

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Eglė Jaraminienė

**ORO INFILTRACIJOS
PASTATUOSE TYRIMAS
TAIKANT NEAPIBRĖŽTIES
ANALIZĘ**

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
ENERGETIKA IR TERMOINŽINERIJA (06T)

Vilnius „Technika“ 2008

Daktaro disertacija rengta 2003–2008 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Darbo mokslinis vadovas

prof. dr. Egidijus Saulius Juodis (Vilniaus Gedimino Technikos Universitetas,
technologijos mokslai, energetika ir termoinžinerija, 06T)

<http://leidykla.vgtu.lt>

VG TU leidyklos TECHNIKA 1540-M mokslo literatūros knyga

ISBN 978-9955-28-348-5

© Jaraminienė, E., 2008

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Eglė Jaraminienė

INVESTIGATION OF AIR INFILTRATION IN BUILDINGS USING UNCERTAINTY ANALYSIS

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
ENERGETICS AND POWER ENGINEERING (06T)

Vilnius „Technika“ 2008

Reziუმė

Griežtėjant reikalavimams pastatų išorinių atitvarų šiluminei varžai, santykinai didėja šilumos nuostoliai dėl nekontroliuojamos oro kaitos arba kitaip – infiltracijos. Infiltracijai nustatyti egzistuoja keletas plačiai taikomų metodų, tačiau jų taikymas ne visose situacijose yra priimtinas dėl techninio sudėtingumo, didelių sąnaudų ar gaunamo rezultato neapibrėžties. Todėl išlieka naujų infiltracijos nustatymo metodų poreikis. Darbe pristatomas infiltracijos įvertinimo pagal pastato šilumos kiekių balansą, kurio sudarymui naudojami pastato automatizuoto valdymo sistemose kaupiami statistiniai mikroklimato ir sistemų veikimo duomenys. Tokiu būdu infiltracija nustatoma įprastinėmis pastato eksploataavimo sąlygomis, kas yra labai svarbu vertinant infiltracijos dalį bendrame šilumos vartojime. Infiltracijos intensyvumo nustatymas pagal pastato šilumos kiekių balansą yra ribojamas gaunamo rezultato neapibrėžties. Vidutinio infiltracijos intensyvumo vertinimo pagal pastato šilumos kiekių balansą neapibrėžtį lemia atliekamų matavimų tikslumas ir dažnis, pastato charakteristikos ir aplinkos sąlygos. Neapibrėžties analizė leidžia tirti šių veiksnių įtaką vertinimo neapibrėžčiai ir tokiu būdu nustatyti siūlomo infiltracijos intensyvumo vertinimo metodo taikymo galimybes, apribojimus ir sąlygas. Darbe parengus kompiuterinį pastato šilumos kiekių balanso modelį, imituojantį stochastinį pastate vykstančių šiluminių reiškinių ir jų parametrų matavimų pobūdį, atlikta jautrumo ir neapibrėžties analizė keletui tipinių pastatų. Remiantis atliktu tyrimu, infiltracijos įvertinimas pagal šilumos kiekių balansą būtų galimas didelio tūrio pastatuose su įrengtomis šiuolaikinėmis mikroklimato automatizuoto valdymo sistemomis.

Abstract

As regulations on thermal insulation of building external envelope have got tighter, the relative contribution of infiltration to heat consumption in buildings has increased. There are some methods widely used for evaluation of infiltration, but their application is not feasible in every situation because of their technical complexity, large expenses or uncertainty of the result. Thus the need of new infiltration estimation methods remains. The thesis presents method of air infiltration evaluation, based on construction of set of thermal balance equations using statistical data, stored by building automation control systems. In this way, infiltration is evaluated in conditions of usual building performance, what is important when estimating infiltration share in whole building energy consumption. Method can be used without the need of building exploitation interruption. The application limits of the method are defined by the uncertainty of the result that depends upon characteristics of building, conditions and accuracy of measurements. The uncertainty analysis is performed using computer model, designed on the base of Monte Carlo approach. As revealed by the research, infiltration evaluation from thermal balance could be feasible in large volume buildings equipped with modern building microclimate control systems.

Žymėjimai

Santrumpos

- LBL L. Berkeley laboratorija;
 MKA Monte Karlo analizė;
 MK mikroklimato kondicionavimas;
 MKS mikroklimato kondicionavimo sistemos;
 PAV pastato automatizuotas valdymas;
 PAV pastato automatizuoto valdymo sistema.

Lentelių sąrašas

1 lentelė.	Apskaičiuotas šilumos poreikis per vertinamąjį mėnesį	22
2 lentelė.	Infiltracijos ir ją atitinkančių šilumos nuostolių priklausomybė nuo prielaidų apie koeficientą C'	23
3 lentelė.	Infiltracijos ir ją atitinkančių šilumos nuostolių priklausomybė nuo prielaidų apie pastato aplinkos reljefą atspindinčius parametrus	24
4 lentelė.	Infiltracijos ir ją atitinkančių šilumos nuostolių priklausomybė nuo prielaidų apie nesandarumų pasiskirstymą pastato atitvarose	24
5 lentelė.	Infiltracijos oro kaitos ir ją atitinkančių šilumos nuostolių priklausomybė nuo prielaidų apie nesandarumų pasiskirstymą pastato atitvarose	25
6 lentelė.	Faktinių sandarumo matavimų prie 75 Pa slėgio skirtumo rezultatai	29
7 lentelė.	Faktinių sandarumo matavimų prie 50 Pa slėgio skirtumo rezultatai	30
8 lentelė.	Faktinių pastatų sandarumo matavimų prie 75 Pa slėgio skirtumo rezultatai	30
9 lentelė.	Faktinių didelio tūrio pastatų sandarumo matavimų rezultatai	31
10 lentelė.	Naudotinas matavimų tikslumas gyvenamųjų pastatų energijos vartojimo monitoringo sistemose	54
11 lentelė.	Pastato energijos vartojimo monitoringo sistemose naudotinas matavimų tikslumas	54

12 lentelė.	Vidinių šilumos šaltinių šilumos srauto tankis, W/m^2 patalpų grindų ploto	69
13 lentelė.	Analizuojamo daugiabučio gyvenamojo pastato išorinių atitvarų plotai	77
14 lentelė.	Modelio daugiabučiui namui įvesties parametrai	78
15 lentelė.	Identiškų pastatų šilumos vartojimo sklaida	81
16 lentelė.	Prekybos centro atitvarų šilumos perdavimo koeficientai	82
17 lentelė.	Pastato šilumos srauto su vėdinimo oru matavimo neapibrėžties rezultatai	84
18 lentelė.	Šilumos kiekių balanso dedamųjų absoliutinės vertės	85
19 lentelė.	Atskirų šilumos kiekių balanso dedamųjų neapibrėžtis, MWh	85
20 lentelė.	Kiekvieno lygybės (4.5) dėmens indėlis į bendrą gaunamo rezultato neapibrėžtį	85
21 lentelė.	Analizuojamų IND ir PC1–PC4 variantų pastatų matmenys ir šildymo sistemos galia	94
22 lentelė.	Modeliuojant tiriamus variantus priimti atsitiktinių dydžių skirstiniai	94
23 lentelė.	Šilumos pritekio nuo vidinių šilumos šaltinių grafikas PC1–PC4 variantams	95
24 lentelė.	Šilumos pritekio nuo vidinių šilumos šaltinių grafikas IND, PC1–PC4 variantams	95
25 lentelė.	Atliekamų matavimų tikslumas PC1–PC4 variantams	97
26 lentelė.	Šilumos kiekių balanso dedamųjų absoliutinės vertės IND variantui	99
27 lentelė.	IND varianto savitųjų šilumos nuostolių neapibrėžties analizės rezultatai	100
28 lentelė.	Atskirų šilumos kiekių balanso dedamųjų neapibrėžtis IND variante	100
29 lentelė.	Kiekvieno lygybės (2.14) dėmens indėlis į bendrą gaunamo rezultato neapibrėžtį IND variante	100
30 lentelė.	Vidutinės oro kaitos vertės analizuojamuose PC1–PC4 variantų pastatuose	102
31 lentelė.	Šilumos kiekių balanso dedamųjų absoliutinės vertės	104
32 lentelė.	PC1–PC4 variantų pastatų savitųjų šilumos nuostolių neapibrėžties analizės rezultatai	105

33 lentelė.	PC1–PC4 variantų pastatų šilumos srauto su vėdinimo oru matavimo neapibrėžties rezultatai	106
34 lentelė.	Atskirų šilumos kiekių balanso dedamųjų absoliutinė ir santykinė neapibrėžtis	107
35 lentelė.	Infiltracijos vertinimo neapibrėžtis, kai šilumos pritekio neapibrėžtis lygi nuliui	107
36 lentelė.	Kiekvieno lygybės (4.5) dėmens indėlis į bendrą gaunamo rezultato neapibrėžtį	107
37 lentelė.	Apibendrinta infiltracijos nustatymo neapibrėžties PC1–PC4 variantams rezultatų lentelė	108
38 lentelė.	Neapibrėžties PC3 variantui priklausomybė nuo matavimų skaičiaus	110
39 lentelė.	Neapibrėžties PC3 variantui priklausomybė nuo vėdinimo sistemomis tiekiamo oro debito matavimo tikslumo	112
40 lentelė.	Neapibrėžties PC3 variantui priklausomybė nuo temperatūros matavimo tikslumo	113
41 lentelė.	Infiltracijos nustatymo priklausomybė nuo pastato atitvarų šiluminės izoliacijos	114
42 lentelė.	Infiltracijos vertinimo neapibrėžties priklausomybė nuo pastato sandarumo orui	115
43 lentelė.	Infiltracijos nustatymo priklausomybė nuo šilumos pritekio	115
44 lentelė.	Vėjo greičio svyravimo įtaka vertinimo neapibrėžčiai	117

Paveikslų sąrašas

1 pav.	Infiltracijos tyrimų grupavimas pagal objektą	8
2 pav.	Infiltracijos skaičiuojamosios vertės	8
3 pav.	Infiltracijos vertinimo metodų taikymas skirtingais pastato gyvavimo ciklo etapais	10
4 pav.	Pastato sandarumo matavimo viršslėgio sudarymo metodu įrangos schema	13
5 pav.	Infiltracijos priklausomybė nuo lauko oro temperatūros	21
6 pav.	Šilumos poreikio jautrumas LBL modelio parametrų vertėms	25
7 pav.	Infiltracijos vertės tam pačiam pastatui, gautos taikant skirtingus infiltracijos oro kaitos vertinimo metodus ir prielaidas	26

8 pav.	Šilumos nuostolių dėl infiltracijos vertės tam pačiam pastatui, gautos taikant skirtingus infiltracijos oro kaitos vertinimo metodus ir prielaidas	27
9 pav.	Darbe siūlomo metodo vieta esamų infiltracijos vertinimo metodų sistemoje	32
10 pav.	Vertinimo modelis	34
11 pav.	Monte Karlo analizės principinė schema	42
12 pav.	Normaliojo (Gauso) skirstinio tankis	44
13 pav.	Log normaliojo skirstinio tankis	45
14 pav.	Tolydusis skirstinio tankis	45
15 pav.	Pagrindinės valdymo grandinės schemos pavyzdys	49
16 pav.	Modelio BPM panaudojimas informacijos apie pastatą sekimui	51
17 pav.	Matavimo proceso schema	53
18 pav.	Pastato šilumos kiekių balanso schema	58
19 pav.	Modelio mikroklimato kondicionavimo ir PAV sistemų schema	60
20 pav.	Savitųjų šilumos nuostolių įvertinimo schema	65
21 pav.	Kompiuterinio modelio infiltracijos vertinimui pagal šilumos kiekių balansą neapibrėžties analizės pirma	73
22 pav.	Kompiuterinio modelio infiltracijos vertinimui pagal šilumos kiekių balansą neapibrėžties analizės antra schema	75
23 pav.	Tipinio daugiabučio aukšto sekcijos planas	77
24 pav.	Modeliavimu gautų verčių histograma	79
25 pav.	Faktinės šilumos sąnaudos daugiabučiams pastatams	80
26 pav.	Faktinių metinio šilumos suvartojimo verčių histograma	80
27 pav.	Savitųjų šilumos nuostolių per atitvaras verčių histograma	83
28 pav.	Šilumos kiekio, patekusio su vėdinimo oru, verčių histograma	84
29 pav.	Neapibrėžties analizės variantų schema	93
30 pav.	Tiriamų pastatų schematinis vaizdas	94
31 pav.	Infiltracijos oro kaita IND varianto pastate per vertinamąjį laikotarpį	98
32 pav.	Šilumos srautų kitimas IND varianto pastate per vertinamąjį laikotarpį	98

33 pav.	IND variantu savitujų ūilumos nuostolių histograma	99
34 pav.	Infiltracijos oro kaita pastate per vertinamąjį laikotarpį	101
35 pav.	Ūilumos srautų kitimas per vertinamąjį mėnesį	102
36 pav.	Ūilumos srautų kitimo priklausomybė nuo aplinkos ir patalpų oro temperatūrų skirtumo	103
37 pav.	Kiekvienos dedamosios dalis ūilumos kiekių balanse	104
38 pav.	Savitujų ūilumos nuostolių PC3 variantui histograma	105
39 pav.	Matavimais gaunamos vėdinimo dedamosios neapibrėžties priklausomybė nuo matavimų kiekio	109
40 pav.	Regresinės analizės grafikas. Ūilumos srauto su vėdinimo oru priklausomybė nuo aplinkos ir patalpų oro skirtumo	111
41 pav.	Oro kaitos dėl infiltracijos priklausomybė nuo vėjo greičio	117

Turinys

Abstract	iv
Reziumė	v
Įvadas	1
Tiriamoji problema	1
Darbo aktualumas	1
Tyrimų objektas	2
Darbo tikslas	2
Darbo uždaviniai	2
Tyrimo metodai	3
Ginamieji teiginiai	3
Mokslinis darbo naujumas.....	4
Praktinė darbo nauda	4
Darbo rezultatų aprobavimas.....	4
Disertacijos struktūra.....	4
1. Oro infiltracija pastatuose ir jos vertinimo metodai	5
1.1. Oro infiltracijos pastatuose reiškiniai	5
1.2. Oro infiltracijos pastatuose tyrimų apžvalga	7
1.3. Infiltracijos vertinimo metodai	9
1.3.1. Supaprastinti infiltracijos vertinimo metodai	11
1.3.2. Sandarumo matavimas sukuriant viršslėgį	12
1.3.3. Infiltracijos vertinimo pagal išmatuotą sandarumą metodai	15
1.3.4. Indikatorinių dujų metodai	17
1.3.5. Infiltracijos vertinimas pagal pastato šilumos balansą	19
1.4. Esamų infiltracijos vertinimo metodų neapibrėžtis	20
1.5. Faktiniai infiltracijos pastatuose vertinimo duomenys	28
1.6. Pirmojo skyriaus išvados	31
2. Neapibrėžtis ir jos vertinimo metodai	33
2.1. Neapibrėžties analizė pastatuose vykstančių šilumos perdavimo procesų tyrimė	34
2.2. Neapibrėžties analizė	36

2.2.1. Neapibrėžties išraiškos būdai	36
2.2.2. Neapibrėžties analizės metodai	37
2.3. A tipo neapibrėžties vertinimas	38
2.3.1. Vidutinės vertės ir imties sklaidos parametrų skaičiavimas.....	38
2.3.2. Neapibrėžties vertinimas mažiausios kvadratų sumos metodu	39
2.4. B tipo neapibrėžties vertinimas	40
2.5. Paklaidų sumavimo taisyklės.....	40
2.6. Monte Karlo metodas	41
2.7. Įvedimo parametrų ir rezultatų tikimybiniai skirstiniai	43
2.7.1. Normalusis (Gauso) skirstinys	43
2.7.2. Log normalusis skirstinys	44
2.7.3. Tolydusis skirstinys.....	45
2.8. Jautrumo analizė	46
2.9. Antrojo skyriaus apibendrinimas.....	46
3. Pastatų mikroklimato automatizuoto valdymo sistemos	47
3.1. Pastato automatizuoto valdymo sistemų raida.....	47
3.2. Pastato automatizuoto valdymo sistemų sandara ir funkcijos	48
3.3. Pastatų automatizuoto valdymo sistemose kaupiami duomenys	53
3.4. Trečiojo skyriaus išvados	55
4. Oro infiltracijos nustatymas pagal pastato šilumos kiekių balansą.....	57
4.1. Pastato šilumos kiekių balanso sudarymas	57
4.2. Oro infiltracijos intensyvumo įvertinimo pagal pastato šilumos kiekių balansą algoritmas	61
4.3. Infiltracijos įvertinimo neapibrėžties analizės schema	62
4.3.1. Šilumos nuostolių per atitvaras neapibrėžtis.....	63
4.3.2. Šilumos pritekio nuo vidinių šilumos šaltinių neapibrėžtis.....	68
4.3.3. Šilumos pritekio dėl saulės spinduliuotės neapibrėžtis	71
4.3.4. Šilumos srautų dėl mikroklimato kondicionavimo sistemų veikimo neapibrėžtis.....	71
4.4. Infiltracijos vertinimo kompiuterinis modelis	72
4.5. Modeliavimo rezultatų palyginimas su matavimų duomenimis	76
4.6. Realaus pastato infiltracijos nustatymas	81
4.6.1. Pastato charakteristikos.....	81
4.6.2. Pastato savitieji šilumos nuostoliai per atitvaras.....	82
4.6.3. Matuojamų duomenų analizė	83
4.6.4. Infiltracijos vertinimo rezultatai.....	85
4.7. Ketvirtojo skyriaus apibendrinimas	86
5. Oro infiltracijos vertinimo neapibrėžties jautrumo analizė	87
5.1. Kompiuterinis pastato šilumos kiekių balanso imitavimo modelis	87
5.1.1. Oro infiltracijos modeliavimas.....	88

5.1.2.	Šilumos pritekio modeliavimas.....	89
5.1.3.	Šilumos nuostolių per atitvaras modeliavimas.....	89
5.1.4.	Patalpų oro temperatūros modeliavimas	89
5.1.5.	Mikroklimato kondicionavimo sistemų darbo režimo modeliavimas	90
5.1.6.	Matavimo duomenų modeliavimas	91
5.2.	Atliekamos analizės schema ir pradiniai duomenys	92
5.2.1.	Tiriamų pastatų variantų pasirinkimo pagrindimas.....	92
5.2.2.	Tiriamų pastatų charakteristikos	93
5.2.3.	Mikroklimato kondicionavimo ir pastato automatizuoto valdymo sistemos tiriamuosiuose pastatuose	96
5.2.4.	Skaičiavimams naudoti klimatiniai duomenys.....	97
5.3.	Neapibrėžties analizės IND variantui rezultatai	97
5.3.1.	Šilumos kiekių balanso IND variantui analizė.....	97
5.3.2.	IND varianto savitųjų šilumos nuostolių neapibrėžtis	99
5.3.3.	IND varianto infiltracijos nustatymo rezultatai.....	100
5.4.	PC1–PC4 variantų modeliavimo rezultatai.....	101
5.4.1.	Šilumos kiekių balanso PC1–PC4 variantams tyrimas	101
5.4.2.	Savitųjų šilumos nuostolių PC1–PC4 variantams vertinimo neapibrėžtis.....	105
5.4.3.	Matavimų duomenimis pagrįstų dedamųjų PC1–PC4 variantams neapibrėžties rezultatai	106
5.4.4.	Oro kaitos dėl infiltracijos PC1–PC4 variantams vertinimo neapibrėžtis.....	106
5.5.	Galimybių sumažinti neapibrėžtį PC3 varianto atveju analizė	108
5.5.1.	Matavimų skaičius	109
5.5.2.	Tiesinės regresijos taikymas	110
5.5.3.	Matavimų tikslumo įtaka oro infiltracijos nustatymo neapibrėžčiai	112
5.6.	Pastato charakteristikų įtaka infiltracijos nustatymo neapibrėžčiai	113
5.7.	Aplinkos sąlygų įtaka infiltracijos nustatymo neapibrėžčiai	116
5.8.	Infiltracijos nustatymo pagal šilumos kiekių balansą ribos ir sąlygos....	118
5.8.1.	Pastato charakteristikos.....	118
5.8.2.	Aplinkos sąlygų pasirinkimas matavimams	119
5.8.3.	Reikalavimai pastato automatizuoto valdymo sistemose kaupiamiems duomenims	119
	Bendrosios išvados.....	121
	Literatūros sąrašas	123
	Autorės publikacijų sąrašas disertacijos tema.....	131

Įvadas

Tiriamoji problema

Oro infiltracijos intensyvumo nustatymo galimybės pagal pastato šilumos kiekių balansą yra ribojamos gaunamo rezultato neapibrėžties. Šiame darbe tiriamas neapibrėžties jautrumas matavimo sąlygoms ir pastato charakteristikoms, tokių būdu nustatant metodo taikymui tinkamas jų vertes.

