ar ω . Minēto lielumu noteikšanai izmanto sekojošus pārneses vienādojumus, kuru apzīmējumi pamatā sakrīt ar iepriekš minētajiem

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j k)}{\partial x_j} = P_k - \beta' \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right), \quad (4.20)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j \omega)}{\partial x_j} = \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right). \quad (4.21)$$

Šeit $\Gamma_k = \eta + \frac{\eta_t}{\sigma_k}$, $\Gamma_\omega = \eta + \frac{\eta_t}{\sigma_\omega}$, $\eta_t = \rho \frac{k}{\omega}$, bet lietoto konstanšu vērtības ir šādas:

$$\beta' = 0,09, \quad \alpha = 5/9, \quad \beta = 3/40, \quad \sigma_k = 2,0, \quad \sigma_\omega = 2,0. \quad (4.22)$$

Kaut arī abi minētie turbulences modeļi lielākoties var tikt izmantoti gaisa kustības aprēķinos, atsevišķos gadījumos tie var būt neprecīzi (piem., plūsmas atrašanās vietās, pie lieliem spiediena gradientiem u.c.). Risinājums ir mūsdienās plaši lietotais *Shear Stress Transport* (SST) turbulences modelis, kas kombinē abu modeļu labākās īpašības ar pārejas funkcijas palīdzību, kas ir vienāda ar 1 virsmu tuvumā un ar 0 pārejā plūsmas daļā. Tā attiecīgi aktivizē Vilkoksa modeli (Wilcox, 1993), kas ir optimizēts plūsmām pie virsmām, bet nav lietojams tālu no tām, vai standarta k - ε modeli. SST modelis tiek definēts sekojoši (apzīmējumi atbilst iepriekšējo modeļos lietotajiem):

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j k)}{\partial x_j} = \tilde{P}_k - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right), \quad (4.23)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j \omega)}{\partial x_j} = \\ = \frac{\gamma}{\nu_t} P_k - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + (1 - F_1) 2 \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, \end{aligned} \quad (4.24)$$

tiek lietoti apzīmējumi: $\Gamma_k = \eta + \frac{\eta_t}{\sigma_k}$, $\Gamma_\omega = \eta + \frac{\eta_t}{\sigma_\omega}$, $P_k = \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j}$, $\tilde{P}_k = \min(P_k; c_1 \varepsilon)$, un ar τ_{ij} ir

$$\text{apzīmēta izteiksme } \tau_{ij} = \eta_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}.$$

Vienādojumos ieejošo konstanšu skaitlisko vērtību kopa φ tiek noteikta no divām konstanšu kopām φ_1 un φ_2 ar funkcijas F_1 palīdzību: $\varphi = F_1 \varphi_1 + (1 - F_1) \varphi_2$. Konstanšu kopas ir sekojošas:

$$\begin{aligned} \varphi_1 : \quad \sigma_{k1} = 2 \quad \sigma_{\omega 1} = 2 \quad \gamma_1 = 0,5532 \quad \beta_1 = 0,0750 \quad \beta^* = 0,09 \quad c_1 = 10 \\ \varphi_2 : \quad \sigma_{k2} = 1 \quad \sigma_{\omega 2} = 1,168 \quad \gamma_2 = 0,4403 \quad \beta_2 = 0,0828 \quad \beta^* = 0,09 \end{aligned} ,$$

bet pati funkcija F_1 tiek definēta šādā veidā:

$$\begin{aligned} F_1 = \tanh \left\{ \left[\min \left(\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500 \nu}{y^2 \omega} \right); \frac{4 \rho \sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} y^2} \right) \right]^4 \right\}, \\ CD_{k\omega} = \max \left(2 \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}; e^{-10} \right) \end{aligned} \quad (4.25)$$

kur ν ir kinemātiskā viskozitāte (η/ρ).

Gadījumā, ja vides īpašības ir konstantas un tajā nav iekšējo siltuma avotu, temperatūras vienādojumu šīs metodes ietvaros pieraksta sekojoši:

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j T)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\eta}{Pr} + \frac{\eta_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} \right]. \quad (4.26)$$

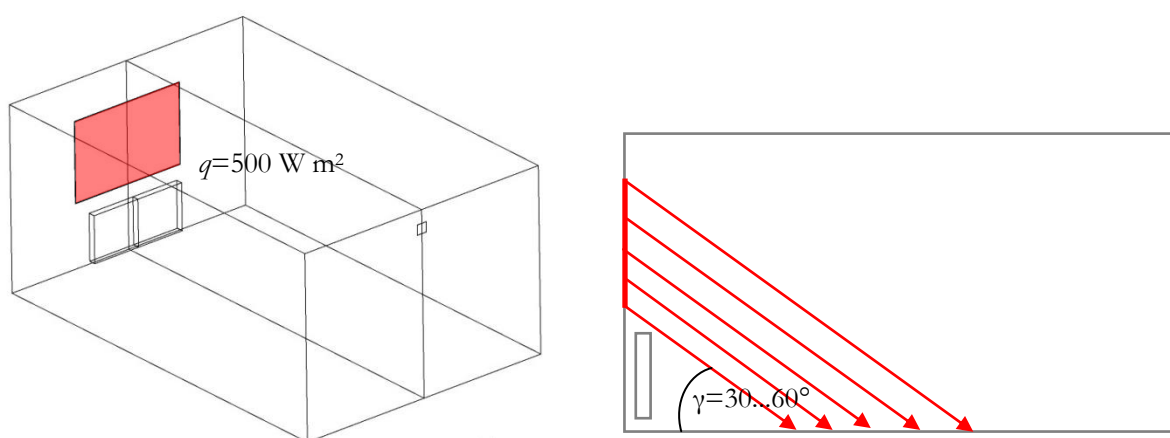
Šajā formulā Prandtlja skaitlis Pr , kā minēts iepriekš, gaisam ir 0,72, bet ar Pr_t apzīmētais turbulenta Prandtlja skaitlis no eksperimentālo mērījumu un analītisko aprēķinu rezultātiem ir pieņemts vienāds ar 0,9. Vairāk par SST modeļa formulējumu, tajā izmantotiem vienādojumiem un apzīmējumiem var iepazīties darbā (Menter, 1994), bet tā rezultātu verifikācija un salīdzinājums ar eksperimentāliem datiem atrodams darbos (Bardina *et.al.*, 1997; Vieser *et.al.*, 2002).

Cita mūsdienās populāra *Large Eddy Simulation* pieeja (Lesieur *et.al.*, 2005; Deevy *et.al.*, 2007) šī darba stacionāru dzīvojamās telpas modeļu ietvaros netika izmantota, jo, atšķirībā no iepriekš minētajiem modeļiem, ir lietojama tikai nestacionārā nostādņē – lielie, enerģiju pārnesošie, turbulentie virpuļi tajā tiek izsekoti laikā un telpā, kas prasa arī ievērojami lielākus laika un skaitļotāja jaudas resursus.

Kaut arī mērījumos iegūtie dati liecina, ka Latvijas klimatiskajos apstākļos siltuma apmaiņa ar ārgaisu notiek galvenokārt siltuma vadišanas un konvekcijas ceļā, atsevišķos gadījumos arī siltuma starojuma plūsma var būt būtiska (skat. arī sadaļu 2.4). Īpaši svarīgi ir ievērot to ēkām ar lielu caurspīdīgu norobežojošo konstrukciju daļu ārējā čaulā, kas ziemas mēnešos samazina apkurei nepieciešamo siltuma daudzumu, bet vasaras sezonā ir cēlonis palielinātai iekštelpu gaisa temperatūrai un neapmierinošiem termiskā komforta apstākļiem, kas prasa papildus elektroenerģijas patēriņu gaisa dzesēšanai. Jāatzīmē, ka pie augstām apkures sistēmas sildķermeņa virsmas temperatūrām arī radiācijas siltuma daudzums var būt nozīmīgs. Tāpēc atsevišķos 3D modeļos tiek aktivizēts starojuma siltuma pārneses modelis un analizēta solārās radiācijas ziemas mēnešos ietekme uz telpas siltuma bilanci un temperatūras un gaisa ātrumu sadalījumiem.

Radiācijas siltuma apmaiņas modelēšanai tiek izmantots programmatūrā ANSYS/CFX integrētais Montekarlo modelis (Carlson, Hassan, 1991; Ansys Inc., 2005). Tā pamatā ir fotonu un apkārtējās vides mijiedarbības modelēšana, kad no starojuma avota tiek izvēlēts viens fotons un izsekots sistēmā, reģistrējot iespējamus notikumus – tā saskari ar virsmām, izkliedi vai absorbciju, kā rezultātā fizikālie sistēmas lielumi mainās. Šis process ģenerē sistēmas fotona t.s. pilno vēsturi. Ir nepieciešams ģenerēt daudzu fotonu vēstures, lai iegūtu pietiekami precīzu visas sistēmas fizikālo lielumu novērtējumu – apskatītajos variantos šis skaits tiek pieņemts vienāds ar $2 \cdot 10^6$. Veidojot apskatāmā apgabala diskretizācijas režģi programmatūrā, ir jāievēro, ka gadījumā, ja viela neizstaro, neabsorbē un neizkliedē radiāciju, režģis tajā vispār nav nepieciešams – apmaiņa notiek tikai starp norobežojošām virsmām.

Starojuma siltuma pārnese ievērošana ļauj novērtēt šī procesa ietekmi uz no apkures sistēmas sildķermeņa izdalīto siltuma daudzumu. Tas izmaina gan kopējo telpas siltuma bilanci, gan arī gaisa plūsmu sadalījumu telpā. Cita iespēja, kas tiek realizēta dažos 3D modeļa variantos, ir papildus Saules starojuma ievērošana, uzdodot uz loga iekšējās virsmas siltuma avotu. Ņemot vērā veikto eksperimentālo logu solārās caurlaidības mērījumu rezultātus (Jakovičs *et.al.*, 2006), avota siltuma plūsmas blīvums ir noteikts $q=500 \text{ W m}^{-2}$, bet krišanas leņķis γ variēts no 30 līdz 60 grādiem virs horizonta (attēls 4.12). Šādi nosacījumi atbilst vasaras dienai ar trīs Saules pozīcijām. Modeļa ietvaros visas telpas virsmas, izņemot caurspīdīgo logu, tiek uzskatītas par pelēkiem objektiem ar emisijas koeficientu $\epsilon=0,9$.



Attēls 4.12. Saules siltuma starojuma ievērošanas skice.

Cilvēka klātbūtne apskatāmā telpā nav paredzēta, un no tā virsmas izdalītais siltuma daudzums starojuma ceļā netiek modelēts. Kā norāda citu līdzīgu darbu autori (Deevy *et.al.*, 2007), radiācijas siltuma daudzums no cilvēka ķermeņa ir mazāks par citu siltuma pārnese veidu ieguldījumu, to ir grūti precīzi aprakstīt daudzu tādu to ietekmējošu faktoru dēļ kā apģērba daudzums, aktivitāte, ķermeņa izmēri un tā temperatūras nevienādīgums, elpošana un iztvaikošanas procesi no ādas.

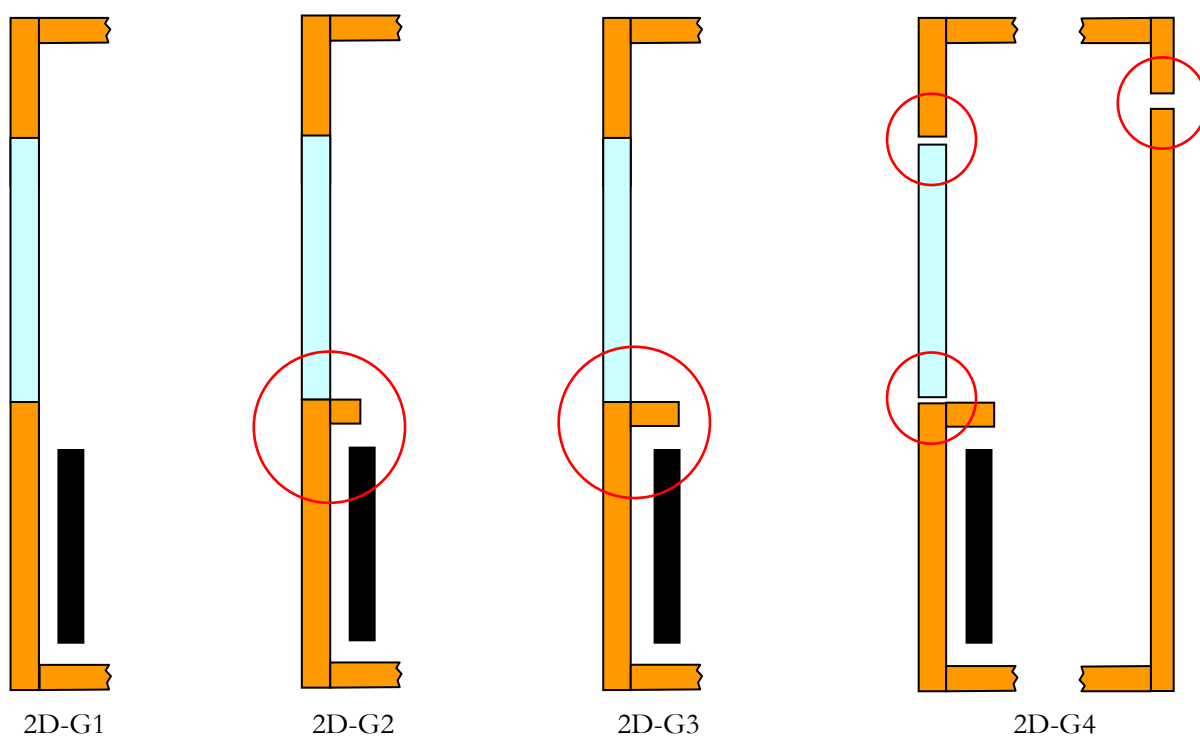
Apskatīsim telpas 2D un 3D modeļu realizācijas, analizējot dažādu ģeometrisku un fizikālo parametru ietekmi uz energoefektivitātes raksturlielumiem un cilvēka termisko komforta apstākļiem tajā.

4.3.2D modeļi

Veicot apskatāmās telpas matemātisko modelēšanu 2D tuvinājumā, tika analizēta sekojošu atšķirīgo robežnosacījumu un konstruktīvu risinājumu, kas atbilst situācijām reālos apstākļos, ietekme uz gaisa cirkulāciju un temperatūras sadalījumu telpā:

- apkures sistēmas sildķermeņa virsmas temperatūra;
- telpas ārējo norobežojošo konstrukciju siltuma caurlaidības;
- palodze un tās izmērs;
- atveres telpas čaulā, caur kurām ir iespējama gaisa cirkulācija.

Veicot aprēķinus pirmo divu faktoru ietekmes novērtējumam, telpas ģeometrija netika mainīta, bet variēti tikai atbilstošie fizikālie parametri – virsmas temperatūra T ($^{\circ}\text{C}$) un sienas un loga siltuma caurlaidības U ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$). Apzīmēsim šo ģeometriju, kas nesatur palodzi, ar 2D-G1. Nākamajos modeļa variantos kā mainīgs parametrs tiek lietota divu atšķirīgu platumu palodze, kas nozīmē arī divas atšķirīgas telpas ģeometrijas, ko apzīmēsim ar 2D-G2 īsākas (līdz sildītāja vidusdaļai) un 2D-G3 garākas (līdz sildītāja malai) palodzes gadījumā. Visbeidzot, gaisa apmaiņas ar ārgaisu un kāpņu telpu ievērošanai, tika izveidota vēl viena ģeometrija, kas paredz atveres norobežojošās konstrukcijās, to apzīmēsim ar 2D-G4. Visu minēto ģeometriju skīču fragmenti ar atšķirīgiem elementiem parādīti attēlā 4.13.



Attēls 4.13. Dzīvojamās telpas dažādu 2D modelēšanai variantu ģeometriskās atšķirības.

Uzreiz jāatzīmē, ka atkarībā no izmantotajiem robežnosacījumiem mainījās arī problēmas konverģences ātrums. Tā, nenoslēgtās telpas gadījumā, it sevišķi pie uzdotās spiedienu starpības, sasniegt konverģences kritērijus bija iespējams tikai uzsākot aprēķinus ar izmainītiem telpā esošās gāzes parametriem – sākotnēji tie tika nomainīti pret ļoti viskoza šķidruma īpašībām, tikai pēc tam aprēķini tika turpināti lietojot gaisa raksturlielumus. Bet gadījumā ar uzdoto spiedienu starpību ar šo

paņēmienu konverģenci neizdevās sasniegt, tāpēc tika izmantots sākuma sadalījums no rēķina bez uzdotās spiedienu starpības. Šo problēmu cēloņi ir saistīti gan ar nepietiekami smalku režģa elementu izmēru lielu ātrumu gradientu zonās, gan arī lietotās programmatūras skaitliskās risināšanas metožu specifiku, kas jaunākās paaudzes programmatūrā ANSYS/CFX, veicot aprēķinus 3D gadījumos, ir uzlabotas un šāda tipa grūtības vairs netika konstatētas

Tabulā 4.8. ir apkopoti telpas 2D modeļa dažādu variantu atšķirīgie fizikālie lielumi ar atbilstošo telpas ģeometriju apzīmējumiem. Tālāk apskatīsim un analizēsim katra no šiem modelēšanas variantiem rezultātus, veiksīm to salīdzinošu analīzi ar mērķi noteikt dažādu faktoru ietekmi uz dzīvojamās telpas siltuma zudumiem un, tādējādi, arī visas ēkas energoefektivitāti, kā arī uz cilvēka termiskā komforta apstākļiem telpā.

Tabula 4.8. Veikto 2D modeļa aprēķinu variantu ģeometriju un fizikālo raksturlielumu kopsavilkums.

Ģeometrijas apzīmējums (skat. att. 4.13)		2D-G1					2D-G2	2D-G3	2D-G4		
Aprēķinu variants		2D-G1-1	2D-G1-2	2D-G1-3	2D-G1-4	2D-G1-5	2D-G2-1	2D-G3-1	2D-G4-1	2D-G4-2	
Sildītāja virsmas temperatūra T_s , °C		60	50	40		50					
Spiedienu starpība ΔP , Pa		-						0	2		
Siltuma caurlaidības U , $W m^{-2} K^{-1}$	Siena uz āru	1,5			0,33						
	Logs uz āru	2,5				6,0					
	Siena uz kāpņu telpu	1,2									
	Griesti un grīda	0,8									

4.3.1. Sildelementa virsmas temperatūras ietekme

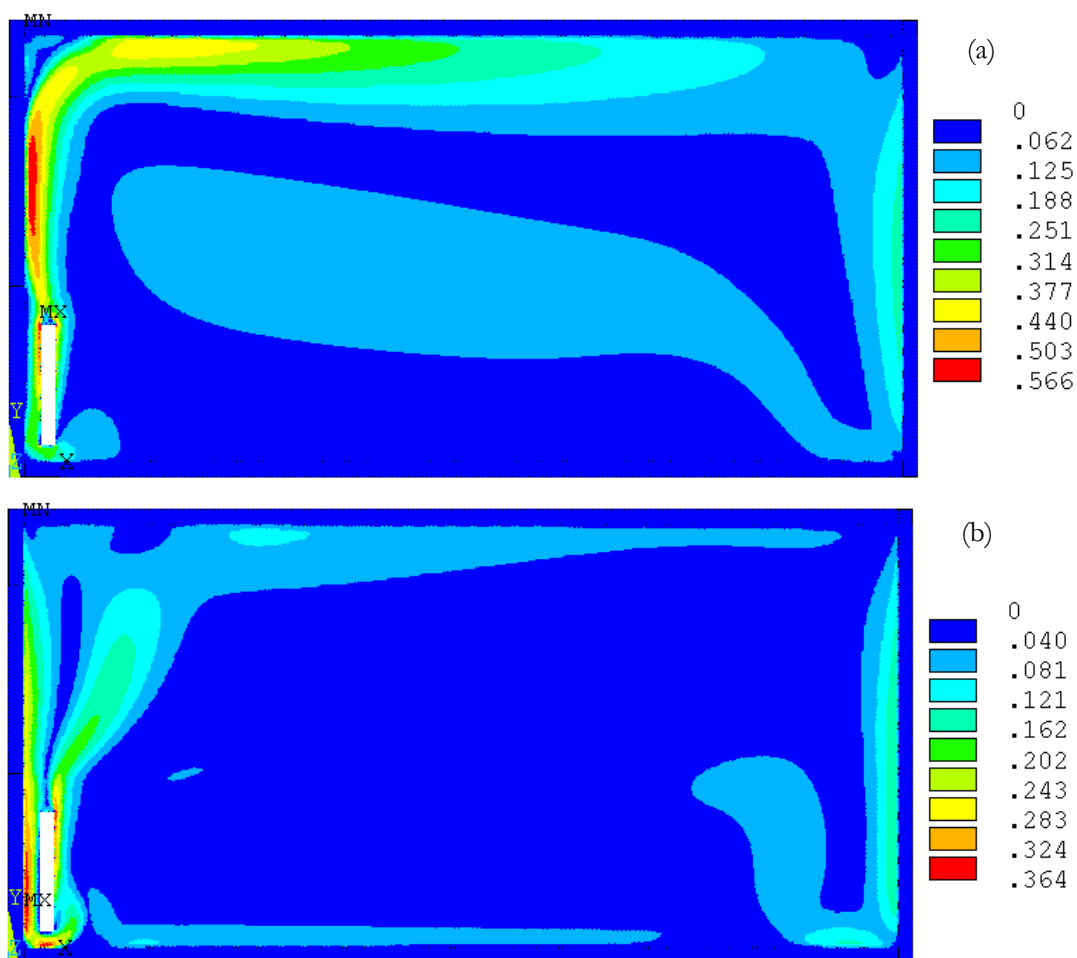
Kā pirmo apskatīsim telpas ģeometriju bez palodzes 2D-G1, uz tās bāzes veiksīm 3 aprēķinus ar atšķirīgām apkures sistēmas sildķermeņa virsmas temperatūrām (skat. attēlu 4.13 un tabulu 4.8):

- 60°C (variants 2D-G1-1);
- 50°C (variants 2D-G1-2);
- 40°C (variants 2D-G1-3).

Izvēlētās temperatūras atbilst praksē bieži lietotajām siltuma nesēja – ūdens temperatūrai centrālās apkures sistēmās daudzstāvu dzīvojamās ēkās. Pieņemot, ka sildķermenis ir veidots no metāla ar

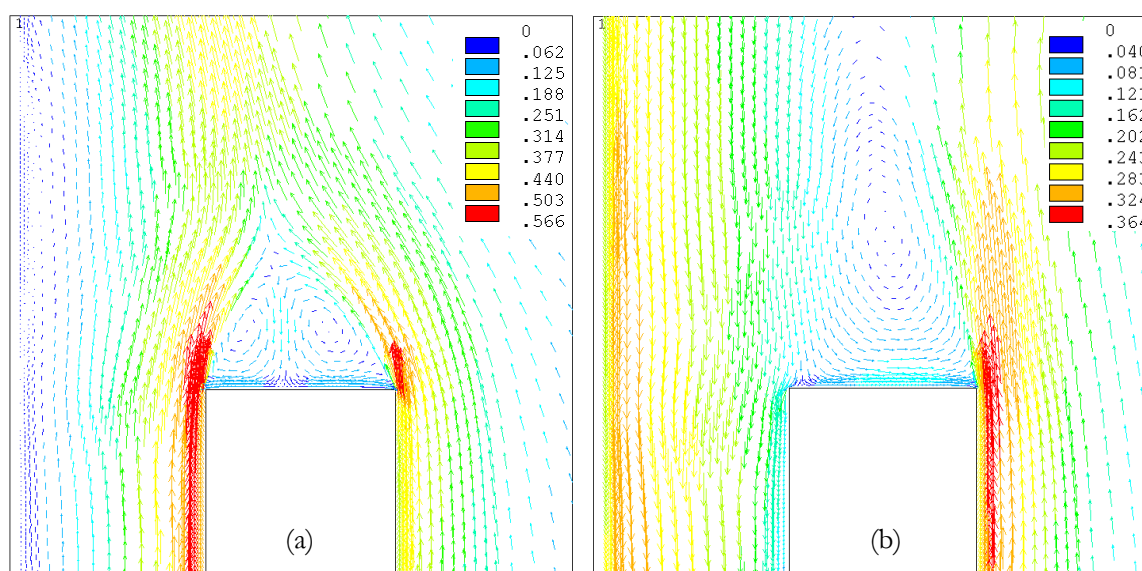
mazu siltuma pretestību, var uzskatīt, ka tā uzdotā virsmas temperatūra tuvināti atbilst ūdens temperatūrai.

Novērtēsim, cik lielā mērā sildķermeņa temperatūra ietekmē kopējo temperatūras sadalījumu telpā un izmaina gaisa cirkulāciju tajā. Ātruma sadalījums telpā variantiem 2D-G1-1 un 2D-G1-3 ar sildītāja virsmas temperatūru 60 °C un 40 °C attiecīgi, vizualizējot tā moduli telpā, parādīts attēlos 4.14a un 4.14b attiecīgi. Aprēķinu variantā ar lielāku sildītāja virsmas temperatūru gaisa plūsmas no tā novirzās vairāk uz loga pusi, uz lielāka temperatūras gradienta pusi, kur arī ir novērojamas lielākas ātruma vērtības un arī lielāki siltuma zudumi. Sildķermeņa virsmas temperatūrai samazinoties, plūsma no tā novirzās vairāk uz telpas vidusdaļu, kas ir izskaidrojams ar mazāku temperatūru starpību, kā rezultātā pie loga virsmas noteicoša kļūst atdzisušā gaisa lejup vērsta kustība. Šāda kustība ir saistīta ar termisko izplešanos, kas nosaka gaisa blīvuma samazinājumu pieaugot temperatūrai. Otrajā gadījumā maksimālās gaisa kustības intensitātes zona atrodas spraugā starp ārsienu un sildītāju, bet ātrumu absolūtās vērtības ir mazākas nekā pirmajā gadījumā (attēls 4.14).

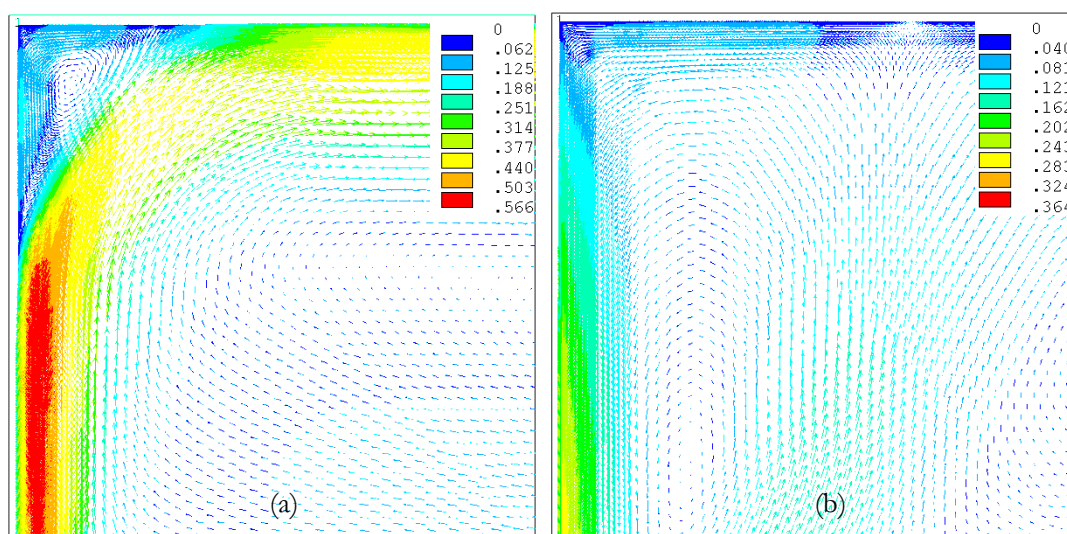


Attēls 4.14. Ātruma vektora moduļa (m s^{-1}) sadalījums telpā pie 60 °C (a) un 40 °C (b) sildītāja temperatūras.

Uz sildītāja augšējās daļas atkarībā no tā temperatūras ir ļoti redzama gaisa plūsmas virziena maiņa (attēls 4.15), kas arī ir izskaidrojams ar gaisa plūsmas un ārējās norobežojošās konstrukcijas temperatūru starpību. Kā redzams attēlā 4.15b, pateicoties intensīvām gaisa plūsmām gar abām sildītāja vertikālajām virsmām, uz tā augšējās horizontālās plaknes variantā 2D-G1-1 veidojas divi virpuļi, bet variantā ar zemāku temperatūru tāds efekts neveidojas. Savukārt, gaiss starp sildītāju un ārsienu pie augstākām konvektora temperatūrām kustas augšup karstā gaisa ietekmē, bet pie zemākām temperatūrām šajā vietā lejup pārvietojas aukstais gaiss, kas atdziest loga tuvumā un karstā gaisa plūsma vairs nav noteicoša visā spraugas platumā. Tā kā gaisa plūsma tiek novirzīta no ārējās sienas konvektora augšdaļā, tad ātruma sadalījuma aina izmainās arī telpas augšējā daļā pie ārējās sienas. Šis efekts parādīts attēlā 4.16, tajā ir ļoti redzama arī lielu gaisa kustības ātrumu zona pie loga un ar to saistītais parazitārais virpulis augšējā stūrī (variantā ar 60 °C sildītāja temperatūru).

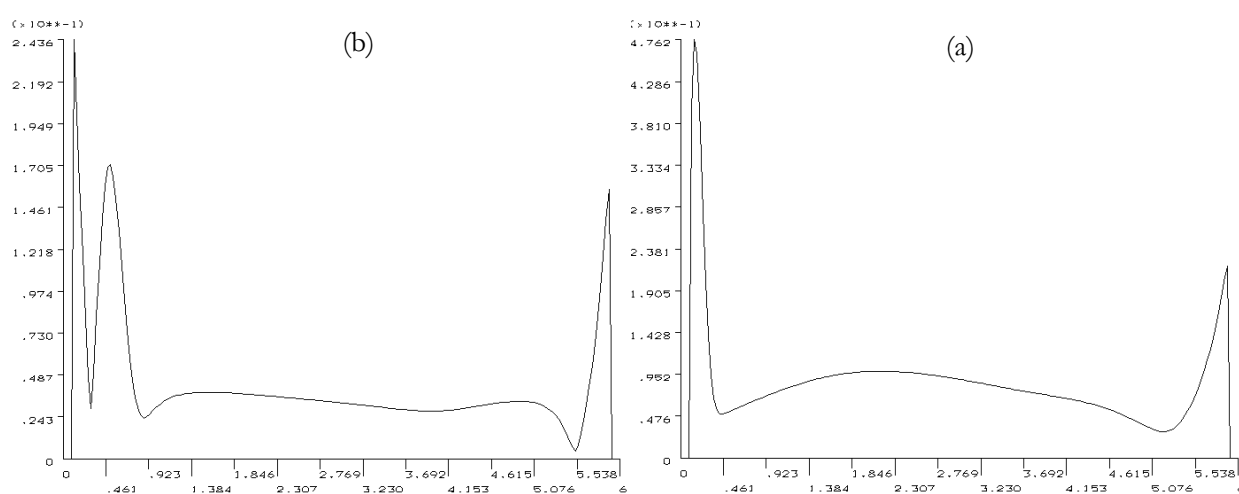


Attēls 4.15. Ātruma vektoru (m s^{-1}) lauks sildītāja augšējā daļā pie tā temperatūras 60 °C (a) un 40 °C (b).



Attēls 4.16. Ātruma vektoru (m s^{-1}) lauks telpā virs sildītāja pie tā temperatūras 60 °C (a) un 40 °C (b).

Ar gaisa plūsmām telpā ir saistīts arī viens no cilvēka termiskā komforta apstākļu pamatfaktoriem – gaisa kustības ātrums. Ja pie sildītāja temperatūras 60 °C vidējais ātrums telpas „dzīvojamā zonā” (skat. sadaļu 4.1) sasniedz 0,5 m s⁻¹, kas neapmierina termiskā komforta prasības, tad pie mazākās temperatūras šis rādītājs ir samazinājies divas reizes un atbilst minētajām prasībām. Palielinātas ātruma vērtības pirmajā gadījumā pamatā ir saistītas ar palielinātu gaisa kustības vidējo ātrumu telpas vidusdaļā, kas ir labi redzams temperatūras profilos uz telpas horizontālās viduslīnijas (attēls 4.17), savu ieguldījumu dod arī intensīvā plūsma loga virsmas tuvumā, ko izraisa palielināta temperatūras diference starp sildītāju un loga virsmu. Palielinātie gaisa kustības ātrumi pie sienas uz kāpņu telpu ar zemāku temperatūru ir saistīti ar gaisa atdzišanu virsmas tuvumā un ir vērsti lejup.

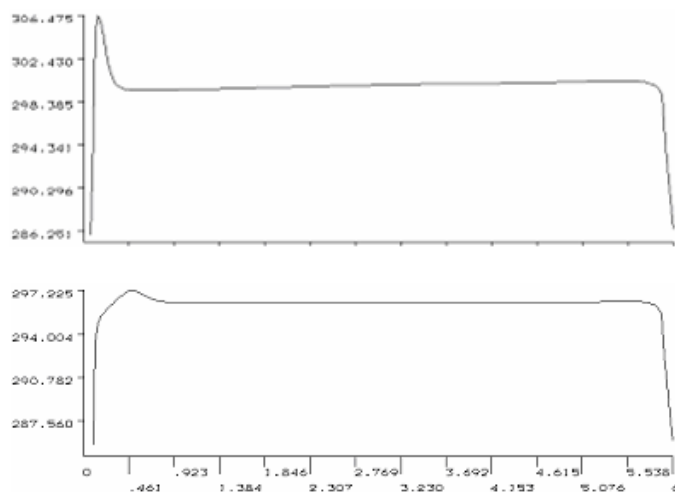


Attēls 4.17. Kopējā ātruma (m s⁻¹) sadalījums pa telpas horizontālo viduslīniju no loga uz kāpņu telpas sienu pie 60 °C (a) un 40 °C (b) sildītāja temperatūras.

Lai objektīvi varētu kontrolēt izmaiņas, ko nosaka tikai sildķermeņa temperatūras maiņa vienkāršas ģeometrijas telpā, minēto variantu aprēķini tika veikti pie nemainīgām norobežojošo konstrukciju siltuma caurlaidībām. Gadījumā, ja sildītāja temperatūra ir liela, raksturīga ir viena izteikta siltā gaisa plūsma no sildītāja uz aukstas sienas pusi, līdz ar to pastāv lieli telpas vidējie plūsmas ātrumi un palielinās siltuma zudumi caur logu. Kā redzams no attēlā 4.18 parādītajiem temperatūras profiliem uz telpas horizontālās viduslīnijas, variantā 2D-G1-1 vidējā temperatūra ir ievērojami augstāka un sasniedz 26 °C, kas ir pārāk augsta dzīvojamām telpām, savukārt samazinot sildķermeņa temperatūru līdz 40 °C (variants 2D-G1-3), vidējā temperatūra nokrīt līdz 22 °C, kas jau tuvināti atbilst normālai dzīvojamās istabas temperatūrai. Šāda tendence saglabājas arī reālajās telpās, bet absolūtās vērtības var atšķirties atkarībā no dažādu interjera priekšmetu izvietojuma un telpas izmantošanas veida, tāpēc iegūtie temperatūras rezultāti ir interpretējami tikai kā pirmais tuvinājums.

Bez minētajiem gaisa plūsmu un temperatūras laukiem, modelēto istabu raksturo arī integrālie siltuma apmaiņas lielumi, kas nosaka telpas un arī visas ēkas energoefektivitāti. Tie ir siltuma zudumi

caur norobežojošām konstrukcijām un apkurei nepieciešamais siltuma daudzums. Rūpīgi analizējot šos rādītājus, ir iespējams ne tikai modelēt konkrētā varianta siltuma bilanci, bet arī optimizēt to, variējot dažādus faktoros, piem., šajos variantos – sildītāja temperatūru. Šeit siltuma bilanci atsevišķi neapskatīsim, jo uzskatāmāk ir veikt visu 2D modeļu siltuma bilanču detalizēto analīzi vienkopus, kas ir atspoguļots sadaļā 4.3.5. Atzīmēsīm tikai, ka līdz ar sildītāja virsmas temperatūras pieaugumu pieaug ne tikai telpas temperatūra, bet arī siltuma enerģijas patēriņš.



Attēls 4.18. Temperatūras (K) sadalījums pa telpas horizontālo viduslīniju no loga uz kāpņu telpas sienu pie 60 °C (augšā) un 40 °C (apakšā) sildītāja temperatūras.

Apskatītajos aprēķinu variantos ār sienas un loga U vērtības ir izvēlētas attiecīgi 1,5 un $2,5 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$, kas atbilst mērījumu rezultātiem nerenovētās daudzstāvu dzīvojamās mājās. Tomēr, kā rāda veiktie eksperimentālie pētījumi (sadaļa 2.2.3), renovēto un jauncelāmo ēku ār sienas siltuma caurlaidība ir mazāka, bet vecajiem vienkambaru logiem – lielāka, pie tam vērtību izkliedes diapazons var pārsniegt vienu kārtu. Tāpēc ir lietderīgi novērtēt arī norobežojošo konstrukciju siltuma pretestības ietekmi uz apmaiņas procesiem un termisko komfortu dzīvojamā telpā.

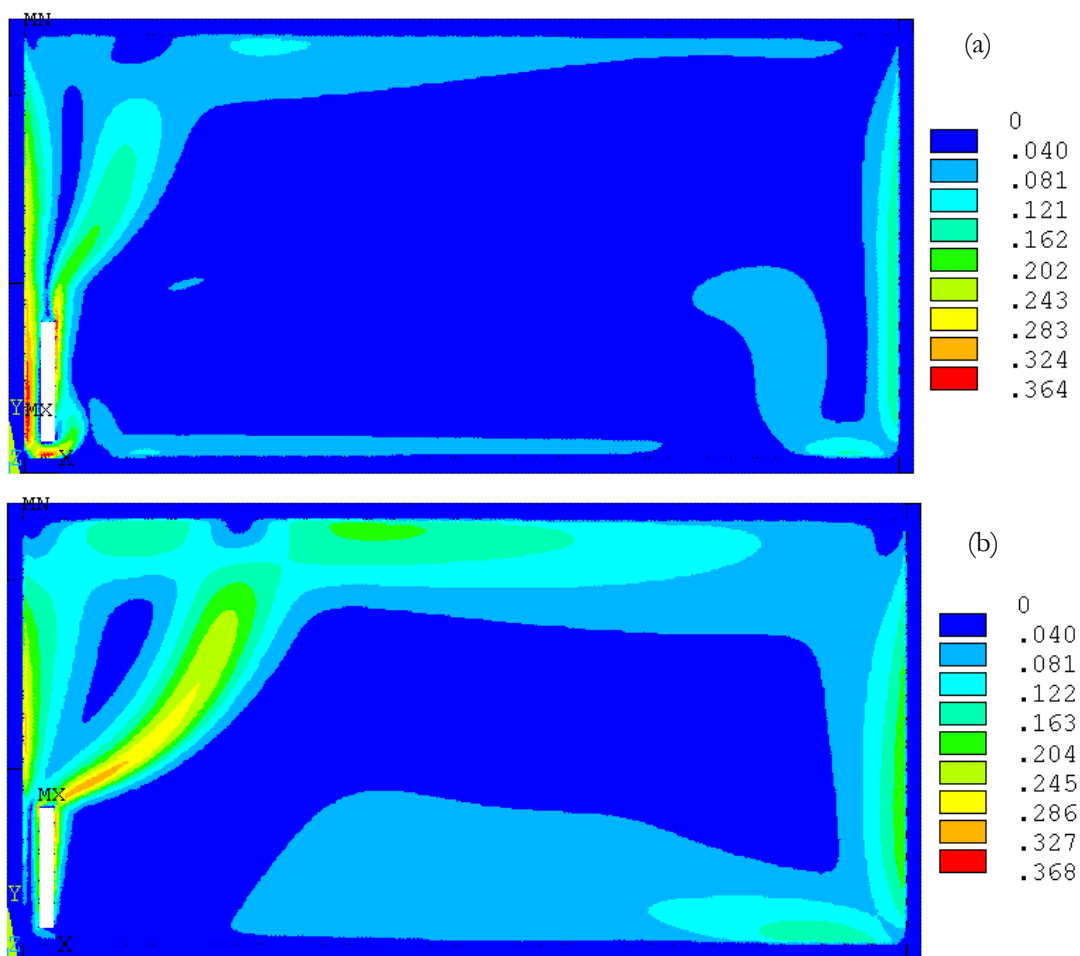
4.3.2. Ār sienas siltuma caurlaidības ietekme

Līdz šim apskatītajos telpas modeļa variantos norobežojošo konstrukciju siltuma pretestības tika pieņemtas relatīvi mazas. Lai analizētu to ietekmi uz siltumfizikālajiem procesiem telpā, izvēlamies kritiskā objekta – ār sienas samazinātu siltuma vadīšanas koeficienta vērtību, kas atbilst Latvijas Būvnormatīva LBN 002-01 prasībām. Programmatūrā ANSYS/CFX tiek uzdota materiāla siltuma vadītspēja λ , ko aprēķina, zinot materiāla biezumu, rezultējošo siltuma vadīšanas koeficientu U un ievērojot standartizētos siltuma atdeves koeficientus (skat. sadaļu 2.2). Nākamais apskatītais

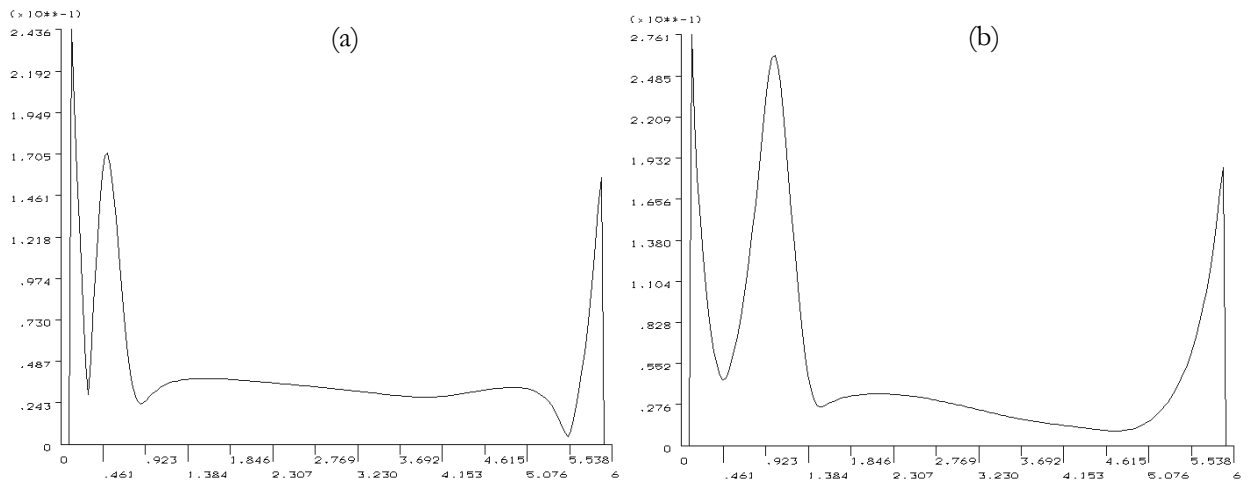
variants 2D-G1-4 atšķiras no iepriekšējā, 2D-G1-3, tikai ar samazināto ārsienas U vērtību $0,35 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$, kas atbilst vecās paneļu ārsienas nosiltināšanai ar akmens vates vai putuplasta slāni.

Minētās U samazinājums rezultātā mainās gaisa kustības raksturs telpā, ko atspoguļo ātruma vektora moduļa sadalījums – skat. attēlu 4.19. Gadījumā, ja ārsienas siltuma izolējošās īpašības ir uzlabotas, palielinās tās iekšējās virsmas temperatūra, tātad samazinās temperatūras atšķirības un arī plūsmas intensitāte starp sildītāju un sienu, līdz ar to tiek reducēti arī siltuma zudumi šajā zonā. Tagad lielākie ātrumi nekā iepriekš parādās labi siltuma vadošā loga tuvumā, bet ārsienas tuvumā plūsma vairs nav intensīva. Gaisa cirkulācijas ātruma maksimālā vērtība ir pārvietojusies no spraugas pie sildķermeņa uz telpas vidusdaļas pusi (attēls 4.20), tajā pat laikā maksimālās ātruma vērtības praktiski nemainās. Vidējais gaisa kustības ātrums pieaug pateicoties intensīvai plūsmai no sildītāja, kas ir vērsta uz telpas vidusdaļu, bet tas joprojām nav pretrunā ar termiskā komforta nosacījumiem.

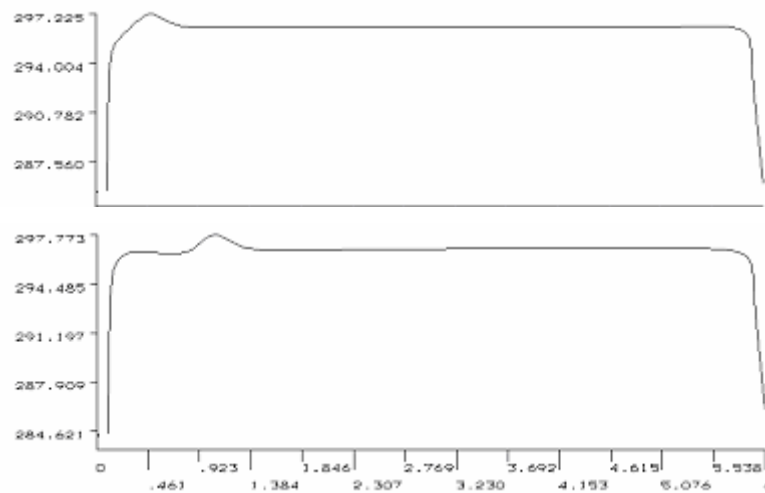
Siltā gaisa masas tagad ir virzītas vairāk uz telpas vidu un temperatūras maksimums sakrīt ar siltā gaisa plūsmas virzienu – attēls 4.21. Gaisa kustības raksturs sildītāja augšējās virsmas tuvumā abos variantos parādīts attēlā 4.22, kur ir skaidri redzama plūsmas ātruma samazināšanas tendence spraugā starp sildķermeni un ārsienu, kā arī siltā gaisa plūsmas virziena maiņa prom no ārsienas.