Darbo aktualumas

Daugelyje šalių pastatuose suvartojama bent 40 proc. visos galutinės energijos (WBCSD, 2007), todėl čia egzistuoja didelis energijos vartojimo efektyvumo didinimo potencialas. Energijos poreikį pastatų mikroklimato palaikymui galima sumažinti gerinant atitvarų šilumines savybes ir didinant pastatų sandarumą. Iki šiol daugiausia dėmesio buvo skiriama atitvarų šiltinimui, tačiau griežtėjant reikalavimams dėl pastatų išorinių atitvarų šiltinimo, santykinai didėja šilumos nuostoliai dėl nekontroliuojamos oro kaitos. Esant dabartiniams pastatų atitvarų šiltinimo ir sandarumo reikalavimams, šilumos nuostoliai dėl infiltracijos sudaro iki 50 proc. visų pastato šilumos nuostolių (Air Barrier Solutions, 2001; Emmerich, et al, 2005). Todėl pastatų sandarumo ir infiltracijos vertinimo metodai

tampa vis aktualesni. Šiuo metu, priklausomai nuo pastato gyvavimo ciklo etapo ir tyrimo tikslo, taikoma keli pastatų sandarumo ir infiltracijos vertinimo metodai: projektuojant pastatus infiltracija prognozuojama pagal analogiškų pastatų statistinius duomenis arba modeliujama kompiuterinėmis programomis, esamų pastatų sandarumas tiriamas atliekant natūrinius matavimus. Tačiau statistinių duomenų naudojimas ir modeliavimas lemia didelę gaunamų rezultatų neapibrėžtį, o natūriniai sandarumo matavimai dėl savo techninio sudėtingumo ir didelės kainos atliekami gana retai. Visa tai lemia poreikį tokių oro infiltracijos pastatuose vertinimo metodų, kurie būtų tikslesni už skaičiavimą ar modeliavimą, neparemtą faktiniais matavimais, ir pigesni už matavimais paremtus.

Infiltracijos vertinimas pagal pastato šilumos kiekių balansą neturint mikroklimato parametrų matavimo duomenų yra labai netikslus. Tačiau šiuolaikiniuose pastatuose vis plačiau taikomos pastatų automatizuoto valdymo sistemos, vis didesnis šiose sistemose atliekamų matavimų tikslumas, pigesnė duomenų registravimo ir saugojimo įranga, vis didesnės duomenų analizės galimybės sudaro prielaidas sukaupti tikslesniam vertinimui reikalingą matavimo duomenų kiekį.

Tyrimų objektas

Tyrimo objektas yra vidutinė oro kaita per pasirinktąjį laikotarpį dėl oro infiltracijos per pastato atitvarų nesandarumus ir angas.

Darbo tikslas

Darbo tikslas – suformuluoti oro infiltracijos įvertinimo pagal pastato šilumos kiekių balansą algoritimą, nustatyti šio vertinimo galimybes, apribojimus ir sąlygas.

Darbo uždaviniai

1. Apžvelgti dabar naudojamų metodų taikymo sritis, apribojimus ir šiais metodais gaunamų rezultatų neapibrėžtį.
2. Įvertinti galimybes šilumos kiekių balanso sudarymui panaudoti matavimų duomenis, kaupiamus pastatų automatizuoto valdymo sistemose, nustatyti infiltracijai vertinti pagal šilumos kiekių balansą reikalingų matavimų tikslumą ir dažnį.

3. Sudaryti oro infiltracijos nustatymo pagal pastato šilumos kiekių balansą algoritmą ir kompiuterinį modelį bei įvertinti realaus pastato infiltraciją pagal faktinius matavimų duomenis.
4. Parengti pastato šilumos kiekių balanso imitacinį kompiuterinį modelį ir naudojantis šiuo modeliu nustatyti pastatų savybes, ribojančias infiltracijos vertinimą pagal šilumos kiekių balansą.
5. Nustatyti infiltracijai vertinti pagal šilumos kiekių balansą tinkamas aplinkos sąlygas.
6. Nustatyti infiltracijai vertinti pagal šilumos kiekių balansą reikalingų skaičiavimais vertinamų šilumos kiekių balanso dedamųjų vertinimo neapibrėžties apribojimus.

Tyrimo metodai

Darbe tiriamos oro kaitos dėl infiltracijos nustatymo pagal pastato šilumos kiekių balansą galimybės. Neapibrėžties tyrimui darbe naudoti jautrumo analizės ir Monte Karlo metodai. Statistinių duomenų, kaupiamų PAV sistemose, apdorojimui naudojami statistinės duomenų analizės metodai.

MS Excel, Visual Basic for Applications ir įskiepio Poptools priemonėmis atliekamas kompiuterinis pastato šiluminių reiškinių modeliavimas, integruojant neapibrėžties analizę.

Ginamieji teiginiai

1. Vidutinę oro kaitą dėl infiltracijos pastato eksploatacijos sąlygomis galima įvertinti sudarant pastato šilumos kiekių balansą. Tokio infiltracijos nustatymo metodą iki šiol riboja faktinių duomenų stoka ir dėl to susidaranti didelė tokio vertinimo neapibrėžtis. Vis dažniau šiuolaikiniuose pastatuose įrengiant pastato automatizuoto valdymo sistemas, atsirado galimybė sukaupti didelį kiekį duomenų, leidžiančių sudaryti tikslesnį šilumos kiekių balansą.
2. Šiuolaikinių pastato automatizuoto valdymo sistemų atliekamų matavimų tikslumas yra pakankamas infiltracijos vertinimui, sistemose be papildomų investicijų gali būti sukaupiamas pakankamas matavimų skaičius.
3. Siūlomo metodo neapibrėžtis gali būti panašaus dydžio kaip ir esamų, matavimais pagrįstų metodų, neapibrėžtis. Infiltracijos nustatymo pa-

gal šilumos kiekių balansą neapibrėžti, o tuo pačiu ir šio metodo taikymo apribojimus ir sąlygas lemia pastato charakteristikos.

Infiltracijos vertinimo pagal šilumos kiekių balansą rezultatų neapibrėžtis ypač jautri šilumos pritekio vertinimui, todėl metodas gali būti taikomas, kai šilumos pritekis sudaro nežymią šilumos kiekių balanso dalį arba gali būti pakankamai tiksliai įvertinamas.

Mokslinis darbo naujumas

Šiame darbe pirmą kartą neapibrėžties analizės pagrindu nustatytos oro kaitos dėl infiltracijos vertinimo pagal pastato šilumos kiekių balansą galimybės, sąlygos ir ribos.

Praktinė darbo nauda

Šiame darbe analizuojamas metodas, kuris leidžia mažomis sąnaudomis, bet pakankamu tikslumu įvertinti faktinę oro kaitą dėl infiltracijos esamuose pastatuose. Oro kaitos dėl infiltracijos įvertinimas eksploataavimo metu leidžia nustatyti pastato sandarinimo ekonominį efektą, optimizuoti pastato mikroklimato kondicionavimo sistemų valdymą.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema paskelbtos 2 mokslinės publikacijos recenzuojamuose periodiniuose mokslo leidiniuose. Disertacijoje teikiama medžiaga buvo skelbiama 6 konferencijose.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, 5 skyriai, pagrindinės išvados, naudotos literatūros sąrašas. Darbo apimtis – 131 puslapis, kuriuose pateikta 41 paveikslas, 44 lentelės ir 141 literatūros šaltinis.

Oro infiltracija pastatuose ir jos vertinimo metodai

Pirmajame skyriuje analizuojant platų oro infiltracijos reiškinių tyrimų spektrą, nustatoma pasirinktų tyrimų vieta atliktų tyrimų erdvėje. Apsibrėžiamas tyrimų objektas – vidutinė laikotarpio oro kaita dėl infiltracijos pastatuose. Pateikiant infiltracijos įtaką energijos sąnaudoms pastatuose, iliustruojama praktinė infiltracijos nustatymo vertė. Analizuojant esamus vidutinės infiltracijos nustatymo metodus, jų privalumus, trūkumus, taikymo galimybes ir neapibrėžtį, nustatomas naujo metodo poreikis, jo vieta tarp esamų metodų.

1.1. Oro infiltracijos pastatuose reiškiniai

Oro infiltracija – tai nekontroliuojamas oro judėjimas iš aplinkos į pastatą per išorinių pastato atitvarų nesandarumus ir plyšius, kaminus, įvairias angas. Kai oro judėjimo kryptis yra iš pastato į aplinką, šis reiškinys vadinamas eksfiltracija. Tame pačiame pastate infiltracija ir eksfiltracija vyksta tuo pačiu metu. Pavyzdžiui, dėl patalpos ir lauko oro tankio skirtumo sukeltos natūralios traukos, oras gali infiltruotis išorinių atitvarų apatinėje dalyje, o viršutinėje dalyje tuo pačiu metu vykti eksfiltracija. Vėsesnio klimato šalyse, tokiose kaip Lietuva, dėl

drėgmės kaupimosi atitvarose pavojaus eksfiltracijos kartais bandoma išvengti mechaninėmis vėdinimo sistemomis pastate palaikant žemesnį slėgį nei aplinkoje, tačiau tai tik intensyvia infiltracija.

Patenkantis iš išorės į pastato vidų oras turi būti pašildomas arba atvėsinaamas iki pastato viduje palaikomos temperatūros, todėl intensyvesnė infiltracija lemia didesnį šilumos arba vėsos poreikį. Eksfiltracijos atveju taip pat susidaro energijos nuostoliai, nes tuo atveju per plyšius išėjęs kondicionuotas oras yra kompensuojamas atitinkamu kondicionuoto oro kiekiu.

Infiltracijos arba eksfiltracijos intensyvumą patogų apibūdinti oro kaita dėl infiltracijos, nes šis dydis tinka lyginant skirtingo tūrio pastatus. Oro kaita – tai oro, patenkančio į pastatą, debito ir pastato tūrio santykis.

Infiltracijos intensyvumo įtaka pastate suvartojamos šilumos ir vėsos kiekiui priklauso nuo šalies klimato, tačiau, nors skirtingo klimato šalyse santykis tarp infiltracijos lemiamo šilumos ir vėsos poreikio yra skirtingas, bendras prarandamos energijos kiekis sudaro didelę daugumos šalių energijos vartojimo balanso dalį. JAV Energijos departamento ataskaitoje teigiama, kad iki 40 proc. visos pastatų mikroklimato palaikymui suvartojamos energijos tenka infiltracijos nuostolių padengimui (Air Barrier Solutions, 2001). Šį vertinimą patvirtina ir tyrimas, atliktas siekiant nustatyti infiltracijos lemiamą energijos suvartojimą tipiniuose JAV komerciniuose pastatuose, kuris parodė, kad šaltesnio klimato valstijose sandarinant šiuos pastatus galima pasiekti iki 36 proc. energijos vartojimo sumažinimą (Emmerich, et al, 2005; Emmerich, et al, 2007). Anksčiau atliktas vertinimas parodė, kad JAV infiltracija lemia apie 15 proc. viso administracinių pastatų šildymui suvartojamo šilumos kiekio, ir ši dalis santykinai vis auga griežtėjant pastatų atitvarų šiltinimo reikalavimams (VanBronkhorst, et al, 1995). Apskaičiuota, kad JAV statomuose naujuose pastatuose infiltracija lemia apie 25 proc. šildymo galios poreikio ir apie 4 proc. vėsinimo galios poreikio (Emmerich, et al, 1995). Europos vietovių klimato sąlygomis infiltracijos įtaka energijos sąnaudoms tokia pat stipri, kaip ir Šiaurės Amerikoje. Atliktas skaičiavimas devynioms šalims parodė, kad infiltracijos nuostoliai sudaro 53 proc. visų šilumos nuostolių gyvenamuosiuose ir paslaugų sektoriaus pastatuose (Emmerich, Persily, 1999).

Infiltracija lemia šilumos sąnaudas ne tik dėl šilumos poreikio į pastatą per plyšius patenkančio oro pašildymui iki patalpos oro temperatūros, bet ir padidina šilumos nuostolius per atitvaras. Pavyzdžiui, įvertinus infiltracijos įtaką šilumos nuostoliams per atitvaras individualiam gyvenamajam namui ir mokyklai, buvo nustatyta, kad šilumos nuostoliai padidėja atitinkamai 8 proc. ir 12 proc. (Orme, 2001). Todėl šilumos nuostolius per atitvaras vertinti siūloma atsižvelgiant ne tik į šilumos, bet ir masės mainus (Barhoun, Guarracino, 2004; Barhoun, Guarracino 2006).

Infiltracija susijusi ne tik su energijos sąnaudomis. Pastato atitvarų laidumas orui daro didelę įtaką atitvarose vykstantiems hidroterminiams reiškiniams (Karragiozis, 2001), atitvarų sandarumas būtinas tinkamam MKS funkcionavimui (Anis, 2001). Pastaraisiais metais oro infiltracijos per pastatų atitvaras reiškinys imtas analizuoti ir pastato vidaus oro apsaugos nuo aplinkos teršalų požiūriu (Persily, 2004).

Nors dėl išvardintų priežasčių nekontroliuojama oro kaita pastatuose dažniausiai nepageidaujama, yra atvejų, kai infiltracija laikoma teigiamu reiškiniu. Pastatuose, kuriuose neįrengtos mechaninės vėdinimo sistemos, infiltracija yra vienas iš būdų užtikrinti patalpų oro kokybės palaikymui reikalingą lauko oro kiekį. Tačiau tyrimai rodo, kad ir intensyvi viso pastato infiltracija ne visada užtikrina oro kokybę atskirose patalpose (Edwards, 1999), todėl dideliuose ir sudėtinguose pastatuose įrengiamos mechaninės vėdinimo sistemos ir infiltracija tampa tik šilumos nuostolius lemiančių ir todėl nepageidajamu reiškiniu.

Oro infiltracija vyksta slėgio skirtumui abipus atitvarų įveikiant oro tekėjimo per atitvarų plyšius ir nesandarumus pasipriešinimo nuostolius. Oro tekėjimo charakteristikos varijuoja priklausomai nuo plyšių dydžio ir formos. Ilgi mažo skerspjuvio ploto plyšiai lemia laminarinį tekėjimą, kurio metu pasipriešinimas yra proporcingas tekėjimo greičiui. Didesniuose plyšiuose tekėjimas artimesnis oro judėjimui per angas, kuomet pasipriešinimas yra proporcingas tekėjimo greičio kvadratui. Paprastai pastato atitvarose yra įvairių plyšių ir nėra tikslinga vertinti oro tekėjimą per kiekvieną jų atskirai, o bendras oro debitas per visus pastato plyšius ir nesandarumus išreiškiamas laipsnine priklausomybe.

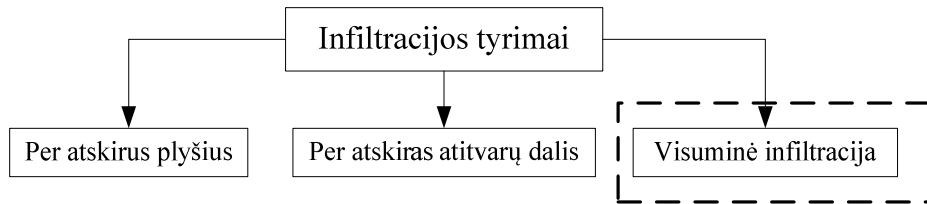
Pagrindinės slėgio skirtumo abipus atitvarų susidarymą lemiančios jėgos yra vėjas, gravitacinės jėgos ir vėdinimo sistemų ventiliatoriai. Palyginus su šiomis pagrindinėmis jėgomis, besikeičiančio barometrinio oro slėgio ir temperatūrinių diferencialų atitvarose poveikis yra labai mažas, todėl vertinant infiltraciją šio poveikio paprastai nepaisoma. Iš trijų pagrindinių slėgio jėgų, vėjo poveikis paprastai yra didžiausias.

1.2. Oro infiltracijos pastatuose tyrimų apžvalga

Didelė oro infiltracijos pastatuose įtaka energijos sąnaudoms lemia, kad infiltracijos teoriniai ir eksperimentiniai tyrimai atliekami jau keletą dešimtmečių ir iki šiol išlieka aktualūs.

Oro judėjimas per pastato atitvaras yra tiriamas įvairiais aspektais, siekiant skirtingų tikslų ir dėl to pasirenkant skirtingą tyrimo detalumą ir atitinkamus metodus.

Visus infiltracijos tyrimo metodus galima sugrupuoti į tris detalumo lygmenis, arba kitaip tariant pagal tris tyrimo objektus, kaip pavaizduota 1 paveiksle pateiktoje schemeje.