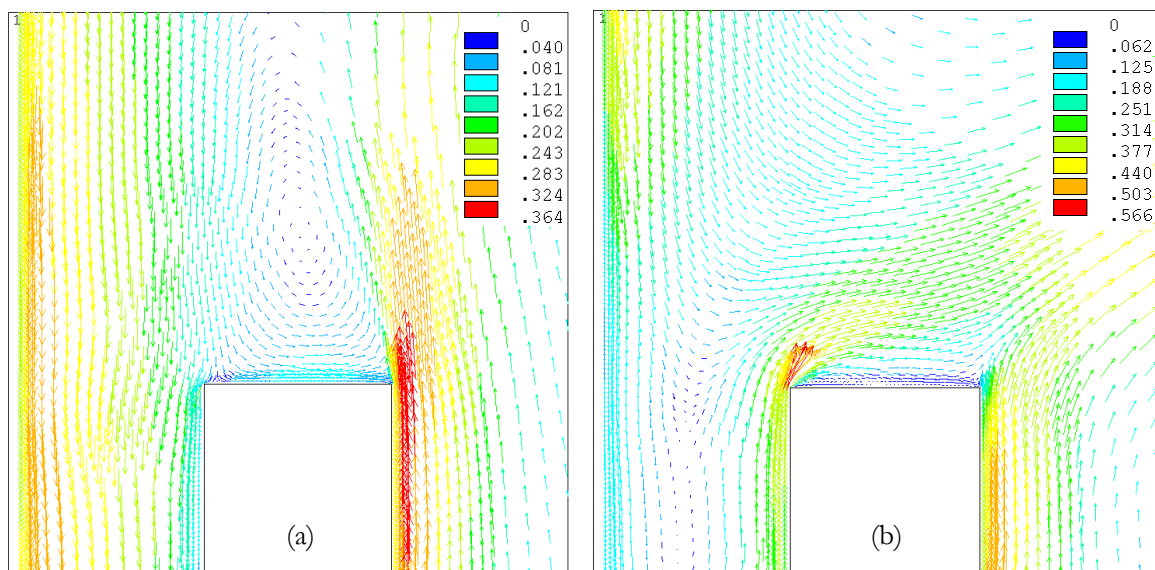
Attēls 4.19. Ātruma vektora moduļa (m s^{-1}) sadalījums telpā ar lielu (a) un mazu (b) ārsienas siltuma caurlaidību.



Attēls 4.20. Kopējā ātruma (m s^{-1}) sadalījums pa telpas horizontālo viduslīniju no loga uz kāpņu telpas sienu gadījumā ar lielu (a) un mazu (b) ārējas siltuma caurlaidību.



Attēls 4.21. Temperatūras (K) sadalījums pa telpas horizontālo viduslīniju no loga uz kāpņu telpas sienu gadījumā ar lielu (augšā) un mazu (apakšā) ārējas siltuma caurlaidību.



Attēls 4.22. Ātruma vektoru (m s^{-1}) lauks sildītāja augšējā daļā telpā ar lielu (a) un mazu (b) ārējas siltuma caurlaidību.

Uzlabojot ārsienas siltumizolējošās īpašības, samazinās arī siltuma daudzums, kas aizplūst siltuma vadīšanas ceļā caur to, un tas daļēji ietekmē temperatūras līmeni telpā. Vidējā gaisa temperatūra telpas „dzīvojamā zonā” pie tādas pašas sildītāja temperatūras tagad ir pieaugusi par vienu grādu līdz 23 °C. Telpas siltuma bilances rādītājus un to salīdzinošo analīzi skat. sadaļā 4.3.5.

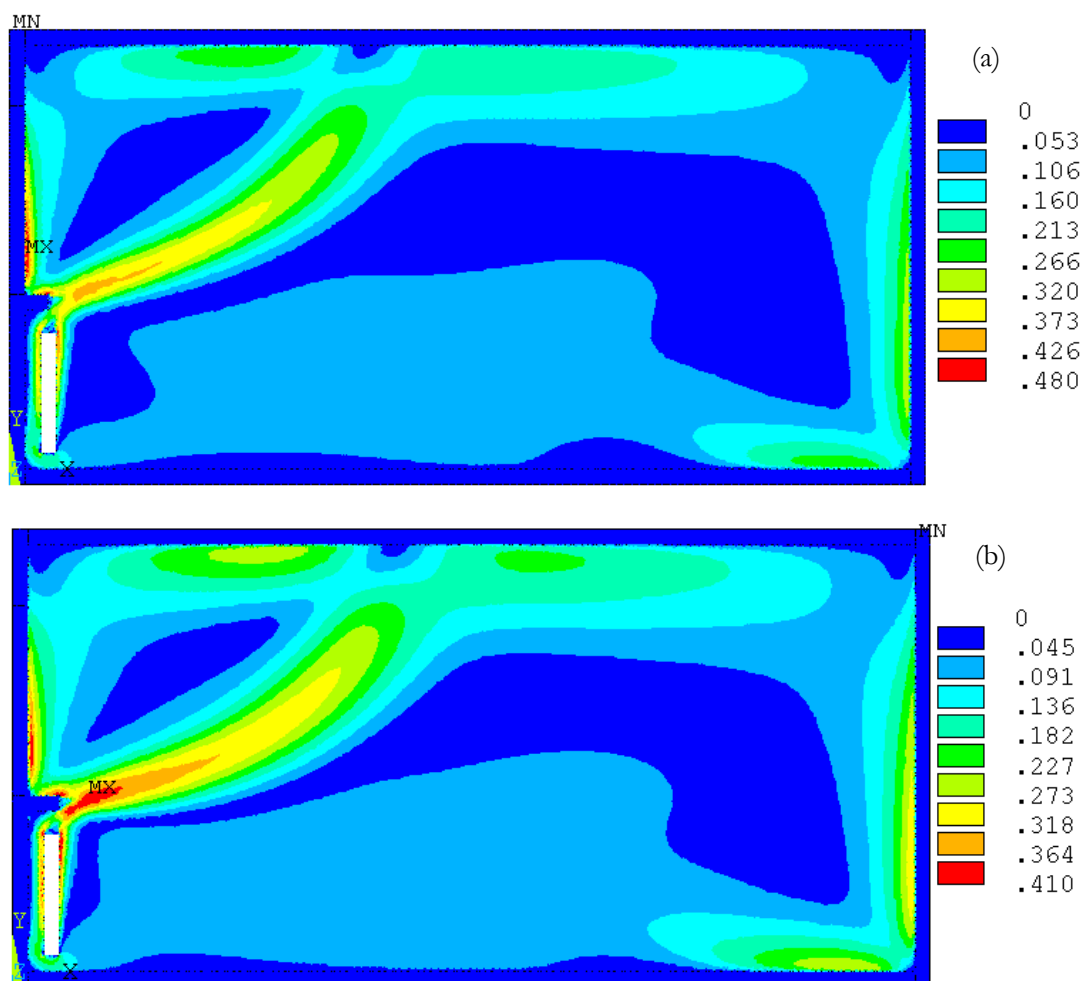
Līdz šim apskatītais no ģeometrijas viedokļa visvienkāršākais modelis ir tikai pirmais, idealizētais tuvinājums un praksē realizējas reti. Galvenokārt tāpēc, ka sildītāju nemēdz novietot telpā atklātā vietā tiešā loga tuvumā: parasti tas vai nu tiek iebūvēts nišās, vai arī virs tā tiek novietota palodze, kas aizkavē tiešo siltuma plūsmu uz logu kā redzams attēlā 4.14, tādā veidā ievērojami samazinot siltuma zudumus. Tāpēc nākošā modeļu grupā ievēsim papildus objektu – virs sildītāja novietotu dažāda platumā palodzi. Lai uzskatāmāk demonstrētu siltuma zudumu ziņā kritiskākā būvelementa – loga ietekmi uz pārneses procesiem, turpmākos modeļa aprēķinos palielināsim tā siltuma caurlaidību līdz $6 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$, kas atbilst daudzdzīvokļu māju kāpņu telpās sastopamiem vienkāršiem logiem. Savukārt, lai saglabātu visu modeļu siltuma bilances salīdzināšanas un analīzes iespējas, palielināsim sildķermeņa virsmas temperatūru līdz 50 °C.

4.3.3. Palodzes ietekme

Kā redzams no iepriekšējiem modelēšanas rezultātiem, siltās gaisa plūsmas no sildķermeņa galvenokārt tiek virzītas uz augšu, tādā veidā veicinot intensīvu siltuma apmaiņu ar daudz zemākas temperatūras gaisu pie ārsienas un loga, kas rada lielus siltuma zudumus. Šis efekts ir ļoti izteikts gadījumā, ja ārējo norobežojošo konstrukciju siltuma pretestība ir maza un sildītāja temperatūra – augsta (variants 2D-G1-1). Viens no veidiem, kā kavēt vai apturēt šādu procesu, ir palielināt sienu siltuma pretestību, tādā veidā samazinot temperatūras gradientus un ar to saistītos siltuma zudumus (variants 2D-G1-4). Cits paņēmieni ir mehāniski novirzīt plūsmu no ārējām norobežojošām konstrukcijām, īpaši loga, kura siltuma pretestība praktiski vienmēr ir daudz mazāka par sienas pretestību. To var vienkārši realizēt, virs sildītāja novietojot palodzi, kas veikts nākamajos divos aprēķinu variantos – ar tās garumu līdz sildītāja vidusdaļai un līdz tā malai (varianti 2D-G2-1 un 2D-G3-1). Skices šāda veida modeļiem parādītas attēlā 4.13. Cita pieeja siltuma apmaiņas minimizēšanai ir apkures sistēmas sildķermeņu novietošana pie citām sienām, bet šādos gadījumos var rasties problēmas ar termiskā komforta nodrošināšanu, kas tiks apskatīts vēlāk telpas 3D modelēšanas sadaļā.

Ātrumu sadalījumi šiem variantiem atšķiras no iepriekš apskatītajiem. Tagad palodze kalpo kā mehāniska barjera gan siltā gaisa plūsmai no sildītāja, gan arī pie loga virsmas atdzisušā gaisa lejupejošai plūsmai. Tagad abām minētām gaisa masām sajaucoties, intensīvā kustība novērojama no palodzes uz telpas vidusdaļu, tādējādi nodrošinot šajā virzienā siltākā gaisa plūsmu (attēls 4.23a).

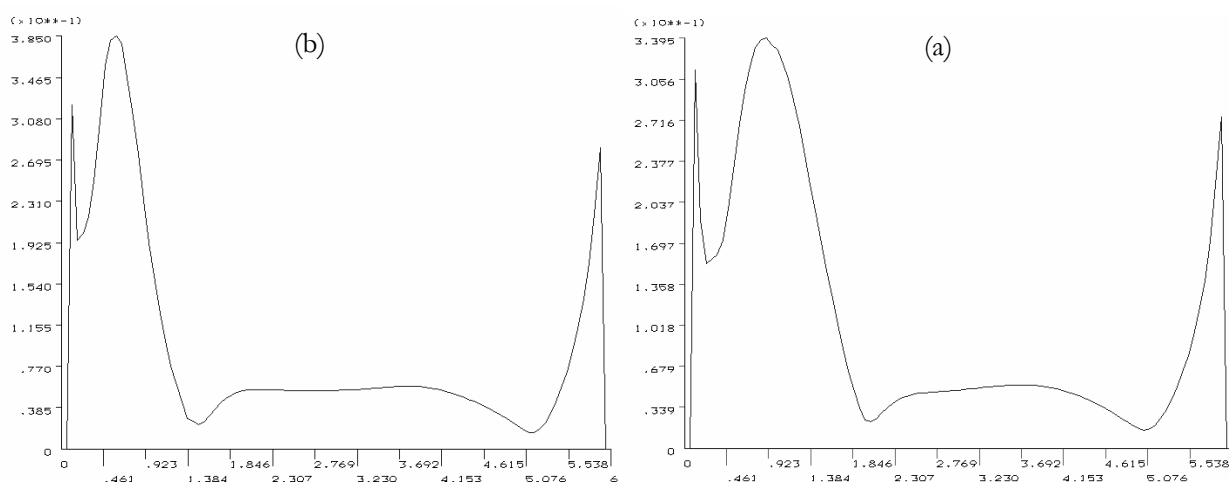
Gadījumā, ja palodze sniedzas līdz sildītāja malai, plūsma tiek novirzīta vēl vairāk, pie tam maksimālās ātruma vērtības tagad tiek reģistrētas tieši plūsmu sajaukšanās vietā (attēls 4.23b). Liels gaisa kustības ātrums novērojams pie loga iekšējās virsmas, kas ir izskaidrojams ar šajā vietā esošo vēl lielāko temperatūras gradientu horizontālā virzienā $\partial T / \partial x$, jo logs ir vislabāk siltumu vadošais elements šajā modelī (skat. tabulu 4.8).



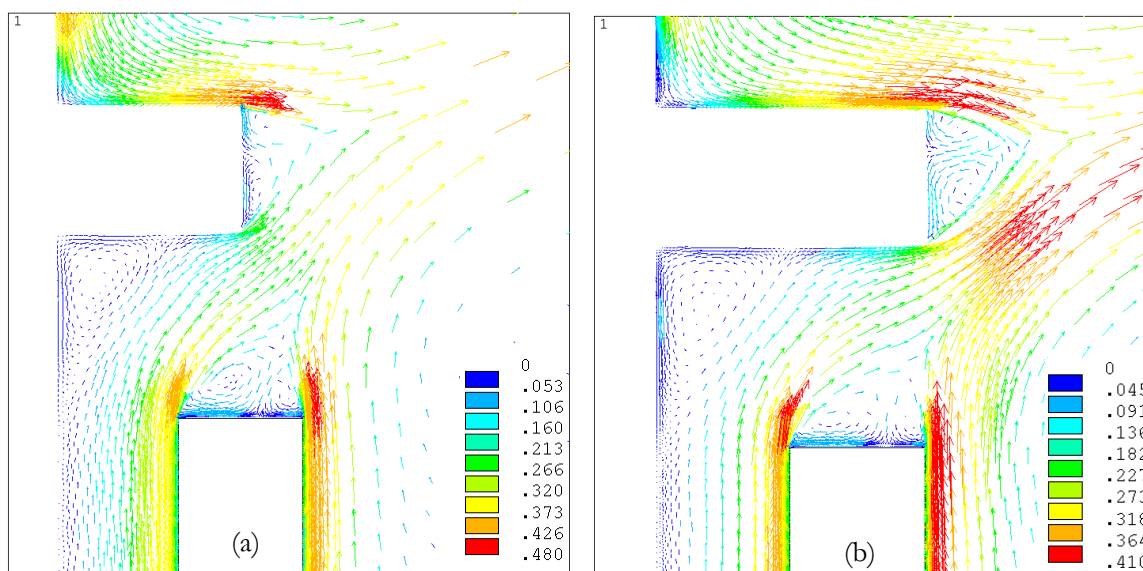
Attēls 4.23. Ātruma vektora moduļa (m s^{-1}) sadalījums telpā ar īsāku (a) un garāku (b) palodzi.

Apskatot gaisa kustības ātruma sadalījumu pa telpas horizontālo viduslīniju (attēls 4.24), var redzēt, ka abos variantos tas ir praktiski vienāds. Maksimālais ātrums salīdzinot ar variantu bez palodzes ir palicis 30 cm s^{-1} līmenī, tādējādi palodzes tuvumā komforta apstākļi ir neapmierinoši, kaut arī telpas „dzīvojamā zonā” vidējais ātrums nepārsniedz 10 cm s^{-1} , kas ir labs rādītājs.

Apskatot gaisa plūsmas no sildītāja augšējās daļas (attēls 4.25), redzam, ka tās abos gadījumos tiek novirzītas uz telpu, bet uz tā augšējās virsmas veidojas divi virpuļi, jo siltais gaiss virzās uz augšu pa abām sildītāja pusēm (līdzīgi variantam 2D-G1-1). Līdzīgi virpuļi ir vērojami arī palodzes galā, gar kuras augšpusi plūst pie loga atdzisušais gaiss, bet apakšpusē – pie konvektora sasilušais gaiss.



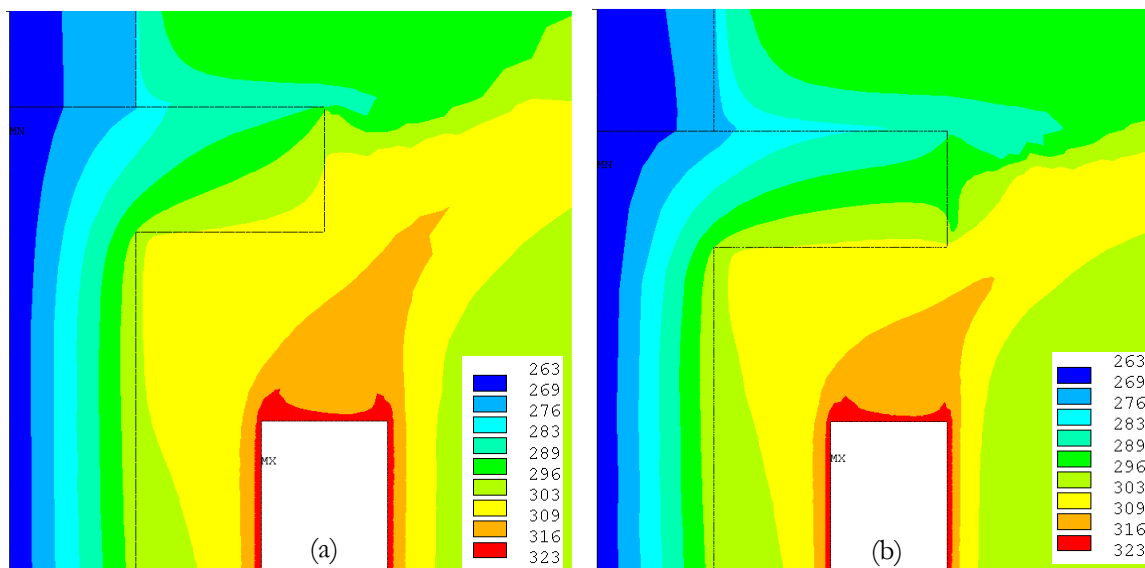
Attēls 4.24. Kopējā ātruma (m s^{-1}) sadalījums pa telpas horizontālo viduslīniju no loga uz kāpņu telpas sienu telpā ar īsāku (a) un garāku (b) palodzi.



Attēls 4.25. Ātruma vektoru (m s^{-1}) lauks sildītāja augšējā daļā telpā ar īsāku (a) un garāku (b) palodzi.

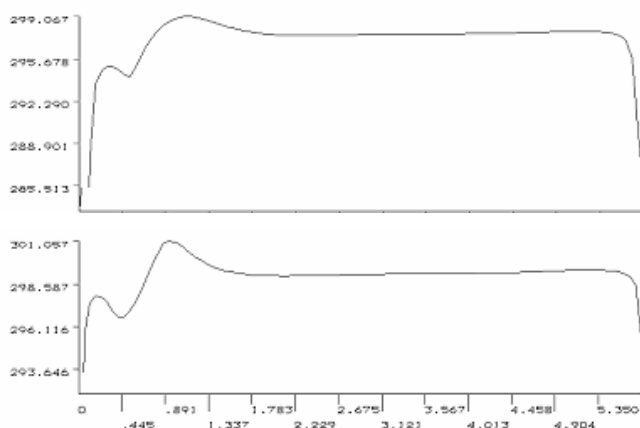
Relatīvi neliela ātruma virpulis rodas arī zem palodzes pie ārsienas, tajā vietā atrodas mazkustīga siltā gaisa masa, un to var redzēt attēlā 4.26 vizualizētajā temperatūras sadalījumā palodzes apakšējā daļā. Salīdzinot temperatūru sadalījumi ārsienā un palodzē abos gadījumos, redzam, ka zemākās temperatūras iespēžas palodzes zonā dziļāk gadījumā, ja tā ir garāka; arī pašas palodzes vidējā temperatūra ir zemāka. Šis rezultāts uzskatāmi apstiprina termogrāfiski novērojamo ainu uz ārsienas tās lielas siltuma caurlaidības gadījumā (att. 2.9)

Tā kā šajos telpas modeļa variantos ir samazināta loga siltuma pretestība, iezīmējas labi siltumvadošām būvkonstrukcijām raksturīgā problēma – iekšējās virsmas temperatūras pazemināšanās, kas palielina rasas punkta sasniegšanas risku. Tā, abos variantos loga virsmas temperatūra nokrīt līdz $16\text{ }^{\circ}\text{C}$, kas ir rasas punkta temperatūra $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ siltam gaisam ar 70% relatīvo mitrumu.



Attēls 4.26. Temperatūras (°C) sadalījums sildītāja augšējā daļā telpā ar īsāku (a) un garāku (b) palodzi.

Temperatūras sadalījums horizontālā virzienā telpas vidusdaļā vairs nav tik homogēns kā visos iepriekšējos aprēķinos – tas vizuāli abiem variantiem parādīts attēlā 4.27. Analizējot temperatūru profilus, loga tuvumā var redzēt vienu mazāk izteiktu temperatūras maksimumu, aiz kura dziļāk telpā novērojams minimums un tad – lielāks maksimums. Šāda aina veidojas, no palodzes mehāniski novirzoties gaisa plūsmai, kuras vienā daļā atrodas pie loga virsmas atdzisis gaiss, bet otrā – pie sildītāja uzsilis gaiss, kura loma ir dominējoša.



Attēls 4.27. Temperatūras (K) sadalījums pa telpas horizontālo viduslīniju no loga uz kāpņu telpas sienu telpā ar īsāku (augšā) un garāku (apakšā) palodzi.

Tā kā siltā gaisa plūsma tagad ir novirzīta no loga, kur notika lielāka siltuma apmaiņa, tad vidējā temperatūra telpā ir pieaugusi (kaut arī ievērojami samazināta loga siltuma pretestība), un līdz ar to samazinājušies siltuma zudumi, ko salīdzinošā analīze ir veikta sadaļā 4.3.5. Modelī ar īsāku palodzi telpas vidējā temperatūra ir pieaugusi līdz 25 °C, bet modelī ar garāku palodzi pat līdz 26 °C (bez palodzes temperatūra bija 23 °C). Šādas temperatūras jau ir pārmērīgi augstas cilvēka

komfortam, taču ir jāatceras, ka tas ir vienkāršota modeļa nostādne, kas ievēro tikai vadišanas siltuma apmaiņu ar apkārtējo vidi.

Visi līdz šim apskatītie aprēķini tika veikti slēgtai telpai, tomēr reālas apstākļos tā nekad nav izolēta no apkārtējās vides, jo cilvēka dzīvības uzturēšanai nepieciešama gaisa cirkulācija, kas kompensē patērētā skābekļa daudzumu. Tāpēc nākošais telpas modelēšanas variants tika realizēts ar atverēm norobežojošās konstrukcijās, kas nodrošina gaisa apmaiņu un līdz ar to arī izraisa papildus siltuma zudumus konvekcijas ceļā, kas pazemina temperatūras līmeni telpā.

4.3.4. Spiedienu starpības ietekme

Lai ievērotu gaisa apmaiņu, papildināsim pēdējo apskatīto telpas ģeometriju 2D-G3, uzdodot trīs atveres norobežojošās konstrukcijās, kas nodrošina gaisa cirkulāciju un tādējādi telpu padara nenoslēgtu. Parasto koka logu gadījumā spraugas parasti atrodas pa loga perimetru, kas saistīts ar tā neblīvo montāžu un konstrukcijas īpatnībām. Matemātiskajā modelī atveres attiecīgi tika izvietotas starp loga un ārsienas materiāliem (ģeometrija 2D-G4 attēlā 4.13). Dabā šādu spraugu platumi nav lieli un parasti nepārsniedz dažus milimetrus, tāpat šis lielums ir mainīgs pa loga perimetru. Modelējamā telpā izveidoto spraugu biezums ir pieņemts vienāds ar 5 mm, kas ir ļoti liels, bet palīdz uzskatāmi novērtēt konvektīvās gaisa apmaiņas kvalitatīvu ietekmi uz siltuma apmaiņas procesiem telpā. Otrā telpas pusē veidosim vēl vienu spraugu, kas atbilst ventilācijas atverei telpas piespiedu vai brīvās ventilācijas gadījumā. Šādu objektu raksturīgie izmēri parasti ir 10...20 cm, bet modelī minētās spraugas platums ir izvēlēts 2,5 cm, ko nosaka fakts, ka apskatāmajā 2D gadījumā šīs atveres ir pa visu telpas platumu.

Lai ievērotu dažādus meteoroloģiskos apstākļus, kas ietekmē gaisa kustību caur neblīvām vietām, tika veikti aprēķini diviem variantiem pie dažādiem robežnosacījumiem uz atverēm:

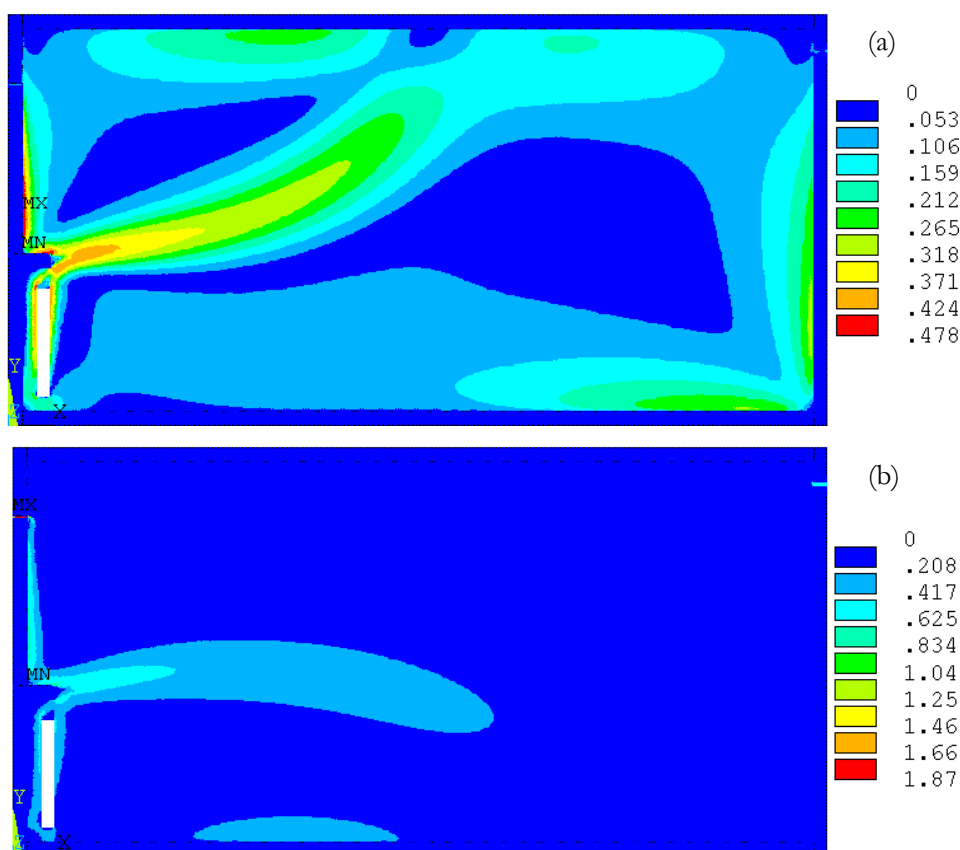
- uz visām spraugām ir uzdots vienāds relatīvais spiediens, kas atbilst situācijai, kad spiedienu starpības starp telpas pretējām sienām nav ($\Delta p = 0$ Pa). Tomēr arī tādā gadījumā veidojas gaisa plūsmas caur spraugām temperatūras un spiediena lauku neviendabības pēc. Šo variantu apzīmēsim ar 2D-G4-1;
- ārgaisa spiediens ir lielāks nekā telpā (piem., vējainā laikā), kā nodrošināšanai starp spraugām ārējā sienā un kāpņu telpas sienā tiek uzdots spiedienu starpība 2 Pa; tiek apskatīts gadījums, kad telpā veidojas pazemināta spiediena apstākļi. Šo variantu apzīmēsim ar 2D-G4-2;

Uz līnijām atverēs, kas norobežo telpu no apkārtējās vides, tiek uzdotas relatīvās spiediena vērtības attiecīgi 0 vai 2 Pa, kā arī temperatūras ārā (-10 °C) un kāpņu telpā (15 °C), kas atbilst

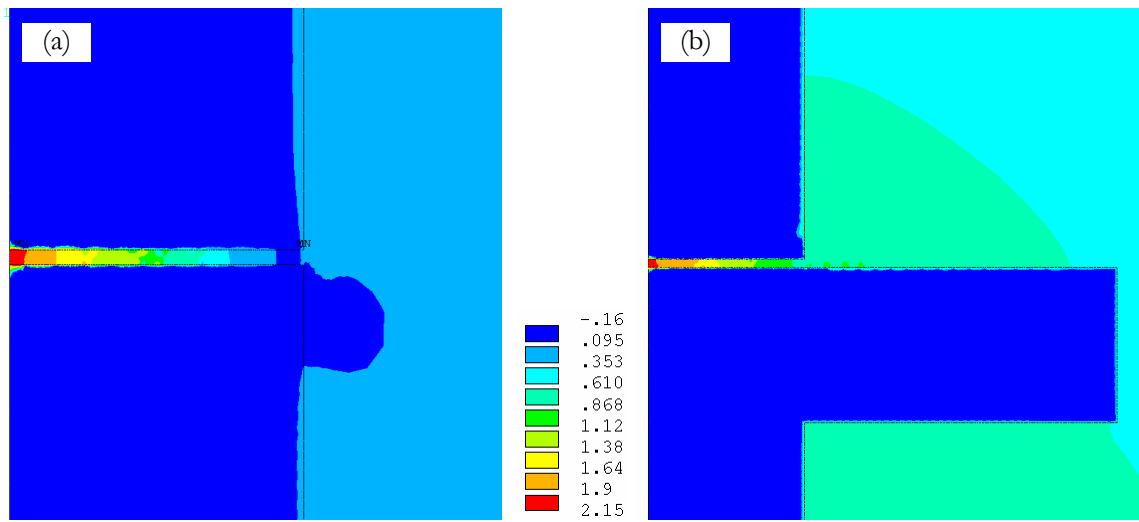
attiecīgo virsmu 3. veida robežnosacījumos uzdotām temperatūrām T_∞ (tabula 4.7). Lai nodrošinātu gaisa plūsmas caur atverēm iespējamību, uz šīs līnijas netiek uzdoti pielipšanas nosacījumi.

Aprēķinu rezultātā iegūtie ātrumu sadalījumi telpai abos variantos parādīti attēlā 4.28. Redzams, ka gadījumā bez spiedienu starpības starp telpas pretējām sienām gaisa cirkulācijas raksturs un ātrumu sadalījums praktiski neatšķiras no iepriekšējā varianta 2D-G3-1 (attēli 4. 23a un 4.28a). Savukārt, arī pastāvot 2 Pa pārspiedienam, tas aktīvi veicina aukstā gaisa ieplūdi telpā caur spraugām loga abās pusēs, kā arī siltā gaisa izplūdi pa ventilācijas atveri otrajā telpas galā, kas izmaina gaisa kustības ātrumu sadalījumu – attēlā 4.28b ļoti lieli (līdz $1,8 \text{ m s}^{-1}$) kustības ātrumi ir spraugās pie loga, tāpēc lietotajā skalā vērtību lauks telpā ir izteikti homogēns. Otrajā gadījumā siltā gaisa plūsmas no sildķermeņa tiek novirzītas vēl vairāk uz telpas vidusdaļu, ko nosaka ne tikai palodze kā mehāniskā barjera, bet arī aukstā gaisa ieplūde. Pa augšējo atveri ienākošais gaiss sava lielāka blīvuma dēļ virzās uz leju un pastiprina šo efektu. Jāatzīmē, ka, kaut arī spiediena vērtības ir uzdotas uz modelējamās telpas pretējām sienām, lielākais spiediena gradients ir novērojams spraugās pie loga, kur tiek sasniegti ļoti lieli ātrumi, tas parādīts attēlā 4.29 (gadījums ar 2 Pa spiedienu starpību).

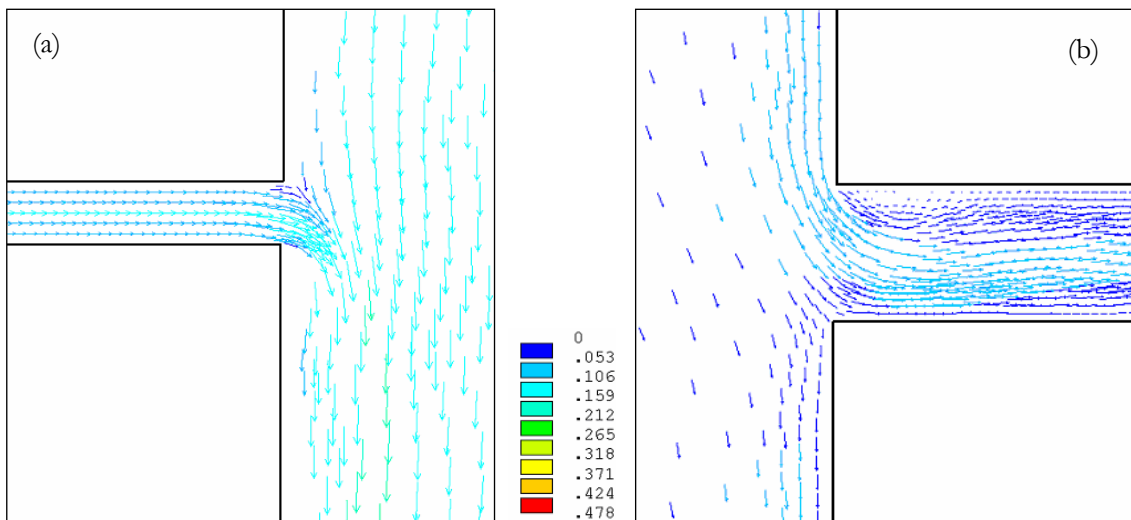
Gaisa ieplūde pa atverēm loga augšējā daļā un izplūde pa ventilācijas atveri abos modelēšanas variantos parādītas attēlā 4.30 (bez spiedienu starpības) un 4.31 (ar 2 Pa zemspiedienu). Kā redzams, pirmajā gadījumā plūsma caur spraugām ir relatīvi neliela un nepārsniedz 15 centimetrus sekundē, bet 2 Pa spiedienu starpības rezultātā tās ātrums ievērojami pieaug. Līdz ar to 2D-G4-2 modelī gaisa kustības ātrumi arī telpas „dzīvojamā zonā” pārsniedz rekomendējamās normas.



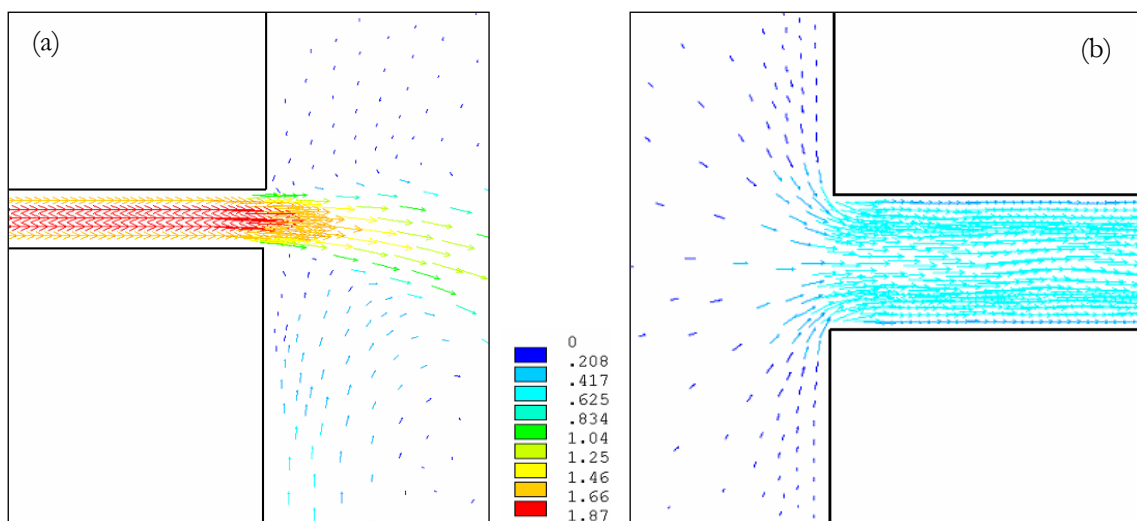
Attēls 4.28. Ātruma vektora moduļa (m s^{-1}) sadalījums telpā ar spiedienu starpību 0 Pa (a) un 2 Pa (b).



Attēls 4.29. Spiediena sadalījuma (Pa) lauks augšējā (a) un apakšējā spraugā starp logu un ārsienu telpā ar spiedienu starpību 2 Pa.

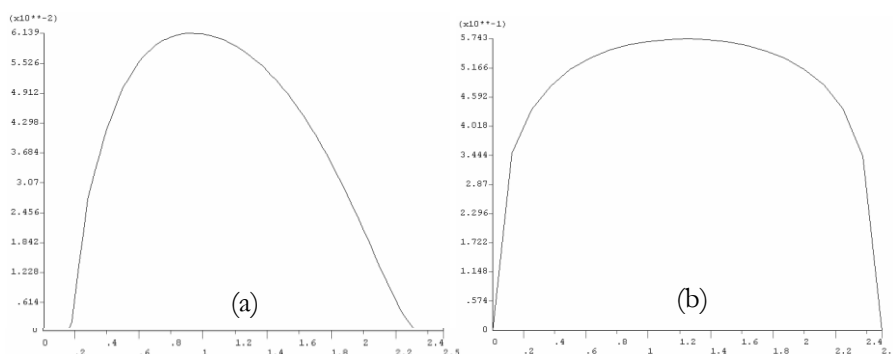


Attēls 4.30. Ātruma vektoru (m s^{-1}) lauks augšējā spraugā starp logu un ārsienu (a) un ventilācijas atverē (b) telpā ar spiedienu starpību 0 Pa.



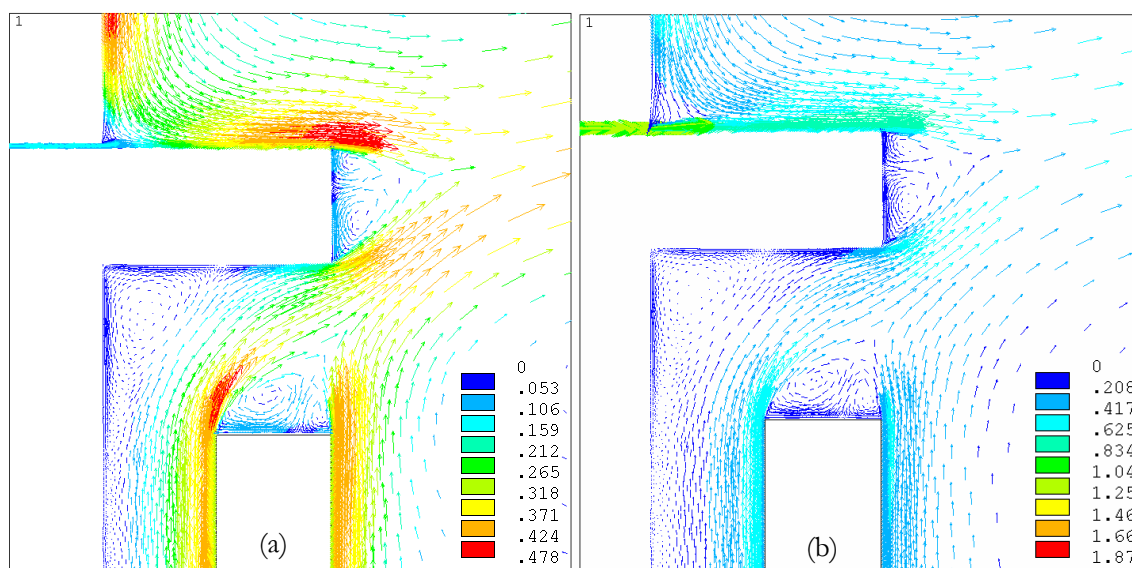
Attēls 4.31. Ātruma vektoru (m s^{-1}) lauks augšējā spraugā starp logu un ārsienu (a) un ventilācijas atverē (b) telpā ar spiedienu starpību 2 Pa.

Palielinoties gaisa plūsmas intensitātei, mainās arī tās raksturs, un vietās, kur ir lielākie kustības ātrumi (piem., spraugās), var novērot pāreju no laminārā uz turbulento plūsmas režīmu. Attēlā 4.32 parādīti ātruma profili ventilācijas atverē abos apskatītos variantos. Kā var redzēt, pie nelielas plūsmas variantā 2D-G4-1 ātrumu sadalījums ir tuvs paraboliskam, jo plūsmas raksturs ir laminārs. Savukārt, variantā 2D-G4-2 gaisa kustības ātrums ir palielinājies par kārtu līdz 60 cm sekundē, kā rezultātā profils būtiski mainās un atbilst turbulentam gadījumam (Incropera, DeWitt, 2002). Novērtējot Reinoldsa skaitli abos gadījumos pēc sakarības (4.15), pirmajā variantā iegūstam $Re \approx 900$, bet otrajā $Re \approx 9000$, kas attiecīgi atbilst lamināram un turbulentam plūsmas raksturam.



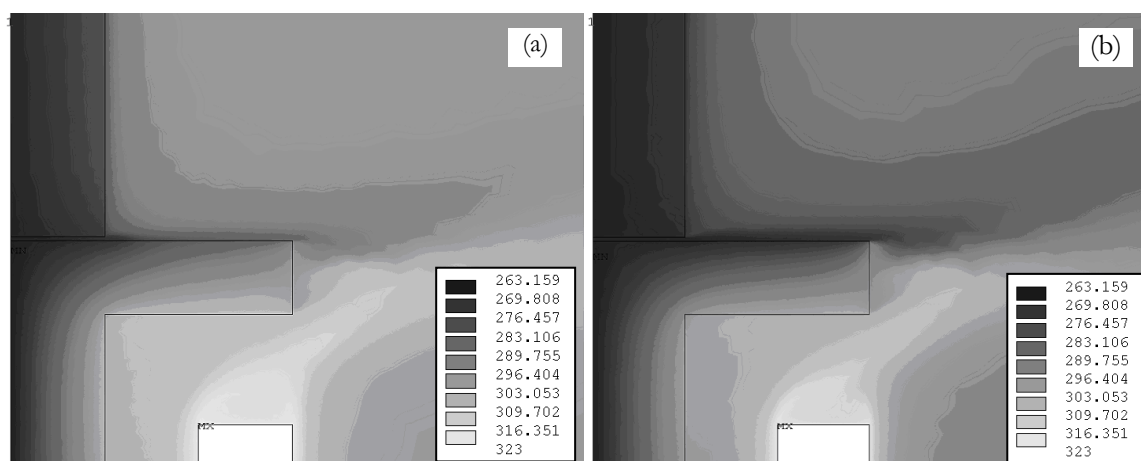
Attēls 4.32. Ātruma (m s^{-1}) profils ventilācijas atverē telpā ar spiedienu starpību 0 Pa (a) un 2 Pa (b).

Gaisa cirkulācija konvektora augšējā daļā un palodzes tuvumā parādīta attēlā 4.33. Kā redzams, kvalitatīvi kustības raksturs nav būtiski mainījies, tajā pat laikā absolūtās plūsmas vērtības būtiski pieaug. Tas palielina no sildītāja virsmas aizvadīto siltuma daudzumu un ietekmē siltuma bilances rādītājus, kas ir detalizēti apskatīti nākamajā sadaļā, tomēr lielu konvektīvo siltuma zudumu dēļ temperatūras līmenis telpā nepaaugstinās.

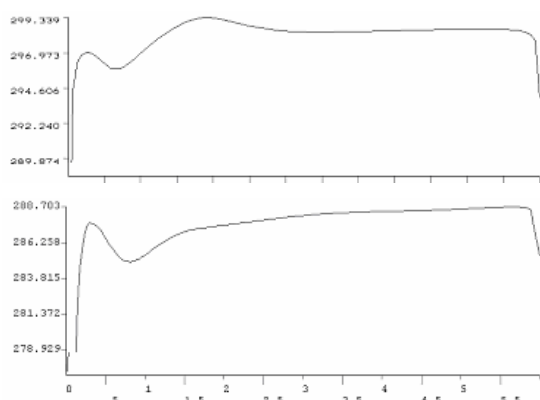


Attēls 4.33. Ātruma vektoru (m s^{-1}) lauks sildītāja augšējā daļā telpā ar spiedienu starpību 0 Pa (a) un 2 Pa (b).

Attēlā 4.34 parādīts temperatūras lauks virs palodzes, pazeminātās tā vērtības izraisa aukstā ārgaisa ieplūde caur spraugu, būtiski intensificējusies gaisa pūsma ir aprēķinu variantā ar 2 Pa spiedienu starpību. Kā redzams, otrajā gadījumā raksturīgās temperatūras ir pazeminājušās par 5-8 grādiem salīdzinot ar variantu bez spiedienu starpības. Līdz ar to pieaug arī konvektīvie siltuma zudumi, kas pamatā nosaka arī visas telpas temperatūras pazemināšanos. Tās horizontālais profils pa telpas viduslīniju no loga līdz kāpņu telpas sienai abiem apskatītiem variantiem parādīts attēlā 4.35. Vidējā telpas temperatūra aprēķinam ar 0 Pa spiedienu starpību salīdzinājumā ar iepriekšējo variantu 2D-G3-1 bez gaisa apmaiņas ir palikusi nemainīga – 25...26 °C līmenī. Ietekme nav konstatēta, jo gaisa apmaiņas intensitāte termogravitācijas dēļ ir neliela. Savukārt, ja starp telpas pretējām sienām ir uzdots spiedienu starpība 2 Pa, telpas vidēja temperatūra intensīvo gaisa plūsmu dēļ ievērojami samazinās un sastāda tikai 15 °C, kas atrodas ārpus cilvēka termiskā komforta apstākļu robežām. To nosaka aukstā ārgaisa ieplūde un atbilstoši siltā iekštelpas gaisa masu izplūde pa ventilācijas atveri. Tā kā konvektora virsmas temperatūra šajos variantos netika mainīta (50 °C), bet telpas temperatūra ir būtiski samazinājusies, redzams tieši konvektīvo siltuma zudumu ievērojamais ieguldījums kopējā siltuma bilancē.



Attēls 4.34. Temperatūras (°C) sadalījums sildītāja augšējā daļā telpā ar spiedienu starpību 0 Pa (a) un 2 Pa (b).



Attēls 4.35. Temperatūras (K) sadalījums pa telpas horizontālo viduslīniju no loga uz kāpņu telpas sienu telpā ar spiedienu starpību 0 Pa (augšā) un 2 Pa (apakšā).

Gaisa plūsmu un temperatūras sadalījuma aprēķini ar programmatūras ANSYS/FLOTRAN (Ansys Inc., 1999) palīdzību tika veikti iteratīvi un procesa konverģence bija lielā mērā atkarīga no sākuma un robežnosacījumiem. Tā, noslēgtai telpai aprēķini uz datora ar 1,3 GHz procesoru ilga no 20 līdz 50 stundām. Savukārt, pēdējo divu apskatīto modelēšanas variantu aprēķinos tika iekļauta konvektīvā gaisa apmaiņa ar attiecīgiem robežnosacījumiem, kas būtiski ietekmē konverģences procesu – tas kļūst nemonotons un konverģences kritēriju izpildīšanās grūti sasniedzama. Atkarībā no spiedienu starpības aprēķina ilgums uz minētās datorsistēmas pārsniedza 50 stundas. Lai palielinātu aprēķinu procesa konverģences ātrumu, tika lietoti divi sākuma tuvinājumi:

- gaiss tika aizstāts ar lielākas viskozitātes gāzi, bet vēlāk iegūtie rezultāti tika izmantoti par sākuma tuvinājumu aprēķiniem ar gaisu;
- telpai ar 2 Pa spiedienu starpību par sākuma tuvinājumiem tika izmantoti rezultāti temperatūras un gaisa plūsmu sadalījumiem no varianta bez spiedienu starpības.

Nākošajā nodaļā analizēsīm visu apskatīto 2D modeļa variantu siltuma bilances rezultātus, kas ir ne tikai konkrētās telpas, bet arī visas ēkas energoefektivitātes rādītājs, kā arī veiksīm ģeometrisku un fizikālo īpašību salīdzinošu analīzi ar mērķi optimizēt siltuma zudumus un samazināt apkures izmaksas, tajā pat laikā būtiski nepasliktinot, bet, ja iespējams, uzlabojot termiskā komforta apstākļus.