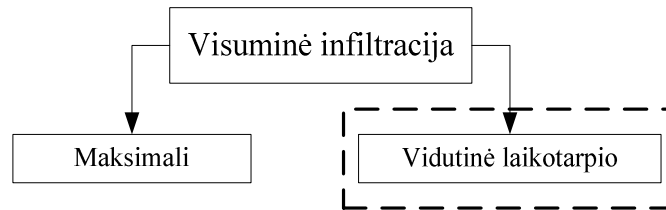


1 pav. Infiltracijos tyrimų grupavimas pagal objektą

Metodo detalumo lygmenis pasirinkimas priklauso nuo keliamo uždavinio. Oro judėjimo per atskirus plyšius tyrimai leidžia suprasti fizinę reiškinio prasmę, nustatyti tekėjimo charakteristikas. Infiltracijos per atskiras atitvarų dalis tyrimas naudingas įvertinant pastatų statybai naudojamų statybinių medžiagų ir atitvarinių konstrukcijų sandarumą orui (Feldman, et al, 1998).

Visuminė infiltracija, t.y. kai vertinama oro kaita dėl infiltracijos per išorines atitvaras visame pastate, leidžia įvertinti į pastatą nekontroliuojamai patenkančio oro debitą ir su tuo susijusius energijos nuostolius bei oro kokybę pastate. Šiame darbe nagrinėjamas tik visuminės pastato (1 pav. pažymėta punktyrine linija) infiltracijos metodai.

Tiriant viso pastato (arba visuminę) infiltraciją, gali būti reikalinga nustatyti ribines arba vidutines laikotarpio vertes (2 pav.).



2 pav. Infiltracijos skaičiuojamosios vertės

Parentant pastato mikroklimato kondicionavimo sistemų (MKS) įrenginius reikia įvertinti nepalankiausias sąlygas, todėl šiuo tikslu vertinama maksimali (parentant šildymo ir vėsinimo įrenginius) ir minimali (parentant vėdinimo įrangą) infiltracijos vertė. Vidutinė sezoninė infiltracija pastate, t.y. vidutinė oro kaita per tam tikrą vertinamąjį laikotarpį, reikalinga siekiant įvertinti energijos sąnaudas per šį laikotarpį. Šame darbe nagrinėjama galimybė įvertinti vidutinę pasirinkto laikotarpio infiltraciją.

Oro infiltracijos pastate tyrimo metodai gali būti skirstomi į:

- analitinius;
- eksperimentinius;
- natūrinius matavimus;
- skaitmeninį modeliavimą;
- supaprastintus skaičiavimo metodus.

Egzistuoja daug analitinių metodų skirtų oro tekėjimo parametrų analizuoti. Paprastesnio analitinio metodo pavyzdžiu gali būti oro judėjimo dėl gravitacinių jėgų vertinimas, atliekamas pasitelkiant Bernulio lygtis ir empirinius debito koeficientus. Sudėtingesniuose analitiniuose metoduose įvertinami ir temperatūrų skirtumo pokyčiai (Lyberg, 1997). Analitinių metodų taikymas dažniausiai taikomas oro srovių judėjimui per atskirus plyšius tirti, rečiau – infiltracijai per atitvarų dalis. Infiltracijos reiškinys visame pastate yra gana sudėtingas, todėl analitiniai metodai šiuo atveju taikomi retai ir tik nedideliems vienos zonos pastatams (Li, Delsante, 2001).

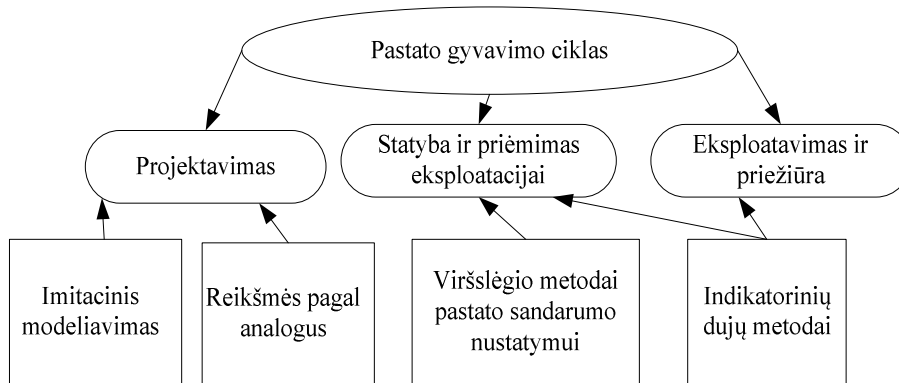
Eksperimentų rezultatai turi didelę vertę nustatant su infiltracija susijusių specifinių fizinių procesų parametrus. Atlikta nemažai eksperimentų, kuriuose buvo tiriama gravitacinių jėgų ir vėjo sukkelto oro tekėjimo per angas fiziniai mechanizmai (Fracastoro, et al, 2002; McWilliams, 2002; Miguel, 2001; Guyon, 1999). Eksperimentų rezultatai panaudojami apibendrinančių analitinių modelių sudarymui. Tačiau eksperimentiniai metodai taikytini tik egzistuojančių struktūrų tyrimams, nes daugeliu atveju modeliuoti realybę atitinkančias sąlygas laboratorijose pernelyg sudėtinga. Kaip ir analitiniai metodai, eksperimentai tiriant infiltraciją visame pastate nėra atliekami dėl sistemos sudėtingumo, apribojančio galimybes kontroliuoti eksperimento sąlygas.

Visuminė pastato infiltracija vertinama atliekant natūrinius matavimus, skaitmeninį modeliavimą, arba taikant supaprastintus skaičiavimo metodus. Išsamiau šie metodai apžvelgiami žemiau. Kadangi šio darbo objektas yra visuminė infiltracija, kitame skyrelyje išsamiau apžvelgiami visuminės infiltracijos nustatymui skirti metodai.

1.3. Infiltracijos vertinimo metodai

Kaip ir kiekvienas sistema, pastatas turi savo gyvavimo ciklą, kurį galima suskirstyti į keletą etapų: projektavimas, statyba ir priėmimas eksploatacijai, eksploatavimas ir nugriovimas. Oro kaitos dėl infiltracijos pastate įvertinimas svarbus visais pastato gyvavimo ciklo etapais, išskyrus nugriovimą: rengiant pastato projektą teisingai įvertinta infiltracija leidžia suprojektuoti tinkamas MK sistemas, sandarumo bandymai pastačius pastatą leidžia įvertinti pastato statybos kokybę, eksploatavimo metu įvertinta infiltracija leidžia nustatyti atitvarų sanda-

rinimo poreikį ir ekonominį efektą, optimizuoti pastato MKS veikimą. Visuminės infiltracijos intensyvumo tyrimui metodai pasirenkami priklausomai nuo tiriamo pastato gyvavimo ciklo etapo, kaip pavaizduota 3 paveiksle pateiktoje schemoje.



3 pav. Infiltracijos vertinimo metodų taikymas skirtingais pastato gyvavimo ciklo etapais

Pastato projektavimo etape oro infiltracijos vertinimui, siekiant numatyti infiltracijos įtaką patalpų oro kokybei ir šilumos nuostoliams, dažniausiai naudojamos statybos norminiuose dokumentuose pateiktos vertės pagal analogiškus pastatus ir kiti supaprastinti skaičiavimo metodai.

Patys paprasčiausi, pigiausi ir todėl dažniausiai praktikoje naudojami supaprastinti infiltracijos vertinimo metodai, kurie pagrįsti paprastomis, pusiau empirinėmis priklausomybėmis, įvairiomis prielaidomis, statistinių verčių, pateikiamų lentelėse, naudojimu. Kai reikalingas tikslesnis vertinimas arba kai projektuojamas pastatas yra nestandartinis, daugelyje šalių yra paplitusi praktika naudoti imitacinį modeliavimą (Beausoleil-Morrison, 2000; Haghghat, Brohus, Rao, 2000; Jiang, Chen, 2001).

Esant poreikiui ypač tiksliai įvertinti projektuojamo pastato šiluminę aplinką ir oro kokybę arba projektuojant labai sudėtingus pastatus, projektavimo metu gali būti naudojamas ir imitacinis modeliavimas. Modeliavimas gali būti tikslinamas statybos metu, kai jau tiksliau žinomos naudojamos medžiagos ir statybos technologijos. Tačiau modeliavimo galimybės dar neišnaudotos vėlesniuose pastato gyvavimo ciklo etapuose: pastato priėmimo eksploatacijai metu, pastato eksploatacijos metu sutrikimų diagnostikai ar valdymo strategijų prognozavimui skirti modeliai (Hensen, 1998).

Priimant pastatą eksploatacijai atliekami bandymai, tarp kurių gali būti ir pastato sandarumo nustatymas viršslėgio sudarymo būdu. Indikatorinių dujų metodų grupė labiau tinka pastato eksploatavimo metu, nes šie metodai skirti infiltracijos vertinimui eksploatavimo sąlygomis, kai kurie šio tipo metodai gali būti

taikomi net visai netrikdant pastato eksploatacijos. Tačiau dažniausiai infiltracijos nustatymo metodai indikatorinėmis dujomis naudojami tik trumpalaikiam monitoringui (Deru, Sherman, 2003).

Infiltracijos nustatymui esamuose pastatuose gali būti naudojami natūriniais matavimais paremti metodai. Natūriniai matavimo metodai gali būti suskirstyti į dvi grupes:

- Viršslėgio sudarymo metodai pastato sandarumo nustatymui
- Indikatorinių dujų metodai

Pastato stebėsenos ir vertinimo eksploatacijos metu aktualumą atspindi didelis šiuo metu įvairiose šalyse vykdomų projektų, kurių tikslas įdiegti efektyvesnio pastatų vertinimo praktiką, kiekis. Tarp tokių projektų galima paminėti JAV Energetikos departamento vykdomą pastatų energinio efektyvumo vertinimo komerciniuose pastatuose projektą (US DOE, 2003), JAV naudojamą ekologiškų pastatų klasifikavimo sistemą (US Green Building Council, LEED, 2003), Olandijoje vykdomą pastatų vertinimo programą (CIBSE, 2003), Jungtinėje Karalystėje įgyvendinamą pastatų energinio klasifikavimo sistemą (BRE, 2005). Tačiau infiltracijos vertinimo pastato eksploataavimo metu galimybės yra ribotos.

1.3.1. Supaprastinti infiltracijos vertinimo metodai

Vertinant infiltraciją pastato projektinių šildymo poreikių nustatymui ir atliekant pastatų energinio naudingumo sertifikavimą Lietuvoje standartiškai taikomi supaprastinti, matavimais neparemti metodai.

Mėnesio šilumos poreikis, reikalingas šilumos nuostoliams dėl oro infiltracijos pastate padengti, gali būti apskaičiuojamas:

$$Q_{\text{inf}} = c \cdot \rho \cdot V \cdot n \cdot \Delta\theta \cdot z \cdot 10^{-6}, \quad (1.1)$$

čia

c – savitoji oro šiluma $\left(\frac{Wh}{kg \cdot K} \right)$;

ρ – oro tankis (kg/m^3);

n – oro kaita dėl infiltracijos (h^{-1});

V – pastato tūris (m^3);

$\Delta\theta$ – išorės ir patalpos oro temperatūrų skirtumas (K);

z – valandų skaičius (h).

Lietuvos statybinėse normose (STR 2.09.04...2002) infiltruojamo oro debitas projektinių šilumos nuostolių ir nagrinėjamo mėnesio vidutinio projektinio šilumos poreikio patalpos šildymui dėl išorės oro infiltracijos apskaičiuojamas imant iš lentelių oro kartotinumą vertę priklausomai nuo vietovės (pajūris ar

žemyninė dalis) ir užuovėjos lygmens ir įvertinant koeficientais vėdinimo sistemos rūšį, o vertinant atskiras patalpas – dar ir patalpos padėtį pastate (kampinė ar ne, kelintame pastato aukšte).

Atliekant pastatų energetinio naudingumo sertifikavimą (STR 2.01.09...2005), vertinami šilumos nuostoliai dėl viršnorminės išorės oro infiltracijos į patalpas per langus ir duris. Jie skaičiuojami atsižvelgiant į faktinį pastato langų ir durų plotą, bei oro skverbties vertes, priimamas priklausomai nuo langų ir durų tipo. Faktinis oro infiltracijos debitas yra nustatomas kaip pastato langų ir durų ploto ir šių atitvarų oro skvarbos sandauga. Tuomet oro kaita dėl infiltracijos, debitą padalinus iš pastato tūrio, gali būti išreiškiama šia lygybe:

$$n = \frac{K \cdot A}{V} \cdot 3600, \quad (1.2)$$

čia

K – langų ir durų oro skvarba $\left(\frac{\text{m}^3}{\text{h} \cdot \text{m}^2} \right)$;

A – langų ir durų plotas (m^2).

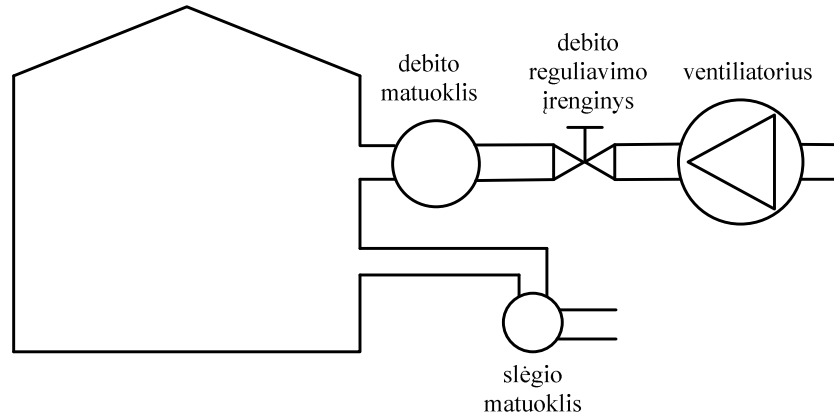
Langų ir durų oro skvarba yra priimama atsižvelgiant į šių atitvarų amžių: naujoms atitvaroms priskiriama $5,82 \frac{\text{m}^3}{\text{h} \cdot \text{m}^2}$ vertė, o senoms atitvaroms beveik dvigubai didesnė – $10,77 \frac{\text{m}^3}{\text{h} \cdot \text{m}^2}$ vertė (STR 2.01.09...2005).

Be to dar įvertinamas oro debitas dėl išorinių durų varstymo, tačiau ši dalis yra labai maža.

1.3.2. Sandarumo matavimas sukuriant viršslėgį

Aukščiau aprašyti metodai yra labai paprasti ir nereikalauja žinoti išmatuotos pastato sandarumo orui vertės. Tačiau turint išmatuotą sandarumo vertę infiltracija gali būti įvertinama daug tiksliau.

Pastato sandarumas nustatomas viršslėgio sudarymo metodais, pradėtais taikyti Švedijoje 1970 m. Viršslėgio arba žemo slėgio (vakuumo) sudarymo metodas kitaip dar vadinamas ventiliatorinių durų metodu arba mechaninio pripūtimo metodu. Šiam metodui naudojamas „durų ventiliatorius“, kurio pavadinimas kilęs iš to, kad šį įrenginį sudaro ventiliatorius, kuris atliekant matavimus dažniausiai įrengiamas tarpduryje. Viršslėgio sudarymui gali būti naudojami ne tik specialūs ventiliatoriai, bet ir pritaikoma pastato vėdinimo sistema. Apibendrinta sandarumo matavimo įrangos schema pateikta 4 paveiksle.



4 pav. Pastato sandarumo matavimo viršslėgio sudarymo metodu įrangos schema

Naudojant viršslėgio (arba vakuumo) sudarymo metodą, pastate galingais ventiliatoriais sukuriamas viršslėgis arba žemas slėgis (vakuumas) ir nustatoma, koks oro debitas yra reikalingas pasirinkto slėgio skirtumo palaikymui. Taip gaunama debito laipsninė priklausomybė nuo palaikomo slėgio skirtumo:

$$L = C \cdot (\Delta p)^k, \quad (1.3)$$

čia

L – infiltruojamas oro debitas (m^3/h);

C – koeficientas;

Δp – slėgio skirtumas abipus atitvarų (Pa);

k – eksponentė.

Eksponentę k nulemia konkretaus pastato plyšių ir angų formos bei dydžiai. Eksponentės k vertė gali būti tarp 0,5 ir 1,0, dažniausiai pasitaikanti, reprezentatyvi vertė yra 0,65 (Anis, 2001). Koeficiento C vertė priklauso nuo pastato dydžio, formos ir sandarumo. Konkrečiam pastatui koeficiento C vertė gali būti nustatoma sudarius regresijos kreivę pagal atlikto sandarumo matavimo duomenis.

Pastato sandarumas, t.y. oro kaitos pastate kartotinumumas prie pasirinkto matavimui slėgio skirtumo, nustatomas padalijus nustatytą oro debitą iš pastato tūrio:

$$n_{\Delta p} = \frac{L}{V}. \quad (1.4)$$

Tai, kad pastato laidumo orui matavimai atliekami esant daug didesniai slėgio skirtumui, už susidarantį natūraliomis sąlygomis, turi keletą priešasčių.

Pirma, tokiu būdu siekiama sumažinti kintamų aplinkos veiksnių įtaką laidumo orui kaip charakteringos pastato savybės įvertinimui. Kai ventiliatoriais dirbtinai sukuriamas slėgio skirtumas žymiai viršija slėgio skirtumą susidarantį dėl aplinkos ir vidaus oro temperatūros skirtumo ir vėjo slėgio, atsiranda galimybė įvertinti pastato laidumo orui charakteristikas praktiškai nepriklausomai nuo aplinkos sąlygų. Tam, kad galima būtų nepaisyti vėjo ir temperatūrų skirtumo sukeltos infiltracijos, pakankamu laikomas 50 Pa slėgio skirtumas (Sherman, Chan, 2004). Antra, esant didesniai slėgio skirtumui ir atitinkamai intensyviau vykstant infiltracijos (eksfiltracijos) procesams, atliekami oro debito matavimai yra tikslesni.

Pastato sandarumo nustatymui viršslėgio sudarymo metodu yra parengta keletas standartų: JAV taikomas standartas (ASTM. E779...1987), Kanadoje – (CAN/CGSB-149.10-M-86...1986), Europos Sąjungoje – (EN 13829...2001). Metodų pagrindą sudaro stacionaraus srauto per ventiliatorių, palaikant pastovų slėgio abipus atitvarų skirtumą, matavimas. Visuose standartuose pirmasis duomenų pateikimo lygis yra iš esmės vienodas – pateikiamas slėgis ir tūrinis debitas. Jei būtina, gauti duomenys turi būti koreguojami pagal temperatūras, altitudes ir pan. – tai standartinės procedūros, priklausančios nuo naudotų įrenginių, matavimo prietaisų ir matavimų plano. Tačiau tolimesnė slėgio – debito matavimo duomenų analizė atskiruose standartuose jau skiriasi. Paprasčiausias ir dažniausiai naudojamas matavimo protokolai numato matavimus prie vieno slėgio skirtumo, dažniausiai 50 Pa arba 75 Pa.

Vienodo tūrio pastatai, priklausomai nuo jų architektūrinės formos, gali turėti skirtingą išorinių atitvarų plotą, todėl atitvarų įrengimo kokybę dar geriau atspindi kitas dažnai naudojamas rodiklis – efektyvusis nesandarumų plotas (ELA – angl. Effective Leakage Area). Efektyvusis nesandarumų plotas nusako nesandarumų pastato atitvarose suminį ekvivalentinį plotą, apibūdinantį konkretų pastatą ir gali būti apskaičiuojama iš šios priklausomybės:

$$ELA = \frac{n_{50} \cdot V}{\Delta p_{50}^k \cdot 3600} \cdot \Delta p_r^{k-1/2} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{2}}, \quad (1.4)$$

čia

ELA – efektyvusis nesandarumų plotas, (m²);

n_{50} – pastato sandarumo orui vertė (h⁻¹), nustatyta prie slėgio skirtumo

$\Delta p_{50} = 50$ Pa ;

k – empirinė laipsninė eksponentė;

Δp_r – referencinis slėgio skirtumas (Pa).

Iškilius atskirų pastatų palyginimo poreikiui, ši infiltraciją nusakanti charakteristika normalizuojama pagal pastato dydį.

Viršslėgio sudarymo metodai gali būti naudingi visiems, bet kokio dydžio ir paskirties pastatams, tačiau praktiškąje susiduriama su techninėmis kliūtimis, kadangi reikiamo dydžio perteklinio slėgio palaikymui dideliuose pastatuose turi būti naudojami laikini itin dideli ventiliatoriai (Sharples, Closs, 2004).

Kuriamos ir specialios, dideliems pastatams skirtos, viršslėgio sudarymo metodo modifikacijos (Carey, Ethwidge, 2001). Dideliuose keleto zonų pastatuose sandarumo nustatymui naudojami keli ventiliatoriai, taikoma „Multifan Pressurisation“ metodika. Tačiau netinkamai naudojant metodą, rezultato paklaida gali viršyti 100 proc. (Furbringer, Roulet, 1991).

1.3.3. Infiltracijos vertinimo pagal išmatuotą sandarumą metodai

Pastato sandarumas yra nustatomas sukuriant dirbtinį slėgio skirtumą abipus pastato atitvarų (plačiau žr. 1.3.2 skyrelyje), todėl nustatant infiltraciją pastato eksploatacijos sąlygomis, sandarumo vertė turi būti perskaičiuojama natūralioms sąlygoms. Sandarumo matavimai, kaip jau minėta, dažniausiai atliekami esant 50 Pa slėgio skirtumui. Natūraliomis sąlygomis slėgio skirtumas tarp pastato vidaus ir aplinkos įvairių autorių duomenimis svyruoja tarp 2,5 ir 5 Pa, ar bent jau neviršija 10 Pa. Matavimo rezultatų perskaičiavimas prie natūralių sąlygų, arba kitaip – ekstrapoliacija, vykdoma naudojantis laipsnine debito priklausomybe nuo slėgio skirtumo. Tačiau kintant slėgio skirtumui kinta ir tekėjimo režimas. Todėl iškyla pavojus, kad prie 50 Pa slėgio skirtumo rastos debito koeficiento ir eksponentės vertės esant natūralioms sąlygoms, t.y. apie 5 Pa slėgio skirtumui, bus kitokios. Tačiau atlikti tyrimai (Walker, Wilson, Sherman, 1998) parodė, kad pagal laipsninę slėgio – debito priklausomybę ekstrapoliuoti matavimų rezultatai pakankamai tiksliai įvertina ir natūraliomis sąlygomis vykstantį oro infiltracijos procesą. Todėl telieka įvertinti pastato eksploatacijos sąlygomis susidarantį slėgio skirtumą.

Vidutinės infiltracijos natūraliomis sąlygomis įvertinimui pagal sandarumo matavimo duomenis plačiausiai taikomas LBL metodas, sukurtas L. Berklio nacionalinės laboratorijos mokslininkų (Sherman, Modera, 1984; Sherman, 1998). Šio metodo naudojimas vertinat infiltraciją yra numatytas JAV normatyviniuose projektavimo dokumentuose (ASHRAE 2001, ASHRAE 2007). LBL metodas įvertina keturis faktorius, lemiančius infiltraciją natūraliomis sąlygomis – tai vėjas, lauko oro temperatūra, pastato konstrukcijų tipas, ir pastato aukštis.

Taikant LBL metodą pagal valandinės lauko oro temperatūros ir vėjo greičio vertes skaičiuojamos valandinės oro kaitos dėl infiltracijos vertės:

$$n(t) = \frac{ELA \cdot s(t)}{V} \cdot 3600, \quad (1.5)$$

čia

V – pastato tūris (m^3).

$s(t)$ – savitasis valandinis infiltruojamo oro debitas (m/s).

Jei pastato sandarumas išreikštas oro kaita, tai perskaičiavimui į ELA naudojama (1.4) priklausomybė.

Savitasis valandinis infiltruojamo oro debitas, įvertinant klimato sąlygas, skaičiuojamas:

$$s(t) = \sqrt{f_s^2 \cdot \Delta\theta(t) + f_w^2 \cdot v^2(t)}, \quad (1.6)$$

čia

f_s – traukos faktorius $\left(\frac{m \cdot \sqrt{K}}{s}\right)$;

f_w – vėjo faktorius;

$\Delta\theta(t)$ – valandinis oro temperatūros abipus pastato atitvarų skirtumas (K);

$v(t)$ – išmatuotas valandinis vėjo greitis (m/s).

Traukos ir vėjo faktoriai (atitinkamai f_s ir f_w) yra pastato savybių funkcijos. Traukos faktorius skaičiuojamas:

$$f_s = \left(\frac{1 + \frac{R}{2}}{3}\right) \cdot \left(1 - \frac{X^2}{(2 - R)^2}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \left(\frac{g \cdot H}{T_o}\right)^{\frac{1}{2}}, \quad (1.7)$$

čia

R – grindyse ir lubose esančių nesandarumų dalis nuo visų pastato išorinėse atitvarose esančių nesandarumų;

X – santykis tarp lubose ir grindyse esančių nesandarumų ploto;

g – laisvo kritimo pagreitis ($9,8 m/s^2$).

Kai nesandarumai pasiskirstę tolygiai visose pastato atitvarose, tai $X = 0$ (grindyse ir lubose vienodas nesandarumų kiekis) ir $R = 0,5$ (pusė visų pastato nesandarumų tenka sienoms).

Vėjo faktorius f_w skaičiuojamas:

$$f_w = C' \cdot (1-R)^{1/3} \cdot A \cdot \left(\frac{H}{10m} \right)^B, \quad (1.8)$$

čia

A – traukos koeficientas;

B – vėjo koeficientas;

C' – apibendrintas užuovėjos koeficientas.

Esant vidutiniam užuovėjos lygiui $C' = 0,25$, vidutiniams vietovės parametrams $A = 0,85$ ir $B = 0,20$.

Be plačiausiai taikomo LBL metodo, pagal žinomą pastato sandarumo vertę infiltracijos įvertinimui taikomi ir kiti metodai. Pavyzdžiui, Nylund modelis, kuris skirtingai nuo LBL metodo, paremta empirinėmis priklausomybėmis, pagrįstas teorine analize (Weber, 2004).

1.3.4. Indikatorinių dujų metodai

Kita natūrinių matavimų metodų grupė, kai infiltracijos nustatymui naudojamos indikatorinės dujos, turi keletą privalumų – oro srautai gali būti fiksuojami normaliomis pastato eksploataavimo sąlygomis ir matavimai gali būti atliekami gana ilgą laiką, tokiu būdu gaunant gana patikimas vidutinės vertes.

Naudojant indikatorinių dujų metodą pastatas prileidžiamas dujų ir matuojama šių dujų koncentracijos kaita bėgant laikui. Egzistuoja daug šio metodo modifikacijų. Iki šiol plačiausiai yra naudojamas metodas, kai matuojama vienos rūšies dujų koncentracijos kaita vienoje zonoje. Šis metodas pasiteisina pastatuose, kurie gali būti laikomi viena zona arba sudėtingesniuose pastatuose, kuriuos sudaro keletas santykinai izoliuotų viena nuo kitos zonų. Kelių zonų pastatams sukurti metodai, kurių metu naudojamos ne vienos, o kelių rūšių dujos – tokiu būdu galima įvertinti oro srautų judėjimą tarp atskirų zonų. Tačiau kuo sudėtingesnis metodas, tuo didesnė gaunamo rezultato neapibrėžtis (Sherman, 1989a).

Visi indikatorinių dujų koncentracijos metodai remiasi debito nepertraukiamumo lygtimi, sprendžiant šią lygtį pagal dujų koncentracijos kitimą, nustatomas oro debitas. Jeigu būtų įmanoma išspręsti debito nepertraukiamumo lygtį kiekvienam laiko momentui, būtų galima rasti tikslią infiltracijos vertę. Tačiau dėl matavimo problemų, įskaitant tolygaus sumaišymo problemą, momentinės infiltruojamo oro debito vertės nustatymas tampa praktiškai neįmanomu (Sherman, 1989b, Sherman, 1990). Todėl siekiant atlikti analizę ir sumažinti gauto rezultato neapibrėžtį, pasitelkiamos matavimo duomenų laiko eilutės. Konkretus metodas, pasirenkamas matavimo duomenų analizei, priklauso tiek nuo atlieka-

mų matavimų metodikos, tiek nuo prielaidų apie sistemą. Pagrindiniai matavimo duomenų analizės metodai tai:

- regresinė analizė;
- integravimo metodas;
- vidurkinimo metodas.

Visi šie metodai remiasi prielaida, kad matavimo laikotarpiu infiltruojamo oro debitas yra pastovus (Sherman, 1989a). Nors tai neatitinka tikrovės, atskirais atvejais šie metodai duoda pakankamai tikslių rezultatų. Išsamią šių metodų naudojimo analizę ir rezultatų neapibrėžties vertinimą galima rasti Sherman darbuose (Sherman, 1989a, Sherman, 1989b).

Lietuvoje, kaip ir visoje ES, oro kaita gali būti nustatoma remiantis galiojančia metodika (LST EN ISO 12569...2002).

Brookhaven nacionalinėje laboratorijoje sukurtas PFT metodas, skirtas infiltracijos vertinimui per ilgą laikotarpį – nuo kelių valandų iki kelių mėnesių. Šis metodas padeda atskleisti ilgalaikes infiltracijos problemas. PFT metodui naudojami du pieštuko dydžio įrenginiai. Vienas iš jų, emiteris, skleidžia nedidelį kiekį bespalvių, bekvapių ir nekenksmingų perflorkarbono dujų, o kitas, gaviklis, absorbuoja dalį šių dujų – t.y. vidutinę pastate esančią šių dujų koncentraciją. Ši vidutinė koncentracija yra proporcinga pastato sandarumui – kuo sandaresnis pastatas, tuo didesnė koncentracija. Vienas iš PFT metodo panaudojimo pavyzdžių pateiktas (Demokritou, et al, 2002). Didžiausias metodo privalumas – praktiškai netrikdoma pastato eksploatacija.

Siekiant išspręsti problemas, kylančias nustatant oro kaitą indikatorinėmis dujomis, kuriami vis nauji metodai. Sprendžiant indikatorinių dujų tolygų pasisklidimą erdvėje, mokslininkai iš Kinijos pasiūlė sudalinti tiriamą didelę erdvę kubais ir matuoti jų ribose (Chow, Fung, Wong, 2002).

Nors kai kurie autoriai siūlo atpiginti indikatorinių dujų metodą naudojant CO₂, išskiriamą žmonių (Roulet, 2007), tačiau kiti autoriai pažymi, kad tai yra komplikauta (Modera, Persily, 1995). CO₂ kitimo ir drėgmės ore stebėjimo duomenis buvo pasiūlyta derinti infiltracijos fakto nustatymui pastato eksploataavimo metu (Bearg, 2000), tačiau infiltruojamo oro kiekio stebėjimui šis metodas netinka, nes CO₂ kitimui lemiamą įtaką daro žmonių kiekio kitimas, kurį įvertinti praktiškai nėra galimybių.

Indikatorinių dujų metodas dėl didelių laiko sąnaudų ir brangios įrangos laikomas mažiau praktišku už viršslėgio metodą. Jis leidžia tiksliau nustatyti infiltraciją pastato eksploatacijos sąlygomis, tačiau tik matavimų atlikimo laikotarpiu. Esant kitokioms, nei matuojant, oro sąlygoms, šiuo metodu nustatyta infiltracija jau nėra tiksli (Walsh, Dudney, Copenhaver, 1984).

Indikatorinių dujų metodai yra patys tiksliausi, tačiau ir patys brangiausi iš visų infiltracijos vertinimo metodų. Šiuo atveju infiltracija matuojama tiesiogiai,

bet dauguma šios grupės metodų reikalauja trikdyti pastato eksploataciją ir todėl šie matavimai yra trumpalaikiai. Indikatorinių dujų metodai yra labai imlūs laikui ir darbo sąnaudoms, reikalinga brangi įranga. Be to metodų taikymas reikalauja išlaikyti keletą prielaidų, kurios sunkiai įgyvendinamos dideliuose ir sudėtinguose pastatuose. Todėl šių metodų grupė paprastai taikoma tik atskiriems pastatams, dažniausiai siekiant patikrinti kitų metodų patikimumą.

Be to metodo taikymas reikalauja išlaikyti keletą prielaidų, kurios sunkiai įgyvendinamos dideliuose ir sudėtinguose pastatuose. Būtina sąlyga pakankamam matavimų tikslumui pasiekti indikatorinių dujų metodu – tolygus indikatorinių dujų sumaišymas su patalpos oru, o didelio tūrio patalpose labai sudėtinga tolygiai paskleisti indikatorines dujas visoje erdvėje, todėl šis metodas paprastai taikomas matuojant oro kaitą nedidelėse patalpose (Sherman, 1989a).

1.3.5. Infiltracijos vertinimas pagal pastato šilumos balansą

Šilumos kiekių balanso sudarymo principas yra plačiai taikomas pastato energijos poreikių įvertinimui, pastato šilumos ir vėsos poreikių skaičiavimui (Pedersen, Fisher, Liesen, 1997; Strand, et al, 2001). Remiantis pastato šilumos kiekių balanso principu įprasta nustatyti projektuojamų įrenginių galias, pvz., pagal Lietuvos statybos techniniuose reglamentuose taikomą metodiką (STR 2.09.04...2002). Sudarant pastato šilumos kiekių balansą, pagal taikymo sritį gali skirtis balanso detalumo lygis, imamos sistemos ribos, šiluminio režimo stacionarumo prielaidos.

Idėja nustatyti energijos nuostolius dėl oro kaitos sudarant pastato energijos balansą taip pat nėra nauja (Liddament, Orme, 1998), dažnai šilumos nuostoliams dėl infiltracijos gali būti priskiriamas nesutapimas tarp šilumos nuostolių per atitvaras, šilumos pritekėjimų ir kitų žinomų balanso dedamųjų. Tačiau sudarant pastato šilumos kiekių balansą pagal projektinius duomenis, infiltracijos įvertinimas būtų toks neapibrėžtas, kad neturėtų jokios vertės. Todėl Juodis (2003) pasiūlė sudarant pastato šilumos kiekių balansą panaudoti matavimų duomenis, kaupiamus pastatų automatizuoto valdymo sistemose. Šiame darbe formuluojamas algoritmas, kaip įvertinti infiltraciją šiuo pasiūlytu būdu, analizuojama tokio vertinimo neapibrėžtis, tiriama kokiuose pastatuose ir kokiomis sąlygomis ši neapibrėžtis galėtų neviršyti nusistatytos ribos.

Kokia neapibrėžties vertė galėtų būti laikoma tinkama, nustatoma analizuojant esamų infiltracijos vertinimo metodų neapibrėžtį.

1.4. Esamų infiltracijos vertinimo metodų neapibrėžtis

Vertinimo neapibrėžtis šiame darbe išreiškiama intervalu, į kurį tikroji vertė patenka su 95 proc. tikimybe. Absoliutinė neapibrėžties vertė – tai geriausio įverčio ir intervalo kraštinės vertės skirtumas, santykinė neapibrėžtis – tai šio skirtumo ir geriausio įverčio santykis, išreikštas procentais. Išsamiau neapibrėžties sąvoka analizuojama 2 skyriuje.

Kadangi tikroji vertė nėra žinoma niekada, metodų neapibrėžtis gali būti vertinama:

- lyginant keliais matavimais gaunamus rezultatus;
- gaunamus rezultatus lyginant su tikslesniais metodais gaunamais rezultatais;
- analizuojant metodo modelyje naudojamų įvesties parametrų neapibrėžtį ir jų įtaką metodo rezultatams.

Pastato sandarumo orui ir oro infiltracijos matavimo pavyzdžių apžvelgtoje literatūroje gausu, tačiau tik labai retais atvejais pateikiamas atliekamų matavimų ir skaičiavimų neapibrėžties vertinimas. Tiksliausia infiltracijos nustatymo metodų grupė yra indikatorinių dujų metodai. Kaip rodo literatūroje (Roulet, 2007) pateikti atliktų matavimų rezultatai, indikatorinių dujų metodu nustatoma infiltracija siekia 14 proc. neapibrėžtį esant 95 proc. pasiklovimo lygmeniui. Lyginant su atliktais infiltracijos natūriniais matavimais nustatyta, kad indikatorinių dujų metodu prognozuojama infiltracijos vidutinė vertė nuo matavimais gautų rezultatų skyrėsi vidutiniškai 11 proc., esant mažesniems temperatūrų skirtumams abipus atitvarų šis skirtumas sudarė 41 proc., o esant žemai vidutinei laikotarpio lauko oro temperatūrai ($-13,1\text{ }^{\circ}\text{C}$) – 4 proc., tuo tarpu LBL metodu prognozuotos infiltracijos vertės buvo didesnės už indikatorinių dujų matavimais nustatytas atitinkamai 2 proc., 23 proc. ir 11 proc. (Weber, 2004).