4.3.5. Variantu salīdzinošā analīze

Telpas siltuma zudumu analīzei un veikto aprēķinu rezultātu kontrolei apskatīsim modelējamās telpas siltuma bilanci un salīdzināsim siltuma daudzumu, kas tiek pievadīts telpai no apkures sistēmas sildķermeņa, ar siltuma plūsmu caur norobežojošām konstrukcijām. Variantiem bez atverēm, pa kurām var ieplūst vai izplūst gaiss, siltuma apmaiņa ar ārpusi notiek tikai vadīšanas ceļā, bet variantiem ar konvektīvo gaisa apmaiņu ir jāievēro arī siltuma daudzums, kas tiek pārnestas gaisa masu pārvietošanās rezultātā. Apskatītā bilance kalpo arī telpas siltuma patēriņa optimizācijai, kā arī lielāko zudumu zonu un veidu noteikšanai.

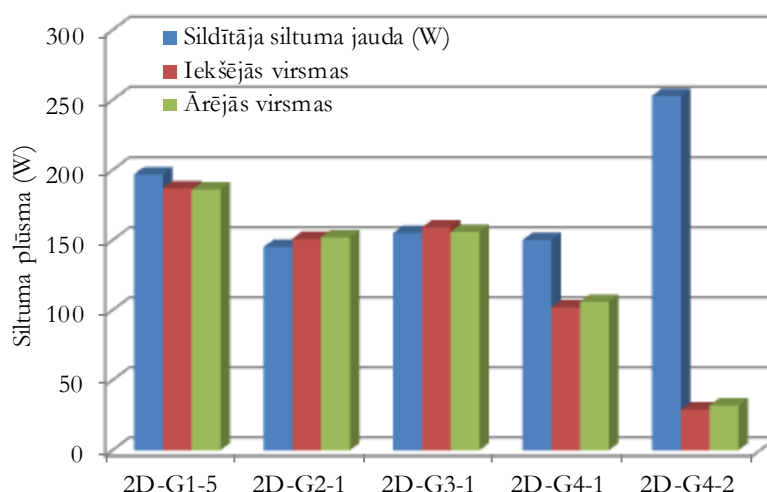
Apskatot variantus ar ģeometrijām 2D-G1, 2D-G2 un 2D-G3, siltuma apmaiņa ar apkārtējo vidi notiek tikai vadīšanas ceļā, tāpēc rezultātu salīdzināšanai izmantosim siltuma daudzumu no konvektora virsmas (pie uzdotās temperatūras T) un temperatūras uz telpas ārējām virsmām. Zinot tās, kā arī uzdotos siltuma atdeves koeficientus α un temperatūras ārpus termiskā robežslāņa T_∞ , var aprēķināt atbilstošās siltuma plūsmas no virsmām. Gadījumā, ja cita veida siltuma pārneses caur norobežojošām konstrukcijām nav un telpā nav citu siltuma avotu, tad šiem lielumiem ir jābūt vienādiem. Papildus kontrolei tika izmantotas arī plūsmas uz sienu iekšējām virsmām. Visu minēto siltuma plūsmu datu salīdzinājums dažos raksturīgos modelēšanas variantos ir apkopots tabulā 4.9,

bet grafiski parādīts attēlā 4.36. Kā var redzēt, apskatītajos noslēgtās telpas variantos visi trīs siltuma daudzumi ir aptuveni vienādi, neprecizitātes ir saistītas ar nepietiekamu robežslāņu diskretizāciju, īpaši sildītāja, tuvumā. Pie vienādas sildītāja temperatūras atšķirīgos telpai pievadītos siltuma daudzumus dažādos aprēķinu variantos nosaka temperatūras režīms tā tuvumā.

Gadījumā, ja tiek apskatīti modeļa varianti ar atverēm norobežojošās konstrukcijās (2D-G4-1 un 2D-G4-2), tikai siltuma plūsmas kontrole no virsmām var būt nepietiekama, ko apstiprina tabulā 4.9 un attēlā 4.36 parādītie rezultāti. Kā redzams, pie spiedienu starpības 0 Pa, konvekcijas ceļā aizplūstošais siltuma daudzums nav tik liels (starpība starp no sildītāja izdalīto siltuma plūsmu un no telpas virsmām atdoto), kā gadījumā ar spiedienu starpību 2 Pa, kad konvekcijas ceļā aizplūstošais siltuma daudzums ir daudz lielāks nekā siltuma vadīšanas zudumi.

Tabula 4.9. Integrālie vadīšanas siltuma daudzumi (neievērojot konvektīvos zudumus).

Aprēķinu variants	Siltuma plūsma (W)			Telpas raksturīgā vidējā temperatūra (°C)	Raksturīgs vidējais ātrums telpas vidusdaļā (m s ⁻¹)
	Sildītājs	Iekšējās virsmas	Ārējās virsmas		
2D-G1-5	197	187	186	22	0,5
2D-G2-1	145	151	152	25	0,3
2D-G3-1	155	159	156	26	0,3
2D-G4-1	150	102	106	25	0,4
2D-G4-2	253	29	32	15	0,5



Attēls 4.36. Integrālās vadīšanas siltuma plūsmas (neievērojot konvektīvos zudumus).

Lai ievērotu konvekcijas siltuma zudumus, nepieciešams kontrolēt gaisa plūsmas caur atverēm norobežojošās konstrukcijās. Pirmkārt, ieplūstošai un izplūstošai gaisa plūsmām jābūt vienādām, jo

apskatāmais process ir stacionārs un telpas iekšpusē nav citas gaisa pieplūdes/noplūdes, t.i., ir jāizpildās vielas saglabāšanās likumam. Otrkārt, siltuma daudzumam, kas tiek pārvietots ar šādu gaisa plūsmu, jābūt vienādam ar starpību starp no konvektora izdalīto siltuma daudzumu un siltuma vadīšanas ceļā izplūstošo caur norobežojošām konstrukcijām. Tādā veidā viss no sildķermeņa telpai pievadītais siltuma daudzums ir vienāds ar telpas konvektīvajām un vadīšanas siltuma zudumiem.

Konvektīvās siltuma apmaiņas novērtēšanai noteiksim gaisa plūsmu V' caur esošām atverēm telpas norobežojošās konstrukcijās. Mūsu gadījumā apgabals tiek diskretizēts, tāpēc integrālās sakarības $V' = \int \vec{v} d\vec{S}$ vietā aprēķinam izmantosim vienkāršotu skaitliskās integrēšanas sakarību, pielietojot trapeču formulu:

$$V' = \sum v_i \cdot \Delta l = \sum \frac{(v_i + v_{i+1})}{2} \Delta l = \frac{\Delta l}{2} \sum (v_i + v_{i+1}), \quad (4.27)$$

kur v_i – ātruma vienā punktā, Δl – elementa izmērs.

Tabulā 4.10 ir apkopotas plūsmas V' skaitliskās vērtības visām atverēm telpas norobežojošās konstrukcijās un atbilstošās siltuma plūsmas Q konvekcijas ceļā tie tiek aprēķinātas pēc sakarības

$$Q = V' \cdot c \cdot \rho \cdot \Delta T, \quad (4.28)$$

kur c un ρ attiecīgi ir gaisa siltuma ietilpība un blīvums, bet ΔT – temperatūru starpība starp atverēm pretējās telpas pusēs. Ir redzams, ka variantā bez spiedienu starpības konvektīvai siltuma pārnei nav noteicoša loma, bet variantā ar 2 Pa spiedienu starpību konvektīvais siltuma daudzums ir gandrīz par kārtu lielāks par siltuma vadīšanas zudumiem (skat. tabulu 4.9). Šāda situācija ir bieži novērojama arī ēkās ar vecajiem koka logiem, kad eksperimentāli noteiktā (skat. sadaļu 2.3) gaisa apmaiņa vairākārt pārsniedz normatīvo lielumu un tādējādi izsauc nepamatoti lielus siltuma zudumus caur neblīvām vietām ēkas čaulā, kas pieaug līdz ar spiedienu starpības pieaugumu.

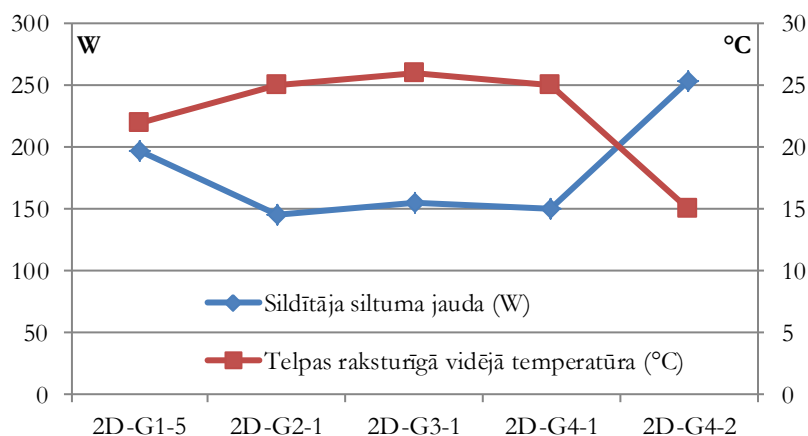
Tabula 4.10. Gaisa plūsmas un atbilstošie pārnēstie siltuma daudzumi dažādu spiedienu starpības variantos.

Aprēķinu variants	Spiedienu starpība, Pa	Gaisa plūsma, m ³ h ⁻¹	Siltuma plūsma, W
2D-G4-1	0	3,24	23
2D-G4-2	2	39,6	268

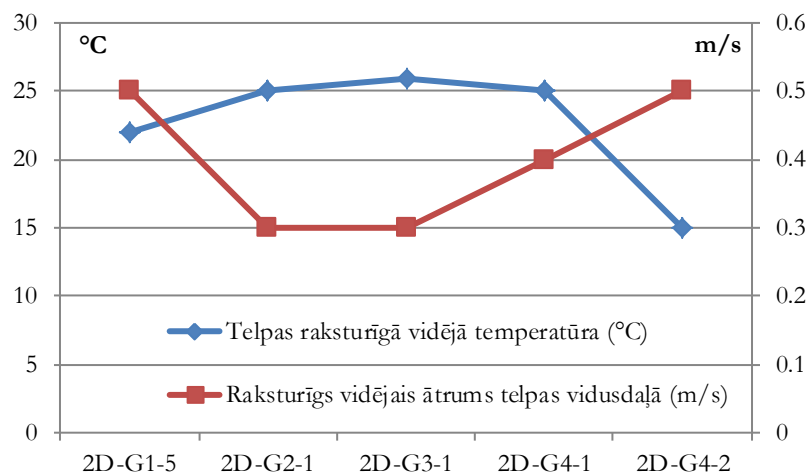
Ja konvekcijas ceļā tiek zaudēta liela enerģijas daļa, tad telpas temperatūru nosaka ne siltuma vadīšanas zudumi, kā noslēgtai telpai, bet pārsvarā konvektīvie siltuma zudumi. Dažu raksturīgāko apskatīto modelēšanas variantu telpas vidējā temperatūra un tai atbilstošais no sildītāja izdalītais siltuma daudzums ir redzami tabulā 4.9 un grafiski atspoguļoti attēlā 4.37. Kā redzams, gadījumā, kad ir ievērojami siltuma zudumi konvekcijas ceļā (variants 2D-G4-2), neskatoties uz to, ka no

konvektora izdalītais siltuma daudzums pie uzdotas tā virsmas temperatūras ir ievērojami lielāks, temperatūra telpā ir būtiski samazinājusies. Tāpēc tieši pēdējais no modelētiem variantiem ir enerģētiski visneizdevīgākais.

Salīdzinot tabulā 4.9 minētos variantus no cilvēka termiskā komforta apstākļu viedokļa, apskatīsim divu svarīgāko parametru – „dzīvojamās zonas” raksturīgās temperatūras un gaisa kustības ātrumus, kas ir parādīti attēlos 4.37 un 4.38. Pirmajā no tiem var redzēt, ka nepieņemama zema temperatūra (15 °C) ir novērota tikai variantā ar 2 Pa zemspiedienu un intensīvu gaisa cirkulāciju, bet citos variantos tās vērtības ir aptuveni vienādas, kas norāda uz to, ka citu faktoru ietekme uz šo parametru ir mazāka. Īpaši var atzīmēt, ka palodzes izveide noved pie vidējā telpas temperatūra pieauguma, tajā pat laikā ievērojami samazinās apkures jauda, tāpēc šāds risinājums var tikt lietots telpas energoefektivitātes rādītāju uzlabošanai, bet var radīt kondensāta problēmu loga apakšdaļā.



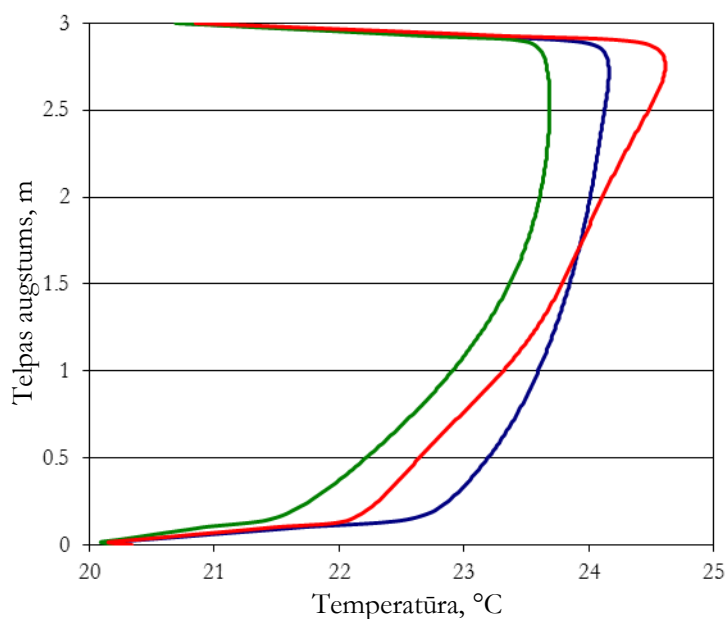
Attēls 4.37. Konvektora siltuma jaudas un telpas raksturīgās temperatūras salīdzinājums.



Attēls 4.38. Vidējā ātruma un telpas raksturīgās temperatūras salīdzinājums.

Salīdzinot gaisa plūsmas telpā (attēls 4.38), raksturīgais ātrums atrodas diapazonā 30...50 centimetrus sekundē, kas nav pieņemami, bet tā absolūta vērtība var būt atkarīga no vairākiem parametriem, kas vienkāršotajā modeli nav iekļauti (piem., aizkari, kas aizkavē tiešo plūsmu no loga vai mēbeles, kas mehāniski nobremzē gaisa kustību). Tomēr ir svarīgi atzīmēt tādas novērotās tendences kā ātruma samazinājumu, virs konvektora novietojot palodzi un tā pieaugumu, telpā ieplūstot ārgaisam.

Kā vēl vienu komforta apstākļus ietekmējošo rādītāju apskatīsim vertikālo temperatūru starpību telpā. Raksturīgie piemēri temperatūras sadalījumam pa telpas vertikālo viduslīniju ir parādīti attēlā 4.39. Kā redzams, lielākais temperatūras kritums (4-5 grādi) ir griestu un grīdas ar zemāku temperatūru tiešā tuvumā (temperatūras robežslānis), ko nosaka uzdotā temperatūra blakus telpās (20 °C) un pielipšanas nosacījumi uz virsmām. Savukārt, tālāk no virsmām un telpas „dzīvojamās zonās” iekšienē gaisa temperatūras atšķirības nepārsniedz 1-2 grādus, kas pilnīgi apmierina komforta prasības.

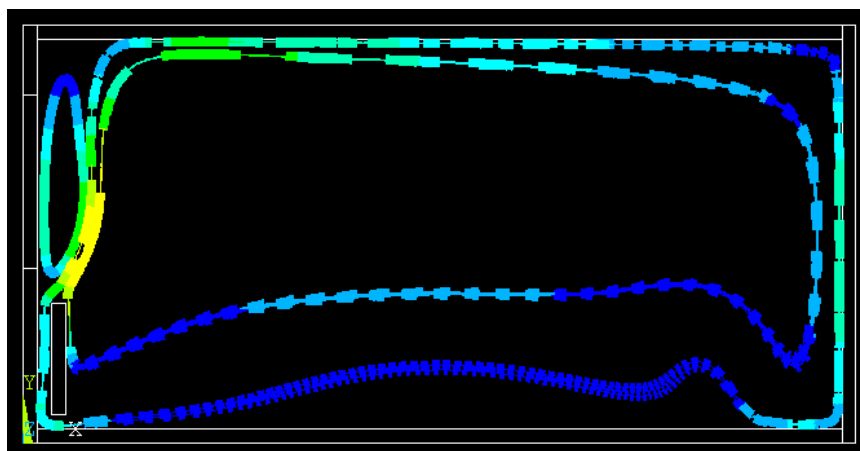


Attēls 4.39. Vertikālais temperatūras sadalījums pa telpas augstumu dažādās telpas vietās.

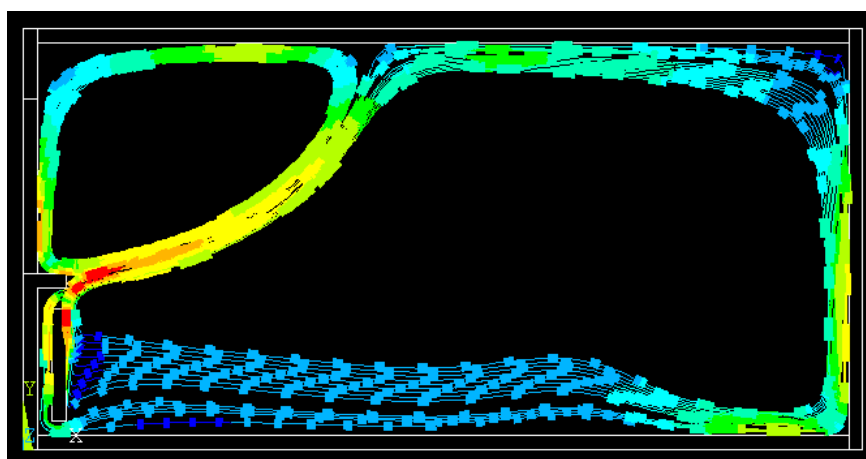
Lai demonstrētu gaisa plūsmu ainu dzīvojamā telpā pie atšķirīgiem nosacījumiem, attēlosim gaisa molekulu kustības trajektorijas 3 raksturīgiem variantiem:

- noslēgtai telpai bez palodzes, variants 2D-G1-4 (attēls 4.40);
- noslēgtai telpai ar palodzi līdz sildītāja malai, variants 2D-G3-1 (attēls 4.41);
- nenoslēgtai telpai ar 2 Pa pārspiedienu ārā, variants 2D-G4-2 (attēls 4.42).

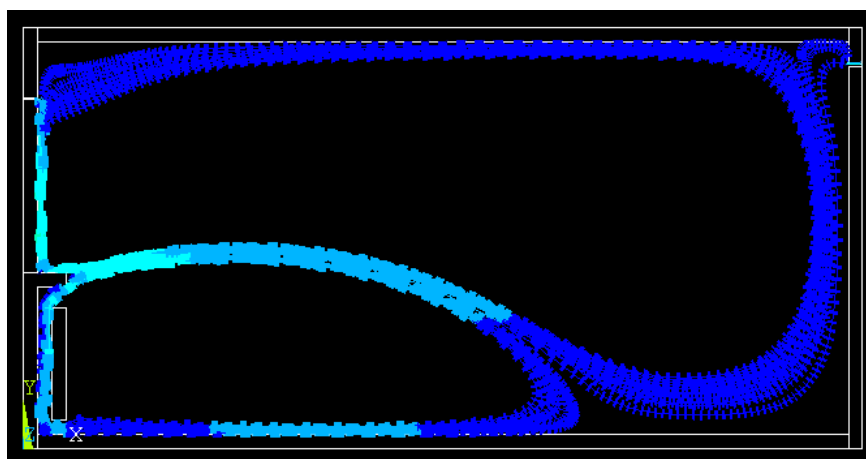
No šiem attēliem ir labi redzams, ka telpā praktiski vienmēr pastāv divi virpuļi, starp kuriem notiek intensīva siltuma apmaiņa. To lielums un izvietojums telpā katrā no variantiem ir atkarīgs kā no ģeometriskajiem parametriem (palodze), tā arī no robežnosacījumiem (gaisa ieplūde pa spraugām).



Attēls 4.40. Gaisa cirkulācija telpā bez palodzes (variants 2D-G1-4).



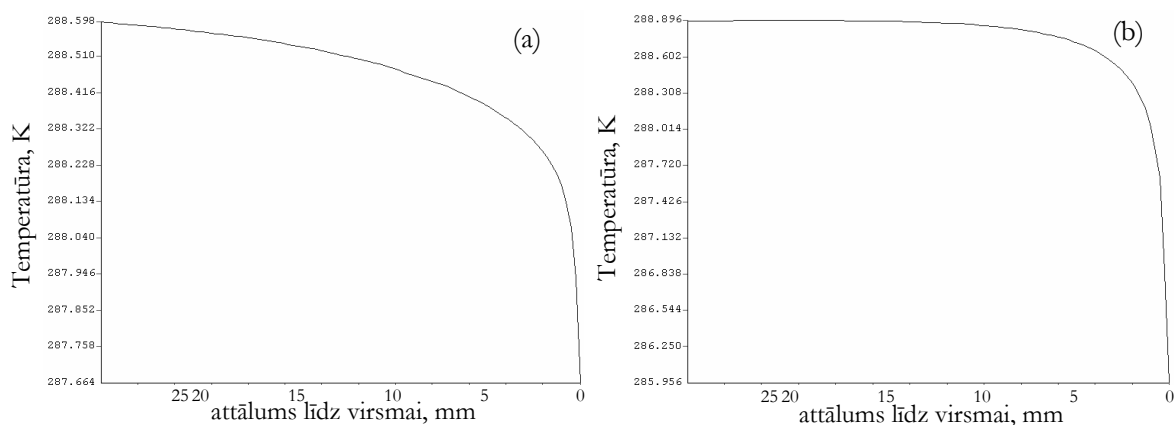
Attēls 4.41. Gaisa cirkulācija telpā ar palodzi (variants 2D-G3-1).



Attēls 4.42. Gaisa cirkulācija nenoslēgtā telpā ar 2Pa zemspiedienu (variants 2D-G4-1).

Tā, pirmajā gadījumā (attēls 4.40) praktiski visā telpas „dzīvojamā zonā” dominē lielais virpulis, kuru uztur gaisa uzsīšana virs konvektora un atdzišana pie kāpņu telpas sienas. Otrajā gadījumā palodze kā mehāniskā barjera ietekmē gaisa kustības virzienus un virpuļu proporcija mainās – tagad to saskares fronte atrodas dziļāk telpā (attēls 4.41). Savukārt, variantā ar 2 Pa zemspiedienu gaisa plūsmu raksturu faktiski nosaka intensīvā aukstā gaisa ieplūde pa spraugām ārsienā (attēls 4.42), kā rezultātā pieaug arī vidējais gaisa kustības ātrums „dzīvojamā zonā”.

Pie atšķirīga gaisa cirkulācijas rakstura telpā mainās arī siltuma atdeves nosacījumi no norobežojošo konstrukciju iekšējām virsmām (atšķirībā no ārējām virsmām, kur siltuma atdeve tiek uzdota). Jo intensīvāka ir gaisa plūsma gar virsmu, jo plānāks robežslānis veidojas un notiek aktīvāka siltuma apmaiņa. Piemēri temperatūras sadalījumam pie virsmas nelielu gaisa ātrumu un to palielināšanas gadījumā parādīti attēlā 4.43. Kā redzams, temperatūras robežslāņa biezums intensīvas gaisa kustības rezultātā stipri samazinās.



Attēls 4.43. Temperatūras profils sienas tuvumā dažādos gaisa cirkulācijas režīmos: (a) – nelielas plūsmas gadījumā, (b) – intensīvās kustības gadījumā.

Līdz šim apskatītie 2D modeļi ir tikai pirmais tuvinājums dzīvojamās telpas siltuma apmaiņas procesu modelēšanā, kas ļauj kvalitatīvi novērtēt dažādu ģeometrisko un fizikālo parametru ietekmi uz temperatūras un gaisa plūsmu laukiem. Nākamais solis ir apskatītās telpas telpiskā modeļa izveide, kura ietvaros varētu detalizētāk pētīt fizikālos procesus ar mērķi optimizēt apkures siltuma vajadzību, tādējādi uzlabojot telpas un visas ēkas energoefektivitāti, tajā pat laikā nepasliktinot cilvēka komforta apstākļus tajā. Veidojot telpas 3D modeļi, ir iespējams korekti ievērot arī spraugu ap logu, ventilācijas atveres un sildītāja ģeometriskos izmērus un to telpisko izvietojumu, kas ļauj precīzāk novērtēt arī kvantitatīvos energopatēriņa rādītājus.

Tāpat ir nepieciešama arī trešā veida siltuma pārneses – starojuma ietekmes ievērošana, jo visos līdz šim apskatītajos 2D modeļa variantos tika pētīta tikai siltuma vadīšanas un konvekcijas siltuma pārneses, bet netika ievēroti starojuma siltuma avoti un zudumi: starojums nosaka gan Saules

radiācijas enerģijas pieplūdi telpā, gan arī izmaina siltuma atdevi no siltajiem ķermeņiem (elektriskās ierīces, sildķermeņi, cilvēki u.c.). Tāpēc šāda veida pārnese var būt būtiska un ir nepieciešams novērtēt tās lomu telpas siltuma bilancē, ko detalizēti apskatīsim nākamajā sadaļā, veidojot telpas 3D modeļa variantus.

4.4.3D modeļi

Aprakstāmās telpas 3D modeļa izveide, aprēķini un iegūto rezultātu analīze tika veikta ar programmatūras ANSYS/CFX (Ansys Inc., 2005) palīdzību, kas tika darbināta uz datora ar 3 GHz procesoru un viena varianta aprēķiniem nepieciešamais laiks ilga līdz pat 3 diennaktīm. Atšķirībā no iepriekš apskatītā 2D modeļa, turbulences modelēšanai tika izmantots SST modelis, bet atsevišķu variantu aprēķinos starojuma siltuma pārneses modelēšanai aktivizēts Montekarlo modelis. Pirmie no 3D modeļa variantiem ir veidoti analogiski dažiem iepriekš apskatītajiem 2D aprēķiniem, bet vēlāk tika variēti arī citi ģeometriskie un fizikālie faktori un novērtēta to ietekme uz telpas siltuma bilanci un komforta apstākļi tajā. Atsevišķi tika veikta detalizēta solārā starojuma lomas analīze.

Izveidotās 3D modeļa ģeometrijas nosacīti iedalīsim divās lielās grupās – bez radiācijas siltuma starojuma modelēšanas un ar tādu. Pirmajā izdalīsim sekojošas ģeometrijas un aprēķinu variantus, ko apskatīsim detalizēti:

- 3D-G1. Bāzes ģeometrija (attēli 4.10, 4.44a), kas tiek ņemta par pamatu visiem tālāk veidotiem ģeometrijas variantiem. Telpa, kurā pa loga perimetru eksistē sprauga, bet pretējā sienā – ventilācijas atvere, tādējādi atkarībā no uzdotās spiedienu starpības Δp un tās virziena (pārspiediens vai zemspiediens) notiek konvektīvā gaisa apmaiņa. Šī varianta ģeometrija ir analogiska pēdējiem no apskatītiem 2D modeļiem ar ģeometriju 2D-G4, bet tajā ir iekļauts arī pretēji vērsts spiedienu gradients (pārspiediens telpā). Atkarībā no spiedienu starpības aprēķinu variantus apzīmēsim sekojoši:
 - 3D-G1-1 bez spiedienu starpības ($\Delta p=0$ Pa);
 - 3D-G1-2 ar pārspiedienu telpā ($\Delta p=1$ Pa);
 - 3D-G1-3 ar zemspiedienu telpā ($\Delta p=-1$ Pa).
- 3D-G2. Ģeometrija bez palodzes (attēls 4.44b). Šis variants ir analogisks iepriekš apskatītajai ģeometrijai 2D-G1, tikai ar atverēm konstrukcijās, uz kurām uzdotā spiedienu starpība ir 0 Pa. Aprēķinu variantu apzīmēsim ar 3D-G2-1.
- 3D-G3. Ģeometrija ar izmainītu sildķermeņa novietojumu – tas ir novietots nevis zem loga, kā tas ir tradicionāli, bet pie pretējās iekšsienas uz kāpņu telpu (attēls 4.44c). Šāds sildītāja novietojums ir sastopams dažās jaunās ēkās, bet tajās ir konstatētas ar termiskā komforta

apstākļu nodrošināšanu saistītas problēmas. Šai ģeometrijai tika veikti 3 aprēķini ar dažādiem spiedienu apstākļiem telpā, atbilstošos variantus apzīmēsim šādi:

- 3D-G3-1 bez spiedienu starpības ($\Delta p=0$ Pa);
 - 3D-G3-2 ar pārspiedienu telpā ($\Delta p=1$ Pa);
 - 3D-G3-3 ar zemspiedienu telpā ($\Delta p=-1$ Pa).
- 3D-G4. Ģeometrija ar pie sānu sienas novietoto sildītāju (attēls 4.44d), kas ēkās ir sastopams retāk. Apskatītais variants bez spiedienu starpības tiek apzīmēts 3D-G4-1.
 - 3D-G5. Ģeometrija ar alternatīvo apkures sistēmu – t.s. „sildo grīdu” (attēls 4.44e), kas mūsdienās kļūst populāra ne tikai vannas istabās un gaitenēs, bet arī dzīvojamās telpās. Tā var nodrošināt no termiskā komforta viedokļa labāku temperatūras sadalījumu telpā (skat. zemāk) un tās darbībai nav nepieciešamas tik augstas temperatūras kā centrālās ūdens apkures sistēmas gadījumā. Kopumā tika apskatīti 3 varianti ar atšķirīgiem spiedienu nosacījumiem:
 - 3D-G5-1 bez spiedienu starpības ($\Delta p=0$ Pa);
 - 3D-G5-2 ar pārspiedienu telpā ($\Delta p=1$ Pa);
 - 3D-G5-3 ar zemspiedienu telpā ($\Delta p=-1$ Pa).

Ģeometriju variantiem 3D-G1, 3D-G3 un 3D-G5 ir izvēlēti 3 aprēķinu apakšgadījumi ar atšķirīgiem spiedienu starpības apstākļiem, jo tie ir bieži sastopami ēkās un to detalizētāka modelēšana ļaus precīzāk novērtēt situāciju reālos apstākļos, analizēt energoefektivitāti un optimizēt to noteicošos faktorus.

Otrajā lielajā aprēķinu grupā ietilpst 3D modeļa varianti, kas ietver starojuma (radiācijas) siltuma pārnesi. Uzdotais solārā starojuma siltuma plūsmas blīvums atbilstoši eksperimentālos mērījumos noteiktajām vērtībām (skat. sadaļu 2.4) tika uzdots 500 W m^{-2} . Tiek izmantotas divas ģeometrijas:

- 3D-G6. Bāzes modelim analogiska ģeometrija, bet bez palodzes un atverēm norobežojošās konstrukcijās, tātad bez konvektīvās siltuma apmaiņas ievērošanas (attēls 4.44f). Šādā veidā tiek objektīvi analizēta tikai ar starojumu saistīto faktoru ietekme uz siltuma apmaiņas procesiem telpā un fizikālo lauku sadalījumiem tajā. Pirmkārt, tiek novērtēts, cik liela loma kopējā siltuma bilancē ir starojuma siltuma pārnesi, tamdēļ pirmajā modeļa variantā starojuma siltuma pārnese netiek ievērota, bet otrajā tās ievērošanai tiek izmantota Montekarlo metode. Nākamajā solī tiek ieviests papildus siltuma avots – Saule, kuras starojuma krišanas leņķis uz loga virsmas tiek variēts no 60° līdz 30° virs horizonta (tas atbilst Latvijas klimatiskajiem apstākļiem pavasara/vasaras dienās). Visbeidzot, tiek

modelēta situācija, kad apkures sistēma telpā ir izslēgta, bet solārās radiācijas avots eksistē un nodrošina siltuma enerģijas pieplūdi. Atbilstošie aprēķinu varianti tiek apzīmēti sekojoši:

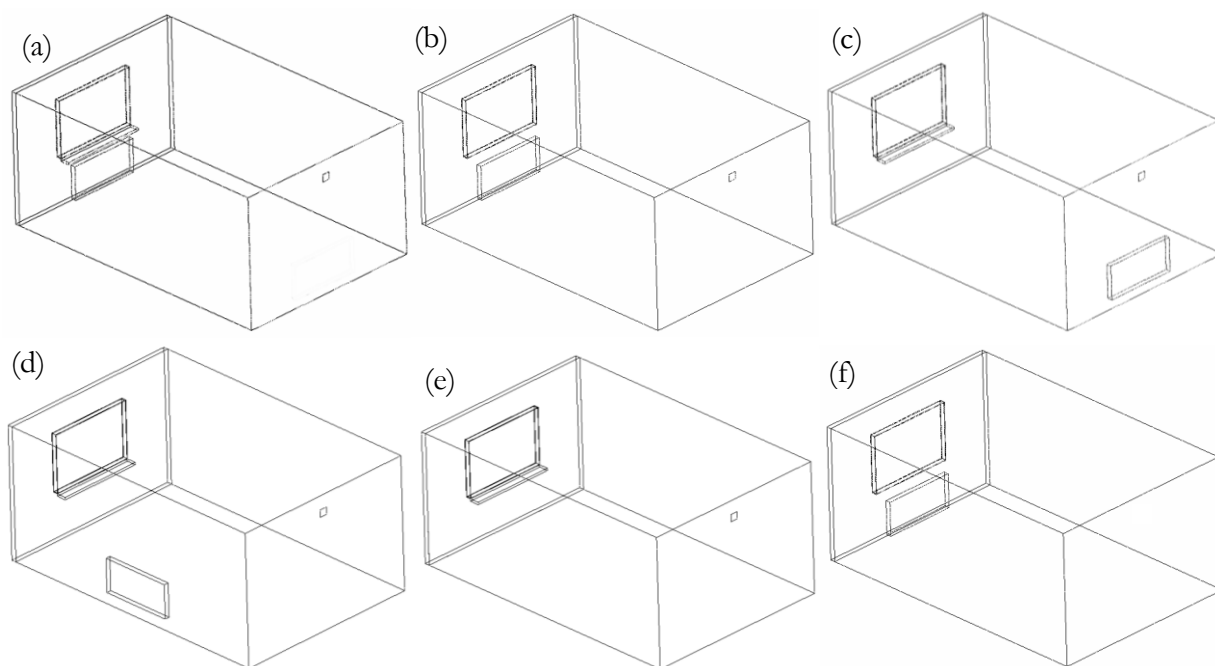
- 3D-G6-1 – aprēķins bez starojuma siltuma pārneses ievērošanas;
 - 3D-G6-2 – aprēķins ar starojuma modeļa aktivizēšanu. Tas ļauj ievērot siltuma daudzumu, ko papildus izdalās no karstās sildītāja virsmas un izplūst arī pa caurspīdīgo logu. Citu starojuma avotu nav;
 - 3D-G6-3 – variants ar solārā siltuma avota (Saules starojuma caur logu) ievērošanu. Krišanas leņķis uzdots vienāds ar 60° virs horizonta;
 - 3D-G6-4 – variants ar solārā siltuma avota krišanas leņķi 45° ;
 - 3D-G6-5 – variants ar solārā siltuma avota krišanas leņķi 30° ;
 - 3D-G6-6 – aprēķins ar solāro siltuma avotu 45° leņķī, bet ar izslēgtu apkures sistēmas sildķermeni, uz kura virsmas ir uzdoti adiabātiskie nosacījumi (nav siltuma apmaiņas). Šāda situācija atbilst saulainai ziemas dienai telpā bez apkures.
- 3D-G7. Ģeometrija, kas sakrīt ar 3D-G2 (attēls 4.44b), no 3D-G6 atšķiras tikai ar 1cm platu spraugu gar loga perimetru un ventilācijas atveri ar izmēru $15 \times 15 \text{ cm}^2$. Ar tās palīdzību ir veikti aprēķinu varianti dažādiem spiedienu starpības gadījumiem:
 - 3D-G7-1 bez spiedienu starpības ($\Delta p=0 \text{ Pa}$);
 - 3D-G7-2 ar pārspiedienu telpā ($\Delta p=1 \text{ Pa}$);
 - 3D-G7-3 ar zemspiedienu telpā ($\Delta p=-1 \text{ Pa}$).

Visu 3D modeļu aprēķinu variantu apzīmējumi, to galvenās atšķirības (spiedienu nosacījumi, sildķermeņa novietojums un temperatūra, palodzes esamība un solārās radiācijas krišanas leņķis) ir apkopotas tabulā 4.11, bet atšķirīgo ģeometrisko modeļu skices ir parādītas attēlā 4.44. Kā redzams no attēla, praktiski visu variantu ģeometrijas ir simetriskas pret telpas vertikālo vidusplakni (izņemot 3D-G4-1), tāpēc atbilstošos aprēķinos tika modelēta tikai viena puse, pielietojot attiecīgo simetrijas nosacījumu, kas ļāva samazināt skaitļošanas resursus un aprēķiniem nepieciešamo laiku.

Aprēķinos iegūto svarīgāko rezultātu apkopojums visiem apskatītajiem variantiem ir sniegts tabulā 4.12, kurā ir apkopoti gan energoefektivitāti, gan termiskā komforta apstākļus noteicošo faktoru skaitliskās vērtības. Apskatīsim katru no ģeometriju variantiem detalizēti, lai raksturotu tā īpatnības un objektīvi noteiktu mainīgā parametra ietekmi uz fizikāliem procesiem telpā. Vēlāk, salīdzinot visus variantus, parādīsim iespējas vienas telpas siltuma zudumu optimizēšanai, kas ļauj novērtēt un uzlabot arī visas ēkas energoefektivitāti.

Tabula 4.11. 3D modeļu atšķirīgo parametru apkopojums (skat. arī attēlu 4.44).

Aprēķinu variants	Spiedienu starpība, Pa	Sildķermeņa novietojums/ tā temperatūra, °C	Palodze	Radiācijas modelis/Saules avota krišanas leņķis, °
3D-G1-1	0	pie ārsienas/50	+	-/-
3D-G1-2	1 (pārspiediens)	pie ārsienas/50	+	-/-
3D-G1-3	-1 (zemspiediens)	pie ārsienas/50	+	-/-
3D-G2-1	0	pie ārsienas/50	-	-/-
3D-G3-1	0	pie kāpņu telpas sienas/50	+	-/-
3D-G3-2	1 (pārspiediens)	pie kāpņu telpas sienas/50	+	-/-
3D-G3-3	-1 (zemspiediens)	pie kāpņu telpas sienas/50	+	-/-
3D-G4-1	0	pie sāna sienas/50	+	-/-
3D-G5-1	0	„siltā grīda”/25	+	-/-
3D-G5-2	1 (pārspiediens)	„siltā grīda”/25	+	-/-
3D-G5-3	-1 (zemspiediens)	„siltā grīda”/25	+	-/-
3D-G6-1	-	pie ārsienas/50	+	-/-
3D-G6-2	-	pie ārsienas/50	+	+/-
3D-G6-3	-	pie ārsienas/50	+	+/60
3D-G6-4	-	pie ārsienas/50	+	+/45
3D-G6-5	-	pie ārsienas/50	+	+/30
3D-G6-6	-	pie ārsienas/ adiabātisks	+	+/45
3D-G7-1	0	pie ārsienas/50	+	+/45
3D-G7-2	1 (pārspiediens)	pie ārsienas/50	+	+/45
3D-G7-3	-1 (zemspiediens)	pie ārsienas/50	+	+/45



Attēls 4.44. 3D modeļu atšķirīgo ģeometriju skices: (a) – 3D-G1, (b) – 3D-G2 un 3D-G7, (c) – 3D-G3, (d) – 3D-G4, (e) – 3D-G5, (f) – 3D-G6.

Tabula 4.12. Apskatīto modelēšanas variantu svarīgākie rezultāti.

Variants	Siltuma patēriņš (sildītāja jauda), W	Solārais siltuma avots, W	Vadīšanas siltuma plūsma (W) caur				Konvektīvā siltuma apmaiņa, W	Telpas gaisa apmaiņas koeficients, h ⁻¹	Vidējā vērtības		
			Ārsienu	Logu	Blakus istabu sienām	Kāpņu telpas sienu			Ātrumam, cm s ⁻¹	Temperatūrai, °C	Vertikālā temperatūru starpība, °C
3D-G1-1	164	-	-70	-60	99	-24	-109	0,50	3	18,3	0,7
3D-G1-2	166	-	-78	-91	101	-29	-69	1,54	6	18,5	0,7
3D-G1-3	263	-	-55	-39	491	16	-676	0,94	6	13,7	4,1
3D-G2-1	226	-	-72	-74	19	-17	-82	0,07	4	19,6	1,4
3D-G3-1	136	-	-66	-62	58	-17	-49	0,15	2	18,3	2,0
3D-G3-2	141	-	-72	-77	66	-20	-38	1,47	4	18,2	0,5
3D-G3-3	859	-	-66	-48	392	26	-1163	0,98	7	10,7	3,9
3D-G4-1	145	-	-68	-64	47	-39	-21	0,14	4	19,2	1,9
3D-G5-1	154	-	-64	-57	32	-35	-30	0,20	3	19,0	0,8
3D-G5-2	243	-	-75	-81	31	-35	-83	1,5	6	17,3	0,7
3D-G5-3	542	-	-54	-43	228	1	-673	1,1	6	14,8	5,2
3D-G6-1	148	-	-41	-47	-39	-21	-	-	5	21,6	2,2
3D-G6-2	225	-	-50	-37	-106	-32	-	-	2	24,2	2,1
3D-G6-3	173	228	-59	-24	-266	-52	-	-	5	28,4	2,5
3D-G6-4	173	327	-79	-7	-355	-59	-	-	6	30,8	1,7
3D-G6-5	178	411	-66	-30	-423	-70	-	-	5	32,5	1,7
3D-G6-6	0	326	-52	-14	-215	-45	-	-	3	26,0	1,5
3D-G7-1	254	326	-50	-218	-180	-37	-95	0,3	4	23,1	1,2
3D-G7-2	232	325	-57	-25	-251	-43	-181	1,4	6	26,1	2,4
3D-G7-3	315	325	-46	-2	-121	-35	-444	1,4	6	22,4	3,1

4.4.1. Spiedienu starpības ietekme

Uzsākot 3D ģeometriju izstrādi, pirmie aprēķinu varianti ir izveidoti atbilstoši jau apskatītajiem 2D modeļiem. Kā parāda to rezultātu salīdzināšana, kvalitatīvi abu pieeju rezultāti ir līdzīgi (plūsmas raksturs un pat gaisa kustības ātrumi), bet pastāv lielākas atšķirības kvantitatīvos rādītājos (temperatūras laukā, siltuma bilances rādītājos). Tas ir saistīts ar neprecīzu dažādu telpisku objektu uzdošanu divās dimensijās, piem., sildītājs vai spraugas loga rāmī, kuru trešā dimensija ir ievērojami

mazāka par sienu izmēriem. Tādējādi var apgalvot, ka vienkāršotais 2D tuvinājums ir pietiekami precīzs kvalitatīviem situācijas novērtējumiem telpas vidusdaļā un tās tuvumā, bet kvantitatīvam aprakstam ir nepieciešams pilnvērtīgs telpisks modelis.

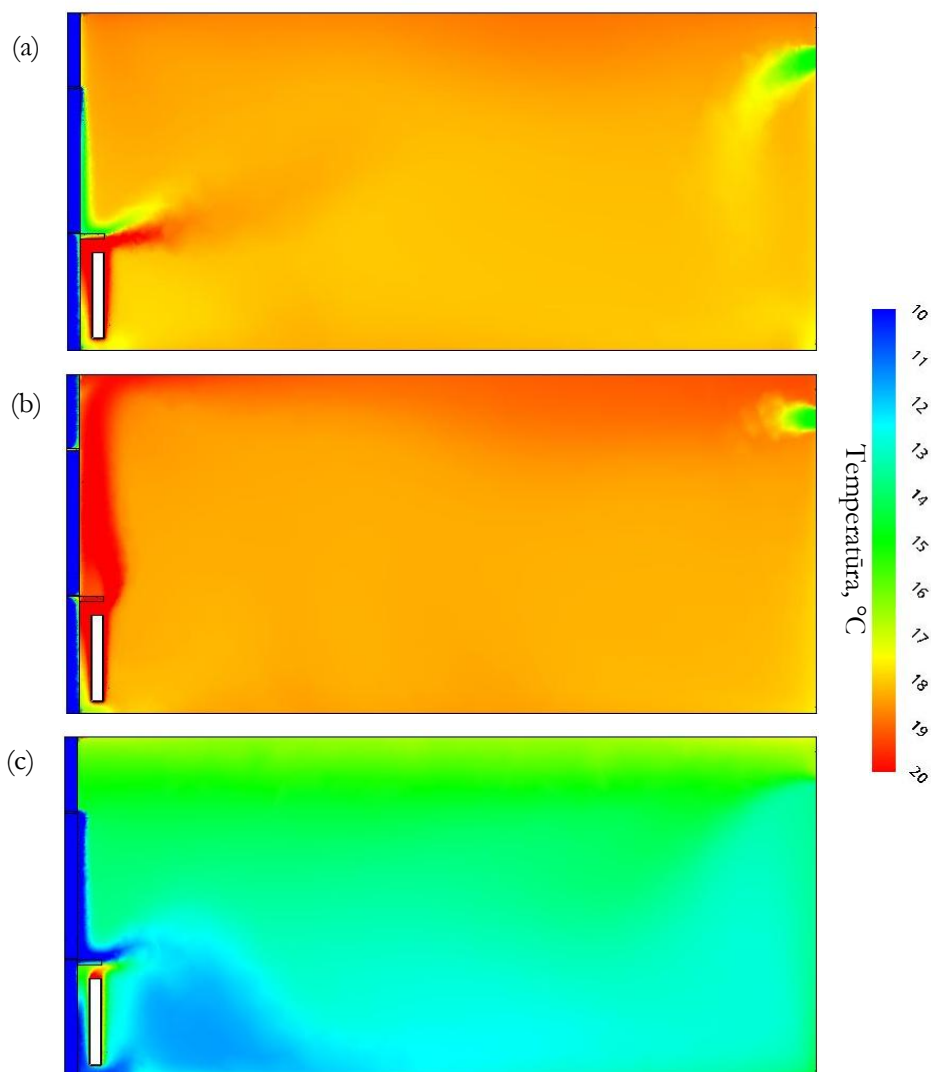
Savā starpā salīdzinot pirmos 3 variantus ar ģeometriju 3D-G1 (sildītājs atrodas zem palodzes pie ārsienas, pastāv gaisa cirkulācijas caur spraugām), kuras skice parādīta attēlā 4.44a, variēts tikai viens lielums – spiedienu starpība starp telpas pretējām sienām. Kaut arī dabā spiedienu starpība starp iekštelpu gaisu un ārējo gaisu var pārsniegt 2-3 Pa neliela vēja apstākļos, bet atsevišķos gadījumos sasniegt pat 15 Pa, modelī tiek apskatīti 0 Pa un 1 Pa gadījumi. Būtisks ir tādas starpības virziens – vai telpā ir zemspiediens vai pārspiediens (turpmāk ar -1 Pa apzīmēsim zemspiediena gadījumu, ar 1 Pa – pārspiedieni). Variantam bez spiedienu starpības tiek lietots apzīmēts 3D-G1-1, ar pārspiedieni telpā – ar 3D-G1-2, bet ar zemspiedienu – 2D-G1-3. Šo variantu svarīgākie energoefektivitātes un termiskā komforta nosacījumu rezultāti ir apkopoti tabulā 4.12.