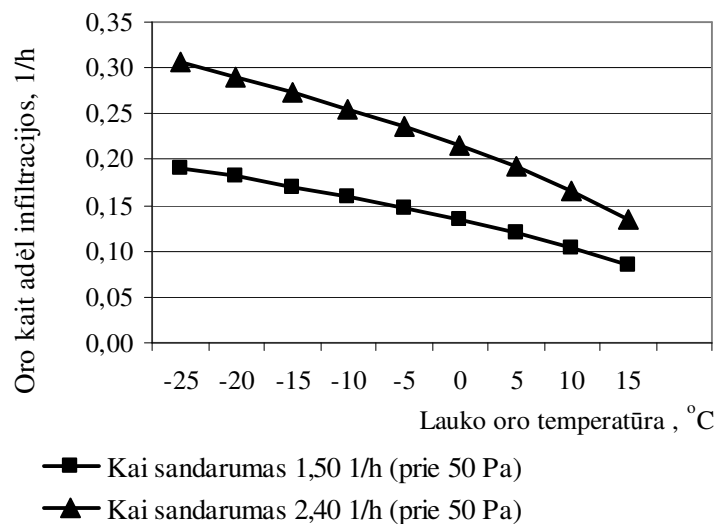
Viršslėgio sudarymo metodas įvertina tik pastato sandarumą ir pagal jį apskaičiuojama infiltracijos vertė neatspindi nuo pastato eksploatavimo ypatumų (vartotojų elgsenos, MK sistemų veikimo režimo) priklausančių veiksnių, o pastato aplinkos veiksniai yra vertinami remiantis prielaidomis parenkant empirinius koeficientus. Todėl vertinant infiltraciją viršslėgio metodu didžiausia neapibrėžtis susidaro ne dėl sandarumo įvertinimo, bet dėl sandarumo vertės pervedimo į infiltracijos vertę. Šių koeficientų pasirinkimas, ypač apsaugotumo nuo vėjo ir konstrukcijos tipo, yra gana subjektyvus, todėl nulemia didelę neapibrėžtį. Vėjo, pastato konstrukcijų tipo ir klimato faktoriaus pasirinkimas gali nulemti iki 490 proc. infiltracijos vertinimo variaciją tokio paties sandarumo pastate (Sherman, Palmiter, 1994), todėl šių faktorių parinkimas turi būti atliekamas itin pagrįstai. Awbi (2003) teigimu, LBL modelis dėl daromų prielaidų

apie plyšių išsidėstymą vertikaliuose ir horizontaliuose paviršiuose bei dėl neat-sižvelgimo į pastate esančias dideles angas, lemia 25 proc. gaunamo rezultato neapibrėžtį. Kitų tyrėjų atliktas LBL metodu prognozuotų ir išmatuotų infiltraci-jos verčių palyginimas parodė, kad trumpam laikotarpiui LBL metodu galima prognozuoti su 20 proc. gerai apibrėžtiems atvejams, o savaitės vidutinė vertė buvo nustatyta su 15 proc. siekiančia neapibrėžtimi (Sherman, Modera, 1984).

Kadangi literatūroje duomenų apie įprastinių infiltracijos nustatymo metodų neapibrėžtį nėra gausu, siekiant palyginti siūlomo metodo rezultato neapibrėžtį su įprastinių metodų rezultatų neapibrėžtimi, šiame darbe atlikta įprastinių me-todų neapibrėžties analizė. Analizei pasirenkamas didelis viešosios paskirties pastatas, nes būtent tokio tipo pastatam, kaip bus matyti toliau, tinkamas ir infilt-racijos vertinimas pagal pastato šilumos kiekių balansą. Pagrindiniai šiame sky-relyje pateikiami rezultatai buvo paskelbti 7-ojoje tarptautinėje mokslinėje kon-ferencijoje „Aplinkos inžinerija 2008“ ir atspausdinti šios konferencijos pranešimų rinkinyje (Jaraminienė, Juodis, 2008b).

Neapibrėžties analizė atliekama taikant jautrumo analizę (žr. 2 skyrių). Čia tiriami įprastiniai infiltracijos vertinimo metodai detaliau yra aprašyti 1.3 skyre-lyje. Teoriniai skaičiavimai atlikti pagal statybos techniniame reglamente (STR 2.09.04...2002) pateiktą metodiką.

5 paveiksle pavaizduota oro kaitos dėl infiltracijos priklausomybė nuo lauko oro temperatūros.



5 pav. Infiltracijos priklausomybė nuo lauko oro temperatūros

5 paveikslas rodo, kad infiltracijos oro kaita stipriai priklauso nuo aplinkos oro temperatūros, nes temperatūrų skirtumas abipus pastato atitvarų yra viena iš oro judėjimą per atitvaras sukeliančio slėgio skirtumo priežasčių. Vienas iš grafikų yra nubrėžtas pagal prielaidą, kad projektinė oro kaitos dėl infiltracijos vertė $n = 0,30 \text{ h}^{-1}$, yra įvertinta projektinei lauko oro temperatūrai esant $-23 \text{ }^\circ\text{C}$. Perskaičiuotus LBL metodu su vidutiniais šio metodo parametrais, gauta atitinkama pastato sandarumo vertė tuomet būtų $n_{50} = 2,40 \text{ h}^{-1}$, o vidutinė oro kaita, perskaičiuota pagal faktinių vertinamojo mėnesio temperatūrų vidurkį, būtų $n = 0,25 \text{ h}^{-1}$. Vadinasi, jei mėnesio šilumos poreikio vertinimui naudojama projektinė oro kaitos dėl infiltracijos vertė, tai lemia 315 MWh/mėn. arba 10 proc. viso šilumos vartojimo prognozės nesutapimą analizuoto pastato atveju.

Kitas 6 paveiksle pateiktas grafikas atitinka norminį pastato sandarumą $n_{50} = 1,50 \text{ h}^{-1}$. Matyti, kad šis grafikas yra mažiau status, nei atitinkantis sandarumo vertę $n_{50} = 2,40 \text{ h}^{-1}$, t.y. kuo mažesnis pastato sandarumas, tuo labiau oro kaita priklauso nuo aplinkos oro temperatūros.

Šilumos poreikis, apskaičiuotas priimant vidutinę oro kaitos dėl infiltracijos n vertę, yra palyginamas su skaičiavimų rezultatais, gaunamais kai vidutinė infiltracijos vertė yra perskaičiuojama pagal vidutinę vertinamojo laikotarpio temperatūrą. Palyginimo rezultatai pateikti 1 lentelėje.

1 lentelė. Apskaičiuotas šilumos poreikis per vertinamąjį mėnesį

Pastato sandarumas $n_{50}, \text{ h}^{-1}$	2,4	2,4	1,5
Projektinė n vertė, h^{-1}	0,3	0,3	0,18
Vidutinė n vertė, h^{-1}	0,3	0,25	0,15
Šilumos nuostoliai per atitvaras, MWh/mėn.	1104	1104	1104
Infiltracijos šilumos nuostoliai, MWh/mėn.	1892	1577	971
Bendras šilumos poreikis šildymui, MWh/mėn.	2996	2681	2076

1 lentelėje pateikti skaičiavimų rezultatai rodo, kad jei mėnesio šilumos poreikio skaičiavimui naudojama infiltracijos vertė, nustatyta esant projektinei penkiadienio oro temperatūrai, tokio skaičiavimo rezultatas nagrinėjamu atveju gali lemti 36 proc. nesutapimą tarp realaus šilumos suvartojimo ir įvertinimo rezultato. Tačiau projektinės infiltracijos vertės perskaičiavimas vidutinei vertinamojo mėnesio temperatūrai nepanaikina neapibrėžties dėl nežinomo pastato sandarumo. Didelių pastatų sandarumo matavimo duomenys (Anis, 2001; Sharples, Closs, Chilengwe, 2005; Persily, 1998) rodo didelę sandarumo verčių įvai-

rovę. Todėl toliau atliekama jautrumo analizė tiriant kaip pastato sandarumo vertė įtakoja šilumos poreikį nagrinėjamojo pastato šildymui.

Jei tiriamasis pastatas yra naujas visuomeninės paskirties pastatas, tai jis turi atitikti pastatų sandarumo reikalavimus, t.y. $n_{50} \leq 1,5 \text{ h}^{-1}$. Jei pastato sandarumo vertė nėra nustatyta matavimais, tai galima pagrįstai manyti, kad sandarumas gali patekti į intervalą $[0,5 \text{ h}^{-1}; 1,5 \text{ h}^{-1}]$. Tuomet LBL metodu, priimant vidutines parametrų vertes, nustatyta infiltracijos vertė gali būti tarp $0,05 \text{ h}^{-1}$ ir $0,15 \text{ h}^{-1}$, o vertinamojo mėnesio šilumos poreikis dėl infiltracijos gali būti intervale $[322 \text{ MWh}; 971 \text{ MWh}]$. Kitaip tariant, nežinomas pastato nesandarumas nagrinėjamu atveju sąlygoja iki 30 proc. siekiančią bendro šilumos poreikio neapibrėžtį. Verta pažymėti, kad esamų pastatų sandarumo reikšmės sudaro dar platesnį intervalą, nei buvo įvertinta šiame tyrime.

Tačiau netgi jei pastato sandarumas yra nustatytas, vis tiek lieka daug infiltracijos vertinimo neapibrėžties šaltinių. Infiltracijos vertę skaičiuojant LBL metodu, neapibrėžtis gali būti lemiama šių faktorių:

- nesandarumų pasiskirstymo pobūdžio pastato atitvarose, kuris LBL modelyje išreikštas faktoriais X ir R ;
- užuovėjos lygio (LBL modelyje parametras C');
- pastato aplinkos (LBL modelyje parametrai A ir B).

Toliau vertinamas infiltracijos skaičiavimo LBL metodu rezultato jautrumas prielaidoms dėl aukščiau išvardintų faktorių. Pastato sandarumas šiuose skaičiavimuose priimamas $1,5 \text{ h}^{-1}$ (prie 50 Pa slėgio skirtumo). Oro infiltracijos vertinimo jautrumo analizės rezultatai pateikti 2 – 4 lentelėse.

2 lentelė. Infiltracijos ir ją atitinkančių šilumos nuostolių priklausomybė nuo prielaidų apie koeficientą C'

Pastato aplinkos aprašymas	Kliūčių nėra	Lengva užuovėja	Keletas kliūčių	Kliūties aplink dalį pastato perimetro	Didelės kliūties aplink visą pastato perimetrą
Apibendrintas užuovėjos koeficientas C'	0,11	0,19	0,25	0,30	0,34
Infiltracija $n, \text{ h}^{-1}$	0,145	0,149	0,154	0,159	0,163
Infiltracijos šilumos nuostoliai, MWh/mėn.	913	941	971	1002	1030

Apibendrintas užuovėjos koeficientas C' , kai imamos skirtingos galimos jo vertės, lemia šilumos poreikio vertės skirtumą, lygų 117 MWh/mėn., sudarantį apie 6 proc. bendro šilumos poreikio šildymui (žr. 2 lentelę).

3 lentelė. Infiltracijos ir ją atitinkančių šilumos nuostolių priklausomybė nuo prielaidų apie pastato aplinkos reljefą atspindinčius parametrus

Pastato aplinkos aprašymas	Visiškai plokščias paviršius	Paviršius plokščias su keletu atskirų kliūčių	Kaimo vietovė	Miesto, pramonės teritorijų ar miško aplinka	Miesto centras
Parametras A	0,47	0,67	0,85	1,00	1,30
Parametras B	0,35	0,25	0,20	0,15	0,10
Infiltracija n , h^{-1}	0,146	0,150	0,154	0,158	0,168
Infiltracijos šilumos nuostoliai, MWh/mėn.	921	944	971	999	1062

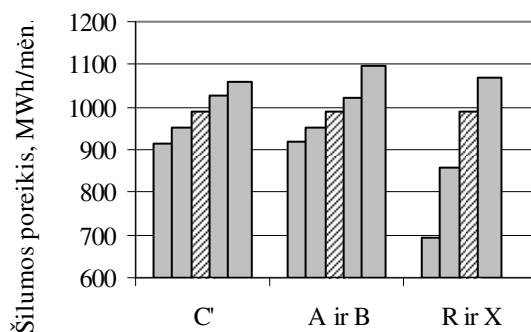
3 lentelėje pateikti rezultatai rodo, kad prielaidos apie pastato aplinką gali lemti 7 proc. šilumos poreikio vertinimo skirtumą.

4 lentelė. Infiltracijos ir ją atitinkančių šilumos nuostolių priklausomybė nuo prielaidų apie nesandarumų pasiskirstymą pastato atitvarose

Parametras R	0,00	0,50	0,50	1,00
Parametras X	1,00	0,50	0,00	0,00
Infiltracija n , h^{-1}	0,105	0,133	0,154	0,171
Infiltracijos šilumos nuostoliai, MWh/mėn.	660	839	971	1078

Iš 4 lentelėje pateiktų skaičiavimo rezultatų matyti, kad prielaidos apie nesandarumų pasiskirstymą pastato išorinėse atitvarose lemia 417 MWh skirtumą pasirenkant minimalias ir maksimalias šį pasiskirstymą atspindinčių parametru vertes, kas sudaro 20 proc. nuo bendro šilumos poreikio šildymui.

Gaunamo rezultato jautrumas kiekvieno LBL modelio parametru pavaizduotas 6 paveiksle. Diagramos stulpeliai atitinka šilumos poreikio nuostolių dėl infiltracijos dengimo vertes, gautas taikant įvairias LBL parametru galimas vertes, kaip tai buvo parodyta 2 – 4 lentelėse. Užstričiuoti stulpeliai atitinka variantą su vidutinėmis vertėmis.



6 pav. Šilumos poreikio jautrumas LBL modelio parametų vertėms

Iš 6 paveiksle pateiktos diagramos aiškiai matyti, kad nesandarumų pasiskirstymo pastato atitvarose žinojimas gali žymiai pagerinti LBL metodu vertinamos infiltracijos vertės tikslumą.

Suminė prielaidų apie LBL modelio parametrus įtaka infiltracijos vertinimo rezultatams parodyta 5 lentelėje.

5 lentelė. Infiltracijos oro kaitos ir ją atitinkančių šilumos nuostolių priklausomybė nuo prielaidų apie nesandarumų pasiskirstymą pastato atitvarose

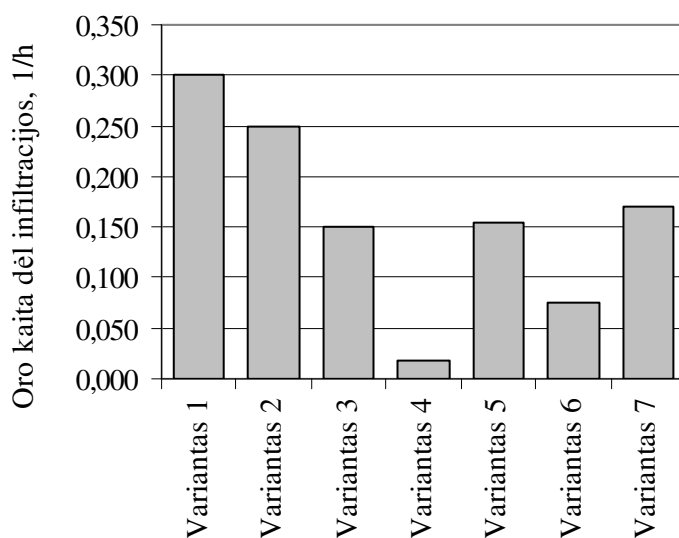
Apibendrintas užovėjos koeficientas C'	0,47	0,85	1,30
Parametras A	0,35	0,20	0,10
Parametras B	0,11	0,25	0,34
Parametras R	0,00	0,50	1,00
Parametras X	1,00	0,00	0,00
n, h ⁻¹	0,076	0,154	0,171
Šilumos nuostoliai dėl infiltracijos, MWh/mėn.	480	971	1078

Bendra LBL metodo faktorių neapibrėžtis gali nulemti 598 MWh nesutapimą, kas atitiktų 29 proc. viso mėnesio šilumos poreikio dideliame viešosios paskirties pastate.

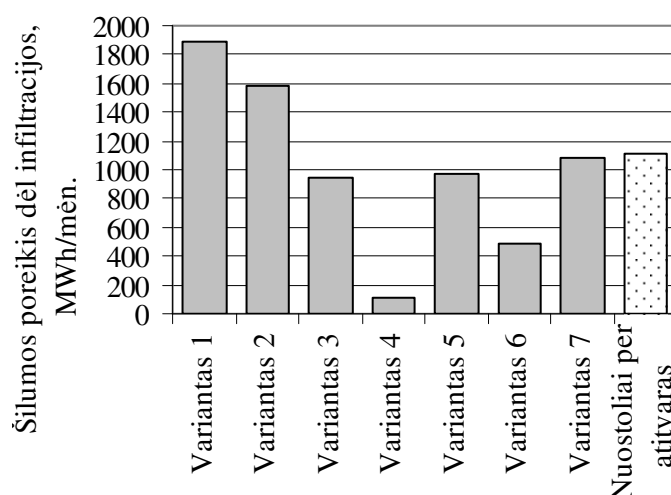
Gautų rezultatų neapibrėžtį akivaizdžiai galima pamatyti 7 ir 8 paveiksluose, kuriuose pateikiama atitinkamai oro kaitos ir šilumos nuostolių dėl infiltracijos vertės, gautos taikant skirtingus metodus ir/ar prielaidas to paties pastato infiltracijos vertinimui. 7 ir 8 paveiksluose pateikti variantai yra šie:

- Variantas 1: skaičiavimas atliktas pagal metodiką, pateiktą statybos techniniame reglamente, skirtame pastato šildymo sistemos galios ir šilumos poreikio skaičiavimui (STR 2.09.04...2002).

- Variantas 2: skaičiavimas atliktas pagal metodiką, pateiktą statybos techniniame reglamente, skirtame pastato šildymo sistemos galios ir šilumos poreikio skaičiavimui (STR 2.09.04...2002), tačiau vidutinės oro kaitos vertė gauta perskaičiuojant LBL metodu faktinei vidutinei vertinamojo laikotarpio temperatūrai.
- Variantas 3: skaičiavimas atliktas pagal metodiką, pateiktą statybos techniniame reglamente, skirtame pastato šildymo sistemos galios ir šilumos poreikio skaičiavimui (STR 2.09.04...2002), bet priimtas leistinas pastato sandarumas $1,5 \text{ h}^{-1}$.
- Variantas 4: skaičiavimas atliktas pagal metodiką, pateiktą statybos techniniame reglamente, skirtame pastato energinio naudingumo sertifikavimui (STR 2.01.09...2005).
- Variantas 5: skaičiavimas atliktas LBL metodu priimant, kad pastato sandarumas yra $1,5 \text{ h}^{-1}$, naudotos vidutinės LBL parametrų vertės;
- Variantas 6: skaičiavimas atliktas LBL metodu priimant, kad pastato sandarumas yra $1,5 \text{ h}^{-1}$, naudotos minimalios LBL parametrų vertės;
- Variantas 7: skaičiavimas atliktas LBL metodu priimant, kad pastato sandarumas yra $1,5 \text{ h}^{-1}$, naudotos maksimalios LBL parametrų vertės.



7 pav. Infiltracijos vertės tam pačiam pastatui, gautos taikant skirtingus infiltracijos oro kaitos vertinimo metodus ir prielaidas



8 pav. Šilumos nuostolių dėl infiltracijos vertės tam pačiam pastatui, gautos taikant skirtingus infiltracijos oro kaitos vertinimo metodus ir prielaidas

Taškuotas stulpelis 8 paveikslo diagramoje atitinka mėnesio šilumos poreikius dėl nuostolių per atitvaras.

Kaip matyti iš 7 ir 8 paveiksluose pateiktų atliktos analizės rezultatų diagramų, oro kaitos dėl infiltracijos ir jos lemiamo šilumos poreikio vertinimas tam pačiam pastatui, bet naudojant skirtingus skaičiavimo metodus arba tam pačiam metodui taikant skirtingas prielaidas, lemia kelis kartus besiskiriantį rezultatą. Išmatuotas pastato sandarumas sumažintų šilumos sąnaudų dėl infiltracijos vertinimo neapibrėžtį 30 proc.

Lietuvoje taikoma šilumos poreikių vertinimo metodika (STR 2.09.04...2002) neįvertina infiltracijos priklausomybės nuo oro temperatūros skirtumo abipus atitvarų. Atliktas skaičiavimas parodė, kad vien tai gali lemti 11 proc. nesutapimą tarp apskaičiuotų ir faktinių sąnaudų.

Dažnai vertinama įvesties parametru neapibrėžties lemiamą gaunamų rezultatų neapibrėžtis, pvz. EN 832 (1998) pateikiama tokia neapibrėžties analizė.

Paminėtina, kad vertinimo neapibrėžtį lemia ne tik įvesties duomenų neapibrėžtis, bet ir skaičiavimo algoritmai, sukurti daugybės prielaidų pagrindu, kurių nulemtą neapibrėžtį galima įvertinti lyginant teoriškai įvertintas ir faktiškai išmatuotas energijos sąnaudas (Macdonald, Strachan, 2001). Tokio palyginimo pavyzdys rastas literatūroje pateiktuose audito, atlikto dešimtyje daugiabučių namų, rezultatuose (Stankevičius, Karbauskaitė, Bliūdžius, 2002). Šilumos sąnaudų vertinimas buvo atliekamas pagal (STR 2.09.04...2002) metodiką, naudo-

jami įvesties duomenys gauti pagal faktinius matavimų, kas eliminavo bent dalį neapibrėžties, nulemtos įvesties duomenų. Pagal matavimų duomenis apskaičiuotas šilumos poreikis nuo šilumos skaitikliais išmatuotų faktinių sąnaudų skyrėsi 12 – 16 proc. (Stankevičius, Karbauskaitė, Bliūdžius, 2002).

Atliktos analizės rezultatai rodo patikimesnių, nei dabar taikomas matavimais neparemtas vertinimas, tačiau pakankamai paprastų faktinės oro infiltracijos nustatymo metodų poreikį.

1.5. Faktiniai infiltracijos pastatuose vertinimo duomenys

Bendrose ES normose, privalomose visoms ES narėms, natūriniai infiltracijos matavimai nėra numatyti. Tokie matavimai nuo 2006 metų numatyti Jungtinės Karalystės nacionaliniuose standartuose (Lowe, Bell, Roberts, 2003; UK Office of the Deputy Prime Minister, 2006), vienkartinis faktinės infiltracijos nustatymas čia privalomas visiems naujiems, didesniems kaip 1000 m² pastatams. Reikalaujama, kad faktinės infiltracijos matavimas būtų atliekamas pagal (ATTMA, 2006). Taip pat sugriežtinti sandarumo reikalavimai – nuo 2006 metų pastato sandarumas, išreikštas efektyviuoju atitvarų laidumo orui plotu turi būti ne mažesnis kaip 10 m³/h/m² prie 50 Pa (iki 2006 metų 12 m³/h/m²) (UK Office of the Deputy Prime Minister, 2006).

JAV komercinių pastatų sandarumui reikalavimai nekeliami (Brennan, et al, 2007).

Lietuvoje keliamas reikalavimas (STR 2.05.01...2005), kad naujai statomų visuomeninių pastatų bendras sandarumas būtų ne mažesnis kaip 1,5 h⁻¹ prie 50 Pa slėgio skirtumo. Tačiau privalomi sandarumo matavimai Lietuvoje nenumatyti.

Nors Lietuvoje atlikta labai nedaug natūrinių oro pastatų sandarumo ir oro kaitos dėl infiltracijos matavimų (Tuomas, 2003), tokių pavyzdžių gausu tiek popularioje, tiek mokslinėje JAV, Kanados, Europos šalių literatūroje. Sandarumo matavimų viršslėgio sudarymo metodais daugiausia yra atlikta nedideliems vienbučiams gyvenamiesiems namams (Sherman, Dickerooff, 1998; Persily, 1999; Sherman, 2006), tačiau dažnėja tokie matavimai ir didesniems (Shaw, 1981; Ashley, Lagus, 1984; Persily, 1998) arba net labai dideliems pastatams (Sharples, Closs 2004).

Sukauptos palyginti gausios individualių gyvenamųjų pastatų sandarumo matavimo duomenų bazės leidžia atlikti šio tipo pastatų sandarumo tendencijų įvertinimą. Pavyzdžiui, vykdant JAV statybos kokybės programą, kurios tikslas buvo įvertinti JAV pastatytų ir statomų pastatų kokybę energijos vartojimo efek-

tyvumo požiūriu, atliktas nemažas kiekis gyvenamosios paskirties pastatų sandarumo bandymų. Atliekamų sandarumo bandymų patirtis apibendrinta (Hancock, Norton, Hendron, 2002; Chan, et al, 2003). Sukaupus didelę gyvenamųjų pastatų sandarumo matavimo rezultatų duomenų bazę, nustatyta statistinė priklausomybė tarp šio tipo pastatų sandarumo ir kitų charakteristikų, tokių kaip statybos metai, pastato amžius, aukštingumas, plotas ir kt. (McWilliams, Jung M, 2006). Tačiau didesnių pastatų atveju egzistuoja tik atskiri sandarumo nustatymo atvejai. Ashley (1984) indikatorinių dujų metodu nustatė oro infiltraciją penkiuose karinio oro transporto angaruose. Išmatuotos oro kaitos dėl infiltracijos vertės buvo nuo 0,6 iki 2,0 h⁻¹. Said (1997) indikatorinių dujų metodu nustatė oro infiltraciją dviejuose angaruose, išmatuotos oro kaitos dėl infiltracijos vertės svyravo nuo 0,32 iki 0,47 h⁻¹. Pabrėžtinai ne tik negyvenamosios paskirties pastatų oro sandarumo matavimo duomenų trūkumas, bet ir turimų duomenų nepakankamas reprezentatyvumas (Sherman, Chan, 2004).

6 – 9 lentelėse pateikti literatūroje (Persily, 1998; Jennings, 2000; Proskiw, Phillips, 2001; Persily, 2004) rasti negyvenamosios paskirties pastatų sandarumo matavimo duomenys. Šiuos duomenis suvienodinti pagal pasirinktą vieną sandarumo rodiklį nėra įmanoma dėl informacijos trūkumo apie tirtus pastatus ar matavimo sąlygas.

6 lentelė. Faktinių sandarumo matavimų prie 75 Pa slėgio skirtumo rezultatai

Pastato tipas	Šalis (vertintų pastatų skaičius)	Vidutinis normalizuotas laidumas orui, L/s·m ²
Administraciniai pastatai	Kanada (8)	2,48
Administraciniai pastatai	JAV (7)	5,91
Administraciniai pastatai	Didžioji Britanija (12)	7,55
Administraciniai pastatai	Didžioji Britanija (13)	6,67
Mokyklos	Kanada (11)	1,48
Mokyklos	JAV (14)	2,44
Komerciniai	Kanada (8)	1,35
Komerciniai	JAV (68)	6,18
Komerciniai	Kanada (10)	13,95
Pramoniniai	Didžioji Britanija (5)	6,95
Pramoniniai	Didžioji Britanija (2)	22,52
Pramoniniai	Švedija (9)	1,45
Instituciniai	Kanada (2)	0,86

7 lentelė. Faktinių sandarumo matavimų prie 50 Pa slėgio skirtumo rezultatai

Pastato tipas	Oro kaita, h ⁻¹	Laidumas orui, m ³ /h 1 m ² viso atitvarų ploto
Administracinis pastatas tik pastatytas po metų eksploatacijos	1,2	1,0
	1,4	1,2
Didelis pastatas prieš rekonstrukciją po rekonstrukcijos	13,4	13,2
	5,2	5,1
Administracinis pastatas tik pastatytas po 4,5 metų eksploatacijos	1,5	3,0
	2	3,8
Administracinis pastatas prieš sandarinimą po sandarinimo	11,1	10,8
	4,4	4,3
Administracinis pastatas	6,3	8,1
Administracinis pastatas	9,8	9,7
Administracinis pastatas	8,0	8,7

8 lentelė. Faktinių pastatų sandarumo matavimų prie 75 Pa slėgio skirtumo rezultatai

Pastatų tipas	Laidumas orui, m ³ /h 1 m ² atitvarų ploto	
	Vidurkis	Standartinis nuokrypis
Administraciniai pastatai	15,3	12,3
Administraciniai pastatai	10,6	5,4
Administraciniai pastatai	23,3	11,9
Administraciniai pastatai	36,0	28,6
Mokyklos	8,5	4,3
Mokyklos	28,3	8,4
Mokyklos	24,5	15,4
Prekybos centrai	49,3	19,6
Prekybos centrai	33,0	24,9
Pramonės paskirties pastatai	5,7	2,4
Pramonės paskirties pastatai	41,4	26,6

Persily (1999) atlikta negyvenamosios paskirties pastatų sandarumo duomenų analizė parodė, kad daugelis šių pastatų nėra pakankamai sandarūs ir kad naujesni pastatai nėra sandaresni už seniau statytus.

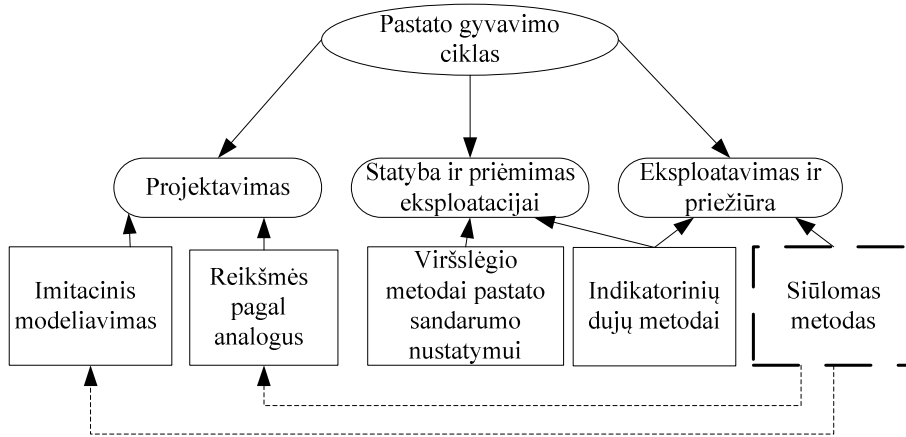
9 lentelė. Faktinių didelio tūrio pastatų sandarumo matavimų rezultatai (Sharples, Closs, Chilengwe, 2005)

Pastatų tipas	Laidumas orui, m ³ /h 1 m ² atitvarų ploto (prie 50 Pa)	Pastato tūris, m ³	Pastato atitvarų plotas, m ²	C	n
Sandėlis	2,25	746720	12400	7,137	0,6182
Sandėlis	2,98	682906	10732	6,540	0,6669
Sandėlis	5,46	196150	35580	3,358	0,7098
Didmeninės prekybos pastatas	5,93	180760	42072	8,931	0,2540

Daugumos įvairių tipų pastatuose matavimai nustatytų oro kaitos dėl infiltracijos reikšmės svyruoja tarp 0,5 h⁻¹ ir 1,0 h⁻¹ (Liddament, Orme, 1998). Pastebima, kad visuomeninės paskirties pastatų sandarumas nepriklauso nuo statybos metų, tačiau aukšti pastatai dažniausiai pasižymi didesniu sandarumu (Emmerich, Persily, 2005).

1.6. Pirmojo skyriaus išvados

Dažniausiai taikomi, matavimais nepagrįsti teoriniai infiltracijos vertinimo metodai yra pigūs, tačiau labai netikslūs. Taikant skirtingus skaičiavimo metodus arba tą patį metodą, bet su skirtingomis prielaidomis, tam pačiam pastatui gaunamas infiltracijos vertinimo rezultatas gali skirtis keletą kartų. Tikslėnius rezultatus duoda imitacinio modeliavimo programos, tačiau ir jomis pasiekiamo tikslumo užtenka tik pastato projektavimo etape. Infiltracijos vertinimui esamuose pastatuose reikalinga remtis faktinių matavimų duomenimis. Infiltracijos intensyvumui nustatyti taikomos dvi matavimais paremtų metodų grupės: viršslėgio sudarymo ir indikatorinių dujų. Šiais metodais gautų rezultatų neapibrėžtis siekia nuo 14 iki 25 proc. Tačiau matavimais paremti metodai taikomi labai retai dėl savo brangumo ir techninio sudėtingumo, ypač dideliuose pastatuose. Be to, dauguma šių metodų yra vienkartiniai arba tinkami tik trumpalaikiam monitoringui, dauguma atveju juos taikant sutrinkdama pastato eksploatacija. Tuo tarpu vis auga eksploatuojamų pastatų ilgalaikės stebėsenos poreikis ir jaučiama stoka matavimais pagrįstų, pakankamai tikslių, bet pigesnių ir paprastesnių infiltracijos vertinimo metodų. Šiame darbe ir siūlomas toks metodas, pagrįstas jau atliekamais šiuolaikiniuose dideliuose pastatuose matavimais, kurių duomenys kaupiami pastato automatizuotose valdymo sistemose. Siūlomo metodo vieta tarp esamų metodų pavaizduota 9 paveiksle.



9 pav. Darbe siūlomo metodo vieta esamų infiltracijos vertinimo metodų sistemoje

Siūlomas infiltracijos vertinimas pagal pastato šilumos kiekių balansą gali būti ilgalaikis – taikomas netgi visu pastato eksploataavimo laikotarpiu. Oro kaitai dėl infiltracijos nustatyti pastato šilumos kiekių balansas iki šiol buvo naudojamas tik atliekant apibendrintus, didelio tikslumo nereikalaujančius skaičiavimus, tačiau pastato automatizuoto valdymo sistemose kaupiami matavimų duomenys turi potencialą tiksliau vertinti infiltraciją. Pagrindine problema lieka nustatyti, ar pakanka PAV sistemose kaupiamų duomenų siūlomo metodo įgyvendinimui ir kokia bus šiuo metodu nustatytos infiltracijos vertės neapibrėžtis.

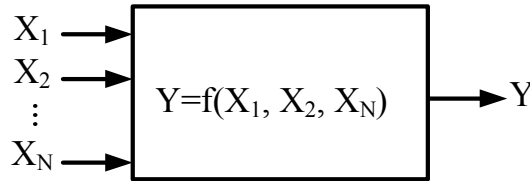
Neapibrėžtis ir jos vertinimo metodai

Pastate vykstančių šilumos ir masės mainų, kaip ir bet kokių kitų realių reiškinių ir sistemų, vertinimas neišvengiamai susijęs su vertinimo neapibrėžtimi. Netgi taikant imitacinio modeliavimo programas metinio šilumos poreikio vertinimo neapibrėžtis sudaro 10 proc., metinio vėsinimo poreikio – 45 proc., poreikio šildymo galiai – 27 proc., o vėsinimo galios poreikio – net 50 proc. (Hopfe, et al, 2007).

Neapibrėžties šaltiniai vertinant šilumos ir masės mainus pastatuose gali būti sugrupuoti į šias tris kategorijas:

- neapibrėžtis dėl natūralaus medžiagų savybių heterogeniškumo, kurios nulemia parametrų verčių sklaidą, pvz., šilumos laidumo;
- neapibrėžtis dėl ribotos informacijos apie savybes;
- neapibrėžtis dėl matavimo paklaidų, susidedančių iš sistemingųjų ir atsitiktinių komponentų.

Bet kokį vertinimą schematiškai galima pavaizduoti kaip parodyta 10 paveiksle. Šioje schemeje $X_1 \dots X_N$ pažymėti įvesties dydžiai (parametrai), o Y – vertinimo rezultatas, kuris yra įvesties dydžių funkcija. Vertinimo modelis – tai ryšio tarp įvesties dydžių ir rezultato aprašymas priklausomybėmis. Pateiktoje schemeje vertinimo modelis pažymėtas stačiakampiu.



10 pav. Vertinimo modelis

Atliekant inžinerinius skaičiavimus gana dažnai įvesties parametrai išreiškiami determinuotomis vertėmis, tuomet gaunamas rezultatas taip pat yra deterministinis. Tačiau realiose sistemose konkrečios įvesties parametru vertės nėra žinomos, o tikslesnis jų išreiškimo būdas būtų tikimybinis skirstinys.

Neapibrėžties analizė atliktina siekiant nustatyti visus bet kokio vertinimo metu kylančius neapibrėžties šaltinius ir identifikuoti jų poveikį vertinimo rezultato neapibrėžčiai. Šilumos kiekių balanso lygčių sprendimas, pasižymi didele neapibrėžtimi tiek dėl pastate vykstančių šilumos ir masės mainų stochastinio pobūdžio, tiek dėl informacijos apie įvesties parametru vertes trūkumo. Infiltracijos vertinimas pagal šilumos kiekių balansą atskirais atvejais gali duoti tokią rezultato neapibrėžtį, kuri bus kelis ar net kelias dešimtis kartų didesnė už patį rezultatą. Todėl šio metodo algoritme būtina integruoti neapibrėžties analizę. Būtent neapibrėžties analizės rezultatai nulemia infiltracijos vertinimo pagal pastato šilumos kiekių balansą taikomumo sąlygas ir ribas.

Siekiant rasti tinkamus neapibrėžties analizės metodus ir duomenis toliau darbe atliekamai analizei, šiame skyriuje nagrinėjami atlikti neapibrėžties tyrimai pastato šiluminių reiškinių srityje, apžvelgiamas neapibrėžties tyrimo metodų taikymas vertinant šilumos perdavimo procesus, vykstančius pastatuose. Toliau skyriuje pateikiamas darbe naudojamos neapibrėžties sąvokos apibūdinimas, jos skaitinės charakteristikos.

2.1. Neapibrėžties analizė pastatuose vykstančių šilumos perdavimo procesų tyrime

Neapibrėžties analize siekiama įvertinti, kaip įvesties duomenų verčių neapibrėžtis įtakoja rezultatų neapibrėžtį.

Neapibrėžties analizė ypač svarbi vertinant su įrenginių patikimumu ir saugumu susijusius reiškinius, todėl neapibrėžties analizės taikomųjų tyrimų energetikos srityje gausu. Dauguma jų skirti energijos gamybos objektų patikimumo vertinimui (Urbonas, 2002; Tonkonogij, Pedišius, 2005). Lietuvoje energijos vartojimo atsitiktinis pobūdis analizuotas tik platesniame, visos energetikos rinkos kontekste (Kugelevičius, Kuprys, 2003). Tuo tarpu pastato šiluminių reiški-

nių neapibrėžties tyrimai dar nėra paplitę ne tik Lietuvoje, bet ir kitose šalyse. Iš vienos pusės tai lemia ne tokios kritiškos, kaip šilumos gamybos srityje, pasekmės, jei skaičiavimų rezultatas viršija įvertintą maksimalią vertę. Iš kitos pusės neapibrėžties vertinimas retai įgyvendinamas, nes jo integravimas į šiluminių reiškinių analizės modelius dauguma atveju yra labai sudėtingas (Emery, 2000). Retai neapibrėžties analizė yra atliekama ir pastatų stebėsenos projektuose (Barley, et al, 2005).