Kā arī varēja sagaidīt, lielākie siltuma zudumi no telpas rodas varantā ar -1 Pa lielu zemspiedienu (variants 3D-G1-3), kur notiek intensīva ārējais ar -10 °C temperatūru ieplūde pa spraugām loga rāmī. Ja telpā ir uzdots pārspiediens (variants 3D-G1-2), ārējais ieplūde tiek novērsta, ieplūstošā kāpņu telpas gaisa temperatūra ir tuva telpas vidējai temperatūrai, tāpēc tajā siltuma patēriņš ir par trešdaļu mazāks. Līdzīgs siltuma enerģijas patēriņš tiek prognozēts arī telpai bez spiedienu starpības (variants 3D-G1-1), jo tajā lielākie konvektīvie siltuma zudumi, kas rodas nelielam ārējais daudzumam ieplūstot telpā pa augšējo loga rāmja spraugu, tiek kompensēti ar mazākiem zudumiem caur logu, ko ietekmē pazemināta loga iekšējās virsmas temperatūra (attēls 4.45a). Jāatzīmē, ka šajā gadījumā pastāv liels kondensāta rašanās risks uz loga iekšējās virsmas, jo tās temperatūra samazinās līdz 5 °C, kas ir vienāds ar rasas punkta temperatūru gaisam ar 45% relatīvo mitrumu pie 18 °C.

Analizējot siltuma apmaiņas veidus un to sadalījumu pa norobežojošām konstrukcijām (tabula 4.12), ir redzams, ka visos apskatītajos modelēšanas variantos pozitīva ir tikai siltuma pārnese no blakus telpām. Tas ir izskaidrojams ar to, ka apskatāmās telpas temperatūra ir zemāka par minētajās telpās uzdotu 20 °C temperatūru. Variantā 3D-G1-3 kļūst pozitīva arī siltuma pārnese no kāpņu telpas, kuras temperatūra 15 °C kļūst lielāka par telpas vidējo temperatūru. Telpas siltuma patēriņš pie uzdotās sildītāja (jeb siltuma nesēja) temperatūras 50 °C, neskatoties uz atšķirīgiem konvekcijas nosacījumiem, pirmajos divos variantos ir līdzīgs, bet telpā ieplūstot aukstajam gaisam zemspiediena gadījumā tā lielums pieaug vairāk nekā uz pusi. Tomēr, ņemot vērā faktu, ka blakus telpas ar uzdotu 20 °C temperatūru kalpo kā papildus siltuma avoti, apkures siltuma vajadzība apskatāmai telpai reālos apstākļos, kad blakus esošās telpas nav tik siltas, var būt arī lielāka.

Visu apskatāmo modelēšanas variantu temperatūras sadalījumi uz telpas simetrijas plaknes ir parādīti attēlā 4.45, bet temperatūras sadalījumi uz 3 vertikālām līnijām tajā pašā plaknē – attēlā 4.46.

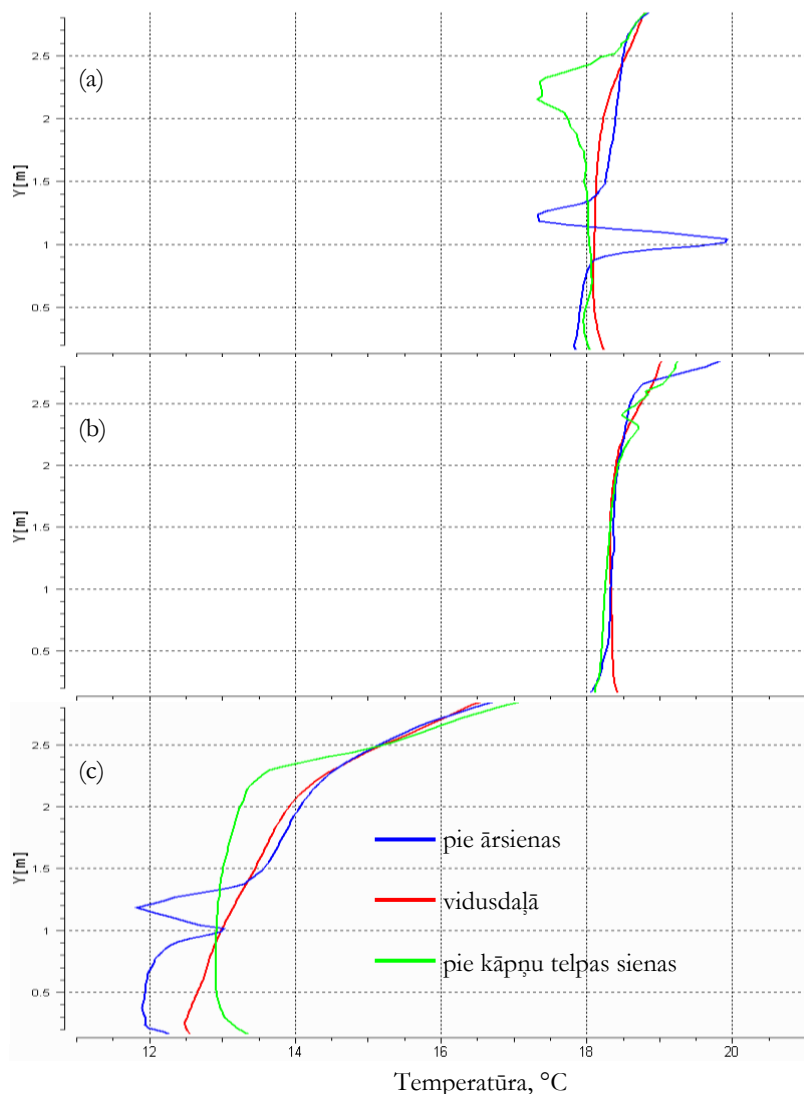
Kā redzams, temperatūras līmenis telpā ir praktiski nemainīgs variantiem 3D-G1-1 un 3D-G1-2, tas ir nedaudz virs 18 °C (skat. arī tabulu 4.12). Bet tas ievērojami samazinās zemspiediena gadījumā, kad vidējā temperatūra samazinās gandrīz par 5 grādiem līdz 13,7 °C, kaut arī no sildķermeņa izdalītā jauda šajā variantā ir maksimāla, tāpēc šo variantu (3D-G1-3) var nosaukt par visneoptimālāko. No termiskā komforta viedokļa temperatūras 18 °C ir pieņemama pie dažiem cilvēka aktivitāšu un apģērba izolācijas rādītājiem, bet vērtības, kas ir zemākas par 14 °C, nav pieņemamas.



Attēls 4.45. Variantu 3D-G1-1 (a), 3D-G1-2 (b), 3D-G1-3 (c) temperatūras sadalījums simetrijas plaknē.

Aplūkojot vertikālos temperatūras profilus telpas vidusdaļā, labi redzamas to neviendabības, ko izraisa gaisa plūsmas ar atšķirīgām temperatūrām variantos 3D-G1-1 un 3D-G1-3 (attēls 4.46a un 4.46c). Sevišķi izteiktas tās ir ārsienas tuvumā, kur palodze mehāniski novirza karstā gaisa plūsmu no sildītāja un lejup vērtas aukstās gaisa masas horizontālā virzienā, kur tad arī notiek sajaukšanās (skat. arī attēlu 4.45a). Pie pretējās sienas temperatūras neviendabīgums saistīts ar lejup vērstu gaisa kustību no ventilācijas atveres. Savukārt, vidusdaļā temperatūras profils ir gluds. Salīdzinot šos 3 profilus

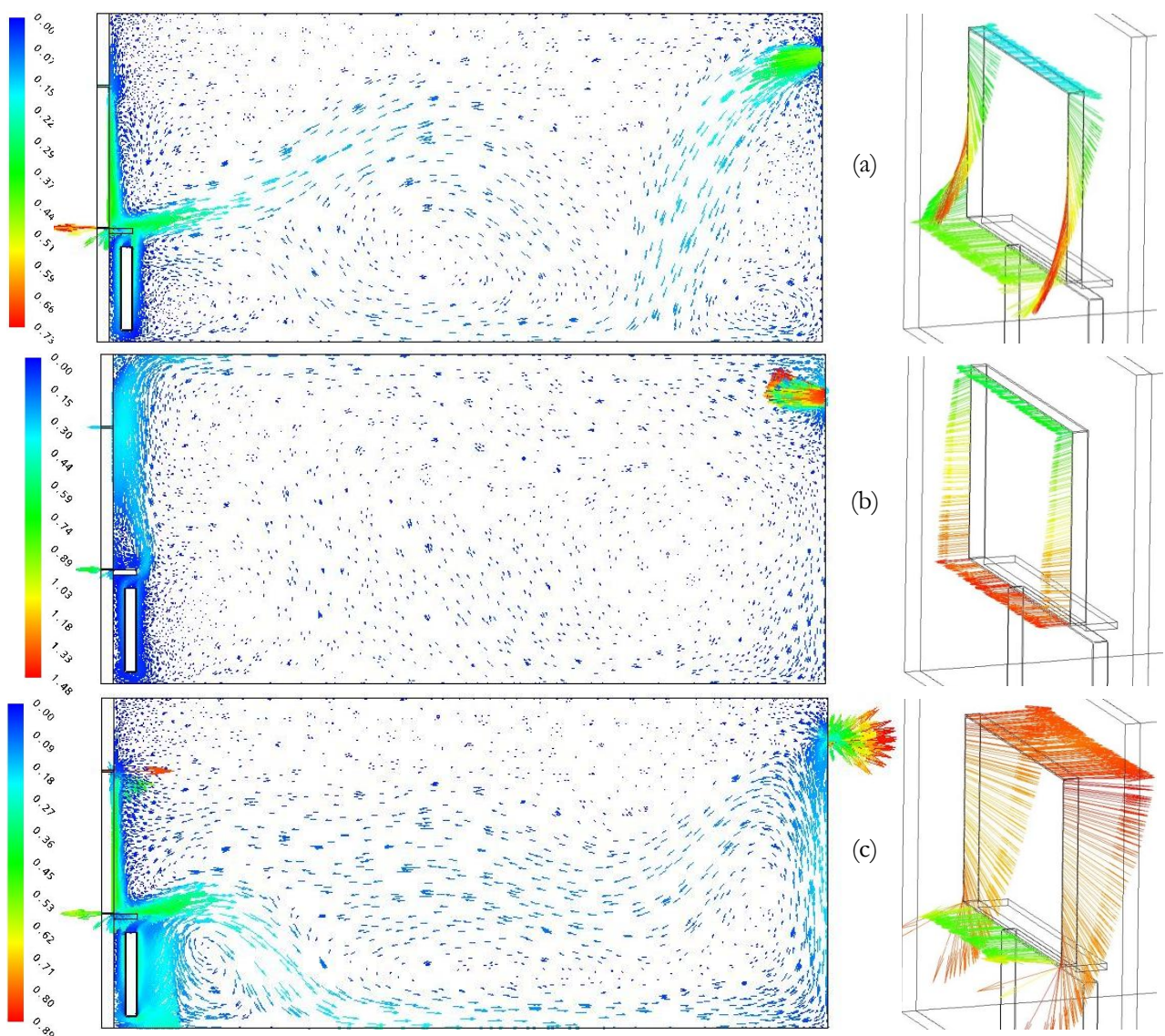
savā starpā, ir skaidri redzams, ka telpas „dzīvojamā zonā” temperatūras atšķirības ir mazāks par 1 grādu variantos bez spiedienu starpības un ar pārspiedienu, bet zemspiediena gadījumā stratifikācija ir būtiska un starpība pārsniedz 3 grādus, tādējādi neapmierinot cilvēka termiskā komforta nosacījumus (attēls 4.4). Pēdējā no variantiem, neskatoties uz sildķermeņa klātbūtni, 1 m attālumā no ārsienas temperatūra pie grīdas samazinās līdz 12 °C, kas arī neatbilst komforta prasībām (attēls 4.6).



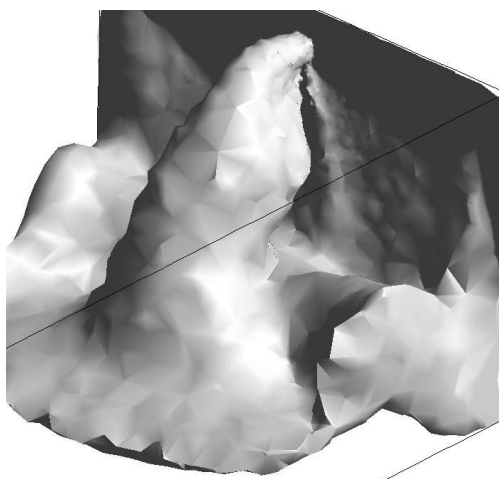
Attēls 4.46. Variantu 3D-G1-1 (a), 3D-G1-2 (b), 3D-G1-3 (c) vertikālie temperatūras (°C) profili simetrijas plaknē.

Raksturīgais gaisa plūsmu lauks telpas simetrijas plaknē apskatāmajiem aprēķinu variantiem ir parādīts attēlā 4.47, kurā ir vizualizēts arī vektorlauks spraugā ap logu. Aprēķinā ar 0 Pa spiedienu starpību (3D-G1-1) gaisa kustību telpā izraisa tā blīvuma atkarība no temperatūras (termogravitācija) un gaisa ieplūde telpā nav saistīta ar gaisa kustību ārpus tās. Tāpēc šajā variantā telpā ir nelielas gaisa kustības intensitātes – ap 3 cm s^{-1} (tabula 4.12) un spraugā ap logu plūsmas virziens ir mainīgs pa augstumu – augšējā daļā notiek ieplūde, bet apakšējā – izplūde (attēls 4.47a); dominējoša tomēr ir

izplūde, ko kompensē ieplūde telpā pa ventilācijas atveri, tās raksturs ir labi redzams attēlā 4.48, vizualizējot temperatūras izovirsmu. Variantā 3D-G1-2 uz spraugas ap logu ārējās virsmas uzdots spiediens ir pa 1 Pa mazāks kā uz ventilācijas atveres, kas arī pamatā nosaka gaisa plūsmas virzienus šo objektu tuvumā (attēls 4.47b). Gaisa kustības intensitāte šajā un pēdējā variantā (3D-G1-3) ir palielinājusies, vidējais tās lielums sastāda 6 cm s^{-1} , ko lielā mērā ietekmē intensīvās plūsmas atveru tuvumā. Apskatot atsevišķas zonas, jānorāda, ka aukstā gaisa plūsmas ātrumi loga tuvumā zemspiediena gadījumā pārsniedz 50 cm s^{-1} un liela šī aukstā gaisa plūsmas intensitāte saglabājas arī telpas vidusdaļā (gan pie grīdas – 35 cm s^{-1} , gan cilvēka sejas augstumā 20 cm s^{-1}). Šādos apstākļos, kas ievērojami pārsniedz termiskā komforta ierobežojumus, cilvēks ilgstoši uzturēties nevar.



Attēls 4.47. Variantu 3D-G1-1 (a), 3D-G1-2 (b), 3D-G1-3 (c) raksturīgais ātrumu (m s^{-1}) vektorlauks simetrijas plaknē un spraugā ap logu.



Attēls 4.48. 17,5 °C izovirsma pie sienas uz kāpņu telpu variantā 3D-G1-1 (temperatūra zem tās ir mazāka).

Apskatot vēl vienu svarīgu telpas energoefektivitātes rādītāju tabulā 4.12 – uz telpas tilpumu normētu gaisa apmaiņas koeficientu, var secināt, ka tā vērtība pie tikai 1 Pa spiedienu starpības līdz ar gaisa cirkulācijas intensifikāciju pieaug līdz pat 4 reizēm (variantā 3D-G1-2). Tā kā šis rādītājs atspoguļo siltuma daudzumu, kas ar gaisa masām tiek pārnestas, tad ir svarīgi to minimizēt.

Salīdzinot visus 3 apskatītos modelēšanas variantus ar dažādiem gaisa apmaiņas nosacījumiem, var izdarīt secinājumus, ka neliels pārspiediens telpā palielina gaisa kustības intensitāti un gaisa apmaiņu, bet, tā kā gaisa ieplūde pamatā notiek no kāpņu telpas ar pietiekami augstu temperatūru, tas būtiski neietekmē telpas siltuma vajadzību un temperatūras lauku tajā. Savukārt, tādus meteoroloģiskos apstākļos, kad vēja ietekmē telpā rodas zemspiediens, aukstā ārējais gaisa ieplūde telpā ne tikai palielina gaisa kustības intensitāti, bet arī ievērojami samazina temperatūras līmeni, tāpēc šajā gadījumā vairāk nekā uz pusi pieaug arī apkurei nepieciešamais siltuma patēriņš, bet termiskā komforta apstākļi radikāli pasliktinās. Analīze uzskatāmi parāda nekontrolējamu (neregulējamu) atveru ēkas ārējā čaulā negatīvo lomu gan energoefektivitātes, gan termiskā komforta aspektos.

4.4.2. Palodzes ietekme

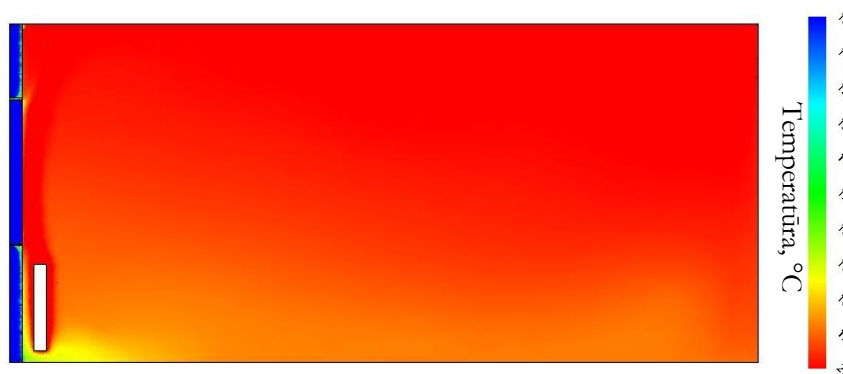
Kā nākamo variantu apskatīsim vēl vienu 2D modelēšanā apskatīto gadījumu – palodzes ietekmi uz siltuma apmaiņas procesiem telpā. Kā tika norādīts iepriekš, mehāniskā barjera starp augšup vērstu karstā gaisa plūsmu un pie loga atdzisušā gaisa lejupvērstu kustību ir ļoti būtiska. Līdzīgi kā 2D modeļa gadījumā, arī telpiskā modeļa 3D-G2-1 bez palodzes (attēls 4.44b) iegūtie rezultāti parāda, ka termiskā komforta apstākļi telpā ir ļoti labi (tabula 4.12):

- vidējais gaisa kustības ātrums ir 4 cm s^{-1} praktiski visā telpā, izņemot 0,5 m platu zonu pie pašas ārsienas, kas neietilpst telpas „dzīvojamā zonā”;

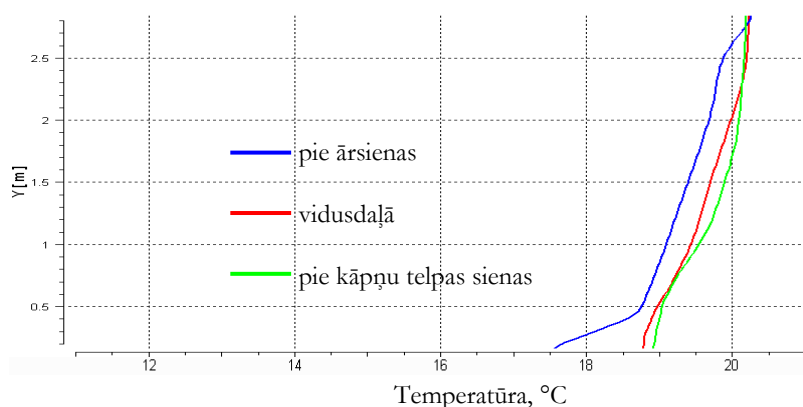
- vidējā temperatūra ir augstāka nekā variantā ar palodzi un sastāda gandrīz 20 °C (attēls 4.49), kas atbilst blakus telpās uzdotajām temperatūrām;
- vertikālā temperatūru starpība nepārsniedz 1,5 °C „dzīvojamā zonā” (attēls 4.50).

Šādu rādītāju uzlabojumu nosaka maza aukstā gaisa kustības intensitāte no loga telpas vidusdaļas virzienā, kas bija novērojama ģeometrijā ar palodzi. Bet 0 Pa spiedienu starpība nerada vērā ņemamu papildus gaisa cirkulāciju caur atverēm norobežojošajās konstrukcijās.

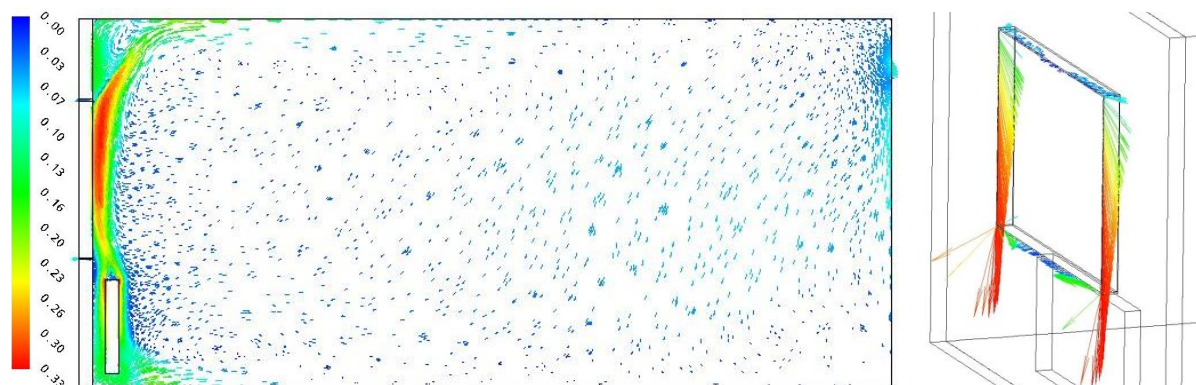
No otras puses, palodzes neesamība būtiski pasliktina telpas energoefektivitātes rādītājus. Tagad karstā gaisa kustība no sildītāja ir vērsta nevis uz telpas vidusdaļu, bet labi siltumu vadošā loga virzienā, kur ir novērojami arī lielāki kustības ātrumi (attēls 4.51). Tā kā siltā gaisa plūsma sasilda loga iekšējo virsmu, tad uz tās pilnībā tiek novērsts kondensāta rašanās risks, jo virsmas tuvumā temperatūra ir pat lielāka nekā telpas vidusdaļā. Palielināts siltuma enerģijas patēriņš ir saistīts arī ar minimizētu enerģijas apmaiņu no blakus esošām telpām ar līdzīgu temperatūru. Noteiktais telpas siltuma patēriņš ir par trešdaļu lielāks nekā variantā ar palodzi 3D-G1-1 un tikai par 15% mazāks nekā telpai ar zemspiedienu 3D-G1-3.



Attēls 4.49. Varianta 3D-G2-1 temperatūras sadalījums simetrijas plaknē.



Attēls 4.50. Varianta 3D-G2-1 vertikālie temperatūras profili (°C) simetrijas plaknē.



Attēls 4.51. Varianta 3D-G2-1 raksturīgais ātrumu (m s^{-1}) vektorlauks simetrijas plaknē un spraugā ap logu.

Salīdzinot ar iepriekš apskatītajiem variantiem, temperatūras lauks un gaisa plūsmu raksturs telpā nosaka gaisa apmaiņas intensitātes caur spraugām samazināšos, kā rezultātā gaisa plūsma caur atverēm ir daudz mazāka nekā variantā ar palodzi (tabula 4.12). Šādā situācijā pat būtu nepieciešama papildus ventilācijas sistēmas darbināšana, lai nodrošinātu skābekļa piegādi. Gaisa plūsma spraugā ap logu ir parādīta attēlā 4.51 – kā redzams, tajā nedominē kāds noteikts virziens, bet maksimālie ātrumi novērojami sānu daļā.

Kompleksi analizējot šī modelēšanas varianta energoefektivitātes un termiskā komforta rādītājus, var secināt, ka tā apkures siltuma patēriņš ir palielinājies, bet komforta apstākļi ir uzlabojušies tikai nedaudz salīdzinot ar telpu ar palodzi. Tāpēc palodzes izmantošana starp logu un apkures sistēmas sildķermeni ir vērtējama pozitīvi, jo samazina telpas apkurei nepieciešamo siltuma jaudu.

4.4.3. Sildelementa novietojuma ietekme

Iepriekš apskatītie aprēķinu varianti parādīja, ka nozīmīga loma telpas siltuma apmaiņā ir gan gaisa cirkulācijai caur atverēm norobežojošās konstrukcijās, gan arī mehāniskajai barjerai virs sildķermeņa, kas ietekmē karstā gaisa plūsmas virzienu un tādējādi arī temperatūras lauka sadalījumu. Nākošajā solī apskatīsim principiāli citu sildķermeņa novietojumu, kas ir sastopams dažās jaunceltnēs, kur tas ir izvietots nevis zem loga vai tā tuvumā, bet gan pie pretējās sienas (attēls 4.44c). Cilvēki, kas ilgstoši uzturas šādās telpās, norāda uz dažādām ar termisko komforta apstākļu nodrošināšanu saistītām problēmām. Tāpēc šādu konstruktīvo risinājumu efektivitāti novērtēsim ar matemātiskā modeļa palīdzību, ievērojot arī dažādas spiedienu starpības atverēs telpas pretējās sienās, tādējādi ņemot vērā arī atšķirīgus vēja virzienus ārpusē. Attiecīgo modeļa variantu apzīmējumi ir šādi: 3D-G3-1 bez spiedienu starpības, 3D-G3-2 – ar 1 Pa pārspiedienu telpā, 3D-G3-3 – ar 1 Pa zemspiedienu.

Papildus minētajam modelim apskatīsim vēl vienu speciālu gadījumu, kad sildītājs ir novietots asimetriski – pie vienas no sānu sienām (attēls 4.44d), šo variantu apzīmēsim ar 3D-G4-1. Šādā gadījumā aprēķinu veikšanai nevar tikt lietota pustelpas ģeometrija, tāpēc ir izveidots pilnvērtīgs visas telpas modelis, kas būtiski palielināja kopējo diskreto elementu skaitu un, tādējādi, arī prasības nepieciešamiem datorresursiem un aprēķiniem nepieciešamo laiku.

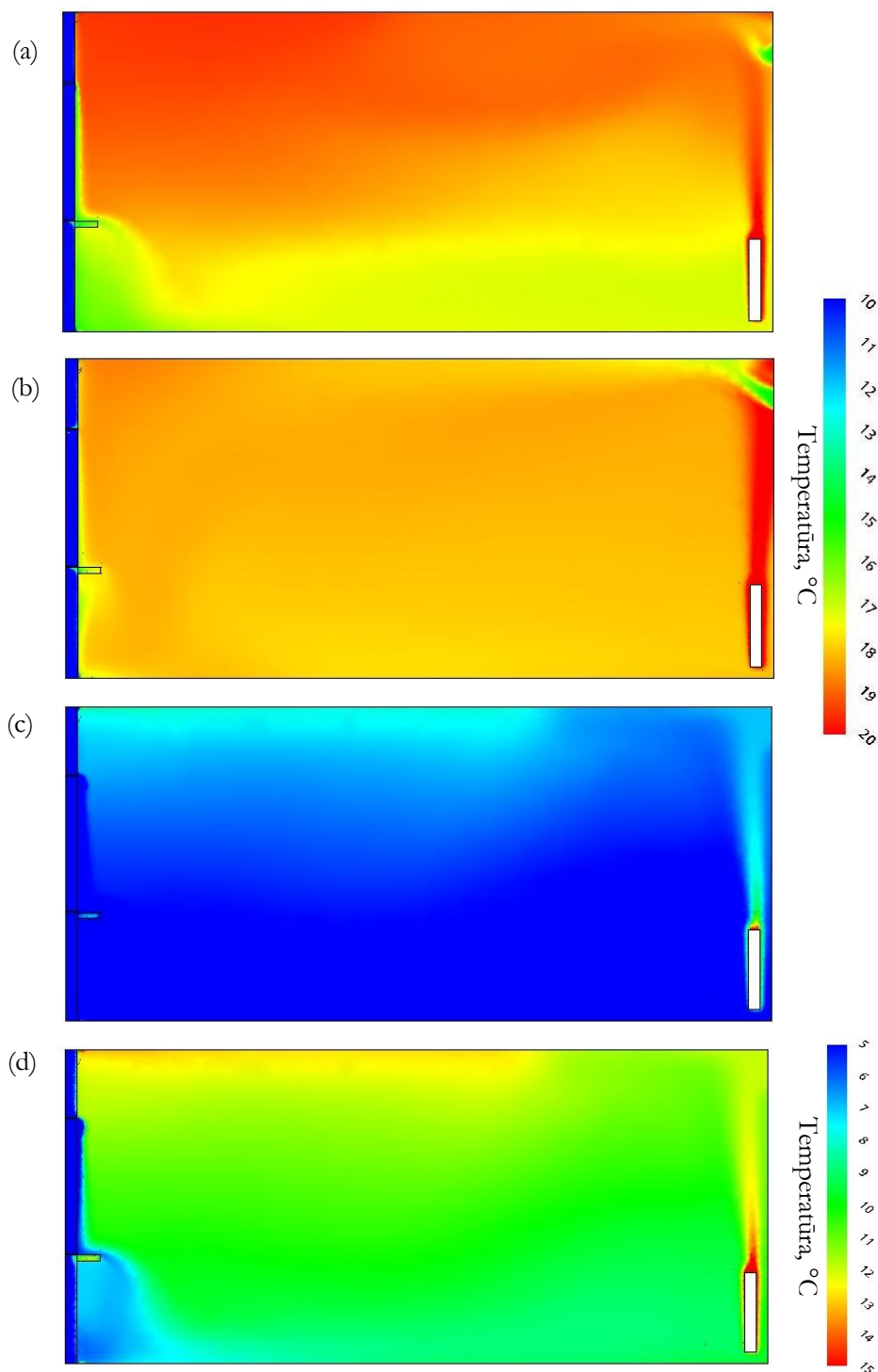
Variantu ar atšķirīgu sildītāja novietojumu iegūtie rezultāti ir apkopoti tabulā 4.12. Vispirms apskatīsim ģeometrijas 3D-G3 variantus ar dažādām spiedienu starpībām. Kā redzams no tabulā apkopotiem datiem un attēlā 4.52a parādītā temperatūras sadalījuma telpas vidusplaknē, variantā bez spiedienu starpības veidojas temperatūras stratifikācija, ko uzskatāmi var redzēt vertikālajos temperatūras profilos (attēls 4.53a). Temperatūru starpība šajā gadījumā sastāda 2 °C, kas vēl apmierina termiskā komforta prasības, vidējā telpas temperatūra „dzīvojamā zonā” ir 18,3 °C, bet zonās pie ārsienas un sildītāja tuvumā tās vērtības ir atšķirīgas (attēls 4.52a).

Analizējot varianta 3D-G3-1 temperatūras sadalījumu, ļoti uzskatāmi pazeminātas temperatūras zonu veidošanos ilustrē attēlā 4.55a parādītā 17 °C izovirsma ārsienas tuvumā. Kā redzams, novietojot sildķermeni pie pretējās sienas, aukstuma zona veidojas gan zem loga, gan arī pie sānu sienām, kur aukstais gaiss nonāk ar intensīvu konvekcijas izraisīto plūsmu. Gaisa temperatūru šajā vietā nosaka gan pa augšējo spraugas daļu ieplūstošais ārējais gaiss, gan pie labi siltumu vadošā loga virsmas atdzisušā gaisa plūsma (attēls 4.54a). Savukārt, pie pretējās sienas novietotais sildķermenis izraisa izteiktu augšup vērstu siltā gaisa plūsmu, tāpēc būtiski zemākas temperatūras slānis atrodas praktiski visā telpā grīdas tuvumā (attēls 4.52a). Šādā situācijā cilvēkam atrasties tuvu logam nav ieteicams, jo, intensīvās aukstā gaisa plūsmas kāju līmenī dēļ rodas diskomforta sajūta, uz ko arī norāda cilvēki, kas ilgstoši uzturas līdzīgas konfigurācijas telpās. Telpas grīdas tuvumā gaisa temperatūra ir zemāka par 16 °C, kas ir pretrunā ar tādu termisko komfortu noteicošo faktoru kā grīdas temperatūra (attēls 4.6).

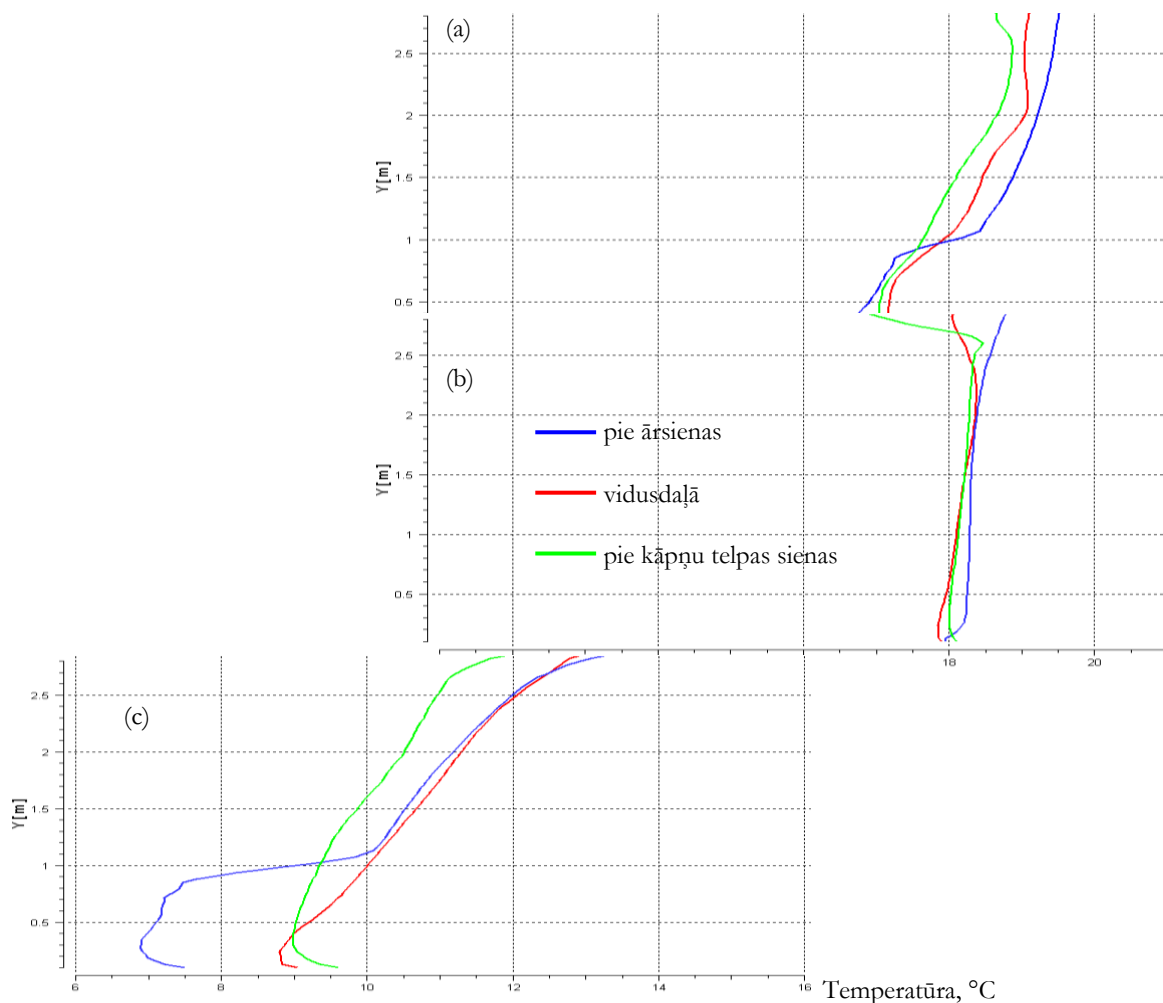
Tomēr no energoefektivitātes viedokļa šāds apkures sistēmas sildķermeņa novietojums ir pamatots, jo, salīdzinot ar analogisku modelēšanas variantu ar pie loga novietoto sildķermeni (3D-G1-1), kopējais telpas enerģijas patēriņš ir samazinājies par 15%, ko pamatā nosaka samazinājums siltuma apmaiņas ar blakus esošām telpām. Ar izmainītu gaisa plūsmu raksturu telpā kopumā un īpaši ārsienas tuvumā saistītas arī gaisa apmaiņas intensitātes izmaiņas (samazinājās vairāk nekā trīs reizes – tabula 4. 12) un ar to saistītie konvekcijas siltumi no telpas ir samazinājušies vairāk nekā uz pusi no 109 līdz 49 W.

Nākamajā šīs ģeometrijas variantā, 3D-G3-2, kad starp atverēm telpas norobežojošās konstrukcijās pastāv 1 Pa spiedienu starpība, telpā veidojoties pārspiedienam, vidējā temperatūra telpas „dzīvojamā zonā” paliek nemainīga, praktiski nemainās arī visas telpas siltuma patēriņa lielums, paliekot 140 W līmenī (tabula 4.12). Tajā pat laikā izteiktais stratifikācijas efekts pazūd, jo ir

novērsta aukstā gaisa ieplūde telpā caur neblīvām vietām ārsienā, un vertikālā temperatūras starpība samazinās līdz visu apskatīto 3D modeļu mazākai vērtībai – 0,5 °C (attēli 4.52b, 4.53b). Savukārt, pateicoties intensīvai gaisa plūsmai ventilācijas atveres tuvumā (vairāk par 1 metru sekundē), vidējais kustības ātrums visā telpā pieaug līdz 4 centimetriem sekundē. Kopējo gaisa plūsmu sadalījumu telpā var redzēt attēlā 4.54b.



Attēls 4.52. Variantu 3D-G3-1 (a), 3D-G3-2 (b), 3D-G3-3 (c, d) temperatūras sadalījums simetrijas plaknē. Attēlam (d) ir lietota atšķirīga no (a-c) temperatūras skala.

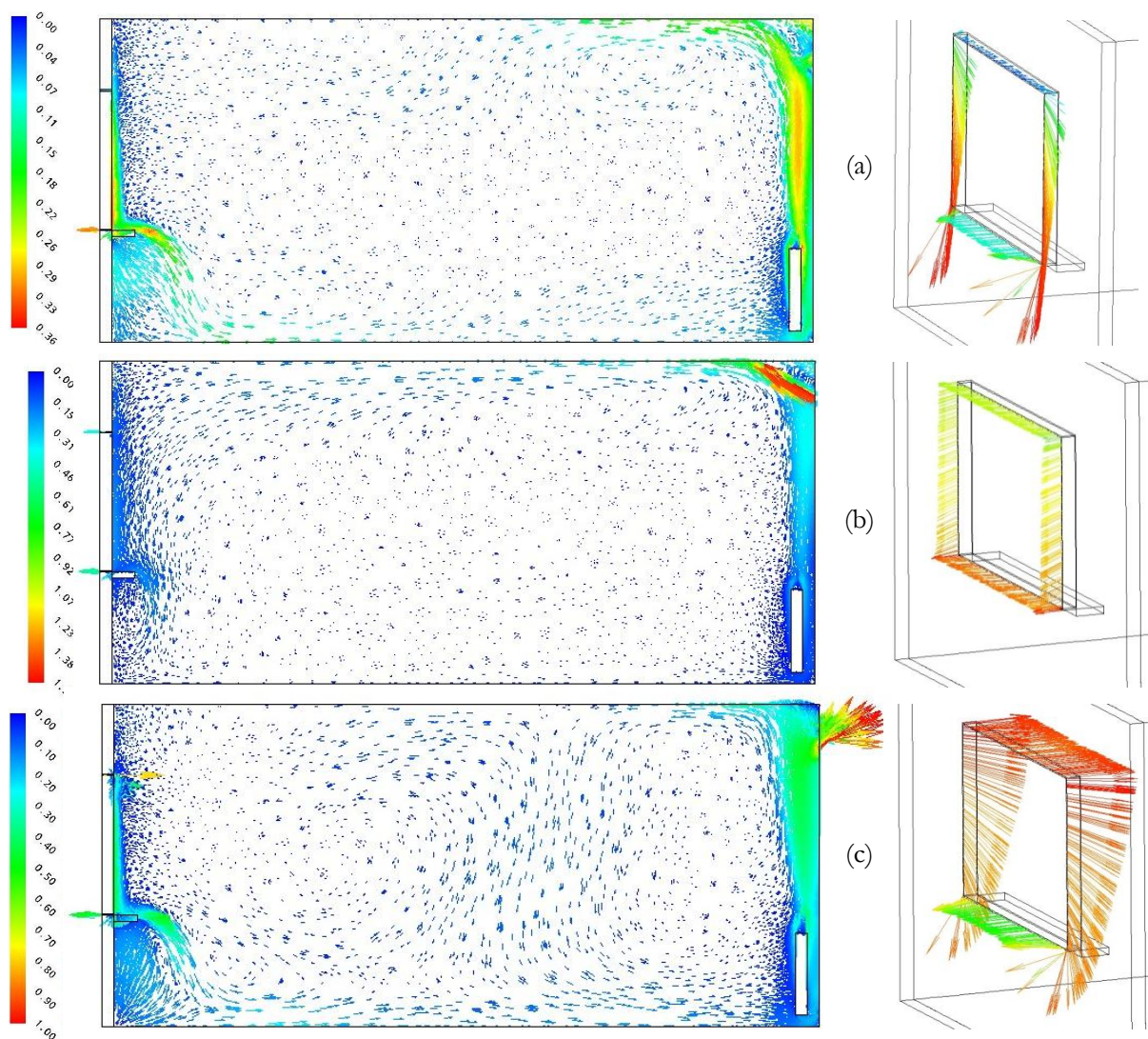


Attēls 4.53. Variantu 3D-G3-1 (a), 3D-G3-2 (b), 3D-G3-3 (c) vertikālie temperatūras (°C) profili.

Salīdzinot ar variantu bez spiedienu starpības, var apgalvot, ka pārspiediena uzdošana homogenizē temperatūras lauku telpas „dzīvojamā zonā”, kas ir saistīts ar palielinātu gaisa kustības intensitāti, praktiski neatstājot iespaidu un apkures patēriņu. Tomēr, tā kā šajā variantā uzdotās spiedienu starpības dēļ pastāv gaisa caurplūde no ventilācijas atveres uz āru (attēls 4.54b), gandrīz par kārtu pieaug telpas gaisa apmaiņa, salīdzinot ar 0 Pa spiedienu starpības variantu, un tās vērtība ir $1,5 \text{ h}^{-1}$ (tabula 4.12). Tajā pat laikā nedaudz samazinās konvektīvie siltuma zudumi no telpas, ko pamatā nosaka ārējais ar temperatūru -10 °C ieplūdes novēršana, kas bija vērojama variantā 3D-G3-1 loga augšējā daļā (attēls 4.54a).

Abos apskatītajos gadījumos, t.i. situācijā ar nelielu pārspiedienu telpā, kā ietekmē nenotika ārējais ieplūde, vai ar 0 Pa spiedienu starpību, ar nelielas intensitātes ieplūdi, telpas energoefektivitātes rādītājs – siltuma enerģijas patēriņš atšķiras nedaudz gan savā starpā, gan arī salīdzinājumā ar analogiskiem variantiem ar pie ārsienas novietoto sildītāju (mazāk par 20%). Trešajā variantā 3D-G3-3 ar 1 Pa zemspiedienu telpā, situācija radikāli mainās pateicoties aktīvai ārējais ieplūdei telpā. Vidējā gaisa temperatūra šajā gadījumā samazinās līdz $10,6 \text{ °C}$ (tabula 4.12 un attēli 4.52c,d), kas ir pat zemāka par kāpņu telpā uzdoto. Līdzīgi kā gadījumā ar 0 Pa spiedienu starpību,

telpā ir izveidojusies izteikta stratifikācija un temperatūras izmaiņas vertikālajā virzienā sasniedz 4 grādus (attēls 4.53c). Tādējādi, gan vidējās temperatūras absolūtā vērtība telpas „dzīvojamā zonā”, gan arī vertikālā starpība neatbilst termiskā komforta nosacījumiem.

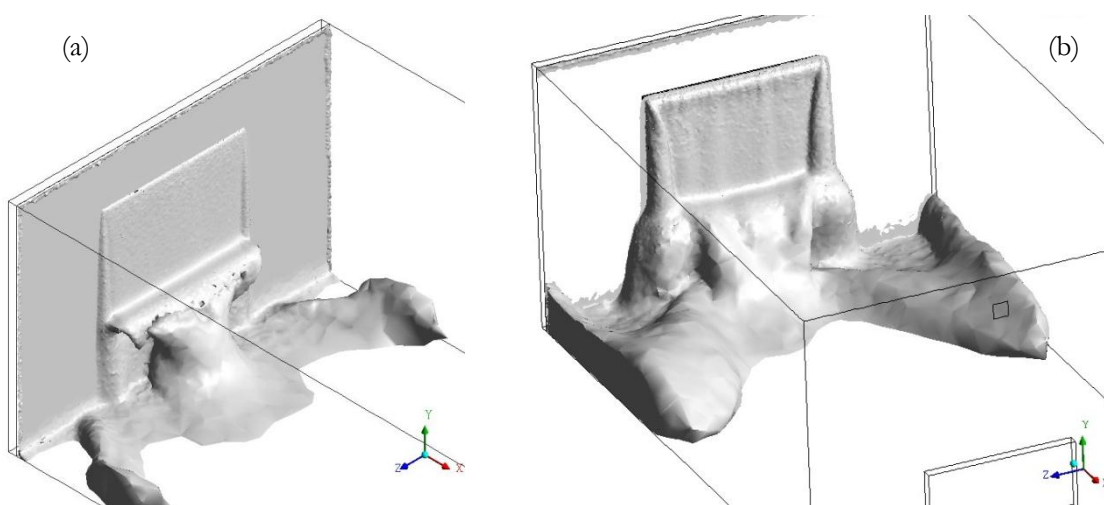


Attēls 4.54. Variantu 3D-G3-1 (a), 3D-G3-2 (b), 3D-G3-3 (c) raksturīgais ātrumu (m s^{-1}) vektorlauks simetrijas plaknē un spraugā ap logu.

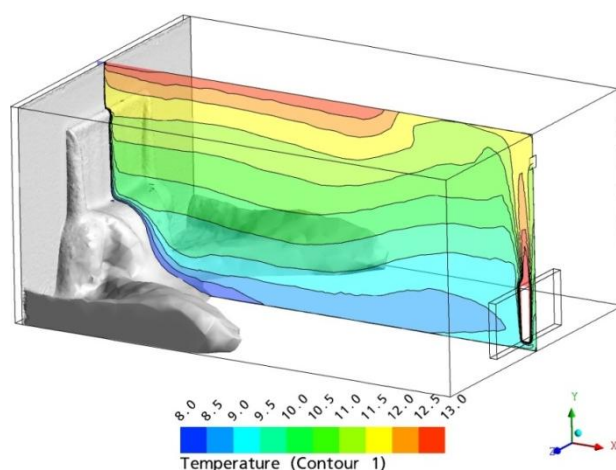
Tik zems temperatūras līmenis telpā ir saistīts ar intensīvu ārējais ar temperatūru $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ieplūdi pa spraugām starp loga un ārsienu, kā arī ar siltā gaisa izplūdi pa ventilācijas atveri, kas atrodas sildītāja tiešā tuvumā. Uzskatāmi gaisa plūsmu raksturs telpā parādīts attēlā 4.54c – kā redzams, maksimālie kustības ātrumi ir koncentrēti spraugā un ventilācijas atverē, kur tie sasniedz 1 m s^{-1} . Pateicoties ārējais ieplūdei, telpā nonāk aukstais gaiss, kas veido pazeminātās temperatūras zonu visas telpas dziļumā līdz pat pie pretējās sienas novietotam sildītājam. Savukārt, pie sildītāja virsmas uzsilis gaiss pārvietojas augšup, kur daļa no tā izplūst pa ventilācijas atveri. Kā redzams no ātrumu vektorlauka vizualizācijas vidusplaknē (4.54c), telpā veidojas divi raksturīgie virpuļi un gaisa

plūsmas vidējais ātrums telpā sasniedz 7 cm s^{-1} , kas arī neapmierina termisko komforta prasības (attēls 4.7).

Līdzīgi variantam 3D-G3-1, aukstā zona ārsienas tuvumā nosaka būtiski pazeminātu grīdas temperatūru un tādējādi ir pretrunā ar nosacījumu minimālajai grīdas temperatūrai (attēls 4.6), bet zemspiediena gadījumā gaisa masu temperatūra ir daudz zemāka (attēli 4.55a,b), kas ievērojami samazina arī grīdas temperatūru – līdz pat $8 \text{ }^\circ\text{C}$ loga tuvumā (attēls 4.56). Tādējādi uzturēties zonā tuvu logam cilvēkam šajā gadījumā nav ieteicams gan zemas temperatūras, gan intensīvās aukstā gaisa plūsmas (līdz $0,35 \text{ m s}^{-1}$) dēļ.



Attēls 4.55. $17 \text{ }^\circ\text{C}$ un $8 \text{ }^\circ\text{C}$ temperatūras izovirsmas variantiem 3D-G3-1 (a) un 3D-G3-3 (b) attiecīgi.



Attēls 4.56. $8 \text{ }^\circ\text{C}$ izovirsmas un temperatūras diapazona $8 \dots 13 \text{ }^\circ\text{C}$ kontūri vidusplāknē variantā 3D-G3-3.

Tā kā variantā 3D-G3-3 telpā intensīvi ieplūst ārējais gaiss, kā rezultātā līdz $11 \text{ }^\circ\text{C}$ samazinās raksturīgā telpas gaisa temperatūra, un ir pieauguši arī gaisa kustības ātrumi, palielinās arī siltuma atdeve no sildītāja ar konstantu virsmas temperatūru un rezultējošā jauda sasniedz 859 W . Attiecībā pret izdalīto jaudu divos iepriekšējos gadījumos tā pieauga seškārtīgi. Bet salīdzinot ar apskatīto

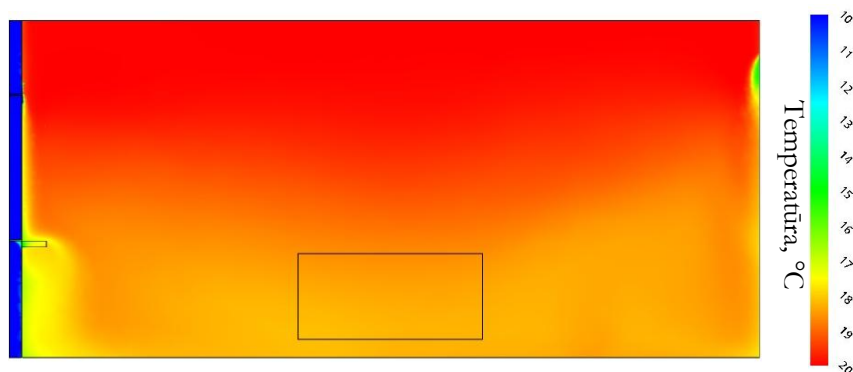
zemspiediena variantu modelim ar pie loga novietotu sildītāju, palielinājums sastāda vairāk kā 3 reizes. Tādējādi var secināt, ka klimatiskajos apstākļos, kad dominē pret fasādi vērsts vējš (kas rada pārspiedienu uz ārsienas), sildelementa novietojums pie ārsienai pretējās sienas vairākkārtīgi palielina apkurei nepieciešamo jaudu, gan arī sekmē gaisa temperatūras pazemināšanos un palielina vertikālo temperatūras diferenci – šis gadījums ir gan enerģētiski neefektīvs, gan arī nepieņemams no termiskā komforta nosacījumu viedokļa. Tādas pašas konfigurācijas telpā ar pie loga novietotu sildītāju visu minētie efektu izpausmes nav tik negatīvas.

Interesants ir fakts, ka kondensācijas risks uz loga virsmas praktiski ir izslēgts gadījumā, kad sildķermenis novietots pie pretējās sienas loga. To nosaka siltā gaisa plūsma gar griestiem ārsienas virzienā un relatīvi mazkustīgas siltā gaisa masas ārsienas augšpusē (virs loga). Tomēr kondensācijas risks pieaug ārsienas apakšējā daļā, pieaugot tās siltuma caurlaidībai. Tā kā apskatītajos variantos ārsienas siltuma izolācija ir relatīvi laba ($U=0,35 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$), tad kondensēšanās varbūtība ir maza.

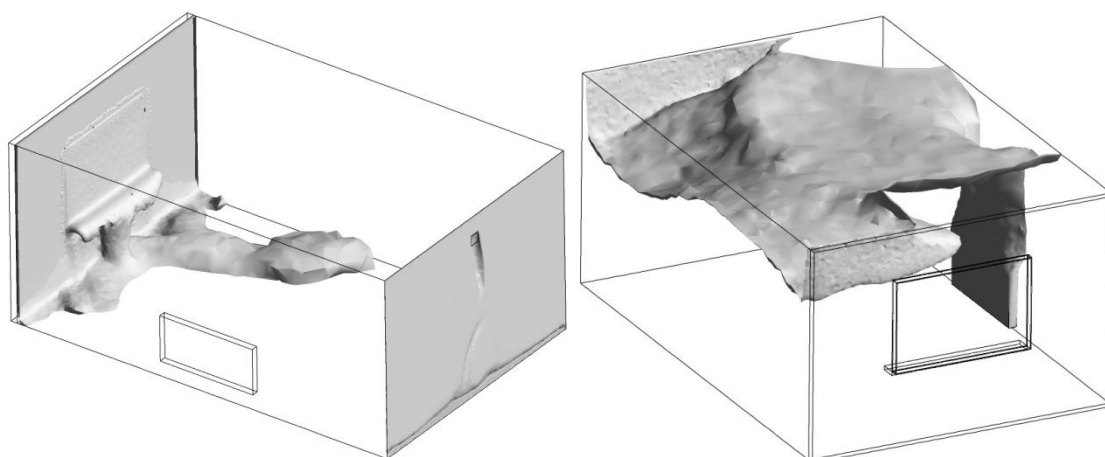
Pamatā telpās apkures sistēmas sildķermenis tiek novietots pie ārsienas, bet dažreiz tas konstruktīvi ir paredzēts arī pie pretējās sienas, kas, kā rāda apskatītie modelēšanas rezultāti un eksperimentālie novērojumi, ir nelabvēlīgāks gan no energoefektivitātes, gan arī no komforta apstākļu viedokļa. Tomēr reizēm sildītājs tiek novietots kādā citā vietā, piem., pie sānu sienas, ko arī apskatīsim atsevišķi (attēls 4.44d). Tādā gadījumā telpas konfigurācija vairs nav simetriska pret vidusplakni. Tā kā šim aprēķinam nepieciešami lielāki datorresursi, tad modelēšana tika veikta tikai gadījumam nosacīti bezvēja laikā ar 0 Pa spiedienu starpību (variants 3D-G4-1), kas ir pietiekami, lai parādītu šāda konstruktīvā risinājuma principiālās atšķirības no iepriekš apskatītajiem.

Svarīgākie aprēķinos iegūtie rezultāti šim variantam apkopotī tabulā 4.12. Vispirms apskatīsim temperatūras lauku telpā – pateicoties izteikti telpiskai gaisa masu cirkulācijai „dzīvojamā zonā” tas ir samērā homogēns (attēls 4.57). To nosaka sildītāja novietojums pie vienas no sānu sienām, kā arī atšķirīgās temperatūrās pie sienas uz kāpņu telpu un pie ārsienas. Aukstais gaiss masas pārvietojas pa grīdu pie sildītājam pretējās sienas (attēls 4.58a), bet gaisa masas ar paaugstinātu temperatūru ir vērstas augšup, arī sakrājoties pie pretējās sienas (4.58b). Rezultātā lielāka vertikālā temperatūras difference veidojas ne tikai pie ārsienas, bet arī pie telpas sānu sienām, ko var redzēt attēlā 4.59 parādītajos temperatūras kontūros divās vertikālajās vidusplaknēs.

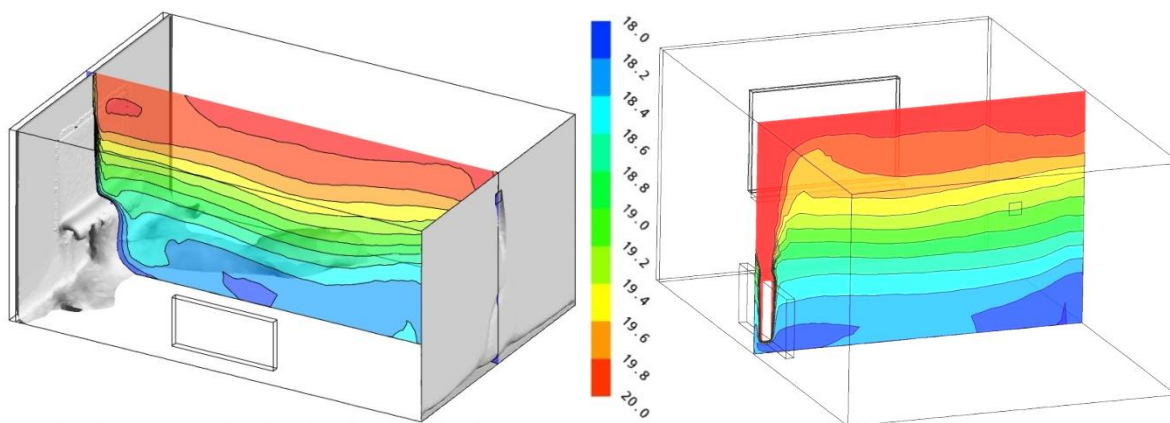
Vidējā temperatūras vērtība šajā variantā ir par 1 °C lielāka nekā analogiskos modeļos ar palodzi un pie citām sienām esošu sildītāju (3D-G1-1 un 3D-G3-1) un sastāda 19,2 °C. Šādu palielinājumu pamatā nosaka sildītāja novietojums pie sienas uz relatīvi siltu blakus istabu (20 °C) un atveru neesamība tiešā tuvumā. Pirmais fakts samazina siltuma zudumus spraugā starp sildītāju un sienu, bet otrais samazina konvekcijas pārnēsi. Tādējādi temperatūra šāda veida konfigurācijas dzīvojamā telpā apmierina termiskā komforta prasības; tām atbilst arī vertikālā temperatūras starpība, kas ir mazāka par 2-3 °C praktiski visā telpā izņemot zonas sienu tuvumā (attēls 4.59).



Attēls 4.57. Varianta 3D-G4-1 temperatūras sadalījums simetrijas plaknē.



Attēls 4.58. 18 °C (pa kreisi) un 20 °C (pa labi) izovirsmas variantā 3D-G4-1.

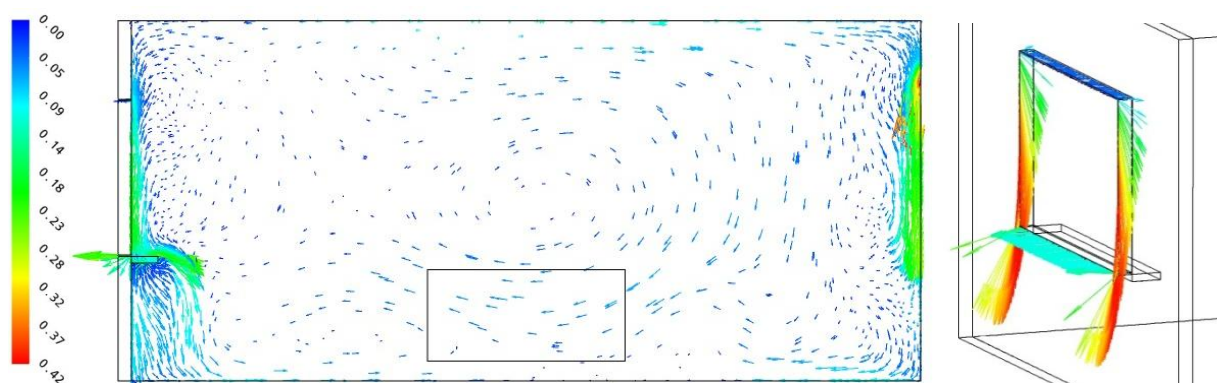


Attēls 4.59. Temperatūras diapazona 18-20 °C kontūri vidusplaknēs variantā 3D-G4-1.

Salīdzinot no sildītāja izdalīto jaudu ar bāzes ģeometrijas variantu 3D-G1-1 (skat. tabulu 4.12), ir redzams, ka tā ir samazinājusies par 12% (tajā pašā laikā pieaugot telpas temperatūrai), tāpēc šāds sildītāja novietojums no energoefektivitātes viedokļa ir pamatots. Tā kā citas spiedienu starpības netika modelētas, var tikai paredzēt, ka zemspiediena gadījumā siltuma zudumu palielinājums nebūs tik būtisks kā ģeometrijās 3D-G1 un 3D-G3, jo sildītājam tuvumā neatrodas atveres norobežojošās konstrukcijā, caur kurām veidotos intensīva karstā gaisa izplūde.

Sildītāja novietojums būtiski ietekmē arī modelētās telpas gaisa apmaiņu, kas apskatāmajā variantā sastāda $0,14 \text{ h}^{-1}$, un, tādējādi, ir vairāk kā 3 reizes mazāka par variantā 3D-G1-1 novēroto. Atbilstošie konvektīvie siltuma zudumi ir samazinājušies 5 reizes un veido tikai 1/7 daļu no kopējā siltuma patēriņa (salīdzinot ar 66% bāzes variantā 3D-G1-1).

Gaisa plūsmu vektorlauks telpā un spraugā ap logu parādīts attēlā 4.60. Kā redzams, lielākās ātruma vērtības veidojas ventilācijas atverēs, kā arī loga un palodzes tuvumā, kur tās sasniedz 30...40 centimetrus sekundē, bet telpas vidusdaļā gaisa kustības intensitāte ir par kārtu mazāka. Salīdzinot ar bāzes variantu (3D-G1-1), telpā notiek intensīvāka gaisa samaisīšanās un gaisa kustības ātrums ir nedaudz pieaudzis, bet tas joprojām apmierina termiskā komforta prasības (skat. attēlu 4.7).



Attēls 4.60. Varianta 3D-G4-1 raksturīgais ātrumu (m s^{-1}) vektorlauks simetrijas plaknē un spraugā ap logu.

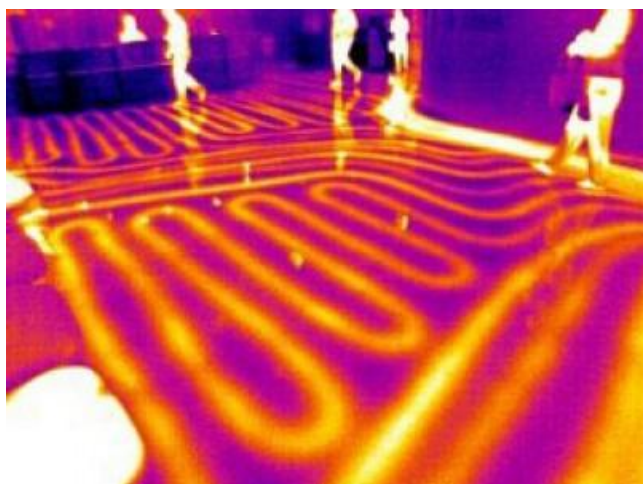
Kā parāda šajā sadaļā apskatīto modelēšanas variantu rezultāti, apkures sistēmas sildķermeņa novietojums būtiski ietekmē gan temperatūras un gaisa plūsmu sadalījumus telpā, tādējādi ietekmējot arī termiskā komforta apstākļus, un ir tieši saistīts arī ar nepieciešamās apkures jaudas noteikšanu. Tā, līdzīgos klimatiskajos apstākļos (bez spiedienu starpības) un vienādas sildītāja virsmas temperatūras gadījumā ir iespējams palielināt telpas temperatūru un samazināt patērēto jaudu tikai fiziski pārvietojot sildītāju pie sānu sienas. Bet vēja spiediena ietekme uz siltumfizikāliem raksturlielumiem ir lielāka telpās, kur sildītājs neatrodas pie ārsienas – vairāk pazeminās temperatūras līmenis un vairākkārtīgi pieaug siltuma zudumi. Vērtējot, protams, jāpatur prātā, ka blakus telpu temperatūra neatkarīgi no nosūcēm pētāmajā telpā tiek uzturēta nemainīga – $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Nākošajā sadaļā analizēsīm tādas telpas energoefektivitātes un termiskā komforta rādītājus, kurā netiek izmantota tradicionālā ūdens apkures sistēma ar sildķermeņiem, bet grīdas apkures sistēma, kas pēdējos gados kļūst arvien populārākā arī Latvijā (piem., siltumsūkņu efektīvas darbināšanas kontekstā).

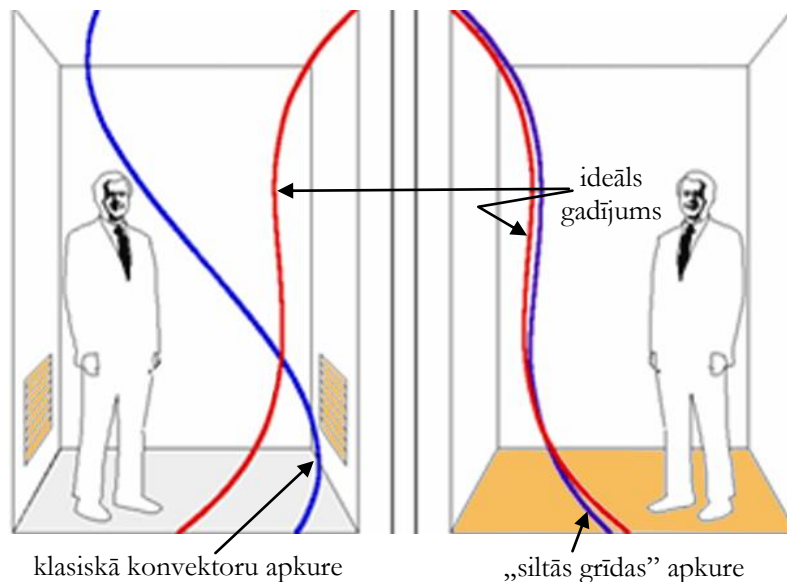
4.4.4. Apkures veida ietekme

Līdz ar jaunāko būvtehnoloģiju ienākšanu Latvijā, arvien populārāks kļūst jauns telpu apkures veids, kurā sildelements ir ievietots zem grīdas seguma – t.s. „siltās grīdas”. Var tikt izmantota kā elektriskā sildīšana, tā arī karstā ūdens cirkulācija (parasti lietojot siltumsūkņus). Visbiežāk šo apkures veidu izmanto vannas istabās un gaitenēs, bet to var lietot arī dzīvojamo un biroja telpu apsildei. Dažādos ārvalstu būvprojektos grīdu apsilde tiek plaši lietota un, kā norāda citi autori, šādam apkures veidam ir divas priekšrocības – samazinās apkurei nepieciešamā jauda un uzlabojas termiskais komforts (Tibaut, Wielser, 2002; Hackleman, 2003). Izmaiņas siltuma patēriņā pamatā nosaka divi faktori – ievērojami mazāka sildītāja temperatūra (parasti nepārsniedzot 27 °C) un lielāks tā laukums (attēls 4.61), kā rezultātā izmainās gaisa cirkulācija telpā. Būtiskākais no termiskā komforta uzlabojumiem ir cilvēkam labvēlīgā gaisa stratifikācija, kas tādā veidā apsildāmās telpās ir tuva ideālai – skat. attēlu 4.62. Lielākais šādu sistēmu trūkums ir sarežģītāka un dārgāka to montāža un apkope.

Lai novērtētu telpas ar „siltās grīdas” apkuri iespējamo priekšrocību nozīmīgumu, ir izveidots tās modelis 3D-G5 (attēls 4.44e), kas no bāzes varianta 3D-G1 atšķiras ar sildītāja izvietošanu – tagad konvektora pie loga vietā visai grīdas tiek uzdots konstanta 25 °C temperatūra, kas tādējādi modelē grīdas apkuri. Līdzīgi kā iepriekš apskatītajos variantos, atsevišķi izdalīsim 3 apakšgadījumus ar 0 un ± 1 Pa spiedienu starpību starp atverēm pretējās sienās, lai analizētu vēja spiediena ietekmi uz siltumfizikāliem procesiem telpā. Variantu bez spiedienu starpības apzīmēsim 3D-G5-1, ar 1 Pa pārspiedienu 3D-G5-2, ar zemspiedienu - 3D-G5-3.



Attēls 4.61. Apkures sistēma aizņem visu grīdas laukumu (©Thermal Consultancy termogramma).



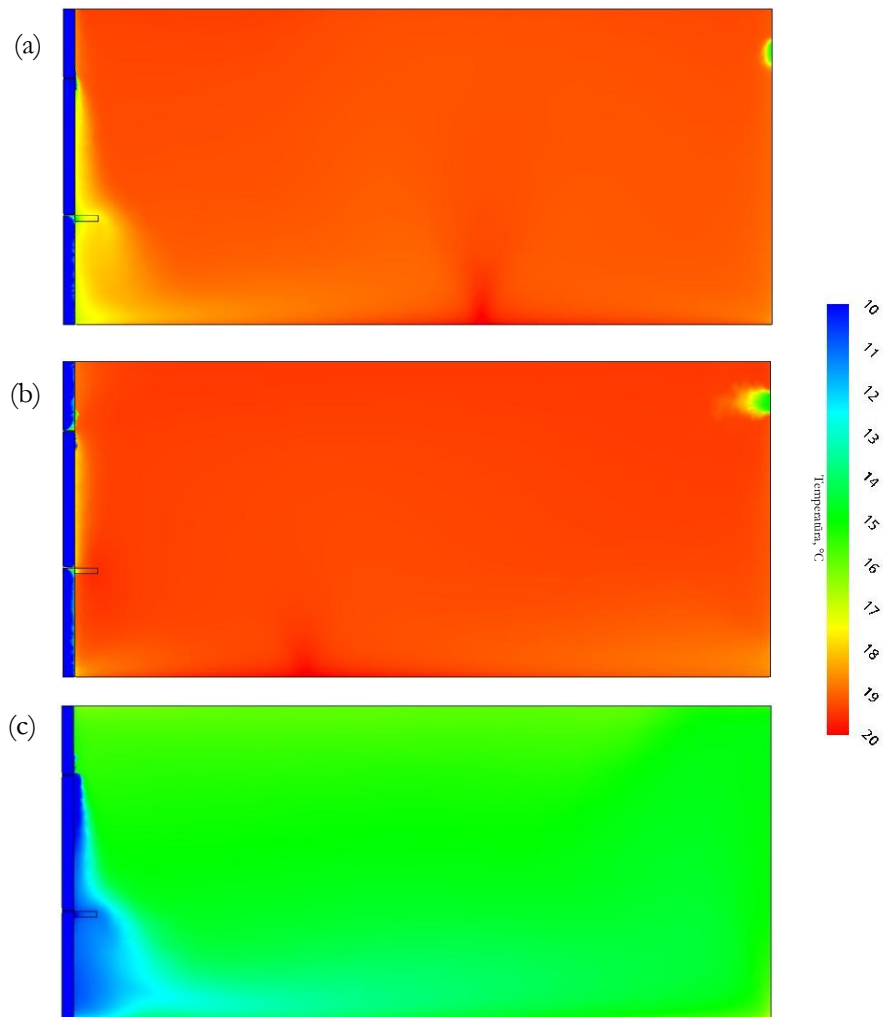
Attēls 4.62. Vertikālās gaisa stratifikācija dažādos gadījumos (©Hohengasser Plumbing & Hydronics).

Svarīgākie aprēķinos iegūtie rezultāti visiem 3 telpas ar „siltās grīdas” apkures veidu ir apkopoti tabulā 4.12. Salīdzinājumā ar bāzes variantu 3D-G1 ar klasisko sildītāju pie ārsienas, apkures siltuma patēriņš gadījumā ar 0 Pa spiedienu starpību ir nedaudz samazinājies, tajā pat laikā telpā ir reģistrēta lielāka temperatūra – 19 °C. Temperatūras sadalījums telpas simetrijas plaknē ir parādīts attēlos 4.63a un 4.64a, kuros ir redzams, ka praktiski visā telpā temperatūras lauks ir homogēns, izņemot zonu pie ārsienas un nelielu slāni grīdas tuvumā. Noteiktais siltuma daudzuma samazinājums šajā gadījumā ne vienmēr nozīmē arī mazākas apkures izmaksas, jo grīdas apkurei parasti tiek izmantota elektroenerģija, kas ir dārgāka par centrālo apkuri. Tas neattiecas uz gadījumu, kad grīdas apkure ir realizēta ar karstā ūdens cirkulācijas palīdzību un/vai izmantojot siltumsūkni.

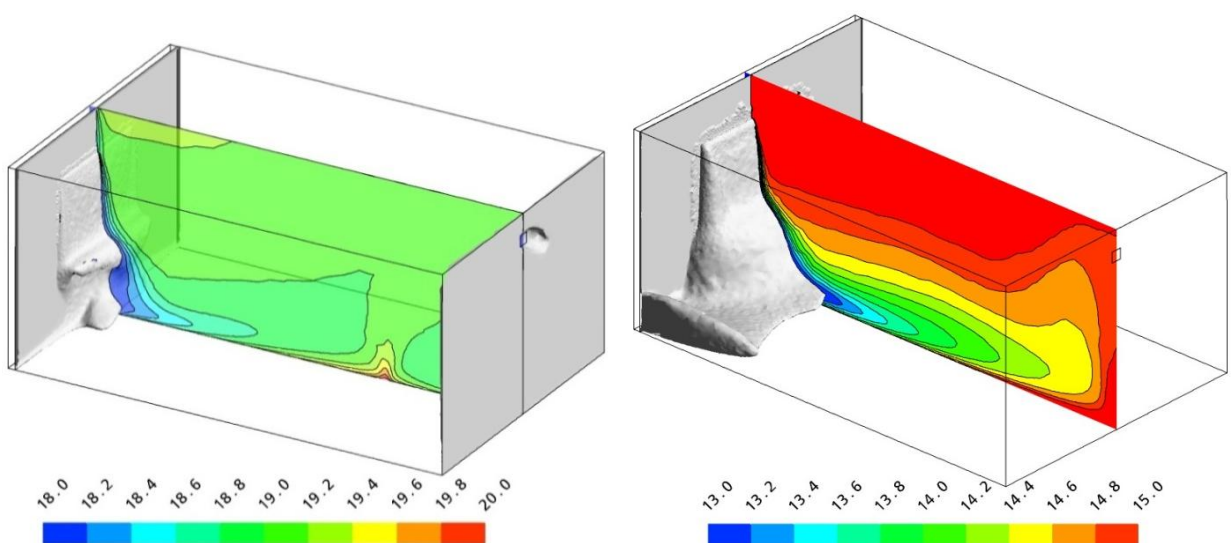
Tā kā modelī vairs nav konvektora ar augstu virsmas temperatūru, kas izraisīja intensīvu gaisa kustību tā tuvumā, mainās arī kopējais plūsmu raksturs visā telpā, ko tagad nosaka divi faktori – gaisa atdzišana pie ārsienas (mazāk – pie kāpņu telpas sienas) un gaisa uzsilšana pie grīdas virsmas. Rezultātā telpā veidojas divi nelielas intensitātes virpuļi (attēls 4.65a), vidējais gaisa kustības ātrums „dzīvojamā zonā” nepārsniedz 3 cm s^{-1} . Caur ventilācijas atveri notiek gaisa ieplūde, bet spraugā ap logu gaisa kustības virziens ir mainīgs, līdzīgi kā iepriekš apskatītajos gadījumos bez spiedienu starpības. Salīdzinoši nelielas intensitātes plūsmas nosaka arī mazus konvektīvos siltuma zudumus, kas ir salīdzināmi ar vadīšanas siltuma zudumiem uz kāpņu telpu, un nelielu gaisa apmaiņas intensitāti – $0,2 \text{ h}^{-1}$ (tabulā 4.12).

Pateicoties nelielām temperatūru izmaiņām dažādās telpas zonās un minimālām zemākas temperatūras gaisa ieplūdēm, ir izveidojusies cilvēkam ļoti labvēlīga gaisa stratifikācija, kas nepārsniedz 1 °C (skat. arī attēlu 4.64a). To var uzskatāmi redzēt attēla 4.66a vertikālajos temperatūras profilos, kas telpas vidusdaļā labi sakrīt ar šāda apkures veida teorētisko profilu (attēls

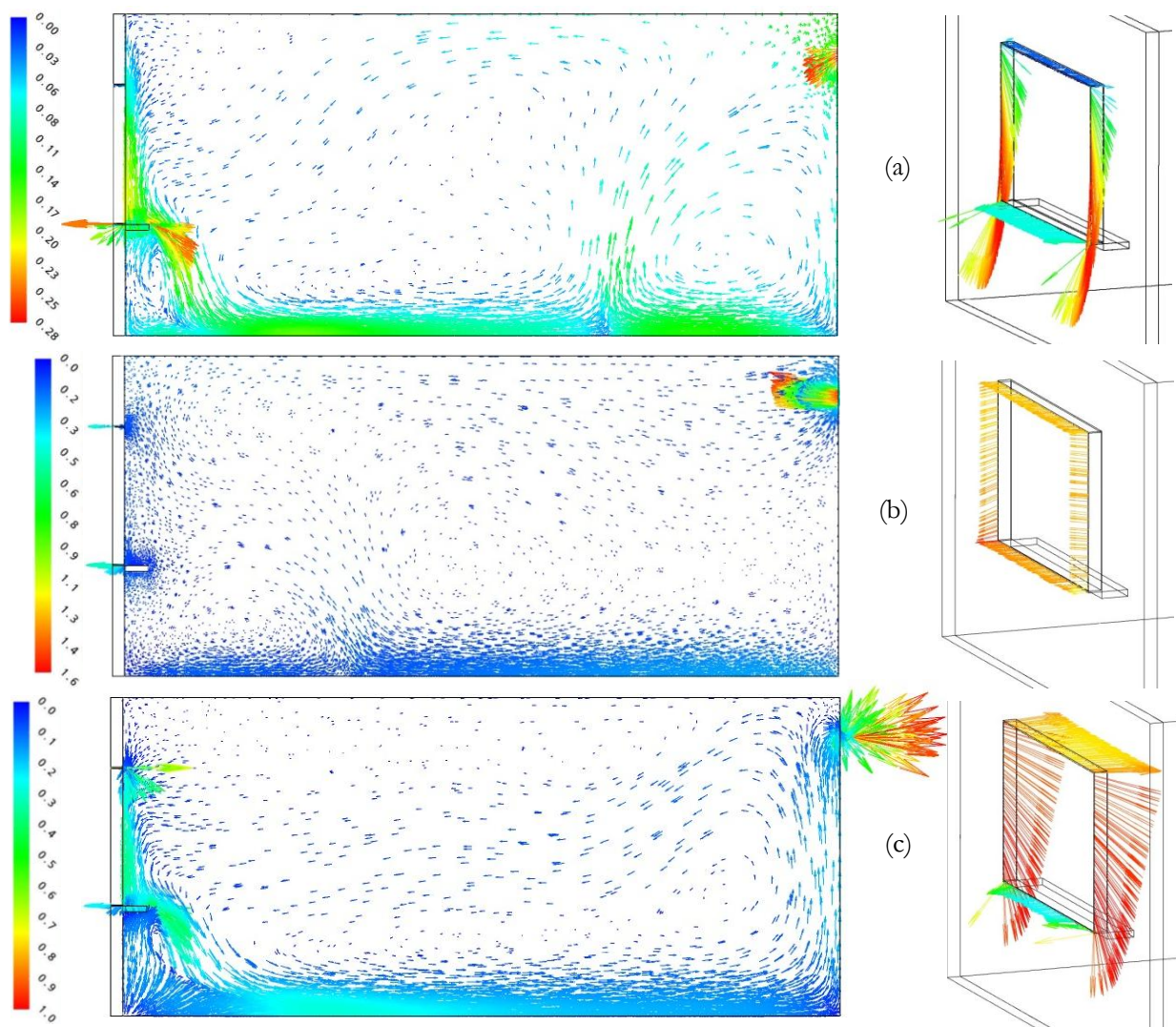
4.62), atšķirīgs profils telpas augšējā daļā saistīts ar blakus telpās uzdoto 20 °C temperatūra nosacījumu, kā rezultātā griestu temperatūra palielinās.



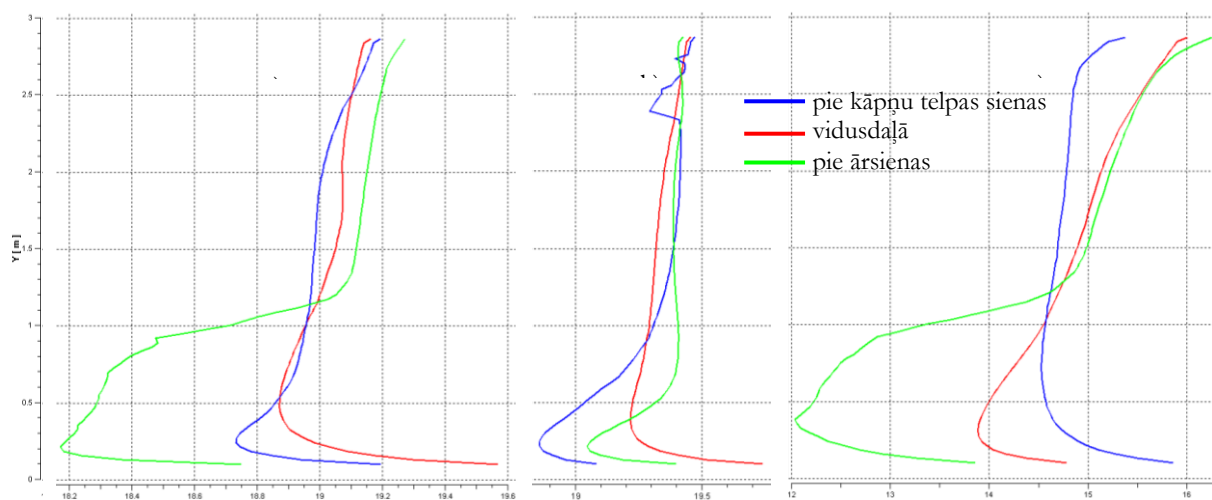
Attēls 4.63. Variantu 3D-G5-1 (a), 3D-G5-2 (b), 3D-G5-3 (c) temperatūras sadalījums simetrijas plaknē.



Attēls 4.64. Temperatūras diapazona 18-20 °C kontūri ar 18 °C izovirsmu variantā 3D-G5-1 (pa kreisi) un temperatūras diapazona 13-15 °C kontūri ar 13 °C izovirsmu variantā 3D-G5-3 (pa labi).



Attēls 4.65. Variantu 3D-G5-1 (a), 3D-G5-2 (b), 3D-G5-3 (c) raksturīgais ātrumu (m s^{-1}) vektorlauks simetrijas plaknē un spraugā ap logu.



Attēls 4.66. Variantu 3D-G5-1 (a), 3D-G5-2 (b), 3D-G5-3 (c) vertikālie temperatūras ($^{\circ}\text{C}$) profili simetrijas plaknē.

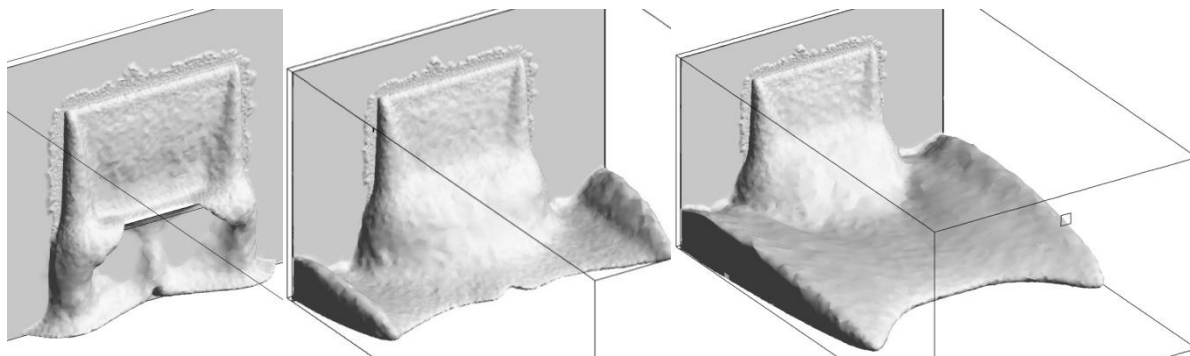
Vērtējot kopumā telpu ar „siltās grīdas” apkures veidu, var atzīmēt siltuma zudumu samazinājumu, ko var uzskatīt par energoefektivitātes uzlabojumu, bet izmaksas tāda veida telpas

apkurei var palielināties. Temperatūras līmenis telpā pieaug un arī citi termiskā komforta apstākļi nav pasliktinājušies. Tomēr jāatzīmē, ka apskatītais variants ir idealizēts un tajā netiek ievērota klimatisko apstākļu ietekme, ko apskatīsim atsevišķi, telpas ventilācijas atverē definējot 1 Pa pārspiedienu (3D-G5-2) un -1Pa zemspiedienu (3D-G5-3) salīdzinājumā ar ārgaisu.

Modelēšanas variantā 3D-G5-2 siltuma apmaiņa ar blakus esošajām telpām un kāpņu telpu nav mainījies, bet, pateicoties uzdotajai spiedienu starpībai, ir novērsta gaisa ieplūde loga spraugā, kā rezultātā palielinās temperatūra ārsienas un loga tuvumā (attēli 4.63b, 4.65b); tas veicina siltuma zudumu pieaugumu šajās vietās (tabula 4.12). Mainās arī gaisa plūsmu lauks telpā – tagad to pamatā nosaka 1 Pa spiedienu starpība starp ventilācijas atveri un ārgaisu, tāpēc lielākais virpulis, ko noteica aukstā gaisa ieplūde, tagad vairs nav novērojams (attēls 4.65b). Tā vietā gaisa kustību telpā būtiski ietekmē kāpņu telpas gaisa ar 15 °C temperatūru ieplūde ar ātrumu līdz 1,5 m s⁻¹ un gaisa izplūde uz āru pa spraugu ap logu, kas telpas vidējo kustības ātrumu palielina divreiz līdz 6 cm s⁻¹, bet telpas vidējo temperatūra samazina līdz 17,3 °C. Konvektīvo siltuma zudumu loma ir pieaugusi gandrīz 3 reizes un būtiski palielinājusies telpas gaisa apmaiņa. Tajā pat laikā rezultējošie siltuma zudumi salīdzinājumā ar variantu 3D-G5-1 pieaug vairāk nekā uz pusi (tabula 4.12), ko nosaka arī liels sildelementa laukums, kas pie konstantas temperatūras un palielinātās gaisa kustības intensitātes gar tā virsmu gadījumā nozīmē arī lielāku siltuma atdevi. Stratifikācija telpā joprojām nepārsniedz 1 °C un, pateicoties novērstai ārgaisa ieplūdei, ārsienas zonā temperatūras profils izmainās un tagad praktiski sakrīt ar citiem profiliem (attēls 4.66b), kas nozīmē, ka vertikālās temperatūras atšķirības ir vienādas visā telpā un nepārsniedz 0,7 °C.

Gadījumā, ja vēja spiediena rezultātā telpā rodas 1 Pa zemspiediens (variants 3D-G5-3), aukstā ārgaisa ieplūde telpā intensificējās, tās ietekmē līdz 14,8 °C samazinās telpas vidējā temperatūra un ārsienas tuvumā veidojas īpaši zemas temperatūras apgabals (attēls 4.63c). Šajā gadījumā noteicošā loma telpas temperatūras un ātrumu lauku veidošanā ir tieši spiedienu starpības izraisītai gaisa plūsmai. Attēlā 4.64b parādītie temperatūras diapazona 13...15 °C kontūri telpas simetrijas plaknē un attēlā 4.67 redzamās 11 °C, 13 °C un 14 °C izovirsmas demonstrē ārgaisa ieplūdes nozīmi temperatūras lauka veidošanā – aukstā gaisa masas sākumā pārvietojas uz leju gar palodzes malām, bet sasilstot virzās uz telpas vidu grīdas tuvumā. Rezultātā telpā veidojas viens izteikts virpulis ar vidējo gaisa kustības ātrumu 6 cm s⁻¹, bet maksimālie ātrumi, kā arī varēja sagaidīt, novēroti atverēs norobežojošās konstrukcijās (attēls 4.65c). Šādā situācijā vertikālā temperatūras starpība telpas vidusdaļā pārsniedz 2 °C, bet tuvāk ārsienai sasniedz pat 5 °C, kas vairs neatbilst termiskā komforta prasībām (attēls 4.66c). Analizējot siltuma zudumus (tabula 4.12), ir redzams, ka, samazinoties telpas gaisa temperatūrai, nedaudz samazinās siltuma plūsma uz āru, bet plūsma uz kāpņu telpu ar 15 °C temperatūru ir praktiski izslēgta, savukārt, siltuma plūsma no blakus esošās

telpām ir būtiski palielinājusies. Vairāk kā 20 reizes pieaug konvektīvie siltuma zudumi, ko izraisa intensīvās gaisa infiltrācija, un gaisa apmaiņas koeficients telpā palielinās līdz $1,1 \text{ h}^{-1}$.



Attēls 4.67. Gaisa ieplūde variantā 3D-G5-3 (temperatūras izovirsmas no kreisās 11 °C, 13 °C un 14 °C).

Apkopojot modelēšanas rezultātus telpas modelim ar grīdas apkuri, var secināt, ka nepieciešamais apkures siltuma daudzums gadījumā bez konvektīviem siltuma zudumiem (labi noblīvetai telpai) ir mazāks salīdzinājumā ar klasisko apkuri, tas uzlabo ēkas energoefektivitāti kopumā. Samazinās arī gaisa stratifikācija un temperatūras profils ir tuvs ideālam, arī gaisa kustības ātrumi ir ļoti mazi praktiski visā telpā, tādējādi termiskā komforta apstākļi arī uzlabojas. Tajā pat laikā jau pie nelielas spiedienu starpības, kas izsauc pastiprinātas gaisa plūsmas caur atverēm norobežojošās konstrukcijās, siltuma zudumi pieaug straujāk pateicoties lielam grīdas apsildāmajam laukumam un zemspiediena gadījumā divreiz pārsniedz zudumus analogiskā bāzes modeļa variantā 3D-1D-3. Tāpēc no energoefektivitātes viedokļa šāds telpu apkures veids ir lietderīgs tikai labi noblīvētās telpās un bez intensīvām gaisa plūsmām – lai nodrošinātu svaiga gaisa pieplūdi jālieto īpaši projektēta piespiedu ventilācijas sistēma.

4.4.5. Starojuma ievērošana un solārā avota ietekme

Visi līdz šim apskatītie telpas modeļu aprēķini tika veikti, ievērojot tikai vadīšanas un konvekcijas siltuma pārneses procesus, kas pamatā arī nosaka gan atsevišķas telpas, gan visas ēkas siltuma zudumus un tādējādi ļauj izdarīt secinājumus par energoefektivitāti un iespējamām tās uzlabojumiem. Pēdējā laikā Latvijā tika realizēti daudzi dzīvojamu un biroja ēku projekti, kuru fasādes gandrīz pilnībā ir veidotas no caurspīdīgām konstrukcijām. Šādā gadījumā būtiska kļūst arī solārā starojuma ietekme uz siltumfizikāliem procesiem telpā un tas nozīme, ka kopējās siltuma bilancē tas nevar tikt neievērots. Kā rāda eksperimentālie mērījumi ēkās ar stikla fasādēm (Jakovičs *et.al.*, 2006), raksturīgais pavasarī Rīgā reģistrētais Saules starojuma blīvums atsevišķos gadījumos

pārsniedz 500 W m^{-2} , kas ir daudzkārt lielāks par siltuma zudumu plūsmu blīvumiem un telpu gaisa dzesēšana var būt nepieciešama pat vairākas stundas dienā arī apkures sezonas laikā.

Šajā sadaļā novērtēsim telpas energoefektivitāti raksturojošos lielumus un termiskā komforta izmaiņas, modelī ievērojot starojuma siltuma pārnesei un variējot tādus parametrus, kā Saules starojuma krišanas leņķis (attēls 4.12) un konvektīvās gaisa plūsmas caur norobežojošām konstrukcijām. Atšķirībā no bāzes ģeometrijas visi turpmāk apskatītie modeļi neietver palodzi, lai tā neietekmētu caur logu telpā nonākušā solārā starojuma izplatīšanos. Noslēgtas telpas modeļa ģeometrija bez atverēm tiek apzīmēta 3D-G6 (attēls 4.44f), bet ģeometrija ar ventilācijas atveri un spraugu pa loga perimetru – 3D-G7 (kas sakrīt ar apskatītu ģeometriju 3D-G2 – attēls 4.44b). Modelētie varianti ir aprakstīti sadaļas 4.4 sākumā, bet aprēķinos iegūtie svarīgākie rezultāti apkopoti tabulā 4.12. Nosacīti visu variantu rezultātus var iedalīt šādās apakšgrupās:

- telpas bez un ar starojuma siltuma apmaiņas ievērošanu (3D-G6-1 un 3D-G6-2);
- solārais starojums no loga ar dažādiem krišanas leņķiem (3D-G6-3, 3D-G6-4 un 3D-G6-5);
- izslēgta apkures sistēma (3D-G6-6);
- gaisa ieplūdes un izplūdes caur atverēm telpas norobežojošās konstrukcijās (3D-G7-1, 3D-G7-2 un 3D-G7-3).