Naujos galimybės panaudoti neapibrėžties analizę atsirado tobulėjant pastatų imitacinio modeliavimo kompiuterinėms programoms (Hopfe, et al, 2007). Pastate vykstančių šiluminių reiškinių vertinimas didžiausia neapibrėžtimi pasižymi projektavimo etape, kadangi tuo atveju dar nėra žinomos daugelio įtakančių faktorių vertės. Neapibrėžties ir jautrumo analizė šiame pastato gyvavimo ciklo etape padeda priimti geriau pagrįstus projektinius sprendimus, nes suteikia galimybę įvertinti galimą vertinimo rezultato neapibrėžtį (Wit, 1997; Macdonald, Clarke, Strachan, 1999), nustatyti reikšmingiausiai neapibrėžtį įtakančias prielaidas (Struck, Hensen, 2007). Parengtos projektinių sprendimų priėmimo, remiantis neapibrėžties analizės rezultatais, rekomendacijos (Wit, 2001). Tokiu būdu neapibrėžties analizės naudojimas imitacinio modeliavimo programose suteikia daugiau informacijos, leidžiančios pagrįstai pasirinkti tarp keleto alternatyvų projektuojant pastatą ar optimizuojant pastato MKS valdymą (Hopfe, Hensen, Plokker, 2006) Neapibrėžties analizė priklauso nuo pasirinkto jos rezultato. Pavyzdžiui energijos vartojimo neapibrėžties ir jautrumo analizė parodė, kad modeliuojamo pastato energijos vartojimo vertinimas yra jautriausias prielaidoms apie infiltraciją ir vidinius šilumos šaltinius, tuo tarpu to paties pastato šiluminio komforto vertinimui didžiausią įtaką turėjo įstiklintų paviršių plotas (Bernard, Lemaire, 2000; Hopfe, Hensen, Plokker, 2007). Dažniausiai neapibrėžties analizės rezultatu pasirenkamas valandų skaičius, kai pastato mikroklimatas netenkins nustatytų komforto sąlygų (Hopfe, et al, 2007; Wit, Augenbroe, 2002).

Neapibrėžties vertinimo aktualumas pastatų šilumos kiekių balanso analizės srityje išaugo ėmus vis plačiau taikyti pasyvias pastatų mikroklimato kondicionavimo sistemas: norint prognozuoti temperatūrų kitimo statistinius duomenis, nebeužtenka turėti tik ribines vertes, t.y. projektuoti tik blogiausiomis sąlygoms (Haarhoff, Mathews, 2006).

Kaip dar viena kompiuterinio modeliavimo sritis išskiriamas matavimo metodų neapibrėžties tyrimas. Kompiuterinio modeliavimo taikymas šiuo atveju leidžia ištirti planuojamų matavimų neapibrėžties jautrumą matavimo sąlygoms, pasirinkti tokias sąlygas, kurios leistų minimizuoti matavimo rezultatų neapibrėžtį. Toks tyrimas buvo atliktas šilumos perdavimo koeficiento ir pastato sandarumo matavimo metodams (Geissler, 2001).

Pastatų šiluminio režimo modelių neapibrėžties įvertinimui dažniausiai naudojama jautrumo analizė ir Monte Karlo metodas. Tarpusavyje priklausomų parametrų įtakojamai neapibrėžčiai tirti tinka MKA. Šis metodas pastate vykstančių šiluminių, hidroterminių ir aerodinaminių reiškinių neapibrėžties tyrimui naudojamas vis dažniau. Monte Karlo metodas taikytas pastato gyvavimo ciklo modelio neapibrėžties analizei (Chouquet, Kohler, Bodin, 2003), hidroterminių reiškinių pastatų atitvarose vertinimui (Holm, Künzel, 2002), MKS projektinių sprendinių parinkimui (Kotek, et al, 2007).

Kaip parodė atlikta analizė, Monte Karlo metodas duoda rezultatą, artimą stochastinio imitacinio modeliavimo rezultatui, nors reikalauja daug mažiau laiko ir darbo sąnaudų ne tik tokio modelio sudarymui, bet ir jo naudojimui (Haarhoff, Mathews, 2006).

Šalia jautrumo analizės ir MKA metodų šiluminių reiškinių modeliavimo neapibrėžties vertinimui siūlomi ir kiti metodai: analitinių sprendimų diferencijavimas, baigtinis skirtumas, sudėtinis žingsnis, programinis diferencijavimas, jautrumo lyginimas, prijungimas (Blackwell, Dowding, 2002; Macdonald, 2002; Macdonald, Clarke, 2007). Tačiau šių metodų taikymas nėra taip plačiai paplitęs, kaip jau minėtų jautrumo analizės ir MKA.

2.2. Neapibrėžties analizė

2.2.1. Neapibrėžties išraiškos būdai

Neapibrėžtis atspindi vertinimo arba matavimo kokybę, nusako tikėtiną įverčio ir tikrosios vertės skirtumą. Kadangi įvertis yra atsitiktinis dydis, jis gali būti nusakomas tikimybinio skirstiniu.

Įvesties parametrai ir vertinimo rezultatai turi normalųjį skirstinį. Kitiems įvesties parametrams šiame darbe priskiriamas normalusis, log normalusis arba tolydusis skirstiniai. Šie skirstiniai ir jų parametrai aprašomi 2.7 skyrelyje.

Įverčių, turinčių normalųjį skirstinį, neapibrėžčiai išreikšti galima pasirinkti įvairius sklaidą atspindinčius parametrus. Šiame darbe neapibrėžtis išreiškiama šiais parametrais:

1. Pasiklovimo intervalu.
2. Absoliutine neapibrėžties verte, kuri nustatoma taip:

$$\delta(X) = X_{\max} - \tilde{X}, \quad (2.1)$$

čia

X – vertinamas atsitiktinis dydis;

$\delta(X)$ – absoliutinė neapibrėžtis;

X_{\max} – kraštinė pasikliautinio intervalo vertė;

\tilde{X} – geriausias įvertis.

3. Santykinė neapibrėžties vertė, kuri nustatoma kaip absoliutinės vertės ir geriausio įverčio santykis $\frac{\delta(X)}{\tilde{X}}$, išreikštas procentais.

Pasiklivimo intervalas nustatomas esant pasirinktam pasiklivimo lygmeniui. Šiame darbe naudojamas 95 proc. pasiklivimo lygmuo, kuris dažniausiai taikomas atliekant inžinerinius matavimus ir vertinimus (ASHRAE Guideline 2...1996; Vekteris, et al, 2000). Pasiklivimo intervalo skaičiavimas normaliajam tikimybiniam skirstiniui yra pateiktas 2.7 skyrelyje.

2.2.2. Neapibrėžties analizės metodai

Neapibrėžties vertinimą galima suskaidyti į tris etapus:

- Matematinio neapibrėžties vertinimo modelio sudarymas.
- Modelio įvesties parametrų tikimybinių skirstinių parinkimas.
- Rezultato neapibrėžties skaičiavimas: rezultato tikimybinio skirstinio gavimas, geriausiojo įverčio ir standartinės neapibrėžties nustatymas, pasikliautinio intervalo su pasirinktu pasiklivimo lygmeniu sudarymas.

Neapibrėžties analizė apima du etapus:

- modelio įvesties parametrų neapibrėžties nustatymas;
- įvesties parametrų neapibrėžties įtakos modelio rezultatų neapibrėžčiai tyrimas.

Priklausomai nuo to, koku būdu gali būti įvertinta, įvesties parametrų neapibrėžtis skirstoma į A tipo neapibrėžtį ir B tipo neapibrėžtį. A tipo neapibrėžtis yra įvertinama statistinės analizės metodais, o B tipo neapibrėžčiai priskiriama neapibrėžtis, kurios statistiniais metodais įvertinti negalima. Plačiau A ir B tipo neapibrėžties vertinimui taikomi metodai aprašyti atitinkamai 2.3 ir 2.4 skyreliuose.

Įvesties parametrų neapibrėžties įtakos modelio rezultatų neapibrėžčiai tyrimas šiame darbe atliekamas taikant Monte Karlo (žr. 2.6 skyrelį) ir paklaidų sumavimo metodus (žr. 2.5 skyrelį).

2.3. A tipo neapibrėžties vertinimas

A tipo neapibrėžtis – tai neapibrėžtis, kurią galima įvertinti statistiniais metodais, pvz., imties vidurkio įverčio nustatymo ar mažiausios kvadratų sumos metodais.

Vertinant matavimų neapibrėžtį, būtina išskirti du neapibrėžties komponentus: atsitiktinį ir sisteminį, nes skirtinga šių komponentų prigimtis reikalauja skirtingų vertinimo metodų (Coleman, Style, 1999). Atsitiktinį neapibrėžties komponentą galima sumažinti kartojant matavimus ir rezultatus apdorojant statistiniais metodais. Tuo tarpu sisteminės paklaidos fiksuota verte kartosis visuose matavimuose, todėl visos sisteminės paklaidos turi būti sumuojamos pagal paklaidų sumavimo taisykles. Atsitiktines paklaidas taikant šilumos kiekių balanso metodą lemia naudojamų matavimo rezultatų atsitiktinės paklaidos, todėl atsitiktinį neapibrėžties komponentą lems turimas matavimų skaičius. Nesukalibruota matavimo įranga, klaidos duomenų registravimo sistemoje lems sisteminį neapibrėžties komponentą, kurį galima sumažinti tik naudojant tinkamai parengtą įrangą.

2.3.1. Vidutinės vertės ir imties sklaidos parametru skaičiavimas

Turint parametro X išmatuotas vertes per vertinamąjį laikotarpį (x_1, x_2, \dots, x_N) , vidutinės parametro X vertės įvertis šiam laikotarpiui skaičiuojama kaip turimų verčių vidurkis \bar{X} :

$$\bar{X} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_N}{N} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N x_i, \quad (2.1)$$

čia

N – verčių (matavimų) skaičius imtyje.

Kadangi nežinoma nei darbe analizuojamų atsitiktinių dydžių (parametru vidutinių verčių) dispersija, nei šių dydžių vidurkiai, nežinomo vidurkio neapibrėžtis gali būti nustatoma:

$$\delta(\bar{X}) = t_{\alpha}(N-1) \cdot \frac{S}{\sqrt{N}}, \quad (2.2)$$

čia

S – duomenų imties standartinis nuokrypis, skaičiuojamas:

$$S = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{X})^2}, \quad (2.3)$$

čia

$t_{\alpha}(N-1)$ – t skirstinys su kritine verte α ir $(N-1)$ laisvės laipsnių.

Kritinė vertė α nustatoma pagal pasirinktą pasiklovimo lygmenį:

$$\alpha = \frac{1-Q}{2}, \quad (2.4)$$

čia

Q – pasiklovimo lygmuo. Šiame darbe naudojamas pasiklovimo lygmuo lygus 0,95, tuomet $\alpha = 0,025$. Didelėms imtims, t.y. kai $N > 200$, $t_{0,025} = 1,96$.

Naudojantis formulėmis (2.1–2.4) yra įvertinamos visų matuojamų parametrų vidutinės vertės ir jų neapibrėžtis.

2.3.2. Neapibrėžties vertinimas mažiausios kvadratų sumos metodu

Jei parametras X yra priklausomas nuo kito matuojamo parametro Y , tai galima atlikti regresinę analizę. Jei priklausomybė tiesinė – atliekamas paprasčiausias regresinės analizės atvejis – tiesinė regresinė analizė. Tokiu būdu vertinat matavimo duomenų sklaidą, yra pašalinamas žinomas šios sklaidos faktorius ir sumažėja matuojamo parametro matavimo neapibrėžtis.

Tiesinės regresijos analizėje vidutinės prognozuojamos vertės neapibrėžtis $\delta(\bar{X})$, kaip nusakyta aukščiau, skaičiuojama pagal šią formulę:

$$\delta(\bar{X}) = \pm t_{\alpha}(N-2) \sqrt{\frac{(x - \bar{X})^2 N(N-1)(S_y^2 - b^2 S_x^2) + (N-1)S_x^2}{N(N-1)(N-2)S_x^2}}, \quad (2.5)$$

čia

S_x^2 ir S_y^2 – standartinio nuokrypio įverčių kvadratai;

b – regresijos tiesės krypties koeficientas.

Standartinio nuokrypio įverčių kvadratai S_x^2 ir S_y^2 apskaičiuojami:

$$S_x^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N x_i^2 - \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N x_i \right)^2, \quad (2.6)$$

$$S_y^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N y_i^2 - \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N y_i \right)^2, \quad (2.7)$$

Regresijos tiesės krypties koeficientas b apskaičiuojamas:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^k x_i y_i - \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k x_i \sum_{i=1}^k y_i}{\sum_{i=1}^k x_i - \frac{1}{k} \left(\sum_{i=1}^k y_i \right)^2}, \quad (2.8)$$

Mažiausios kvadratų sumos metodas gali būti taikomas nustatyti įverčio neapibrėžčiai tų matuojamų dydžių, kurie priklauso nuo kitų matuojamų dydžių. Pvz., orinio šildymo atveju, tiekiamo oro temperatūros įverčio neapibrėžtis gali būti nustatoma įvertinant priklausomybę nuo lauko oro temperatūros.

2.4. B tipo neapibrėžties vertinimas

Neapibrėžtis, kuri negali būti įvertinta statistiniais metodais, vadinama B tipo neapibrėžtimi. B tipo neapibrėžtis gali būti vertinama remiantis:

- anksčiau atliktų matavimų rezultatais,
- žiniomis apie vertinamojo parametro prigimtį ir savybes,
- gamintojų pateikiamomis specifikacijomis,
- sertifikatuose nurodomomis specifikacijomis,
- neapibrėžtimi, kuri nurodoma kituose šaltiniuose pateiktiems duomenims.

B tipo neapibrėžtis visuomet bus didesnė, nei A tipo neapibrėžtis.

2.5. Paklaidų sumavimo taisyklės

Netiesioginio matavimo atveju, t.y. kai rezultatas gaunamas iš funkcinės priklausomybės tarp kelių tiesioginio matavimo rezultatų, netiesioginio matavimo rezultato neapibrėžties įvertinimui naudojamos paklaidų sumavimo taisyklės. Pati bendriausia taisyklė, jei paklaidos yra nepriklausomos, gali būti užrašoma šia funkcija:

$$\delta(z) = \sqrt{\left(\frac{df(x,y)}{dx} \delta(x)\right)^2 + \left(\frac{df(x,y)}{dy} \delta(y)\right)^2}, \quad (2.9)$$

čia

x ir y – kintamieji;

z – bet kokia x ir y funkcija: $z = f(x, y)$;

$\frac{df(x,y)}{dx}$ ir $\frac{df(x,y)}{dy}$ – dalinės funkcijos išvestinės atitinkamai nuo x ir y .

Sumavimo atveju, t.y. kai $z = x + y$:

$$\delta(z) = \delta(x + y) = \delta(x - y) = \sqrt{\delta^2(x) + \delta^2(y)}. \quad (2.10)$$

Daugybos arba dalybos atveju, t.y. kai $z = xy$ arba $z = \frac{x}{y}$:

$$\frac{\delta(z)}{z} = \frac{\delta(x \cdot y)}{x \cdot y} = \frac{\delta\left(\frac{x}{y}\right)}{\frac{x}{y}} = \sqrt{\left(\frac{\delta(x)}{x}\right)^2 + \left(\frac{\delta(y)}{y}\right)^2}. \quad (2.11)$$

Laipsninės priklausomybės atveju, t.y. kai $z = x^n$:

$$\frac{\delta(z)}{z} = \frac{\delta(x^n)}{x^n} = n \cdot \frac{\delta(x)}{x}, \quad (2.12)$$

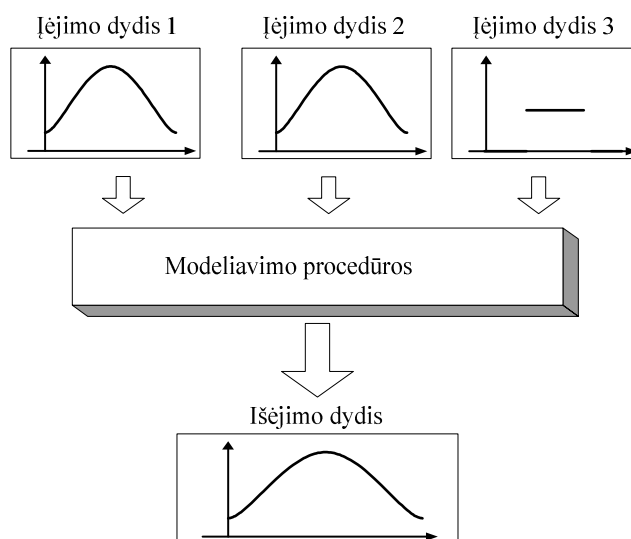
čia

n – laipsnio rodiklis.

Lygybėmis (2.10–2.12) išreikštos paklaidų įvertinimo taisyklės įdiegtos infiltracijos nustatymo kompiuteriniame modelyje, aprašytame 4 skyriuje.

2.6. Monte Karlo metodas

Įvesties parametrų neapibrėžties įtaka skaičiavimais gaunamo rezultato neapibrėžčiai vertinama taikant Monte Karlo metodą. Šio metodo pasirinkimas analizei pagrįstas parametrų svyravimo tikimybinio pobūdžiu ir siekiant įvertinti bendrą visų parametrų įtaką rezultatui. 11 paveiksle pavaizduota Monte Karlo analizės schema.



11 pav. Monte Karlo analizės principinė schema

Monte Karlo analizės (MKA) metodu analizuojamas bendras visų įvedamų parametų neapibrėžties poveikis rezultato neapibrėžčiai. Atliekant Monte Karlo analizę pirmiausia kiekvienam dominančiam įvedimo parametrai nustatomas jo verčių tikimybinis pasiskirstymas. Tuomet kiekvienam parametrai priskiriama vertė atsitiktinai priimta iš to parametro tikimybinio pasiskirstymo ir modeliamas atliekamas su šiomis vertėmis. Tokia procedūra yra atliekama daug kartų kiekvieną kartą vis iš naujo atsitiktinai pasirenkant įvedimo parametų vertes. Atlikus didelį skaičių tokių modeliavimų, gaunamas rezultatų neapibrėžties skirstinys, kuris įgyja normaliojo (Gauso) pasiskirstymo formą nepriklausomai nuo įvedimo parametų tikimybinio pasiskirstymo formos. Monte Karlo metodas priskiriamas statistiniams eksperimentams, kurių metu uždavinių sprendimui naudojami atsitiktiniai arba pseudo-atsitiktiniai skaičiai. Atsitiktiniai dydžiai modeliuojami kompiuterinėmis programomis ir apytiksliai apskaičiuojami tikrųjų verčių įverčiai (Aksomaitis, 2000).