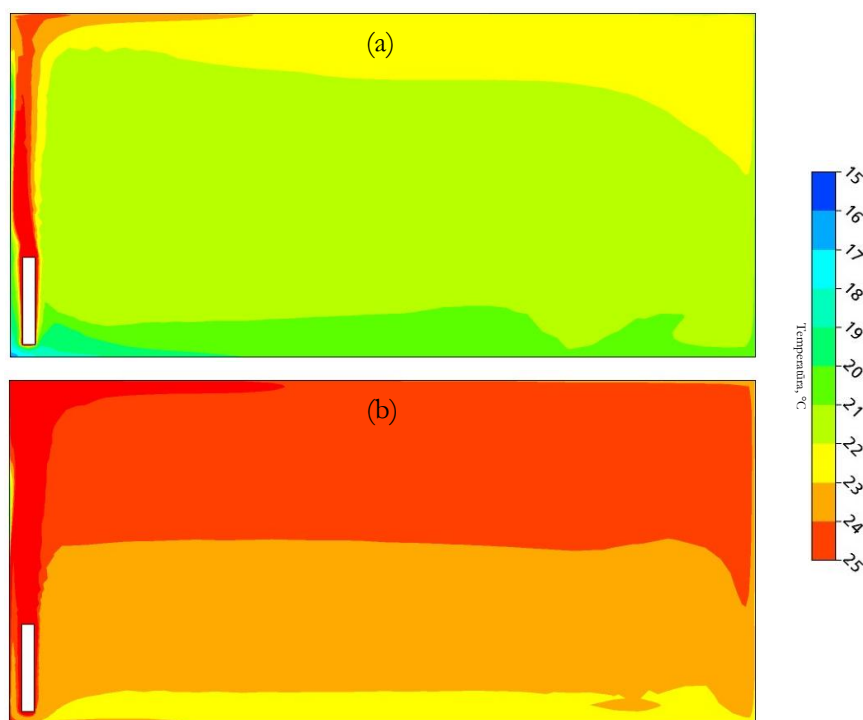
Iegūtos rezultātus iespējams sadalīt divās daļās, viena no kurām ietver telpas siltuma bilanci raksturojošus lielumus (apkures jauda, siltuma zudumu, solārais avots un konvektīvā pārnese), bet otra – termiskā komforta raksturlielumus (vidējā temperatūra, tās vertikālais gradients un gaisa kustības ātrums).

Lai novērtētu faktisko starojuma siltuma pārnesei ietekmi uz no sildītāja kā karstākā objekta izdalīto siltuma daudzumu un tā lomu telpas kopējā siltuma bilanci, vispirms salīdzināsim divus ģeometriski identiskus variantus 3D-G6-1 un 3D-G6-2, kas atšķiras tikai ar starojuma siltuma pārnesei ievērošanu. Ar abu aprēķinu variantu rezultātiem var iepazīties tabulā 4.12. Kā varēja gaidīt, telpā ar starojuma pārnesei no sildītāja izdalītais summārais siltuma daudzums ir lielāks, pieaugums sastāda pusi no pirmajā gadījumā noteiktā, kā pamatā ir sildītāja pietiekami augstā ($50 \text{ }^\circ\text{C}$) virsmas temperatūra. Jāatzīmē, ka noteiktā jauda reālos apstākļos lielākoties būs mazāka, jo aprēķinos ir lietota palielināta sildītāja virsmas emisija $\varepsilon = 0,9$, lai demonstrētu maksimāli iespējamo starojuma daļu – dabā ε parasti ir mazāks, kas nozīmē arī mazāku izstarotās enerģijas jaudu. Tomēr starojuma daļa kopējā siltuma bilanci ir būtiska un kvantitatīvai telpu apstākļu modelēšanai ir nepieciešama tā ievērošana. Tāpēc uz mēneša bilances balstītajā visas ēkas integrālajā siltuma bilances aprēķinā, kas ir apskatīts sadaļā 3.2, šis pārnesei veids tuvināti tiek ievērots.

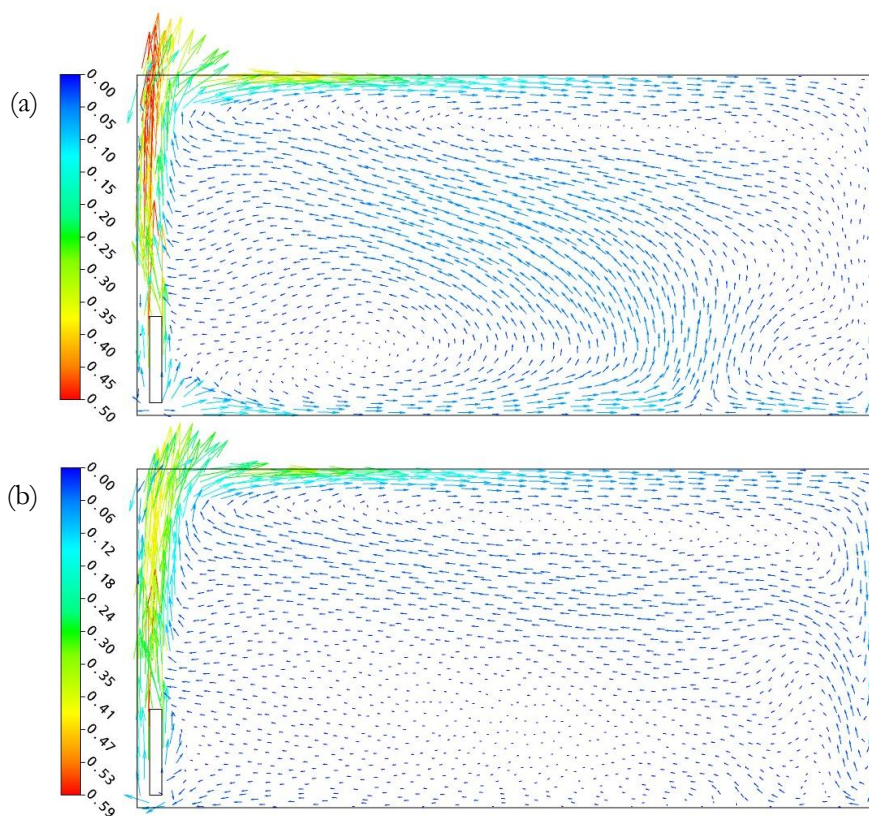
Līdz ar izdalītās jaudas pieaugumu palielinās arī telpas vidējā temperatūra, kas variantā bez starojuma ievērošanas 3D-G6-1 bija $21,6 \text{ }^\circ\text{C}$ (kas labi saskan ar vienkāršā 2D modeļa rezultātiem-

skat. sadaļu 4.3.1), bet variantā 3D-G6-2 sasniedz jau 24,2 °C. Temperatūras sadalījums telpas simetrijas plaknē abos apskatāmos variantos ir parādīts attēlā 4.68. Tajā ir labi redzamas telpas temperatūras lauka kvantitatīvas izmaiņas, tajā pat laikā būtiski nemainoties kvalitatīvam sadalījumam, jo praktiski nemainīga paliek gaisa kustības intensitāte sildītāja tuvumā, bet pārējā telpā tās absolūtās vērtības ir mazas (attēls 4.69). Gaisa plūsmas un temperatūras lauks vertikālajā un horizontālajā plaknēs modelim ir parādīti attēlā 4.70, tajā ir redzami arī lejup vērsti ātruma vektori aukstāko sienu tuvumā.

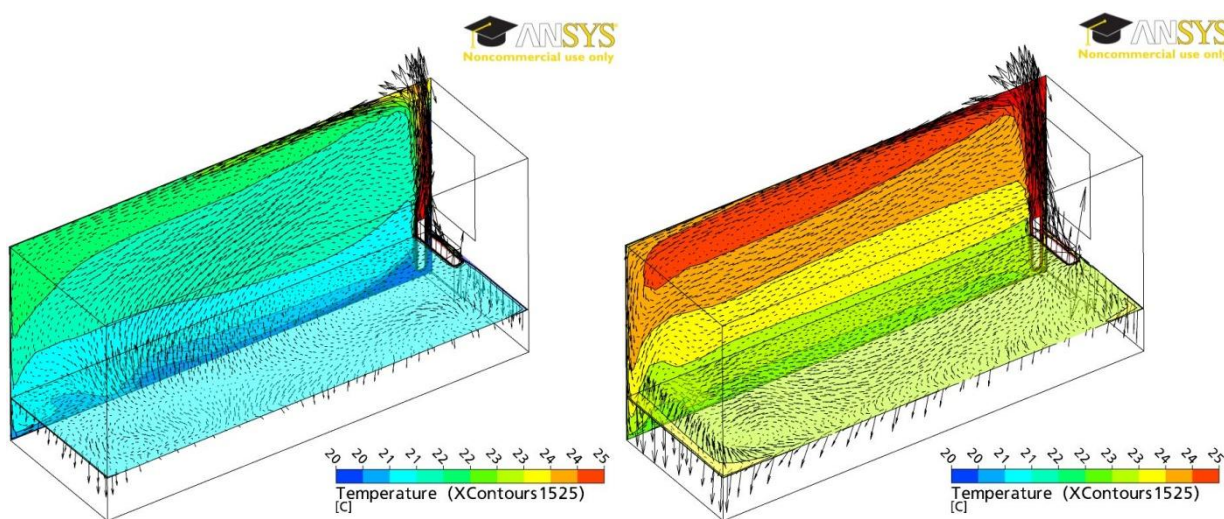
Mazākas temperatūras atšķirības dažādās telpas zonās, ko nosaka siltuma starojuma pārnese process, veicina vidējā gaisa kustības ātrumu samazinājumu no 5 līdz 2 cm s⁻¹ (tabula 4.12) un tādējādi ievērojami uzlabo vienu no termiskā komforta rādītājiem. Līdz ar to homogēnāks kļūst arī temperatūras vertikālais sadalījums dažādās telpas zonās (attēls 4.71), tā skaitliskā vērtība abos variantos ir nedaudz lielāka par 2 °C. Ievērojot siltuma starojumu, palielinās arī sildītāja tuvumā esošo virsmu temperatūras, kas liecina par starojuma ceļā nonākušo papildus siltuma daudzumu. Tā, analizējot attēlu 4.72, var redzēt paaugstinātas temperatūras zonas arī uz ārsienas un grīdas tiešā sildķermeņa tuvumā.



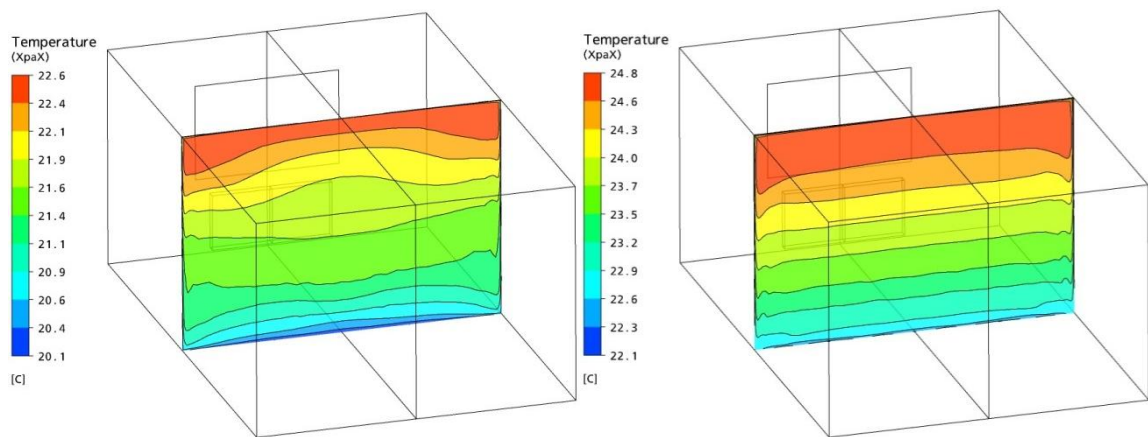
Attēls 4.68. Variantu 3D-G6-1 (a), 3D-G6-2 (b) temperatūras sadalījums simetrijas plaknē.



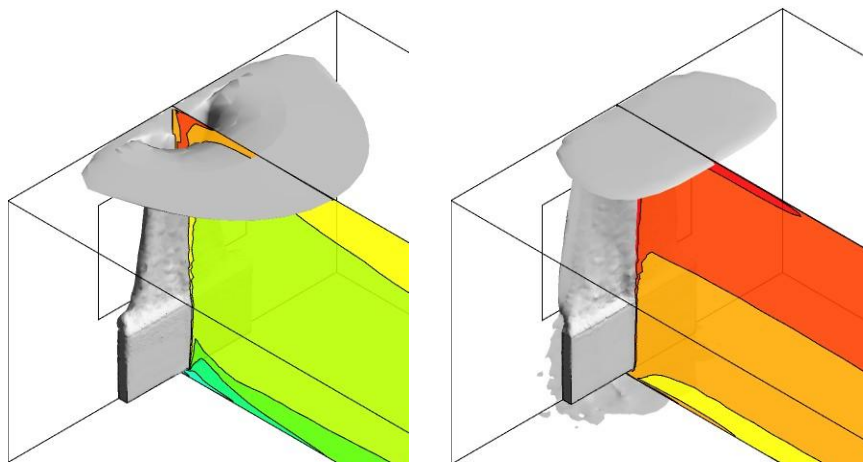
Attēls 4.69. Variantu 3D-G6-1 (a) un 3D-G6-2 (b) raksturīgais ātrumu (m s^{-1}) vektorlauks simetrijas plaknē.



Attēls 4.70. Variantu 3D-G6-1 (pa kreisi) un 3D-G6-2 (pa labi) raksturīgais ātrumu lauks un temperatūras kontūri simetrijas plaknē un horizontālajā plaknē 0,5 m augstumā.



Attēls 4.71. Variantu 3D-G6-1 (pa kreisi) un 3D-G6-2 (pa labi) temperatūras sadalījums vidusplaknē.

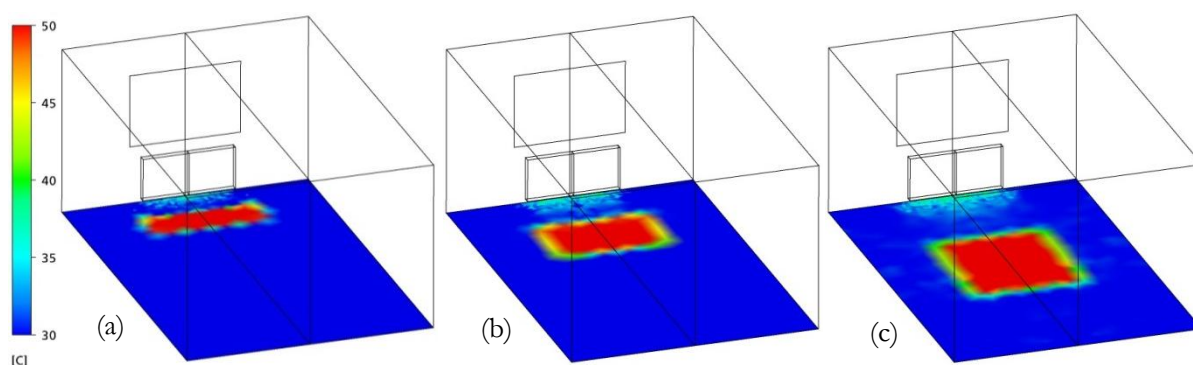


Attēls 4.72. Variantu 3D-G6-1 (pa kreisi) un 3D-G6-2 (pa labi) 23 °C un 25,5 °C izovirsmas attiecīgi.

Kā rāda aprēķinu rezultāti, nenoslēgtai telpai starojuma siltuma pārnese ievērojama palielina no sildītāja izdalīto jaudu, kas, savukārt, ietekmē vidējo temperatūru telpā un arī zudumus no tās. Atšķirībā no daudziem iepriekš apskatītajiem variantiem, variantā 3D-G6-2 temperatūras līmenis telpā ir tāds, ka blakus telpu fiksētā temperatūra 20 °C ir mazāka par telpas gaisa temperatūru un vairs nenotiek papildus siltuma daudzuma pieplūde no blakus telpām. Tagad caur visām sienām tiek reģistrēti siltuma zudumi, bet kā siltuma avots kalpo tikai sildītājs.

Nākamajā solī ievēdīsim vēl vienu siltuma avotu – solāro siltuma starojumu caur logu, jo tā ietekme atsevišķos gadījumos (piem., telpās ar lielu stiklotu virsmu laukumu) uz temperatūru un gaisa plūsmām telpā ir ļoti būtiska. Apskatīsim šo praksē bieži novērojamo faktu un novērtēsim siltumfizikālo procesu izmaiņas modelējamā telpā atkarībā no Saules starojuma pie dažādiem tā krišanas leņķiem (skat. attēlu 4.12). Izvēlēts leņķu skaitliskās vērtības – 30° (variants 3D-G6-3), 45° (variants 3D-G6-4) un 60° (variants 3D-G6-5) virs horizonta atbilst pavasara dienai Latvijas platuma grādos.

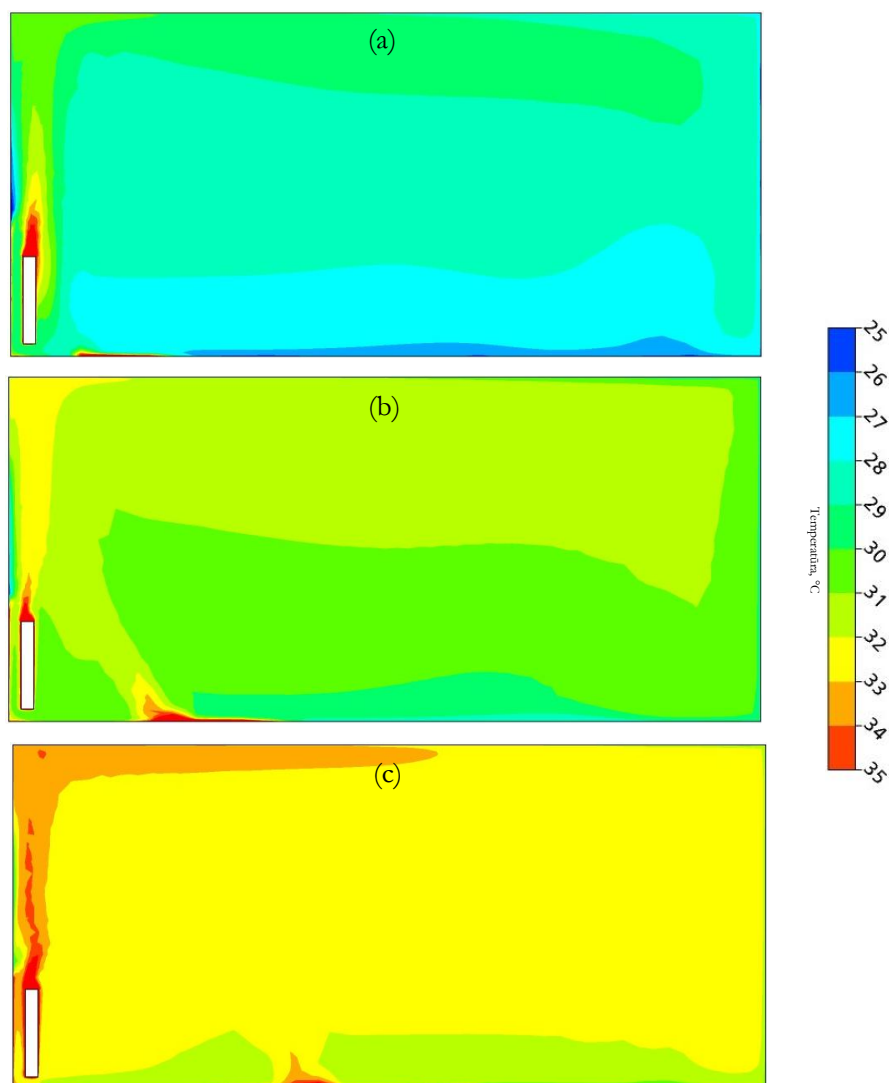
Iegūtie rezultāti ir apkopoti tabulā 4.12. Dzīvojamās telpas modelī uz visas loga virsmas atbilstoši eksperimentāliem mērījumiem Rīgā (Jakovičs *et.al.*, 2006) tiek uzdots konstants starojuma jaudas blīvums – 500 W m^{-2} , tāpēc faktiski telpā nonākušās enerģijas daudzums ir atkarīgs no krišanas leņķa. Pie 60° vērtības papildus solārā siltuma avota ieguldījums kopējā bilancē sastāda $\sim 230 \text{ W}$, pie $45^\circ \sim 330 \text{ W}$, bet pie 30° jau $\sim 410 \text{ W}$, ko uzskatāmi demonstrē visu trīs variantu telpas grīdas temperatūra ar Saules starojuma izraisītu atbilstošā laukuma uzsilšanu, kas ir parādīta attēlā 4.73. Pie mazāka krišanas leņķa tiek apspīdēts ievērojami lielāks grīdas laukums, kas ietekmē telpas vidējo temperatūru un gaisa plūsmu raksturu.



Attēls 4.73. Temperatūras sadalījums uz grīdas variantos 3D-G6-3 (a), 3D-G6-4 (b) un 3D-G6-5 (c).

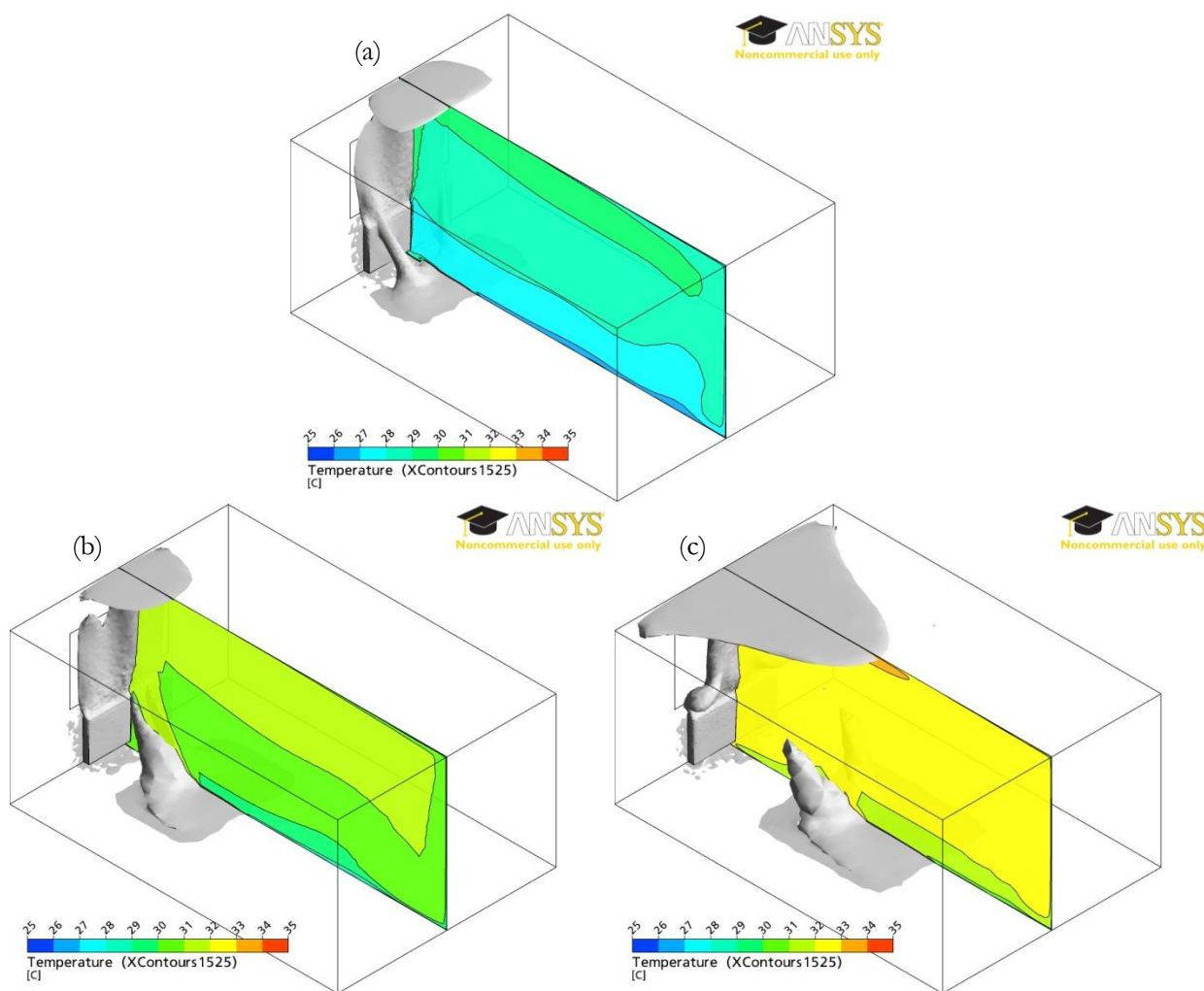
Temperatūras sadalījumi telpas simetrijas plaknē apkopoti attēlā 4.74, tajos ir labi redzams ne tikai vidējās temperatūras pieaugums, samazinoties krišanas leņķim, bet ar paaugstinātu gaisa temperatūra grīdas virsmas tuvumā tiešā solārā starojuma nonākšanas vietās (atbilstoši attēlam 4.73). Pamazinoties Saules novietojumam virs horizonta, telpas „dzīvojamās zonas” vidējā temperatūra pieaug par 4 grādiem – no $28,4^\circ \text{C}$ līdz $32,5^\circ \text{C}$. Tādu temperatūras celšanos faktiski nosaka tikai Saules starojums, jo no sildītāja izdalītais siltuma daudzums paliek nemainīgs 175 W līmenī, kas, tādējādi, ir mazāks par solārā avota jaudu pie jebkura apskatītā krišanas leņķa. No termiskā komforta viedokļa tāds temperatūras līmenis nav pieņemams un šajā situācijā ir nepieciešama termostatiskā apkures sistēmas regulēšana vai dzesēšanas sistēmas ierīkošana, bet visvienkāršākais risinājums solārā starojuma samazinājumam ir loga aizkaru vai vēl efektīvāk – ārējo žalūziju lietošana (Collins, 2004).

Pie grīdas virsmas, kas ir uzsilusi Saules tiešā starojuma rezultātā, gaiss ar paaugstinātu temperatūru ceļas uz augšu un pārvietojas ārsienas virzienā, ko uzskatāmi demonstrē attēlā 4.75 parādītās izovirsmas. Tajās ir labi redzami arī starojuma modeļa skaitliskā algoritma efekti – uz virsmām sildītāja tuvumā ir redzamas neregulārās paaugstinātas temperatūras zonas.



Attēls 4.74. Variantu 3D-G6-3 (a), 3D-G6-4 (b) un 3D-G6-5 (c) temperatūras sadalījums simetrijas plaknē.

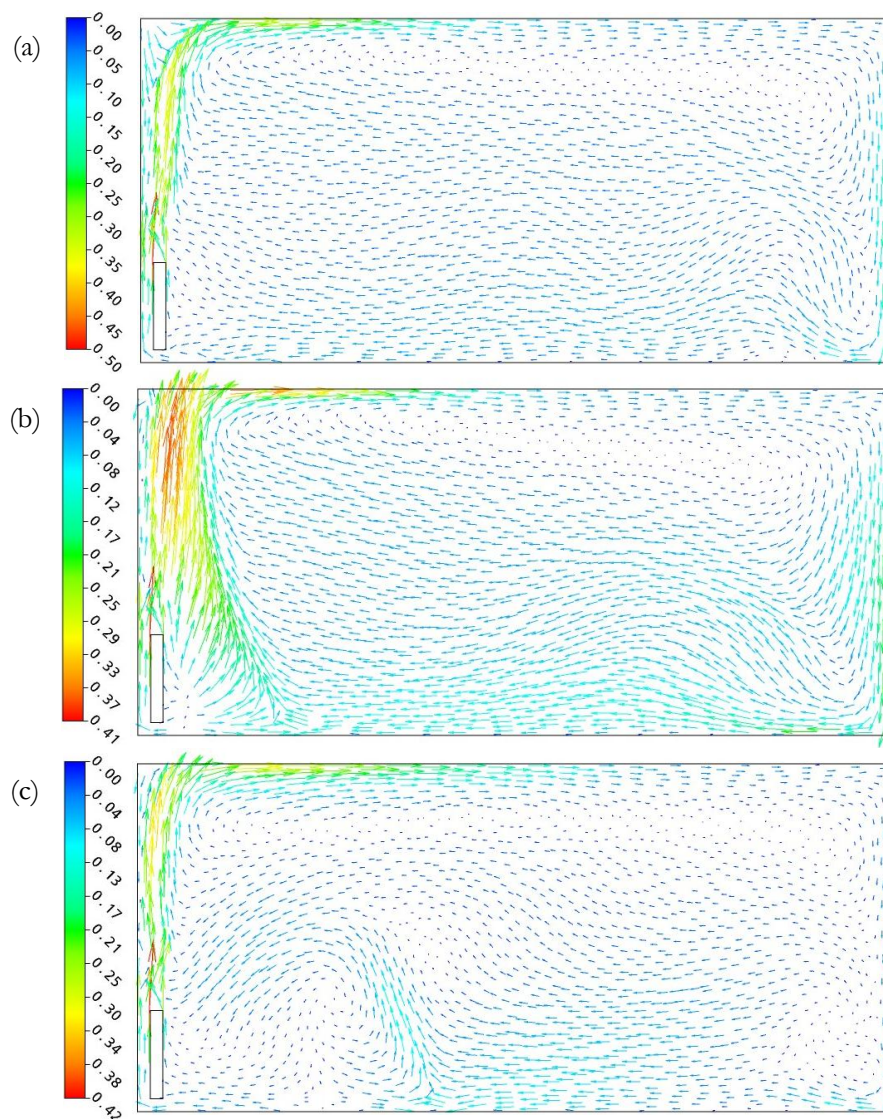
Neskatoties uz papildus siltuma avotu telpā, kas izsauc gaisa masu pārvietošanos, intensīvākās gaisa plūsmas veidojas pateicoties konvektora būtiski augstākai temperatūrai. Kustība ātrumi loga tuvumā sasniedz $30...40 \text{ cm s}^{-1}$, bet pārējā telpās daļā, pateicoties noslēgtai telpas ģeometrijai, nepārsniedz $5-6 \text{ cm s}^{-1}$ (att. 4.76), kas apmierina komforta prasības. Cits svarīgs faktors – temperatūras vertikāla starpība variantā 3D-G6-3 sastāda $2,5 \text{ °C}$, bet pārējos divos variantos ar mazāku krišanas leņķi – $1,7 \text{ °C}$, kas, tādējādi, arī atbilst komforta nosacījumiem. Stratifikācijas piemēri telpas vidusšķēlumā parādīti attēlā 4.77 – kā redzams, lielākās temperatūras atšķirības ir novērojams grīdas tuvumā, pirmajos divos gadījumos to pamatā nosaka tās fiksētā 20 °C temperatūra, bet variantā ar 30° solārā starojuma krišanas leņķi šķēluma apakšējā daļā atrodas arī Saules apstarotais laukums.



Attēls 4.75. Variantu 3D-G6-3 (a), 3D-G6-4 (b) un 3D-G6-5 (c) temperatūru 30 °C, 32 °C un 33 °C izovirsmas attiecīgi.

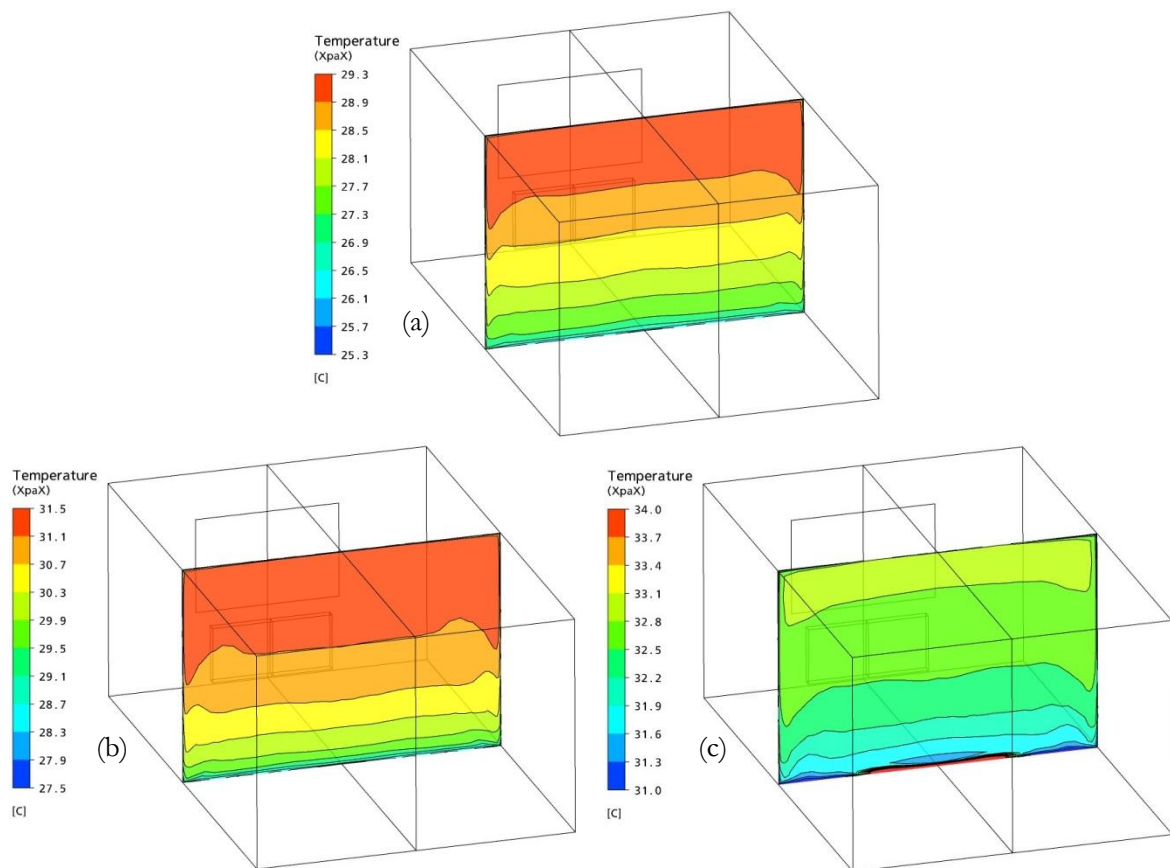
Analizējot Saules starojuma ietekmi uz enerģijas bilanci telpā, var apgalvot, ka tā lielums ir salīdzināms ar apkures sistēmas jaudu un pat lielāks par to, kas būtiski palielina telpas gaisa temperatūras līmeni. Visi apskatītie varianti neietvēra gaisa apmaiņas iespēju, tāpēc rezultātā iegūtās temperatūras vērtības ievērojami pārsniedz termiskā komforta prasības un ir nepieciešama dzesēšana. Tomēr atsevišķos gadījumos varētu pietikt arī ar vienkāršu apkures sistēmas atslēgšanu, telpas temperatūrai sasniedzot kādu noteiktu vērtību. Tāpēc atsevišķi apskatīsim situāciju telpā bez apkures.

Gadījumā, ja telpā izslēgta apkures sistēma un kā vienīgais siltuma avots kalpo solārais starojums, tas pamatā arī nosaka gaisa cirkulāciju un temperatūras līmeni tajā. Citi ietekmējošie faktori ir norobežojošo konstrukciju temperatūras, kas ir atkarīgas no ārpusē uzdotajām temperatūrām. Apskatīsim gadījumu, kad Saules starojuma krišanas leņķis ir 45°, un novērtēsim, vai solārais avots ir pietiekams, lai telpā uzturētu pieņemamu temperatūru un nodrošinātu termiskā komforta apstākļus bez papildus apkures. Šim mērķim uz sildītāja virsmas tiek uzdoti adiabatiskie nosacījumi, tādējādi izslēdzot siltuma apmaiņu ar to. Telpas ģeometrija 3D-G6 ir tāda pati kā iepriekšējos variantos (attēls 4.44f), bet šo aprēķinu variantu apzīmēsim ar 3D-G6-6.



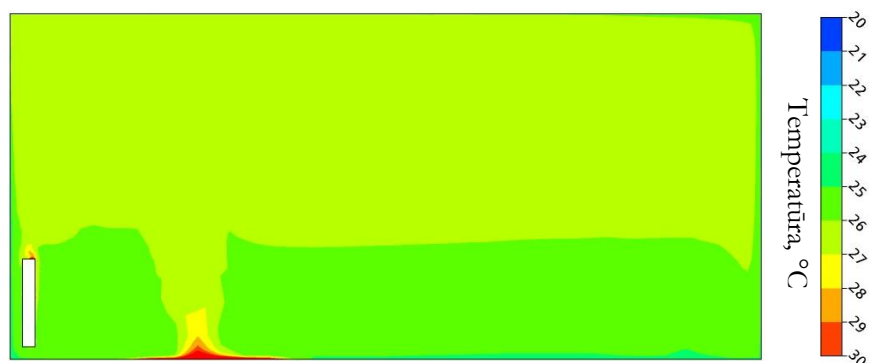
Attēls 4.76. Variantu 3D-G6-3 (a), 3D-G6-4 (b) un 3D-G6-5 (c) raksturīgais ātrumu (m s^{-1}) vektorlauks simetrijas plaknē.

Svarīgākie iegūtie rezultāti ir apkopoti tabulā 4.12. Ir redzams, ka gadījumā ar izslēgtu apkures sistēmu, pievadītās Saules enerģijas pietiek, lai apskatītajā telpā uzturētu gaisa temperatūru $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ līmenī. Salīdzinot ar analogisku variantu 3D-G6-4 ar ieslēgtu sildītāju, temperatūra ir samazinājusies par $4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tā kā tagad telpā ir tikai viens siltuma avots un sildītājs ar augstu virsmas temperatūru neizraisa palielinātu gaisa cirkulāciju tā tuvumā, radikāli mainās arī temperatūras un gaisa plūsmu lauks. Temperatūras sadalījumā simetrijas plaknē, kas parādīta attēlā 4.78, ir redzams, ka telpā pastāv viena karstā zona solārā starojuma krišanas vietā grīdas tuvumā (skat. arī attēlu 4.79). Paaugstināta temperatūra sildītāja augšējā daļā ir izskaidrojama ar tiešo starojumu no loga.

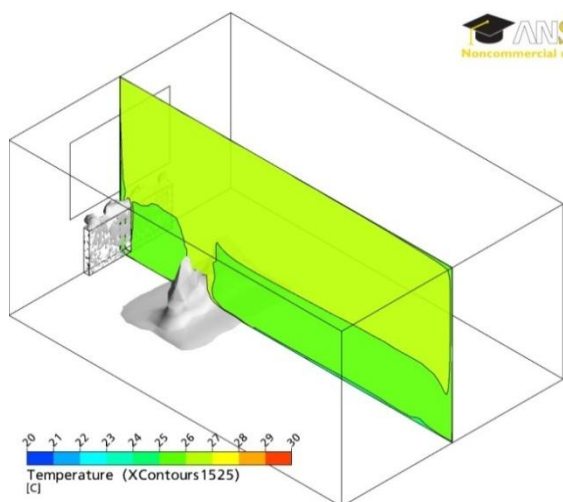


Attēls 4.77. Variantu 3D-G6-3 (a), 3D-G6-4 (b) un 3D-G6-5 (c) temperatūras sadalījums vidusplaknē.

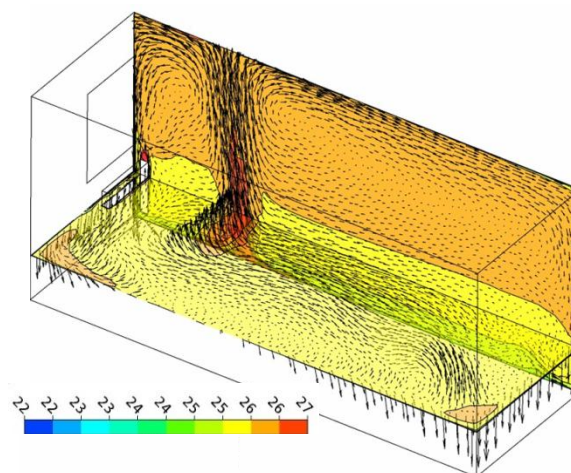
Pie grīdas virsmas uzsilis gaiss mazākā blīvuma dēļ pārvietojas gandrīz vertikāli augšup (atšķirībā no varianta ar ieslēgtu sildītāju, kur gaisa plūsmu raksturs ir cits), bet lejupvērsta gaisa kustība ir novērojama praktiski pie visām vertikālajām sienām ar ievērojami zemākām virsmas temperatūrām. Rezultātā telpā veidojas viens telpisks virpulis ar lielākiem gaisa kustības ātrumiem ap 20 cm s^{-1} tā centra (attēli 4.80, 4.81). Tomēr, salīdzinot ar iepriekš apskatītajiem variantiem, kur gaisa plūsmu raksturu noteica arī sildķermenis, maksimālie ātrumi ir samazinājušies un vidējais ātrums telpas „dzīvojamā zonā” sastāda tikai 3 cm s^{-1} , kas ir ļoti labs rādītājs. Cits termiskā komforta rādītājs – vertikālā temperatūras starpība nav būtiski mainījies.



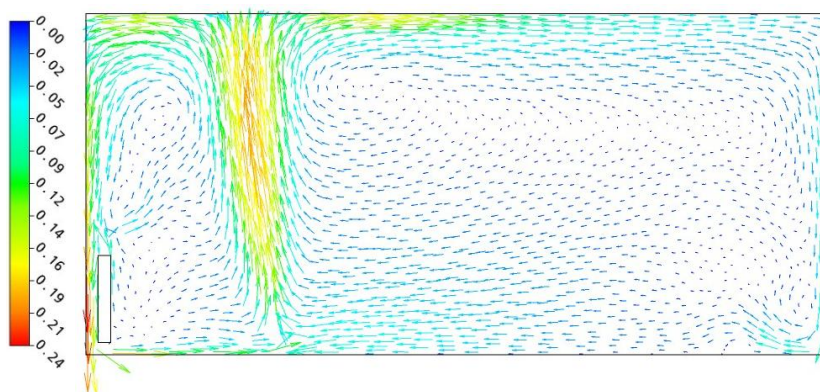
Attēls 4.78. Varianta 3D-G6-6 temperatūras sadalījums simetrijas plaknē.



Attēls 4.79. Varianta 3D-G6-6 temperatūras 27 °C izovirsmas.



Attēls 4.80. Varianta 3D-G6-6 raksturīgais ātrumu lauks un temperatūras kontūri simetrijas plaknē un horizontālajā plaknē 0.5 m augstumā.



Attēls 4.81. Varianta 3D-G6-6 raksturīgais ātrumu (m s^{-1}) vektorlauks simetrijas plaknē.

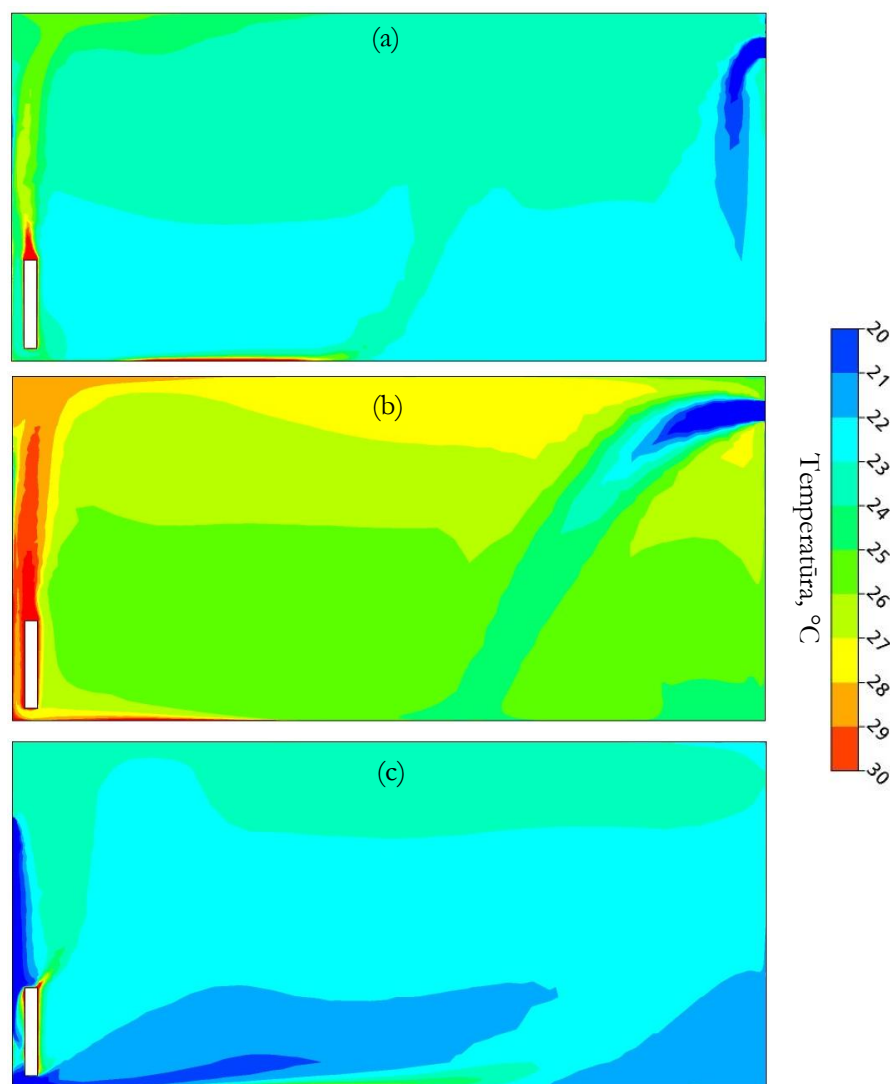
Neskatoties uz to, ka ar sildītāju netiek pievadīts siltuma daudzums, telpā reģistrētā temperatūra 26 °C ir pārāk augsta. Tāpēc pavasara periodā ēkās ar lielu stikloto virsmu daļu fasādēs ir lietderīgi izmantot termoregulāciju, atslēdzot apkures sistēmu uz noteiktu laiku. Bet, kā rāda pieredze, bieži šāda iespēja netiek realizēta vai pat paredzēta, ko, galvenokārt, nosaka apkures sistēmas īpatnības, kad nav iespējams individuāli regulēt atsevišķi fasāžu telpu apkures jaudu atkarībā no Saules krišanas leņķa un iekštelpu temperatūras. Jāatzīmē, ka reālos apstākļos temperatūra var būt arī zemāka par modeli noteikto, samazinājumu pamatā noteiks loga siltuma enerģijas caurlaidība SF (skat. sadaļu 2.4) un citi šķēršļi – aizkari, žalūzijas, kā arī gaisa cirkulācija caur dabīgām spraugām konstrukcijās un piespiedu ventilācijas sistēmu. Tāpēc nākamajos 3D modeļa ar siltuma starojumu variantos iekļausim arī konvektīvo siltuma apmaiņu, vēl vairāk tuvinot izveidoto modeli reālajiem apstākļiem telpā.

Ievērojot dzīvojamās telpās pastāvošo gaisa apmaiņu caur atverēm norobežojošās konstrukcijās, ir iespējams vēl precīzāk modelēt siltumfizikālos procesus telpā ar siltuma starojuma

ievērošanu. Šim nolūkam telpas modeļģeometrijā izveidosim 5 mm spraugu pa loga perimetru un arī ventilācijas atveri pretējā sienā analogiski ģeometrijai 3D-G2 (attēls 4.44b). Apzīmēsim jauno ģeometriju ar 3D-G7 un uz tās bāzes, līdzīgi kā ģeometrijās 3D-G1, 3D-G3 un 3D-G5, apskatīsim 3 apakšgadījumus ar atšķirīgiem spiedienu nosacījumiem uz atverēm:

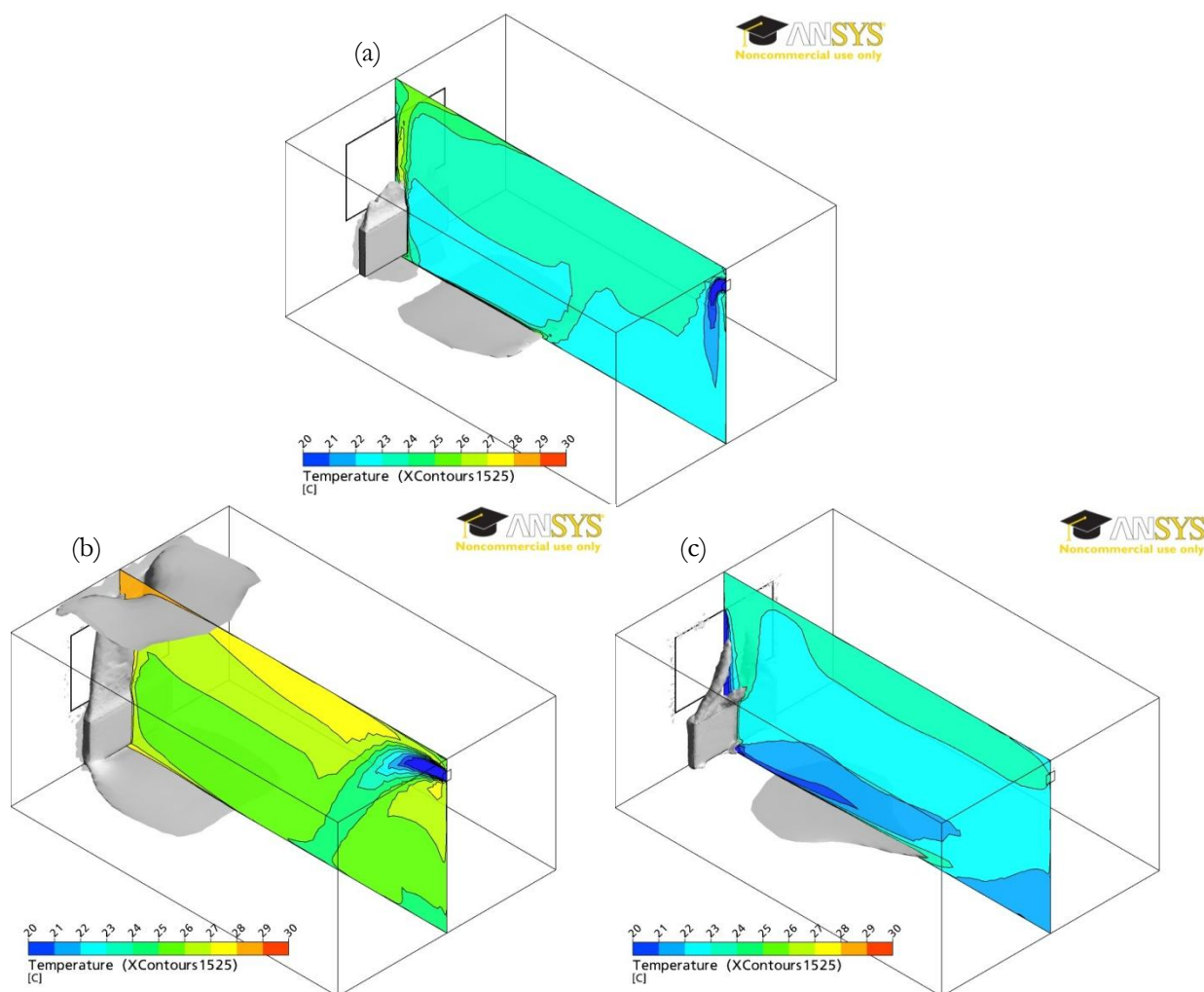
- spiedienu starpība starp atverēm pretējās sienās $\Delta P=0$ Pa – variants 3D-G7-1;
- uz spraugas ārējās sienā uzdotā relatīvā spiediena vērtība ir par 1 Pa mazāka par uz ventilācijas atveres uzdoto ($\Delta P=1$ Pa, telpā pārspiediens) – variants 3D-G7-2;
- uz spraugas ārējās sienā uzdotā relatīvā spiediena vērtība ir par 1 Pa lielāka par uz ventilācijas atveres uzdoto ($\Delta P=-1$ Pa, telpā zemspiediens) – variants 3D-G7-3.

Šo variantu svarīgākie rezultāti ir apkopoti tabulā 4.12. Kā redzams, solārā siltuma avota jauda paliek nemainīga, jo Saules krišanas leņķis nemainās. Savukārt, no otrā avota – apkures sistēmas sildītāja izdalītais siltuma daudzums ir atkarīgs no gaisa kustības intensitātes un tā temperatūras, tas nedaudz samazinās pārspiediena gadījumā (no 254 W līdz 232 W) un gandrīz par ceturtdaļu, līdz 315 W, pieaug variantā ar zemspiedienu. Šīs izmaiņas ir saistītas ar telpas vidējo gaisa temperatūru, ko būtiski ietekmē gaisa plūsmas caur norobežojošām konstrukcijām. Tā, variantā 3D-G7-1 ar 0 Pa spiedienu starpību, sprauga ap logu gaisa plūsmas virziens ir mainīgs un pastāv neliela auksto masu ieplūde, kas tiek novērsta, telpā nodrošinot 1 Pa pārspiedienam, un telpas vidējā temperatūra pieaug no 23,1 °C līdz 26,1 °C (skat. arī attēlus 4.82a,b). Pretējais efekts – ārgaisa ar temperatūru -10 °C ieplūde telpā notiek variantā ar zemspiedienu 3D-G7-3, kas samazina temperatūru līdz 22,4 °C (attēls 4.82c). Tomēr jāatzīmē, ka, pateicoties ievērojamai solārā starojuma daļai, kopējā siltuma bilancē arī šajā gadījumā temperatūras līmenis telpā ir pietiekami augsts.



Attēls 4.82. Variantu 3D-G7-1 (a), 3D-G7-2 (b) un 3D-G7-3 (c) temperatūras sadalījums simetrijas plaknē.

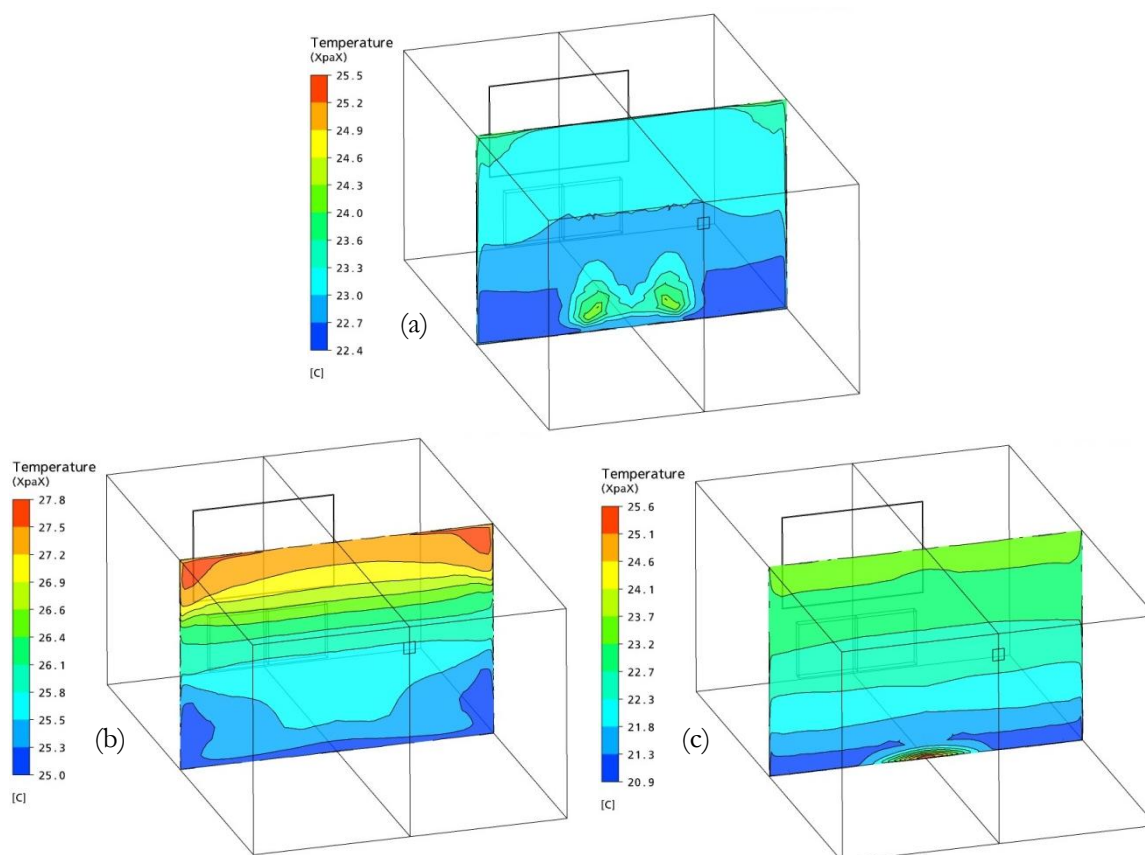
Attēlā 4.83 ir parādītas visu trīs variantu temperatūru izovirsmas, kas ilustrē ne tikai temperatūras lauku sildītāja tuvumā, bet arī solārā starojuma krišanas vietu, kur gaisa temperatūra Saules apspīdētā laukuma tuvumā pārsniedz 30 °C. Šāda vērtība neapmierina termiskā komforta nosacījumu prasību grīdas temperatūrai (skat. attēlu 4.6). Savukārt, intensīvās gaisa kustība dēļ šī gaisa slāņa biezums nepārsniedz dažus centimetrus un tā ietekme uz kopējo stratifikācijas raksturu ir daudz mazāka kā aukstāku gaisa masu kustības ietekmei. To uzskatāmi var redzēt temperatūras sadalījuma attēlos telpas vidusplaknē (attēli 4.83). Stratifikācijas aina citā telpas vertikālajā vidussķēlumā starp ārsienu un sienu uz gaiteni ir parādīta attēlā 4.84 – kā redzams, gadījumā ar 0 Pa spiedienu starpību (3D-G7-1) temperatūras starpības praktiski visā plaknē nepārsniedz 1 °C, izņemot siltāko zonu grīdas tuvumā, bet pārējos variantos ar gaisa infiltrāciju pieaug līdz 2-3 °C (skat. tabulu 4.12). Visos gadījumos noteiktās vertikālās temperatūras starpības vērtības telpas „dzīvojamās zonā” atbilst termiskā komforta prasībām (attēls 4.4).



Attēls 4.83. Variantu 3D-G7-1 (a), 3D-G7-2 (b) un 3D-G7-3 (c) temperatūru 26 °C, 28 °C un 24 °C izovirsmas attiecīgi.

Cits svarīgs faktors termiskā komforta nodrošināšanai – gaisa kustības ātrumi telpā bez spiedienu starpības (3D-G7-1) maksimāli sasniedz 50 cm s^{-1} norobežojošo konstrukciju tuvumā (attēls 4.85a), bet telpas „dzīvojamā zonā” nepārsniedz 4 cm s^{-1} , izņemot telpas viduszonu, kur augšupvērsta plūsma no Saules apspīdētā apgabala palielina kustības intensitāti – līdz 20 cm s^{-1} . Pieņemot, ka turbulences intensitāte Tu apskatāmajā telpā ar dabīgo ventilāciju ir 20%, bet raksturīgā temperatūra T sastāda 23 °C , pēc sakarības (4.3) nosakām, ka maksimāli pieļaujamā gaisa plūsma ir 20 cm s^{-1} , kas sakrīt ar modeli noteikto. Tādējādi var apgalvot, ka šis kritērijs telpās ar zemāku temperatūru vai ar piespiedu ventilāciju, kas palielina turbulences intensitāti, atsevišķos reģionos nebūs izpildīts. Tomēr jāatzīmē, ka reālos apstākļos telpā ir novietoti dažādi interjera objekti, kas samazinās gaisa pārvietošanās ātrumu. Telpā pastāvot aktīvai gaisa ieplūdei 1 Pa spiedienu starpības rezultātā (3D-G7-2 un 3D-G7-3) palielinās arī maksimālie kustības ātrumi, kas ir novērojami ventilācijas atveres un ārējās konstrukcijas tuvumā (attēli 4.85b,c), līdz 6 cm s^{-1} pieaug arī vidējie plūsmas rādītāji telpas „dzīvojamā zonā”. Līdzīgi kā iepriekšējā variantā, telpā eksistē zonas ar aktīvu gaisa cirkulāciju, kur termiskā komforta nosacījumi lokāli netiek izpildīti un ko lielā mērā nosaka arī

apskatītais telpas modelis bez jebkādiem mākslīgiem gaisa plūsmu šķēršļiem (piem., gulta, galds u.c. mēbeles).

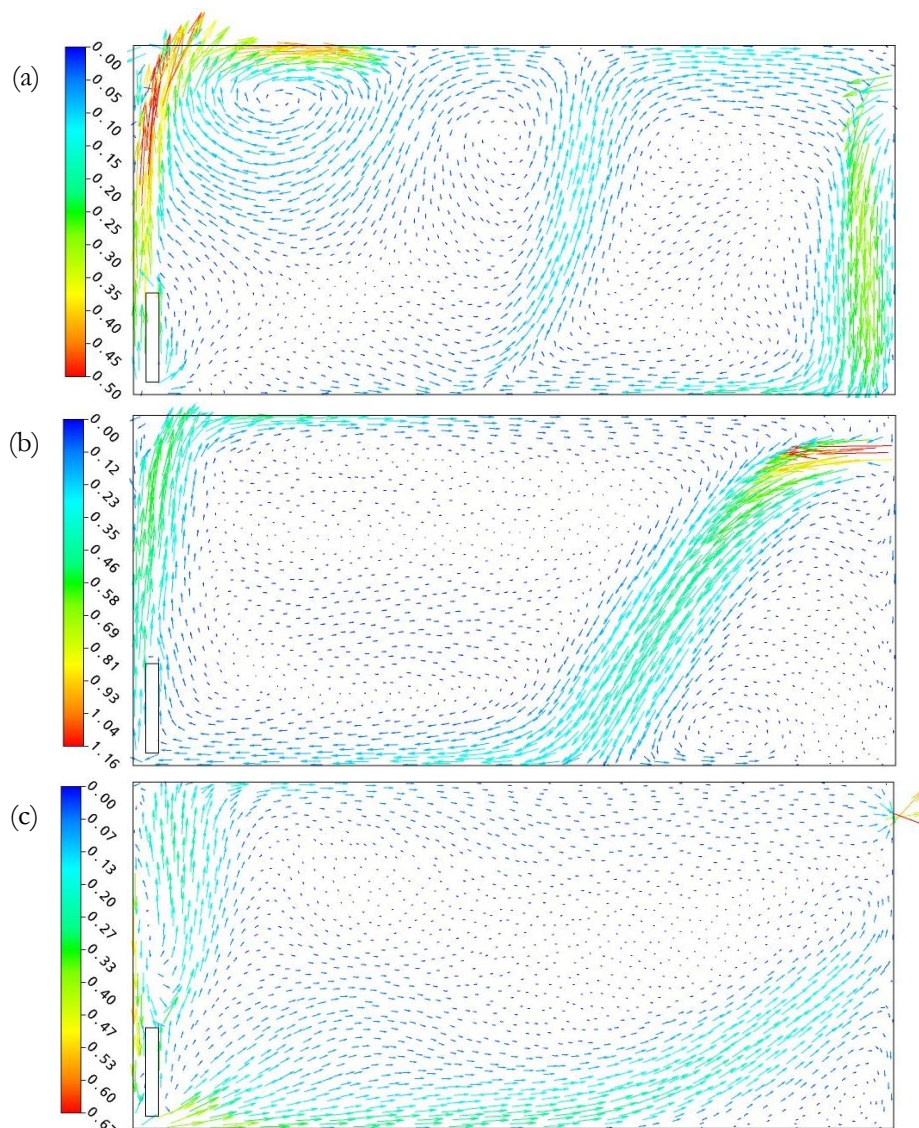


Attēls 4.84. Variantu 3D-G7-1 (a), 3D-G7-2 (b) un 3D-G6-3 (c) temperatūras sadalījums vidusplaknē.

Sarežģīta daudzvirpuļu plūsmas struktūra ar maksimālajiem ātrumiem līdz 50 cm s^{-1} variantā 3D-G7-1 bez uzdotās spiedienu starpības parādīta attēlā 4.86a. To raksturu nosaka sekojošie faktori:

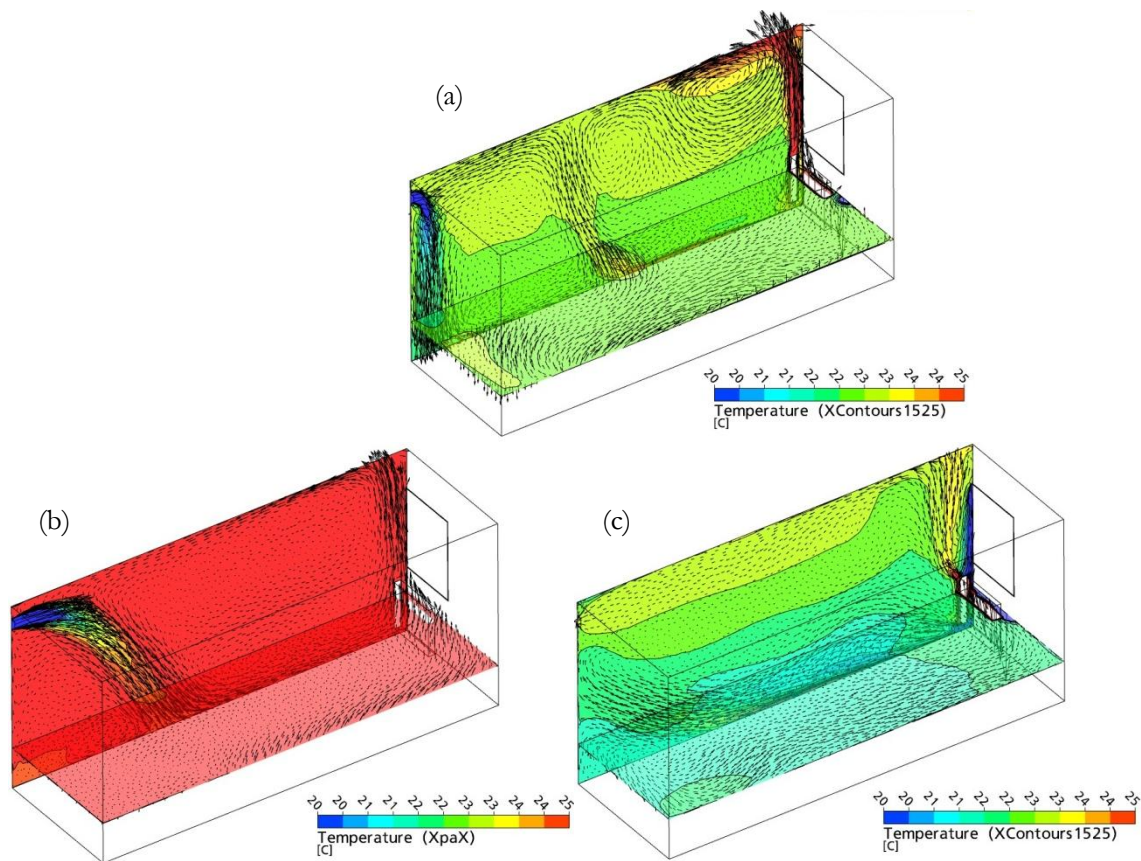
- aukstā gaisa ieplūde no gaitiņa pa ventilācijas atveri, kas virzās gar sienu uz leju;
- Saules apspīdētā reģionā uzsilušā gaisa kustība augšup un sadalīšanās pie griestiem;
- karstā gaisa no sildītāja virsmas pārvietošanās augšup gar logu, izraisot intensīvu plūsmu.

Situācija radikāli mainās, ja pastāv gaisa ieplūde pa kādu no atverēm norobežojošās konstrukcijās. Tā, variantā 3D-G7-2 intensīva gaisa plūsma no gaitiņa veido tikai divus virpuļus visā telpā (attēls 4.86b). Tā kā gaisa masas nonāk telpā caur neliela izmēra ventilācijas atveri, plūsma tās tuvumā sasniedz $1,1 \text{ m s}^{-1}$ (skat. arī attēlu 4.85), bet pārējā telpas daļā nepārsniedz 15 cm s^{-1} . Mainoties spiedienu starpības virzienam, mainās arī gaisa kustības struktūra telpā, bet arī šādā gadījumā pastāv viena dominējoša gaisa plūsma no ārsienas zonas (attēls 4.86c) ar maksimālo ātrumu 40 cm s^{-1} , tajā pat laikā ventilācijas atverē plūsmas intensitāte pārsniedz 60 cm s^{-1} (skat. arī attēlu 4.85).



Attēls 4.85. Variantu 3D-G7-1 (a), 3D-G7-2 (b) un 3D-G7-3 (c) raksturīgais ātrumu (m s^{-1}) vektorlauks simetrijas plaknē.

Analizējot ģeometrijas 3D-G7 variantu siltuma zudumu sadalījumu (tabula 4.12), ir redzams, ka plūsma uz blakus telpām mainās atbilstoši telpas gaisa temperatūras izmaiņām – lielākās modelējamās telpas temperatūras gadījumā tā ir divreiz lielāka par plūsmu mazākās temperatūras gadījumā. Interesanta ir zudumu caur logu izmaiņu tendence – variantā 3D-G7-2 siltā gaisa plūsma no sildītāja ir vērsta tālāk no loga virsmas, kas nosaka siltuma zudumu samazinājumu, bet zemspiediena gadījumā (variants 3D-G7-3) intensīvās aukstā ārgaisa ieplūdes rezultātā telpas gaisa temperatūra loga tuvumā ir ļoti zema un tas samazina integrālos zudumus caur to līdz minimumam.



Attēls 4.86. Raksturīgais vektorlauks un temperatūras sadalījums simetrijas plaknē un horizontālajā plaknē 75 cm augstumā variantos 3D-G7-1 (a), 3D-G7-2 (b) un 3D-G7-3 (c).

Tā kā apskatītajos variantos pastāv gaisa infiltrācijas iespējas, bez siltuma vadīšanas pastāv arī konvektīvie siltuma zudumi, kuru ieguldījums kopējā bilanci ir ievērojams, īpaši variantā 3D-G7-3, kad notiek intensīva aukstā ārgaisa ieplūde caur spraugu pa loga perimetru. Šajā gadījumā konvektīvie siltuma zudumi vairāk nekā divreiz pārsniedz siltuma vadīšanas zudumus caur norobežojošām konstrukcijām (tabula 4.12). Tāds rezultāts labi saskan ar uz eksperimentālo pētījumu rezultātiem – ēkās ar nepietiekami gaisa blīvējumu konvektīvai siltuma pārnesei ir dominējošā loma (skat. sadaļu 3). Arī noteiktā gaisa apmaiņas koeficients n variantos ar uzdotu 1 Pa spiedienu starpību palielinās līdz 2,5 reizēm salīdzinot ar variantu bez spiedienu starpības un tādējādi izsauc virsnormatīvos siltuma zudumus.

Salīdzinot apstatītos variantus, kur ievērota arī konvektīvā gaisa apmaiņa, redzams, ka neblīvās vietas norobežojošās konstrukcijās palielina apkurei nepieciešamo jaudu, tajā pat laikā temperatūras līmenis telpā nedaudz samazinās. Tomēr, atšķirībā no iepriekš apskatītajiem variantiem bez solārā siltuma avota, absolūtā temperatūra samazinās tikai līdz 22 °C pat gadījumā ar intensīvu aukstā ārgaisa ieplūdi (variants 3D-G7-3). Jāatzīmē, ka reālā telpā temperatūras līmenis būs zemāks pateicoties mazākam telpā nonākušam Saules siltuma daudzumam, ko ietekmē gan loga siltuma enerģijas caurlaidība SF , gan mehānisku barjeru novietošana pie loga iekšējās virsmas (žalūzijas, aizkari). Savukārt dažādi telpā novietoti priekšmeti var izmainīt gaisa plūsmu raksturu un samazināt

kustības ātrumu, kas variantos 3D-G7-2 un 3D-G7-3 noteikti kā termiskā komforta prasībām neatbilstoši.

No visiem līdz šim apskatītiem variantiem, pēdējie 3 var tikt uzskatīti kā visprecīzākie, jo ietver visi trīs siltuma pārneses veidus, bet temperatūras līmenis 22...26 °C tiek bieži eksperimentāli konstatēts telpās ar lielu stiklotu virsmu laukumu, caur kuru telpā nonāk ievērojams solārās siltuma enerģijas daudzums.

4.4.6. Variantu salīdzinošā analīze

Lai uzskatāmāk parādītu un kompleksi analizētu dažādu 3D modeļos apskatīto faktoru ietekmi uz siltuma bilanci un fizikālajiem procesiem telpā, vizuāli attēlosim raksturīgāko variantu svarīgākos rezultātus. Sildītāja novietojuma un apkures veida ietekmes novērtējumam izvēlēsimies sekojošus modelēšanas variantus ar 0 Pa spiedienu starpību: 3D-G1-1, 3D-G3-1, 3D-G4-1 un 3D-G5-1; spiedienu starpības ietekmi aplūkosim precīzākā modeļa ietvaros, ievērojot starojuma pārnesi. Telpas ar starojuma siltuma pārnesi modeļu salīdzināšanai apskatīsim ģeometriju 3D-G6 un 3D-G7 visus variantus.

Vienkāršotā telpas modeļa bez siltuma starojuma izvēlēto variantu rezultātu skaitliskās vērtības ir apkopotas tabulā 4.12, bet to vizualizāciju iedalīsim divās daļās:

- integrālo siltuma daudzumu un telpas vidējās temperatūras apkopojums (attēls 4.87)
- svarīgāko termiskā komforta apstākļu rādītāju – vidējā ātruma un vertikālās temperatūras starpības grafiska reprezentācija (attēls 4.88).

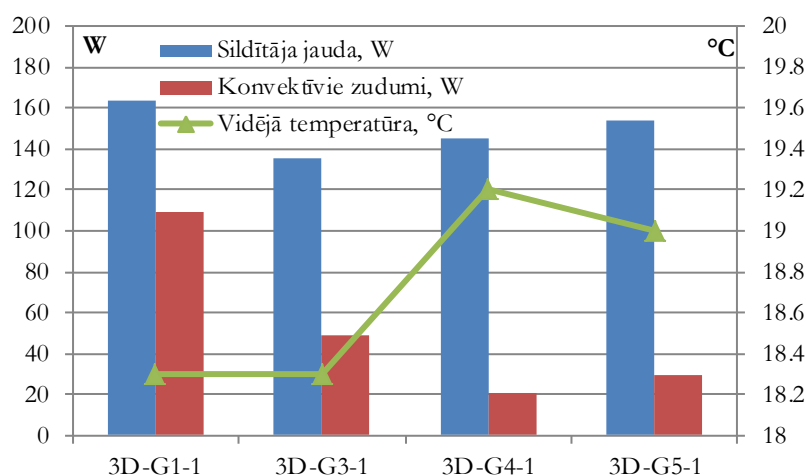
Vispirms aplūkosim siltuma bilances rādītājus atkarībā no dažāda apkures sistēmas sildītāja novietojuma un tā veida. Attēlā 4.87 redzamais sildītāja jaudas salīdzinājums parāda, ka apkurei patērētais siltuma daudzums visos četros apskatāmajos variantos mainās 20% robežās, lielākais tas ir gadījumā ar pie ārsienas novietoto sildītāju (variants 3D-G1-1), bet vismazākais – gadījumā ar sildītāju pie sienas uz gaiteni (variants 3D-G3-1). Vislielākie konvektīvie siltuma zudumi no telpas ir arī konstatēti variantā 3D-G1-1, bet piecas reizes mazāki – ar pie sānu sienas novietotu sildītāju (variants 3D-G4-1).

Tomēr, lai objektīvi novērtētu siltuma enerģijas izmantošanas efektivitāti katrā variantā, ir nepieciešams salīdzināt arī nodrošināto temperatūras līmeni telpā. Ja pie vienādām sildītāja jaudām (jeb pie vienādām apkures siltuma vajadzībām) telpas vidējā temperatūras būtiski atšķiras, tad nevar runāt par vienādu enerģijas izmantošanas efektivitāti, šajā gadījumā ir jāpievērš uzmanība siltuma zudumu izmaiņām, kas ir saistītas ar atšķirīgu gaisa plūsmu un temperatūras lauka sadalījumu telpā. Kā izriet no attēlā 4.87 apkopotajiem datiem par vidējo gaisa temperatūru telpā, par grādu lielākās

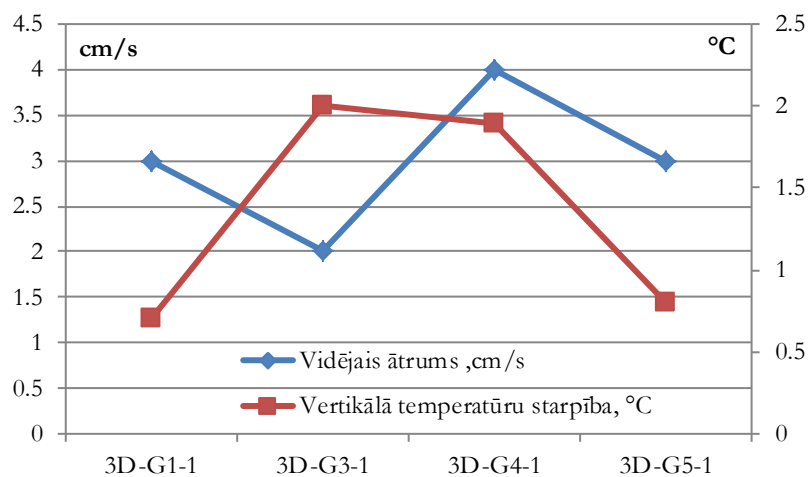
vērtības ir konstatētas variantos ar pie sāna sienas novietotu sildītāju (3D-G4-1) un ar grīdas apkuri (3D-G5-1). Tajā pat laikā sildītāja jauda abos šajos variantos ir nedaudz mazāka par pirmo variantu 3D-G1-1. Tāpēc no energoefektivitātes viedokļa tieši varianti ir 3D-G4-1 un 3D-G5-1 var tikt uzskatīti par visoptimālākiem. Bet bez minētās pievadītā siltuma daudzuma efektīvās izmantošanas dzīvojamās telpas ne mazāk svarīgi ir kontrolēt arī cilvēka komfortu ietekmējošus parametrus, ko neievērošanas gadījumā uzturēšanās pat energoekonomiskās ēkās nebūs iespējama. Tāpēc ir nepieciešama tādu parametru un siltuma patēriņa kompleksa analīze.

Izvēlēto 4 variantu ar atšķirīgu apkures tipu dati (tabula 4.12) par cilvēka termisko komfortu svarīgākiem ietekmējošiem faktoriem – gaisa kustības ātrumu v un vertikālo temperatūru starpību ΔT ir vizualizēti attēlā 4.88. Abiem minētajiem lielumiem jābūt pēc iespējas mazākiem, nepārsniedzot sadaļā 4.1 minētās vērtības. Visos variantos maksimāli pieļaujamās vērtības netiek sasniegtas, tomēr arī šo variantu vidū var izvēlēties vislabāko, ko noteiks apskatāmo parametru absolūtās vērtības. Izslēgsim tādus variantus, kur vismaz viens no parametriem v vai ΔT ir maksimāls, t.i. 3D-G3-1 un 3D-G4-1. Atlikušo variantu 3D-G1-1 un 3D-G5-1 minēto parametru vērtības ir praktiski vienādas – $v=3 \text{ cm s}^{-1}$ un $\Delta T=0,7...0,8 \text{ }^\circ\text{C}$. Tāpēc no termiskā komforta viedokļa vispiemērotākie dzīvojamās telpas apkures veidi ir klasiskais ar pie ārsienas novietoto sildītāju vai arī „siltās grīdas” apkures veids, bet termiskā komforta prasībām atbilst visi apskatītie varianti.

Rezumējot, var apgalvot, ka kompleksa energoefektivitātes un termisko komfortu noteicošo parametru analīze parāda vienu visoptimālāko variantu – ar „siltās grīdas” apkures veidu. Tajā vislabāk tiek nodrošināti termiskā komforta apstākļi un tiek uzturēta pietiekami augsta gaisa temperatūra ar tuvināti tādu pašu kā citos variantos siltuma patēriņu. No otras puses, ja šāda tipa apkurei tiek izmantota tikai elektroenerģija, apkures izmaksas var izrādīties lielākas neskatoties uz mazāku enerģijas patēriņu (tas neattiecas uz sistēmām ar siltuma sūkņiem).



Attēls 4.87. Sildītājam pievadītā jauda, konvekcijas siltuma zudumi un telpas vidējā temperatūra dažādos modelēšanas variantos ar atšķirīgu sildelementa novietojumu un tipu.



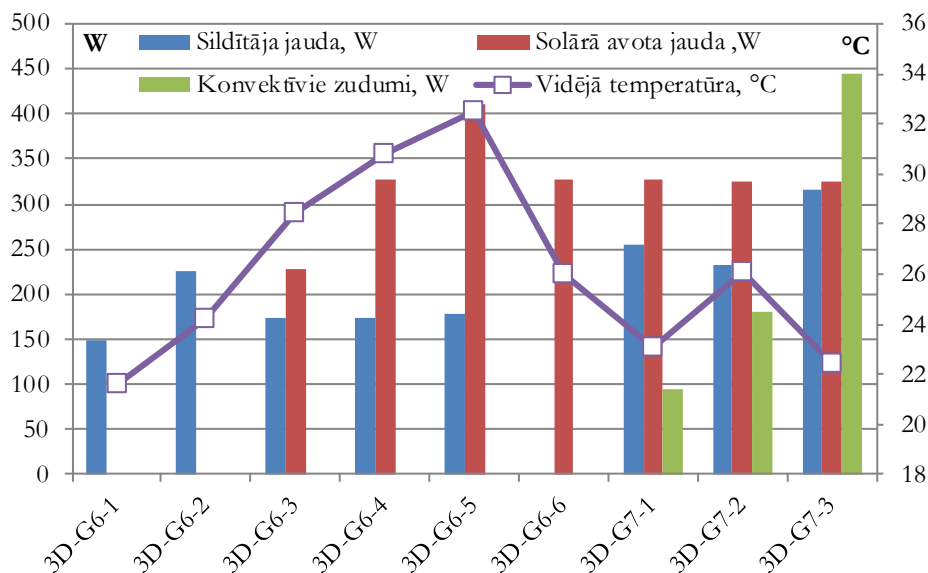
Attēls 4.88. Vidējā ātruma vērtība un vertikālā temperatūru starpība telpas vidusdaļā dažādos modelēšanas variantos ar atšķirīgu sildelementa novietojumu un tipu.

Iepriekš minētie 4 aprēķinu varianti neievēro starojuma siltuma pārnesi un tādējādi to rezultātiem pamatā ir kvalitatīvs raksturs, kas ir pietiekami, lai optimizētu siltuma patēriņu, variējot sildītāja novietojumu, bet precīzākiem kvantitatīvākiem aprēķiniem ir nepieciešams izmantot citus modeļus ar starojuma pārnesi, kādi ir 3D-G6 un 3D-G7. Uz to bāzes precīzāk apskatīsim gan starojuma, gan arī konvektīvās siltuma pārneses ietekmi uz telpas siltumfizikāliem laukiem. Modeļu 3D-G6 (bez konvektīvās apmaiņas) un 3D-G7 (ar gaisa ieplūdēm/izplūdēm) visus apskatītos variantus analizēsīm līdzīgi kā iepriekš, atsevišķi izdalot energoefektivitātes rādītājus un termiskā komforta nosacījumus.

Attēlā 4.89 ir vizualizēti tabulā 4.12 apkopotie dati par dzīvojamās telpas modeļu 3D-G6 un 3D-G7 energoefektivitātes rādītājiem – sildītāja jaudu, solārā siltuma avota jaudu, konvekcijas siltuma zudumiem un atbilstošo telpas vidējo gaisa temperatūru. Varianti 3D-G6-1 un 3D-G6-2 atšķiras ar starojuma ievērošanu, un attēlā redzamais sildītāja jaudas un telpas vidējās temperatūras palielinājums variantā 3D-G6-2 parāda starojuma siltuma pārneses lomu kopējā bilancē. Starojuma modeļa lietošana palielina no sildītāja izdalīto siltuma daudzumu par 50%, bet temperatūras līmeni telpā paceļ par 2,6 °C.

Nākamajos 3 variantos 3D-G6-2, 3D-G6-3 un 3D-G6-5 papildus ieviestais solārais avots ar atšķirīgiem tā krišanas leņķiem demonstrē Saules starojuma ietekmi uz telpas temperatūras līmeni, kas palielinās proporcionāli telpā nonākušās papildus enerģijas daudzumam (attēls 4.89). Salīdzinot ar variantu 3D-G6-2 bez solārā avota, samazinās no sildītāja izdalītais siltuma daudzums, kas ir saistīts ar izmainītu gaisa cirkulāciju tā tuvumā un arī vidējā gaisa temperatūras pieaugumu (vairāk par 4 °C), kas samazina siltuma atdevi no sildītāja virsmas. Apskatītajos variantos temperatūras līmenis telpā ir ļoti augsts nozīmīga solārā siltuma avota ieguldījuma dēļ un tas nesamazinās pat telpā bez apkures (3D-G6-6), kur vidējā gaisa temperatūra ir augstāka nekā variantā 3D-G6-2 ar apkuri. Tāpēc izvēlēta

sildītāja virsmas temperatūra 50 °C šādos apstākļos ir pārāk liela un pievadītās enerģijas daudzums ir jāsamazina vai arī atspoguļo reāli esošie papildus siltuma zudumi, kas arī tiek realizēts nākamajos variantos ar gaisa infiltrācijas iespējām.



Attēls 4.89. Sildītājam pievadītā jauda, solārā avota jauda, konvekcijas siltuma zudumi un telpas vidējā temperatūra dažādos modelēšanas variantos.

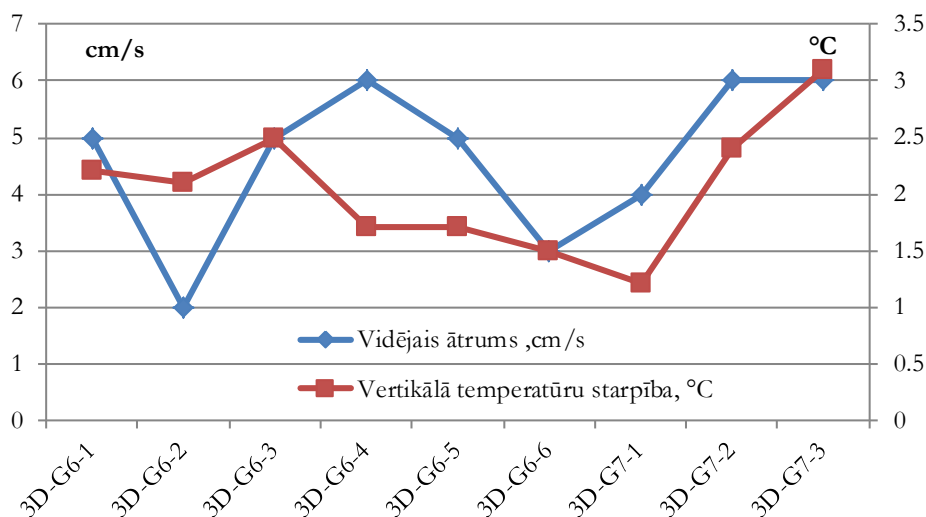
Telpas 3D modelis ar neblīvām vietām norobežojošās konstrukcijās un papildus solāro siltuma avotu caur logu nodrošina pieņemamu 22,4 °C temperatūras līmeni gadījumā ar nelielu zemspiedienu telpā, kas labi atbilst novērojumiem reālajos ēku ekspluatācijas apstākļos. Tomēr papildus konvektīvie siltuma zudumi palielina arī no sildītāja izdalīto siltuma daudzumu, kas ir cieši saistīta ar gaisa cirkulāciju gar tā virsmu. Kā redzams no modelēšanas rezultātā iegūtajiem datiem (attēls 4.89), nenoslēgtās telpas gadījumā apkurei pievadītais siltuma daudzums ir lielāks kā noslēgtās telpās, kas saistīts arī ar papildus siltuma zudumiem. Kopumā abi šie faktori – intensīva gaisa cirkulācijas sildītāja tuvumā un gaisa infiltrācija arī nosaka lielāku sildītāja jaudu pie mazākām telpas gaisa temperatūrām.

Apkopojot energopatēriņa datus modeļiem 3D-G6 un 3D-G7, var secināt, ka mazāka sildītāja jauda ir noteikta, telpā pastāvot papildus siltuma avotam solārā starojuma veidā, bet tā palielinās, papildus ievērojot arī gaisa apmaiņas iespējas ar apkārtējo vidi. Tā kā noslēgta telpa ir tikai idealizācija, tad no precīzākiem modeļiem ar gaisa infiltrāciju par enerģētiski visoptimālāko var uzskatīt gadījumu ar nelielu pārspiedienu telpā (3D-G7-2), kad tiek izslēgta ārējais ieplūde caur spraugu pa loga perimetru, tajā pat laikā nesamazinoties vidējai telpas gaisa temperatūrai.

Pēdējos modeļos iekļauta gaisa apmaiņa telpā ir nepieciešama skābekļa, ko patērē cilvēki, satura uzturēšanai. Par normālu gaisa apmaiņas intensitātes vērtību *n* telpās bez piespiedu ventilācijas

uzskata koeficientu $0,7 \text{ h}^{-1}$ (skat. sadaļu 2.3), savukārt palielināta gaisa apmaiņa izsauc virsnormatīvos siltuma zudumus. Ņemot vērā caur spraugām aplodā un caur ventilācijas atveri ieplūstošo un izplūstošo gaisa tilpumus ir redzams, ka variantos ar 1 Pa spiedienu starpību, kas ir praksē bieži sastopama, noteiktā gaisa apmaiņa (tabula 4.12) ir pietiekama. Bez gaisa apmaiņas ne mazāk svarīgi ir nodrošināt arī termiskā komforta prasībām atbilstošus apstākļus un apskatīt tos kontekstā ar telpas energopatēriņa rādītājiem.

Analizējot attēlā 4.90 parādīto datus telpas vidusdaļā, var redzēt, ka gaisa kustības intensitāte telpā pieaug noslēgtā apkurinātā telpā ar solāro siltuma avotu (varianti 3D-G6-3, 3D-G6-4 un 3D-G6-5) un telpā ar infiltrācijas iespēju pie 1 Pa spiedienu starpības (varianti 3D-G7-2 un 3D-G7-3). Nedaudz mazāki ātrumi ir variantā ar izslēgtu sildītāju un telpā ar 0 Pa spiedienu starpību (3D-G6-6) starp atverēm pretējās sienās (3D-G7-1). Savukārt, vismazākā gaisa plūsmu intensitāte it telpā bez solārā starojuma avota (3D-G6-2). Salīdzinot šos datus ar citu svarīgu termisko komfortu noteicošo parametru – vertikālo temperatūras starpību, var redzēt, ka tikai variantos 3D-G6-6 un 3D-G7-2 ir konstatēta arī minimālā stratifikācija. Tāpēc no visiem apskatītajiem modelēšanas variantiem tieši šie ir visoptimālākie, bet tajos netiek ievērots cits komforta rādītājs – lielo uzdotajā solārās enerģija blīvuma dēļ grīdas tuvumā veidojas šaura zona, kuras temperatūra neatbilst maksimālas pieļaujamās grīdas temperatūra prasībām.



Attēls 4.90. Vidējā ātruma vērtība un vertikālā temperatūru starpība telpas vidusdaļā dažādos modelēšanas variantos.

Apkopojot ar papildus solāro siltuma avotu iegūtos rezultātus siltuma enerģijas patēriņa un komforta apstākļu nodrošināšanas aspektā, vislabvēlīgākais variants ir ar izslēgtu apkures sistēmu, kad siltuma zudumi tiek kompensēti tikai ar solārā siltuma avota palīdzību un tiek reģistrēti vismazākās temperatūras starpības un gaisa plūsmas. Savukārt, telpā ar atverēm norobežojošās

konstrukcijās pastāv ievērojami konvektīvie siltuma zudumi, būtiski samazinās vidējā temperatūra un pieaug gaisa kustības ātrumi.

Vēl viens aspekts, kas ir svarīgs, veicot dzīvojamās telpas modelēšanu, ir rasas punkta sasniegšana uz virsmām ar zemu temperatūru. Atsevišķi darbā tas analizēts netiek, bet tas ir svarīgs būvkonstrukciju ilgmūžības un siltuma vadīšanas īpašību izmaiņu novērtēšanā. Īpaši liels kondensāta rašanās risks ir uz telpas ārējām būvkonstrukcijām ar lielu siltuma caurlaidību, apskatītajos variantos šādā aspektā viskritiskākā konstrukcija ir logs ar mazu siltuma pretestību. Šis risks pieaug līdz ar telpas raksturīgās temperatūras un loga virsmas temperatūras starpības pieaugumu, kā rezultātā uz loga var veidoties kondensāts, jo, pieņemot, ka telpas gaisa relatīvais mitrums ir 60%, tā kondensēšanās sākas pie temperatūras zemākas par 11 °C. Tajā pašā laikā ir jāievēro, ka caur spraugām aplodē notiek aukstā gaisa ieplūde, kura absolūtais mitruma saturs ir mazāks. Tādēļ var izrādīties, ka kondensācija notiek loga apakšdaļā, kur gan virsmas temperatūra ir nedaudz augstāka, bet no āra ieplūdušais gaiss plūstot gar virsmu jau ir sajaucies ar mitrāko telpas gaisu. Savukārt kondensācijas risks pastāv pašā spraugā tur, kur caur to izplūst un atdziest telpas siltais un mitrais gaiss (piem., variantos ar pārspiedienu).

4.5. Secinājumi

Atsevišķas telpas matemātiskā modelēšana izstrādātās kompleksas ēkas energoefektivitātes ietvaros parāda dažādu fizikālo un ģeometrisku faktoru būtisko lomu telpas un visas ēkas siltuma vajadzības optimizēšanā un cilvēka termiskā komforta apstākļu uzlabošanā. Kaut arī apskatītajiem modeļiem ir vairāk kvalitatīva nozīme, tie uzskatāmi parāda atsevišķu parametru ietekmi uz gaisa plūsmām telpā un temperatūras sadalījumu, kas ietekmē arī kopējos telpas un visas ēkas siltuma zudumus un apkures patēriņu. Salīdzinot energoefektivitāti un termisko komfortu raksturojošus rādītājus var secināt, ka tie ir cieši saistīti un to vienlaicīga uzlabošana ir komplicēts process, kas prasa detalizētākus aprēķinus un rūpīgu daudzu modeļu variantu analīzi.

Kā parādīja veiktā skaitliskā modelēšana telpā, būtiskākās izmaiņas tās energoefektivitātē ir saistītas ar konvektīviem siltuma zudumiem caur neblīvējumiem norobežojošās konstrukcijās. Sevišķi liela loma šāda veida siltuma apmaiņai ir pie lielām spiedienu starpībām, kas izsauc palielinātu gaisa cirkulācijas intensitāti. Liela nozīme ir arī ārējo norobežojošo konstrukciju siltuma caurlaidības izmaiņām un papildus solārajam siltuma avotam. Mazāka ietekme uz energopatēriņu ir dažādiem ģeometriskajiem faktoriem, piem., palodzes un apkures sistēmas sildķermeņa izvietojumam. Siltuma starojuma pārneses ieguldījums kopējā siltuma bilancē un fizikālo lauku sadalījumā ir ļoti svarīgs un, veicot dzīvojamo telpu, it sevišķi ar lielu stikloto virsmu daļu, matemātisko modeļu izveidi, tas ir

noteikti jāņem vērā. Papildus siltuma bilances analīzei, iegūtie temperatūru sadalījumi uz būvkonstrukciju virsmām ļauj izvērtēt arī potenciālos kondensāta veidošanās riskus.

Tā kā tika apskatīta dzīvojamā vai biroja telpa, tad atsevišķi bija jānovērtē arī cilvēka termisko komfortu noteicošie parametri. Tie arī ir būtiski atkarīgi no konstruktīvo elementu izvietojuma, norobežojošo konstrukciju siltuma pretestības, gaisa infiltrācijas iespējas un solārā avota jaudas, jo visi minētie faktori ietekmē gan gaisa plūsmu raksturu un virzienus, gan arī ar to saistīto temperatūras lauku. Lielākā daļā gadījumu termiskā komforta prasības ir izpildītas, izņemot variantus ar intensīvu gaisa caurplūdi, kas samazina telpas vidējo temperatūru un palielina kustības intensitāti. Tāpat nelabvēlīgi izrādījās varianti ar solāro avotu, kas izraisa palielinātu temperatūru grīdas tuvumā un lokāli intensificē gaisa plūsmas. No veikto aprēķinu rezultātiem var atzīmēt dažus svarīgākos nosacījumus termiskā komforta nodrošināšanai:

- sildītāja jaudas regulēšanas iespēja atbilstoši gaisa temperatūrai (īpaši solāro avotu gadījumā);
- neliela pārspiediena telpā nodrošināšana, kas novērš aukstā ārgaisa ieplūdi;
- mazāka temperatūru starpība ar blakus telpām, kas samazina siltuma apmaiņu ar tām;
- optimizēta sildķermeņa novietošana.

Kā iepriekš minēts, izveidotajiem modeļiem ir kvalitatīvs raksturs, kas parāda to lietojumu lietderīgumu, projektējot ēku celtniecību vai renovāciju un veidojot atsevišķu telpu plānojumu. Šādi modeļi ļauj izvēlēties ēkas un tās atsevišķu telpu būvkonstrukciju siltumtehnikos parametrus, telpas konstruktīvo elementu izvietojumu un analizēt siltuma zudumus un to sadalījumu atbilstoši reālai situācijai, ievērojot gaisa cirkulāciju un solārā starojuma ietekmi, t.i. veikt termiskā komforta un siltuma patēriņa optimizācijas uzdevumu ēkas atsevišķā telpā.

5. Darba rezultāti un secinājumi

Promocijas darba gaitā ir izstrādāta un praksē aprobēta vienota ēkas siltumfizikālo procesu analīzes metodika, veikta virkne eksperimentālo pētījumu, izstrādātas un pilnveidotas atbilstošās mērmetodes, ir izveidoti ēkas siltuma bilances un atsevišķas telpas siltumfizikālo procesu matemātiskie modeļi, detalizēti analizēti iegūtie mērījumu un modeļaprēķinu rezultāti. Promocijas darba izvirzītie mērķi un uzdevumi kopumā ir izpildīti.

Konkrētie secinājumi ir apkopoti katras nodaļas beigās. Galvenie darbā iegūtie rezultāti un vispārīgie secinājumi ir šādi:

- Ir izveidota mērsistēma ar speciālu iegūto datu pēcapstrādes metodiku, kas ir efektīvi lietojama būvkonstrukciju siltuma caurlaidības noteikšanai nestacionāros, reālos ēku ekspluatācijas apstākļos. Šī pieeja ļauj palielināt rezultātu precizitāti, tajā pat laikā samazinot mērījumiem nepieciešamo laiku.
- Uz standartizētās „karstās plates” iekārtas bāzes ir izveidota metode materiālu siltuma ietilpības eksperimentālai noteikšanai, lietojot speciāli izstrādātu aprēķinu metodiku.
- Eksperimentu sērijā ir veikti dažādu veidu speciālo stikla pakešu pārklājumu saules enerģijas caurlaidības mērījumi, noteikta to parametru atbilstība deklarētajām vērtībām.
- Eksperimentāli konstatēts, ka ēku un būvkonstrukciju siltumtehnikie raksturlielumi (siltuma, gaisa un starojuma caurlaidības) var būtiski atšķirties no teorētiskajiem un novērtētajiem, un parādīts, ka kvalitatīvu ieejas datu nodrošināšanai ēku siltuma bilances modelēšanai un objektīvam energoefektivitātes novērtējumam ir nepieciešami iepriekšminētie mērījumi.
- Apkopojot mērījumu rezultātus, ir izveidota specializēta informatīvā datu bāzē ar iegūtajiem datiem par ēku un būvkonstrukciju siltumfizikāliem parametriem, kas atvieglo sērijveida dzīvojamo ēku energoefektivitātes izvērtēšanu.
- Izveidoti vairāki ēkas siltuma bilances matemātiskie modeļi, kas ir sekmīgi aprobēti, lietojot eksistējošu objektu apkures patēriņa datus. Izanalizētas dažādu modeļu rezultātu atšķirības un parādīta iespēja sabalansēti izvēlēties projektējamās ēkas celtniecības vai renovācijas variantu.
- Izveidoti atsevišķas telpas 2D un 3D matemātiskie modeļi, parādīta iespēja izvērtēt dažādu faktoru ietekmi uz siltumfizikālajiem procesiem telpā un analizēt izmaiņu tendences. Iegūto rezultātu izvērtējums parāda, ka ir iespējams nodrošināt termiskā komforta apstākļus pie samazinātā apkures siltuma patēriņa.

6. Zinātniskie projekti

Lielākie zinātniskie projekti, ar kuru izpildi ir saistīts promocijas darbs:

1. ES energoefektivitātes un optimāla telpu mikroklīmata prasībām atbilstoša kompozīta ēkas ārsienas konstruktīvā risinājuma no vietējām izejvielām izstrāde, izmantojot multifizikālās modelēšanas metodi. 2011.
2. Mūsdienīgu mērījumu un modelēšanas sistēmu izveide ēku siltumfizikālo parametru analīzei. Fundamentālo un lietišķo pētījumu projekts. 2009-2011.
3. Poliuretāna siltuma vadītspējas un siltuma ietilpības pētījumi. Pētniecisks pasūtījums sadarbībā ar Koksnes ķīmijas institūtu. 2007-2008.
4. Mērsistēmas ar Peltjē sensoru materiālu siltuma caurlaidības un mitruma dinamikas attālinātam monitoringam prototipa izveide un izmēģinājumi. LU komercializācijas projekts. 2007-2008
5. Ēku siltuma zudumu kompleksa diagnostika un precizēta siltuma patēriņa noteikšana, izmantojot automatizētas mērsistēmas un hierarhiski saistītu matemātisko modeļu sistēmu. Latvijas Zinātnes padomes finansēts projekts. 2004-2008.
6. Mērsistēmas un programmatūras siltuma caurlaidības koeficienta noteikšanai izstrāde. Pētniecisks projekts sadarbībā ar Latvijas Lauksaimniecības Universitāti. 2002-2003
7. Klimatiskajiem un saimnieciskajiem nosacījumiem atbilstošu pakešu logu konstrukciju piedāvājuma izstrāde Latvijā tirgum, veicot standartizētu testēšanu un pārbaudes reālos ekspluatācijas apstākļos. Latvijas Izglītības un zinātnes ministrijas pasūtīts tirgus pieprasītais pētījums. 1999-2000.

7. Publikācijas un konferences

Galvenie promocijas darba rezultāti atspoguļoti šādās publikācijās:

1. J. Grečenkovs, A. Jakovich, S. Gendelis. 3D Numerical Analysis of Heat Exchange in Building Structures with Cavities. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, 2011, Vol. 48, N 1, P. 3–12. (DOI: 10.2478/v10047-011-0001-1)
2. S. Gendelis, A. Jakovičs. Numerical Modelling of Airflow and Temperature Distribution in a Living Room with Different Heat Exchange Conditions. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, 2010, Vol. 47, N 4, P. 27–43. (DOI: 10.2478/v10047-010-0016-z)
3. S. Gendelis, A. Jakovičs. Mathematical modelling of a living-room with solar radiation source and different boundary conditions. *Scientific Proceedings of RTU, Heat & Power and thermal physics*, 2008, Vol. 1, P. 57–67
4. S. Gendelis, A. Jakovičs. Mathematical Modelling of Living Room with Different Types of Heating and Pressure Conditions. *WSEAS Transactions on Heat and Mass Transfer*, 2006, Issue 3, Vol. 1, P. 229–237.
5. S. Gendelis, A. Jakovičs. Applications of 3D Mathematical Models for Improvement of Thermal Comfort Conditions in Living Rooms. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, 2005, N 4, P. 7–18.
6. S. Gendelis, A. Jakovičs. Numerical Modelling of Airflow and Temperature Distribution in Heated Rooms. *Latvian journal of physics and technical sciences*, 2003, N 3 (2003), P. 3–20.
7. Jakovičs, S. Gendelis, Z. Krievāns. Ēku siltuma zudumu un apkures vajadzības datormodelēšana. *Latvian Journal of Physics And Technical Sciences*, 2000, N 3, P. 3–18.

Promocijas darba rezultāti publicēti arī sekojošu konferenču un semināru rakstu krājumos un tēzēs:

1. Gendelis, S., Jakovics, A., Klavins, J. Mathematical modelling of heat balance and comfort conditions in a living-room with radiation source. In: *Proceedings of the 6th Baltic Heat Transfer Conference*. August 24-26, 2011, Tampere, Finland. 6 p. (CD).
2. Grečenkovs, J., Jakovičs, A., Gendelis, S. 3D Numerical Analysis of Heat Exchange in Building Structures with Cavities. In: *Proceedings of the 6th International Scientific Colloquium "Modelling for Material Processing"*, September 16-17, 2010, Riga. 163.-168. p.
3. Gendelis, S., Jakovičs, A. Mathematical modelling of a living-room with a solar radiation source. In: *Proceedings of the International forum-competition of young researchers "Topical Issues of Subsoil Usage". Working group "Energy saving and renewable energy"*, Volume II. April 21-23, 2010, St. Petersburg, Russia. 186.-188. p.
4. Gendelis, S., Jakovičs, A.. Influence of Solar Radiation and Ventilation Conditions on Heat Balance and Thermal Comfort Conditions in Living-Rooms. In: *Advances in Heat*

- Transfer. Proceeding of the 5th Baltic Heat Transfer Conference*, vol. 2. September 19-21, 2007, Saint-Petersburg, Russia. 634.-643. p.
5. Gendelis, S., Jakovičs, A. Mathematical Modelling of a Living Room with Solar Radiation Source and Different Boundary Conditions. In: *Proceedings of the WSEAS International conference on Waste Management, Water Pollution, Air pollution, Indoor Climate*. October 14-16, 2007, Arcachon, France. 168.-173. p.
 6. Gendelis, S., Jakovičs, A. Mathematical Modelling of Living Room with Different Type of Heating. In: *Proceedings of the 4th WSEAS Int. Conf. on Heat Transfer, Thermal Engineering and Environment*. Elounda, Greece, August 21-23, 2006. 248.-253. p.
 7. Timuhins, A., Gendelis, S., Jakovičs, A. Experimental Estimation of Thermophysical Properties of Materials. In: *Proceedings of the 4th International Scientific Colloquium "Modelling for Material Processing"*. Rīga, 2006. 227.-232. p.
 8. Gendelis, S., Jakovičs, A., Javaitis, I., Ērglis, K., Repsons, K. Siltuma caurlaidības, temperatūras un mitruma sadalījumu modelēšana būvkonstrukcijās. Grām.: *International scientific conference "Civil Engineering '05". Section "Environment and Environmental Effects"*. Jelgava, 2005. 156.-164. lpp.
 9. Gendelis, S., Jakovičs, A. Heat Transfer Measurements in Non-stationary Conditions for Building Structures. In: *Proceedings of the 14th International Conference on Thermal Engineering and Thermogrammetry*. 22-24 June, 2005, Budapest, Hungary. 6 p. (CD).
 10. Gendelis, S., Jakovičs, A. Mathematical Modelling of Airflow and Temperature Distribution in Living Rooms. In: *14th International Conference on Thermal Engineering and Thermogrammetry*. 22-24 June, 2005, Budapest, Hungary. 6 p. (CD).
 11. Gendelis, S., Jakovičs, A. Application of Mathematical Models for the Simulation of the Thermal Comfort Conditions in a Living Room. In: *Proceeding of the 5th International Scientific and Practical Conference "Environment. Technology. Resources"*. Rēzekne, 2005. 11.-18. p.
 12. Gendelis, S., Jakovičs, A. Complex Analysis of Heat Losses for Buildings. In: *Proceeding of the International Conference "Scientific Achievements for wellbeing and development of society". Section "Enabling environment for society wellbeing"*. Rēzekne, 2004. 76.-83. p.
 13. Gendelis, S., Jakovičs, A. Ēku siltuma zudumu analīze, izmantojot matemātiskos modeļus. Grām.: *IV Starptautiskā zinātniski praktiskā konference "Vide. Tehnoloģija. Resursi"*. Rēzekne, 2003. 247.-352. lpp.
 14. Gendelis, S. Telpas termiskā komforta apstākļu datormodelēšana. Grām.: *IV Starptautiskā zinātniski praktiskā konference "Vide. Tehnoloģija. Resursi"*. Rēzekne, 2003. 241.-346. lpp.
 15. Gendelis, S., Jakovičs, A. Ēku blīvējuma pakāpes mērījumi - zemspiediena un pārspiediena testi. Grām.: *Zinātniski-praktiskais seminārs "Ēku norobežojošo konstrukciju siltumtehnika II"*. Rīga, 2002. 16.1.-16.4. lpp.

16. Jakovičs, A., Gendelis, S. Būvkonstrukciju siltuma caurlaidības noteikšana reālos ēku ekspluatācijas apstākļos. Grām.: *Zinātniski-praktiskais seminārs "Ēku norobežozošo konstrukciju siltumtehnika II"*. Rīga, 2002. 9.1.-9.10. lpp.
17. Jakovičs, A., Gendelis, S., Trümmann, H. Modelling of Air Fluxes and Temperature Distribution in Heated Rooms. In: *Proceedings of the 4th International Scientific Colloquium "Modelling for saving resources"*. Riga, 2001. 170.-176. p.
18. Jakovičs, A., Gendelis, S., Trümmann, H. Analysis of Heat Losses from Typical Buildings in Riga. In: *Proceedings of the 4th International Scientific Colloquium "Modelling for saving resources"*. Riga, 2001. 190.-197. p.
19. Jakovičs, A., Gendelis, S. System of Inspection of Heat Losses in Structures of Existing Buildings in Latvia. In: *Proceedings of the conference „Requirements to energy consumption level in buildings of the Baltic region"*. Kaunas, Lithuania, 2001. 105.-114. p.
20. Jakovičs, A., Gendelis S., Trümmann, H. Ēku siltuma zudumu un apkures siltuma patēriņa modelēšana. Grām.: *Zinātniski-praktiskais seminārs „Ēku norobežozošo konstrukciju siltumtehnika"*. Rīga, 2000. 24.1.-24.15. lpp.
21. Jakovičs, A., Gendelis, S., Krievāns, Z. Būvkonstrukciju siltuma caurlaidības noteikšana reālos ēku ekspluatācijas apstākļos. Grām.: *Zinātniski-praktiskais seminārs „Ēku norobežozošo konstrukciju siltumtehnika"*. Rīga, 2000. 12.1.-12.9. lpp.
22. Jakovičs, A., Šnīdere, L., Krūmiņš, V., Gendelis, S. Gatavo būvizstrādājumu siltuma caurlaidības testēšanas iespējas Latvijā. Grām.: *Zinātniski-praktiskais seminārs „Ēku norobežozošo konstrukciju siltumtehnika"*. Rīga, 2000. 16.1.-16.9. lpp.
23. Jakovičs, A., Gendelis, S., Krievāns, Z.. Determination of the heat transfer coefficient of construction elements for existing buildings. In: *Proceedings of the 3th Baltic Heat Transfer Conference „Progress in Engineering Heat Transfer"*. Gdansk, Poland, 1999. 145.-152. p.
24. Jakovics, A., Shnidere, L., Gendelis, S., Krumins, V. Standardised measurement of heat transfer coefficient of finished building structures in the heat chamber. In: *Proceedings of the international scientific colloquium „Modelling of material processing"*. Riga, 1999. 168.-173. p.
25. Jakovičs, A., Gendelis, S., Truemmann, H., Virbulis, J. Combined applications of thermography, heat transfer measurement and heat consumption modelling in the reconstruction of buildings. In: *Proceedings of the international scientific colloquium „Modelling of material processing"*. Riga, 1999. 158.-167. p.
26. Jakovičs, A., Snidere, L., Gendelis, S. Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten von Bauelementen in existierenden Gebäuden und in der Thermokammer. In: *44. Internationales wissenschaftliches Kolloquium „Maschinenbau im Informationszeitalter"*. Ilmenau, Germany, 1999. 239.-243. S.

Promocijas darba rezultāti tika referēti šādās starptautiskās konferencēs:

1. *6th Baltic Heat Transfer Conference*. Tampere, Finland, 2011.
2. *International Scientific Colloquium "Modelling for Material Processing"*. Riga, 2010
3. *International forum-competition of young researchers "Topical Issues of Subsoil Usage", working group "Energy saving and renewable energy"*. St. Petersburg, Russia, 2010.
4. World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS). *International Conference on International conference on Waste Management, Water Pollution, Air pollution, Indoor Climate*. Arcachon, France, 2007.
5. *5th Baltic Heat Transfer Conference*. St. Petersburg, Russia, 2007.
6. World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS). *4th International Conference on Heat Transfer, Thermal Engineering and Environment*. Agios Nikolaos, Greece, 2006.
7. *International scientific conference "Modelling of Material Processing"*. Riga, 2006.
8. *International scientific conference "Civil Engineering '05". Section "Environment and Environmental Effects"*. Jelgava, 2005.
9. *14th International Conference on Thermal Engineering and Thermogrammetry*. Budapest, Hungary, 2005.
10. *5th International Scientific and Practical Conference "Environment. Technology. Resources"*. Rēzekne, 2005.
11. *International Conference "Scientific Achievements for Wellbeing and Development of Society". Section "Enabling Environment for Society Wellbeing"*. Rēzekne, 2004.
12. *4th International Scientific and Practical Conference "Environment. Technology. Resources"*. Rēzekne, 2005.
13. *International scientific colloquium "Modelling for Saving Resources"*. Riga, 2001.
14. *International conference "Requirements to Energy Consumption Level in Buildings of the Baltic Region"*. Kaunas, Lithuania 2001.
15. *3rd Baltic Heat Transfer Conference*. Gdansk, Poland 1999.
16. *International scientific conference "Modelling of Material Processing"*. Riga, 1999.

8. Izmantotā literatūra

Abdou, A.A., Budaiwi, I.M. Comparison of thermal conductivity measurements of building insulation materials under various operating temperature. *Journal of Building Physics*, 2005, Vol. 29, No. 2, 71-184.

Ahlborn Mess- und Regelungstechnik, *Data logger Almemo 2290-8. Operating instructions. V2.1.* Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH, Holzkirchen, Germany, 2003.

Ahlborn Mess- und Regelungstechnik, *Data logger Almemo 2690-8. Operating instructions. V1.0.* Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH, Holzkirchen, Germany, 2004.

ANSI/ASHRAE Standard 55-2004. *Thermal environmental conditions for human occupancy.* American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc, 2004.

ANSI/ASHRAE Standard 62-2001. *Ventilation for acceptable air quality.* American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc, 2004.

Ansys Inc. *ANSYS CFD FLOTRAN Analysis Guide. Release 5.6.* Ansys Inc., 1999.

Ansys Inc. *ANSYS CFX User Manual.* Ansys Inc., 2005.

Association MINERGIE. *Swiss quality label for new and refurbished buildings.* www.minergie.ch, 2007.

ASTM C 1058. *Standard practice for selecting temperatures for evaluating and reporting thermal properties of thermal insulation.* ASTM Standard. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 15.01, 2003.

ASTM C 518. *Standard test method for steady-state thermal transmission properties by means of the heat flow apparatus.* ASTM Standard. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.06, 2004.

Bahvalov, N.S., Zhidkov, N.P., Kobel'kov, G.M. *Chislennye metody [Skaitliskās metodes].* Moskva: Binom, 2003, lpp. 336-341.

Bardina, J. E., Huang, P. G., Coakley, T. *Turbulence Modeling Validation Testing and Development.* NASA Technical Memorandum 110446, 1997.

Bejan, A., Kraus, A.D. *Heat Transfer Handbook.* New Jersey: John Wiley & Sons, 2003. lpp. 16-30.

Batchelor, G.K. *An introduction to fluid dynamics.* London: Cambridge University Press, 2000. 28.-36., lpp. 141-150.

Belindževa-Korkla, O. *Norobežojošo konstrukciju siltumtehniskie aprēķini. Metodiskie norādījumi LBN 002-01 izmantošanai.* Rīga: RTU, 2002.

Berkeley lab. *Window5 User manual. For analyzing window thermal performance. A PC program.* USA, Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2001.

Berkeley lab. *REFSEN5 User manual. For calculating the heating and cooling energy use of windows in residential buildings. A PC program.* USA, Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2005.

Blumberga, A., Kamenders, A. Passive house in Latvia. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, 2006, N 6, lpp. 25-34.

Bojic, M., Yik, F., Lo, T.Y. Locating air-conditioners and furniture inside residential flats to obtain good thermal comfort. *Energy and Buildings* 34, 2002, lpp. 745-751.

BPIE. *Europe's building under the microscope. A country by country review of the energy performance of buildings.* Brussels: Building Performance Institute Europe (BPIE), 2011. 84. lpp.

BuildDesk *BuildDesk U 3.2. Manual.* BuildDesk Limited, Pencoed, Bridgend, UK, 2006.

Butkus, J., Vladišauskas, A., Jakevičius, L. The use of ultrasound for investigation of glazing units. *Ultragarsas*, 2004, Vol. 2, No.51, lpp. 7-12.

Carlson, A., Hassan, H. Radiation Modeling With Direct Simulation Monte Carlo. AIAA Paper 91-1409, 1991.

Charles, K.E. *Fanger's thermal comfort and draught models.* Institute for Research in Constructions Research Report RR-162. Ottawa, Canada, National Research Council of Canada, 2003.

Chung, T.J. *Computational Fluid Dynamics.* New York: Cambridge University Press, 2002. lpp. 686-688.

Collins, M. Convective heat transfer coefficients from an internal window surface and adjacent sunlit Venetian blind. *Energy and Building* 36, 2004, lpp. 309-318.

Curcija, D. Trends and developments in window testing methods. In: *International Workshop „Window Modernization in the Baltic Nations: Problems and Opportunities”, April 2000.* Lithuania, Vilnius, 2000. 228. lpp.

Čertoks, S. *Būvmateriāli ar zemu siltumvadāmību un to pielietošanas nosacījumi būvniecībā: Bakalaura darbs.* Rīga: Rīgas Tehniskā universitāte, 1999.

De Carli, M., Olesen, B.W. Field Measurements of Thermal Comfort Conditions in Buildings with Radiant Surface Cooling Systems. In: *Proceeding of the Clima 2000 World Congress.* Italy: Napoli, 2001, lpp. 15-18.

Deevy, M., Sinai, Y., Everitt, P., Voigt, L., Gobeau, N. Modelling of the effect of an occupant displacement ventilation with computational fluid dynamics. *Energy and Buildings* 2008, 2007, Vol. 40, lpp. 255-264.

Desta, T., Becht, A.V., Meyers, J., Baelmans M., Berckmans, D. Combining CFD and data based mechanistic (DBM) modelling approaches. *Energy and Buildings* 36, 2004, lpp. 535-542.

DIN V 4108-6. *Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden, Teil 6: Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs*. Deutsche Norm. Berlin: Deutsches Institut für Normung, 2003.

DIN 4108-7. *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden. Teil 7: Luftdichtheit von Gebäuden, Anforderungen, Planungs- und Ausführungsempfehlungen sowie – beispiele*. Deutsche Norm. Berlin: Deutsches Institut für Normung, 2001.

DIN 52619-1. *Wärmeschutztechnische Prüfungen. Bestimmung des Wärmedurchlaßwiderstands und Wärmedurchgangskoeffizienten von Fenstern. Messung an der Gesamtkonstruktion*. Deutsche Norm. Berlin: Deutsches Institut für Normung, 1982.

DIN EN 1098. *Verfahren für die Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) von Mehrfachverglasungen. Verfahren mit kalibriertem und geschütztem Heizkasten*. Deutsche Norm. Berlin: Deutsches Institut für Normung, 1993.

DIN EN 674. *Meßverfahren zur Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) von Mehrfachverglasungen, Verfahren mit geschützter Heizplatte*. Deutsche Norm. Berlin: Deutsches Institut für Normung, 1999.

DIN EN 832. *Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden. Berechnung des Heizenergiebedarfs. Wohngebäude*. Deutsche Norm. Berlin: Deutsches Institut für Normung, 2003.

DIN V 18599. *Energy efficiency of buildings – calculation of the net, final and primary energy demand for heating, cooling, ventilation, domestic hot water and lighting*. Deutsche Norm. Berlin: Deutsches Institut für Normung, 2007.

Djunaedy, E., Hensen, J. L. M., Loomans, M. G. L. C. Selecting an appropriate tool for airflow simulation in buildings. *Building Service Engineering*, 2004, No. 25, P. 269-278.

Doran, S.. *Field Investigations of the Thermal Performance of Construction Elements as Built: BRE Client Report No. 78132*. East Kilbride, Glasgow: BRE.

DuBois, D., DuBois, E. F.: A formula to estimate the approximate surface area if height and weight be known. *Arch Int Med*, 1916, No. 17, lpp. 863-871.

Elmualim, A.A. Effect of damper and heat source on wind catcher natural ventilation performance. *Energy and Buildings* 36, 2006, lpp. 939-948.

Energieeinsparverordnung–EnEV. *Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden*. Germany: Öko-Zentrum NRW, 2007.

Ērglis, K. *Mērsistēmas materiālu siltumvadītspējas noteikšanai ar karstās plates metodi izveide. Maģistra darbs*. Rīga: Latvijas Universitāte, 2005.

EU Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast). *Official Journal of the European Communities*, L 153, lpp. 13–35, 2010.

Evola, G., Popov, V. Computational analysis of wind driven natural ventilation in buildings. *Energy and Buildings* 38, 2006, lpp.491-501.

Fanger, P. O. *Thermal Comfort*. Copenhagen. Danish Technical Press, 1970.

Fanger, P. O., Christensen, N. K. Perception of draught in ventilated spaces. *Ergonomics*, 1986, Vol. 30, No. 2, lpp. 215-235.

Frost, U., Moulden, T. *Turbulentnost'. Principi i primeneniya. [Turbulence. Principi un lietojumi]*. Moskva: Mir, 1980, lpp. 239-245.

Gielseler, U.D.J., Heidt, F.D., Bier, W. Combined thermal measurement and sSimulation for the detailed analysis of four occupied low-energy buildings. In: *Processing of the 8th International IBPSA Conference, August 11-14*. Netherlands: Eindhoven, 2003, lpp. 391-398.

GOST 30494-96. *Zdanija zbilije i obschestvennije. Parametri mikroklimata v pomeschenijah. [Dzivojamās un publiskās būves. Telpu mikroklimata parametri.]*. Gosudarstvenny standart Rossii [Krievijas Valsts standarts], 1996

Gutschker, O., Rogas, H., Donath, A. Parameter identification to analyse heat insulation measurements. In: *Proceedings of Building Simulation Conference*, U.S.A.: Madison, 1995. lpp. 580-581.

Hackleman, M. Radiant floor heating. *Backwoods Home Magazine*, 2000, Vol. 64, lpp. 42-49.

Hagentoft, C.-E. *Introduction to building physics*. Lund, Sweden: Studentlitteratur AB. 2003. 44.-45., lpp. 71.-85.

Hohmann, R., Setzer, M. J., Wehling, M. *Bauphysikalische Formeln und Tabellen: Wärmeschutz - Feuchteschutz - Schallschutz*. Germany, Bücher Werner Verlag, 2004.

Hukseflux Thermal Sensors *Hukseflux thermal sensors application and specification of heat flux sensors*. Pieejams: <http://www.hukseflux.com/heat%20flux/applic&spec.pdf> [aplūkots: 24.04.2012].

Incropera, F.P., DeWitt, D.P. *Fundamentals of heat and mass transfer, 5th Edition*. New York: John Wiley & Sons. 2002, lpp. 51-72, 331-334, 355, 367, 540-542, 712-724, 746-750.

Interpane Glas Industrie AG. *Gestalten mit Glas. 6. Auflage*. Offsetdruck Hillebrand, Germany: Beverungen, 2002.

ISO 6781. *Thermal insulation. Qualitative detection of thermal irregularities in building envelopes. Infrared method*. International Standard, 1983.

ISO 9869. *Thermal insulation - Building elements - In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance*. International Organization for Standardization, 1994.

ISO 9972. *Thermal performance of buildings. Determination of air permeability of buildings. Fan pressurization method*. International Standard, 2006.

Jakovičs, A., Banga, A. Kad siltums kļūst redzams. *Zvaigžņotā debess*, 1997, Nr. 2, lpp. 17-22.

Jakovičs, A., Gendelis, S., Krievāns, Z. Ēku siltuma zudumu un apkures siltuma vajadzības datormodelēšana. *Latvijas Fizikas un tehnisko zinātņu žurnāls*, 2000, Nr. 3, lpp. 3-18.

Jakovičs, A., Gendelis, S., Treimanis, M. *Tipveida ēku siltuma zudumu un apkures siltuma patēriņa analīze: Projekta noslēguma atskaite*. Rīga: Procesu analīzes un izpētes centrs, 2003-2004.

Jakovičs, A., Jēkabsons, N., Gendelis, S. *Hansabankas centrālās ēkas stikloto virsmu Saules enerģijas un siltuma caurlaidības ar un bez speciālajām plēvēn un termoklimatisko apstākļu attiecīgajās telpās izvērtējums: Atskaite un sledziens*. Rīga: Latvijas Universitāte, 2006.

Jakovics, A., Jekabsons, N., Mühlbauer, A., Trümmann, H. Bestimmung des effektiven Wärmedurchgangskoeffizienten von Bauelementen unter praxisnahen Bedingungen. *Elektrowärme international*, A2, 1997, lpp. 77-83.

Jakovics, A., Trümmann, H., Banga, A., Mühlbauer, A. Einsatz der Gebäudethermographie zur Diagnostik der Wärmedämmung an osteuropäischen Hochbauten. *Elektrowärme international*, A3, 1998, lpp. 93-100.

Javaitis, I., Ērglis, K., Jakovičs, A. Determination of heat conductivity of materials by the guarded hot plate method. *Latvian journal of physics and technical sciences*, 2005, Nr.4, lpp. 29-39.

Ji, Y., Cook, M.J. Numerical studies of displacement natural ventilation in multi-storey buildings connected to an atrium. *Building Service Engineering* 2007, Vol. 28, lpp. 207-222.

Karlsson, J.K., Moshfegh, B. Investigation of indoor climate and power usage in a data center. *Energy and Buildings* 37, 2005, lpp. 1075-1083.

King, E., N. *Field investigations of the thermal performance of construction elements as built*. BRE Client Report, No. 78132, Glasgow: Building Establishment Ltd., 2000. 93. lpp.

Krafthefer, B., Shah, D.J. Implications of room air motion on control of thermal comfort in rooms with natural convection heat sources. In: *Proceedings of Building Simulation Conference*. U.S.A: Madison, 1995, lpp. 119-127.

Krievāns, Z. *Siltuma caurlaidības koeficienta vērtības noteikšana, izmantojot eksperimenta un matemātiskās modeļēšanas rezultātus: Maģistra darbs*. Rīga: Latvijas Universitāte, 2000.

Lācis, S., Bethers, U. Ventilācijas sistēmu optimizācija ar matemātisko modeļēšanu. "Būvēt?", 2000, Nr. 10, lpp. 27-35.

Landau, L.D., Lifshic, E.M. *Gidrodinamika [Hidrodinamika]*. Moskva: Nauka, 1986. lpp. 71-77.

LBN 002-01. *Ēku norobežojšo konstrukciju siltumtehnika*. Latvijas būvnormatīvs. 2001. Pieejams: <http://www.likumi.lv/doc.php?id=56049> [aplūkots: 30.09.2012.].

LBN 003-01. *Būvklimatoloģija. Latvijas būvnormatīvs.* 2001. Pieejams: <http://www.likumi.lv/doc.php?id=53424> [aplūkots: 30.09.2012.].

LBN 211-08. *Daudzstāvu daudzdzīvokļu dzīvojamie nami. Latvijas Būvnormatīvs.* 2008. Pieejams: <http://www.likumi.lv/doc.php?id=187528> [aplūkots: 28.08.2012.].

Leonachescu, N., Rodan, G., Boian, F., Rodan, P. Physics of thermographical measurements in building industry. *14th International THERMO Conference, June 24-25.* Hungary: Budapest, 2005, CD.

Lesieur, M., Métais, O., Comte, P. *Large-Eddy Simulations of Turbulence.* Cambridge: Cambridge University Press, 2005.

Li, D.H.W., Lam, J.C., Lau, C.C.S., Huan, T.W. Lighting and energy performance of solar film coating in air-conditioned cellular offices. *Renewable Energy* 29, lpp. 921-937.

Lienhardt IV, J. H., Lienhardt V, J. H. *A heat transfer textbook. 3rd Edition.* Cambridge, MA: Phlogiston Press, 2003. lpp. 64.-67.

LVS EN 1279-3. *Būvniecības stikls. Stikla paketes. 3. Daļa: Ilglaicīgā testa metode un prasības gāzes zudumu koeficientam un gāzes koncentrācijas pielaidēm.* Latvijas Valsts Standarts, 2003.

LVS EN 1745. *Mūris un mūra elementi. Siltumtehnikas aprēķina vērtību noteikšanas metodes.* Latvijas Valsts Standarts, 2003.

LVS EN 12412-2. *Logu, durvju un slēgu termiskās īpašības. Siltumvadītspējas noteikšana ar karstās kastes metodi.* Latvijas Valsts standarts, 2003.

LVS EN 13829. *Ēku termiskā efektivitāte - Ēku gaisa caurlaidības noteikšana - Piespiedu ventilācijas metode.* Latvijas Valsts standarts, 2002.

LVS EN ISO 6946. *Ēku daļas un būvkonstrukcijas. Siltumpretestība un siltumvadītspēja. Aprēķina metode.* Latvijas Valsts Standarts, 2003.

LVS EN ISO 7730. *Siltuma vides ergonomika. Termālā komforta analītiska noteikšana un interpretācija, izmantojot paredzamā vidējā balsojuma (PMV) un paredzamā neapmierināto personu procenta (PPD) indeksu kalkulāciju un lokālā termālā komforta kritērijus.* Latvijas Valsts standarts, 2006.

LVS EN ISO 8990. *Siltumizolācija. Stacionāru siltumpārvades raksturlielumu noteikšana. Kalibrētas un norobežotas karstās kastes metode.* Latvijas Valsts Standarts, 2007.

LVS EN ISO 10211. *Termiskie tilti būvkonstrukcijās. Siltuma plūsmas un virsmas temperatūras. Detalizēti aprēķini.* Latvijas Valsts standarts, 2008.

LVS EN ISO 12567-1. *Logu un durvju termiskā efektivitāte. Siltumcaurlaidības noteikšana ar termokameras metodi. 1. daļa: Gatavi logi un durvis.* Latvijas Valsts standarts, 2010.

LVS EN ISO 12569. *Ēku siltumizolācija. Gaisa apmaiņas noteikšana ekās. Iezīmētās gāzes izklādināšanas metode.* Latvijas Valsts standarts, 2009.

LVS EN ISO 13370. *Ēku siltumtehniskās īpašības. Siltuma zudumi caur zemi. Aprēķināšanas metodika*. Latvijas Valsts standarts, 2008.

LVS EN ISO 13790. *Ēku energoefektivitāte. Telpu apsildīšanas un dzesēšanas energopatēriņa rēķināšana*. Latvijas Valsts standarts, 2009.

LVS EN ISO 14683. *Termiskie tilti būvkonstrukcijās. Lineārās siltumapmaiņas koeficients. Vienkāršota aprēķināšanas metodika un standartvērtības*. Latvijas Valsts standarts, 2008.

LVS ISO 8302. *Siltuma izolācija. Siltuma pretestība un ar to saistīto īpašību noteikšana stacionārā režīmā. Norobežotās karstās plāksnes ierīce*. Latvijas Valsts Standarts, 2001.

McMullan, R. *Environmental science in building*. 5th Edition. New York: Palgrave Macmillan, 2002. lpp. 94.-98.

Menter, F. R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *ALAA-Journal*, 1994, Vol. 32, No.8, lpp.1598-1605.

Ministru kabinets. *Ēkas energoefektivitātes aprēķina metode. 2009. gada Ministru kabineta noteikumi Nr.39. 2009.* Pieejams: <http://www.likumi.lv/doc.php?id=187240> [aplūkots: 28.08.2012.].

National Instruments. *AT-MIO-16XE-50, 20 kS/s, 16-Bit, 16 Analog Input Multifunction DAQ*. 2008, Pieejams: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/1072> [aplūkots: 25.09.2012].

Nielsen, T. R., Duer, K., Svendsen, S. Energy performance of glazing and windows. *Solar Energy*, 2000, Vol. 69, No. 1-6, lpp. 137-143.

NPR 5129. *Energy performance of housing buildings. Calculation program*. The Dutch Building Code, 2005.

Oehme, I. *Purchasing Guidelines for Green Buildings Background Document*. EU-Research Project RELIEF. Work Package 13. Austrian Institute for Ecological and Healthy Buildings. Graz, Austria, 2003.

Olesen, B.W., Parsons, K.C. Introduction to thermal comfort standards and to the proposed new version of EN ISO 7730. *Energy and Buildings*, 2002, Vol.34, No.6, lpp. 537-548.

PAIC. *DataProc v. 2.1. Siltuma caurlaidības koeficienta aprēķins. Lietotāja rokasgrāmata*. Rīga: Procesu analīzes un izpētes centrs, 2002.

PAIC. *UMeas v. 2.1. Siltuma caurlaidības noteikšana termokamerā. Lietotāja rokasgrāmata*. Rīga: Procesu analīzes un izpētes centrs, 2003.

PAIC. *Isis v. 1.0.1. Siltuma vadītspējas noteikšanai ar norobežotās karstās plāksnes ierīci. Lietotāja rokasgrāmata*. Rīga: Procesu analīzes un izpētes centrs, 2004.

PAIC. *HeatMod v. 5.2. Ēkas siltuma bilances aprēķins. Lietotāja rokasgrāmata*. Rīga: Procesu analīzes un izpētes centrs. Pieejams: http://www.procesu.com/images/soft/manual_HeatMod52.pdf [aplūkots: 24.04.2012].

PAROC. *Būvēju siltu māju 4. Paroc rokasgrāmata projektētājiem un celtniekiem*. Rīga, 2005.

Passivhaus Institut. „Zertifiziertes Passivhaus“. *Zertifizierungskriterien für Passivhäuser mit Wohnnutzung*. Pieejams: http://www.passiv.de/downloads/03_zertifizierungskriterien_wohngbaeude_de.pdf [aplūkots: 28.08.2012.].

Pavlik, Z., Pavlik, J., Jiřicková, M., Černý, R. System for testing the hygrothermal performance of multi-layered building envelopes. *Journal of Building Physics*, 2002 vol. 25 no. 3, lpp. 239-249.

Petrovs, B., Zēbergs, V., Zeltiņš, N. Enerģijas izmantošanas efektivitātes paaugstināšana: tehnoloģiju vērtēšanas metodiku un modelēšanas attīstības problēmas. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, 2006, Nr. 5, lpp. 46-58.

Pitts, D. R., Sissom, L.E. *Schaum's outline of heat transfer*. New York: McGraw-Hill, 1997.

Potter, SE, Underwood, CP. A modelling method for conjugate heat transfer and fluid flow in building spaces. *Building Service Engineering*, 2004, Vol. 25, lpp. 111-125.

Poussard, E., Peuportier, B., Grepmeier, K., Meersseman, X., Trim, M., Nagy, Z. *Guide for a building energy label*. European Actions for Renewable Energies (PREDAC), 2003. Pieejams: www.cler.org/predac [aplūkots: 17.09.2012].

Riekstiņš, E. *Matemātiskās fizikas vienādojumi*. Rīga: Zvaigzne, 1964. lpp. 453-468.

Rose, J., Svedsen, S. Validating numerical calculations against guarded hot box measurements. *Nordic Journal of Building Physics*, 2004, Vol.4. Pieejams: http://web.byv.kth.se/bphys/pdf/art_0204.pdf [aplūkots 27.09.2012].

Sacima. *Ēku energoefektivitātes likums*. Rīga: Latvijas Vēstnesis, 51 (3835), 2008.

Samarskiy, A.A., Vabishchevich, P.N. *Vichislitel'naja teploperedacha [Skaitliskā siltuma pārnese]*. Moskva: Editorial URSS, 2002, lpp. 36-37, 56-58.

SAP 2005. *The government's standard assessment procedure for energy rating of dwellings, 2005 Edition*. Building Research Establishment, Garston, Watford, UK, 2005. Pieejams <http://projects.bre.co.uk/sap2005/> [aplūkots 27.09.2012].

Schmidt, D., Maas, A., Hauser, G. Experimental and theoretical case study on cross ventilation. *Nordic Journal of Building Physics*, 1999, Vol.2. Pieejams: http://web.byv.kth.se/bphys/pdf/art_0199.pdf [aplūkots 27.09.2012].

SIA 380/1. *Thermal energy in buildings. Swiss Standard*. Swiss Society of Engineers and Architects, 2007.

Solar Energy Laboratory TRNSYS 17. *A TRaNsient SYstem Simulation program*. Pieejams: http://www.transsolar.com/__software/download/en/trnsys_shortinfo_en.pdf [aplūkots: 17.09.2012].

Strautiņš, M. *Materiālu siltuma vadītspējas pētījumi izmantojot karstās plates metodi*. Bakalaura darbs. Rīga: Latvijas Universitāte, 2005.

Svaic, S., Boras, I., Susa, M. The estimation of the state of building using infrared thermography and numerical method. In: *14th International Conference on Thermal Engineering and Thermogrammetry THERMO*. Hungary: Budapest, 2005, CD.

Svidt, K., Bjerg, B., Nielsen, T.D. Initial studies on Virtual Reality Visualization of 3D Airflow in Ventilated Livestock Buildings. In: *Proceeding sof Conference on Applied Virtual Reality in Engineering & Construction Applications of Virtual Reality (AVR II & CONVR)*. Gothenburg, Sweden. 2001, lpp. 176-181.

Tanabe, S., Kobayashi, K., Nakano, J., Ozeki, Y., Konishi, M. Evaluation of thermal comfort using combined multi-node thermoregulation (65MN) and radiation models and computational fluid dynamics (CFD). *Energy and Buildings* 34, 2002, lpp. 637-646.

Tibaut, P., Wiesler., B. Thermal comfort assessments of indoor environment by means of CFD. In: *Proceedings of Room Vent 2002 (8th International Conference of Air Distribution in Rooms)*. Copenhagen, Denmark, 2002, lpp. 97-100.

The Energy Conservatory. (2012) *Minneapolis Blower Door. Operation manual for Model 3 and Model 4 Systems*. Pieejams: http://www.energyconservatory.com/sites/default/files/documents/mod_3-4_dg700_-_new_flow_rings_-_cr_-_tpt_no_fr_switch_manual_ce_0.pdf [aplūkots: 19.09.2012].

Timuhins, A., Gendelis, S., Jakovics, A. Experimental estimation of thermophysical properties of materials. In: *Proceedings of the 4th International Scientific Colloquium "Modelling for Material Processing"*. Rīga, 2006, lpp. 227-232.

Trümmann, H., Kammeyer, E., Mühlbauer, A.. Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten von Trennwänden unter instationären Bedingungen. *Elektrowärme international*. 1992, Jg. 50, Nr.3, lpp. A123-A128.

Tuomaala, P. *Implementation and evaluation of air flow and heat transfer routines for building simulation tools*. Doctoral Thesis. VTT Publications 471. Finland: Helsinki, University of Technology, Espoo, 2002.

Vieser, W., Esch, T., Menter, F. *Heat transfer predictions using advanced two-equation turbulence models*. (CFX Validation Report CFX-VAL10/1002). AEA Technology, 2002.

VTPMML *Mērsistēmas ar Peltjē sensoru materiālu siltuma caurlaidības un mitruma dinamikas attālinātam monitoringam prototipa izveide un izmēģinājumi eku ekspluatācijas apstākļos*. Vides un

tehnoloģisko procesu matemātiskās modelēšanas laboratorija. pārskats par aktivitātes „Zinātniskās darbības infrastruktūras attīstība LU” projektu, 2007.

Werner, A., Roos, A. Simulations of coating to avoid external condensation on low U -value windows. *Optical Materials*, 2007, Vol. 30, Issue 6, lpp. 968-978.

Wilcox, D. C. *Turbulence Modelling for CFD*. La Canada, California: DCW Industries, Inc., 1993.

WSVO. *Verordnung über einen energiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden. Wärmeschutzverordnung*. 1995. Pieejams: http://www.baumarkt.de/b_markt/fr_info/wsvo-anl.htm [aplūkots: 27.09.2012.].

Yao J., Yan, C. Effects of Solar Absorption Coefficient of External Wall on Building Energy Consumption. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2011, Issue 52, lpp. 758-760.

Zambrāns, A., Rezvaja, G. *Fizikālo mērījumu datu elementārā apstrāde*. Rīga: Latvijas Valsts Universitāte, 1984.

Pateicības

Vēlos izteikt sirsnīgu pateicību asoc. prof. Andrim Jakovičam par palīdzību, kritiskām piezīmēm, jaunām idejām un padomiem šī promocijas darba izstrādē un atbalstu citos zinātniski-pētnieciskos darbos jau kopš bakalaura studijām. Paldies kolēģiem no VTPMM laboratorijas, Procesu analīzes un izpētes centra, Fizikas un matemātikas fakultātes un Latvenergo par sadarbību atsevišķu darba sadaļu tapšanā, palīdzību un konsultācijām, to starpā Aldim Bangam, Andrejam Timuhinam, Kasparam Ērglim, Jānim Virbulim.

Īpaša pateicība maniem vecākiem par mīlestību, pacietību un sapratni, kā arī visiem tuviem un ne ļoti cilvēkiem, kas juta līdzī, bet varbūt neizrādīja. Paldies visiem tiem, kas neaizmirsā man regulāri pajautāt: „kā veicas ar disertāciju?” un Lienei Bandeniecei, kas ar savu neatlaidību palīdzēja man uzkāpt uz finiša taisnes.

Esmu pateicīgs Latvijas Universitātes Fizikas un matemātikas fakultātei, Procesu analīzes un izpētes centram un Eiropas Sociālajam fondam, ar kuru atbalstu ir tapis šis darbs.