Pagrindinis MKA naudojimo sunkumas – nėra tiksliai žinomas daugelio įvedimo parametų tikimybinis pasiskirstymas. Dažniausiai yra priskiriamas Gauso pasiskirstymas, nors iš tiesų jis gali būti bet koks. Atliekant Monte Karlo analizę daug dėmesio skiriama ir analizuojamų parametų kitimo riboms. Šios ribos pasirenkamos atsižvelgiant į eksperimentais nustatytas, įvairiuose šaltiniuose pateiktas jų vertes. Kitas labai svarbus Monte Karlo metodo aspektas – pasirenkamas modeliavimo procedūrų kiekis. Šis kiekis turi būti pakankamas, kad modeliavimo rezultatas būtų artimas Gauso skirstiniui. Paprastai tam pakan-

ka 100 modeliavimo procedūrų (Macdonald, Strachan, 2001; Heijmans, Wouters, 2002), tačiau jei modeliavimo procedūros užima nedaug laiko, rekomenduojama atlikti 1000 modeliavimo procedūrų (Kopustinskas, Alzbutas, Augutis, 2007). Šiame darbe naudojant Monte Karlo metodą kiekvieną kartą atliekama 1000 modeliavimo procedūrų. MKA didžiausias trūkumas – negalima matyti atskirų parametų neapibrėžties įtakos rezultato neapibrėžčiai (Macdonald, Strachan, 2001). Esant poreikiui įvertinti atskirų parametų neapibrėžties įtaką, naudojama jautrumo analizė.

2.7. Įvedimo parametų ir rezultatų tikimybiniai skirstiniai

Kaip jau aptarta, įvedimo parametrai modelyje yra tikimybinio pobūdžio. Jie gali turėti skirtingus tikimybinius skirstinius. Tiek stochastinio (tikimybinio) modelio įvedimo parametrai, tiek rezultatai yra tikimybinio pobūdžio ir apibūdinami tikimybinio skirstiniu. Priklausomai nuo dydžio prigimties, jo įgaunamos vertės gali pasiskirstyti pagal skirtingus dėsnius. Toliau analizuojami pastate vykstantiems energijos mainų procesams nusakyti taikomi tikimybiniai skirstiniai.

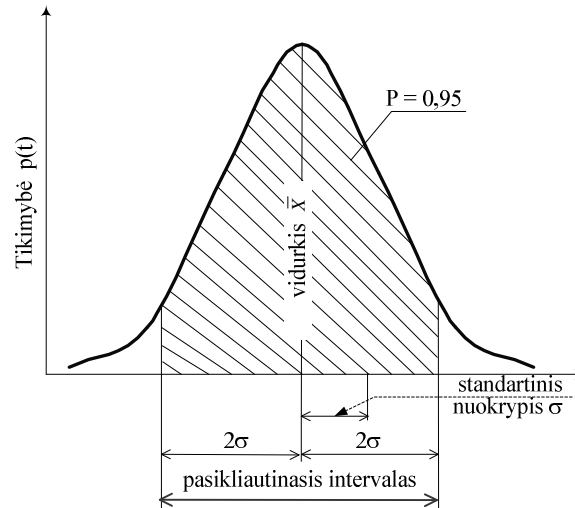
2.7.1. Normalusis (Gauso) skirstinys

Kai atsitiktinis dydis priklauso nuo daugelio veiksnių, iš kurių nei vienas veiksnys nėra vyraujantis, šio dydžio verčių pasiskirstymas atitinka normaliojo (Gauso) skirstinio dėsnį. Aprašant fizinių dydžių matavimų duomenis tai dažniausiai taikomas skirstinys. Atsitiktinis dydis turi normalųjį skirstinį, jeigu jo tankis yra:

$$\varphi_{\mu,\sigma}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left\{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\}, \quad (2.13)$$

čia

μ ir σ – normaliojo skirstinio parametrai, atitinkamai vidurkis ir standartinis nuokrypis.



12 pav. Normaliojo (Gauso) skirstinio tankis

Normalusis, arba kitaip – Gauso, pasiskirstymas yra apibūdinamas dviem parametrais – vidurkiu μ ir standartiniu nuokrypiu σ . Vidutinės vertės įverčiu laikomas imties empirinių verčių vidurkis. Pasikliautinis vidutinės reikšmės įverčio intervalas yra:

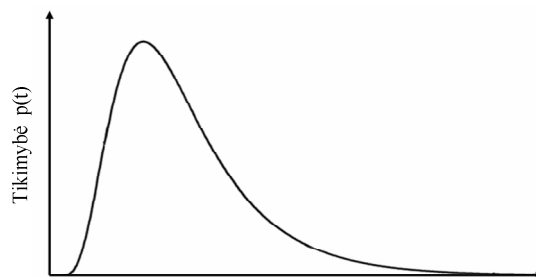
$$\left[\bar{X} - t_{\alpha} \frac{S}{\sqrt{N}}; \bar{X} + t_{\alpha} \frac{S}{\sqrt{N}} \right]. \quad (2.14)$$

Tuomet 95 proc. atsitiktinio dydžio verčių, pasiskirsčiusių pagal Gauso dėsnį, pateks į intervalą:

$$\left[\bar{X} - 1,96 \cdot \frac{S}{\sqrt{N}}; \bar{X} + 1,96 \cdot \frac{S}{\sqrt{N}} \right]. \quad (2.15)$$

2.7.2. Log normalusis skirstinys

Atsitiktinis dydis X turi log normalųjį skirstinį su parametrais μ ir σ , jei $\ln(X)$ turi normalųjį skirstinį su vidurkiu μ ir standartiniu nuokrypiu σ . Log normaliojo skirstinio tankio funkcija pavaizduota 13 paveiksle.

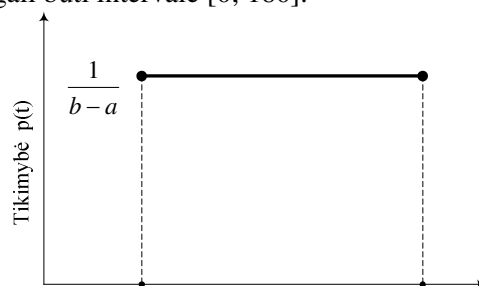


13 pav. Log normaliojo skirstinio tankis

Log normalusis skirstinys neturi neigiamų verčių ir jo vertės neapibrėžtai artėja prie teigiamos begalybės, tikimybei artėjant prie nulio. Todėl šis skirstinys šiame darbe naudojamas atsitiktinių dydžių generavimui, kai tik teigiamos šių dydžių vertės turi fizinę prasmę, pvz., oro kaita dėl infiltracijos, atitvarų matmenys ir pan. Parametrų, turinčių log normalųjį skirstinį neapibrėžtis išreiškiama jau minėtais skirstinio parametrais (μ ; σ).

2.7.3. Tolydusis skirstinys

Tolydųjį skirstinį turi atsitiktiniai dydžiai, kurių vertės intervale pasiskirstę su vienoda tikimybe. Pavyzdžiui, pastato fasado orientacija pasaulio šalių atžvilgiu su vienoda tikimybe gali būti intervale $[0; 180]$.



14 pav. Tolydusis skirstinio tankis

Tolydusis skirstinys yra apibūdinamas dviem parametrais, a ir b – atitinkamai intervalo pradžia ir pabaiga. Intervale $[a, b]$ tolydžiojo skirstinio atveju vertės pasiskirstę su vienoda tikimybe. Į intervalą $[a, b]$ pateks visos vertės su 100 proc. tikimybe.

2.8. Jautrumo analizė

Kaip jau minėta, Monte Karlo metodas leidžia įvertinti bendrą visų parametru neapibrėžties įtaką rezultato neapibrėžčiai. Siekiant įvertinti atskirų parametru įtaką rezultato neapibrėžčiai, naudojama jautrumo analizė. Atliekant jautrumo analizę, keičiant pradinis įvedamus parametrus stebimas rezultato pasikeitimas. Pradinių parametru keitimo intervalas parenkamas atlikus galimų verčių analizę. Atliekama kiekvieno įvedamo parametro neapibrėžties analizė nustatant galimas šio parametro verčių ribas. Sudaroma modeliavimo rezultatų priklausomybė nuo kiekvieno parametro, keičiant jo vertę pasirinktose ribose. Ši jautrumo analizė parodo, kurio iš įvedamų parametru vertės pasirinkimui modeliavimo rezultato jautrumas didžiausias. Jautrumo analizė tinka kai įvedami duomenys tarpusavyje nepriklausomi. Jautrumo analizė taikoma ir kaip paruošiamasis etapas atliekant pradinį įvertinimą ir atrenkant parametrus, kurie toliau tiriami taikant MKA. Šiame darbe jautrumo analizė atliekama siekiant iširti, kurių įvesties parametru neapibrėžtis stipriausiai veikia rezultato neapibrėžtį ir nustatyti šių įvesties parametru ribines vertes, kai užsiduota maksimali rezultato neapibrėžties riba.

2.9. Antrojo skyriaus apibendrinimas

Atlikta apžvalga rodo, kad pastate vykstančių šilumos ir masės mainų neapibrėžties tyrimui dažniausiai naudojami jautrumo analizės ir Monte Karlo metodai. Monte Karlo metodas tinkamas siekiant nustatyti bendrą įvesties parametru poveikį rezultato neapibrėžčiai, o jautrumo analizė leidžia nustatyti kiekvieno įvesties parametro neapibrėžties įtaką rezultato neapibrėžčiai. Neapibrėžties analizė šiame darbe naudojama dviem tikslais:

- neapibrėžties analizę integruojant į siūlomo infiltracijos nustatymo metodo algoritmą;
- atliekant siūlomo metodo taikymo sąlygų ir ribų analizę.

Pirmuoju atveju neapibrėžties analizė yra dalis duomenų analizės, kuri savo ruožtu sudaro šilumos kiekių balanso metodo algoritmo dalį. Šiuo atveju neapibrėžties analizė įgalina įvertinti gauto atsakymo neapibrėžtį. Antruoju atveju neapibrėžties analizės rezultatai lemia šilumos kiekių balanso metodo taikomo ribas. Ieškomo dydžio neapibrėžtį galima sumažinti mažinant įvesties parametru neapibrėžtį. Labiausiai šių įvedimo parametru neapibrėžtį galima sumažinti, kai galima pritaikyti statistinius duomenų analizės metodus, bet tam reikia turėti aibę matavimo duomenų. Galimybę gauti šiuos duomenis suteikia šiuolaikiniuose pasatuose vis plačiu naudojamos pastatų automatizuoto valdymo sistemos.

Pastatų mikroklimato automatizuoto valdymo sistemos

Šiuolaikiniuose pastatuose vis dažniau įrengiamos pastatų automatizuoto valdymo (PAV) sistemos. Pastato automatizuoto valdymo sistema – tai kompiuterizuota sistema, skirta pastato inžinerinės įrangos, pavyzdžiui, vėdinimo įrangos, saugumo sistemų, apšvietimo ir pan., kontrolei ir valdymui. Šiose sistemose yra galimybė beveik be papildomų sąnaudų sukaupti daugybę faktinių matavimo duomenų apie pastato mikroklimato parametrų vertes, MKS veikimą per visą eksploataavimo laikotarpį. Siekiant įvertinti kaupiamų duomenų panaudojimo infiltracijos nustatymui galimybes, apžvelgiamos PAV sistemų raidos tendencijos, pateikiamas trumpas PAV sistemų sandaros aprašymas, analizuojami šių sistemų projektavimo etapai. Apžvelgiamos šiuolaikinių PAV sistemų galimybės duomenų registravimo dažnio, kaupimo apimtys ir matavimų tikslumo požūriais.

3.1. Pastato automatizuoto valdymo sistemų raida

Šiame skyriuje apžvelgta, kokie yra dabartiniai PAV sistemų naudojimo būdai, kaip realizuojami kaupiamų duomenų analizės algoritmai, kokios galimybės įdiegti infiltracijos nustatymo metodą į PAV sistemą. Nustatyta, kokia yra duo-

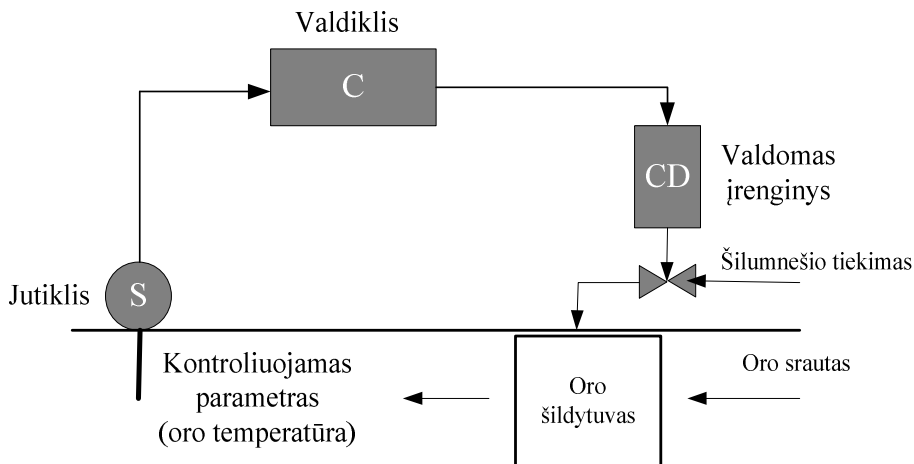
menų matavimo, registravimo ir kaupimo praktika: atliekamų matavimų dažnis, saugomų duomenų kiekio galimybės, duomenų neapibrėžtis. Apžvelgiama, ar dabartiniu metu atliekamos analizės metoduose yra atsižvelgiama į galimus duomenų netikslumus, klaidas ir kokie metodai taikomi šių netikslumų vertinimui.

PAV sistemos atsirado ir plėtojosi pastaraisiais dešimtmečiais kartu su kompiuterine technika, nes mikrokompiuteris yra esminė PAV sistemos dalis. PAV sistemos pirmuoju prototipu galima laikyti centrinį valdymo įrenginį, apjungusį jau iki tol naudotą sistemų kontrolės infrastruktūrą. Ši sistema buvo įdiegta 1960 metais, o artima šiuolaikinėms pirmoji PAV sistema buvo įrengta 1970 metais (Levermore, 2000). Dėl savo kainos anksčiau PAV sistemos buvo įrengiamos tik dideliuose pastatuose, tačiau tobulėjant ir pingant technologijoms, šios sistemos tampa ekonomiškai patrauklios ir vidutinio dydžio ar net mažuose pastatuose.

3.2. Pastato automatizuoto valdymo sistemų sandara ir funkcijos

PAV sistema sudaryta iš techninės ir programinės įrangos. Pagrindiniai techninės įrangos komponentai yra jutikliai, valdikliai, pavaros, kompiuterinė ir ryšių įranga. Standartinė programinė įranga apima pastato sistemų valdymo algoritmus pagal nustatytus palaikomus parametrus.

Viena iš PAV sistemos dalių yra skirta pastato mikroklimato kondicionavimo sistemų valdymui, toliau šiame darbe minint PAV sistemas turima minty tik ši sistemos dalis. MKS valdymą sudaro trys žingsniai: matavimas, išmatuotų duomenų apdorojimas (lyginimas su kita informacija) ir, galiausiai, valdymo veiksmo atlikimas. Šios trys funkcijos sudaro valdymo grandinę. Valdymo grandinės pavyzdys pagal (Iowa Energy Center, 2008) pateiktas 15 paveiksle. Valdymo grandinę sudaro trys pagrindiniai komponentai: jutiklis (sensorius), valdiklis (kontroleris) ir valdymo įrenginys. Šių trijų komponentų funkcionavimas skirtas aplinkos parametrai, pateiktame pavyzdyje, oro temperatūrai, kontroliuoti. Jutiklis matuoja ir teikia matavimo duomenis valdikliui, kuris juos apdoroja ir siunčia valdymo signalą valdymo įrenginiui, šiuo atveju vožtuvo, kontroliuojančio šilumnešio debitą šilumokaityje, pavarai.



15 pav. Pagrindinės valdymo grandinės schemos pavyzdys

Labai dažnai tyrimai susiję su PAV sistemomis, skirti MKS kontrolės ir valdymo funkcijų efektyvumo didinimui. Plintant PAV sistemoms, šių sistemų potencialas efektyviau naudoti energiją, reikalingą mikroklimate sistemų veikimui, taip pat tiriama vis plačiau. Didelis dėmesys yra skiriamas sistemos veikimo klaidų diagnozavimui, nes laiku diagnozuotos ir ištaisytos PAV sistemų klaidos leidžia sumažinti energijos komercinių pastatų mikroklimate kondicionavimo sistemose vartojimą 20–30 proc. (IEA Annex 25...1996).

PAV sistemose sukaupti duomenys leidžia sekti energijos vartojimo režimo kitimą ar identifikuoti sistemų veikimo sutrikimus. Šių užduočių sprendimui yra kuriami algoritmai, kurių įdiegimas į PAV sistemų programinę įrangą palengvina pastatų eksploatacavimo inžinierių darbą, leidžia greičiau pašalinti nustatytus trūkumus, optimizuoti sistemų veikimą tokiu būdu mažinant energijos vartojimą ir užtikrinant geresnes komforto sąlygas pastato vartotojams. Kuriamos taisyklių sistemos, leidžiančios efektyviai reaguoti į MK sistemos veikimo nukrypimus dėl mechaninių ar valdymo sistemos gedimų, operatoriaus klaidų ar kitų priežasčių (Schein, et al, 2006). Kadangi PAV sistemos registruoja ir saugo labai didelį duomenų kiekį, sistemos operatoriaus darbas palengvinamas perspėjimo signalų sistema ir duomenų vizualizavimu. Be to, bandoma automatizuoti kuo daugiau funkcijų, kuo mažiau jų paliekant sistemos operatoriui, Pavyzdžiui, sukurtas duomenų analizės metodas, paremtas robustiniais statistiniais metodais, leidžiantis automatizuotai išskirti nuo normos nukrypstantį energijos vartojimą. Tokiu būdu yra sumažinamas operatoriaus darbo sąnaudų poreikis, nes operatoriaus įsikišimas reikalingas tik atrinktų problemų sprendimui, o problemos identifikavimas yra atliekamas automatiškai (Seem, 2007).

PAV sistemos išskiriamos kaip viena geriausių energijos vartojimo efektyvumo didinimo priemonių. Parodyta, kad vien tik keičiant MKS valdymo strategiją be jokių papildomų investicijų galima sutaupyti didelį kiekį energijos. Pažymima, kad šiai sričiai, nepaisant energijos taupymo potencialo joje, skiriama dar per mažai dėmesio (Canbay, et al, 2004).

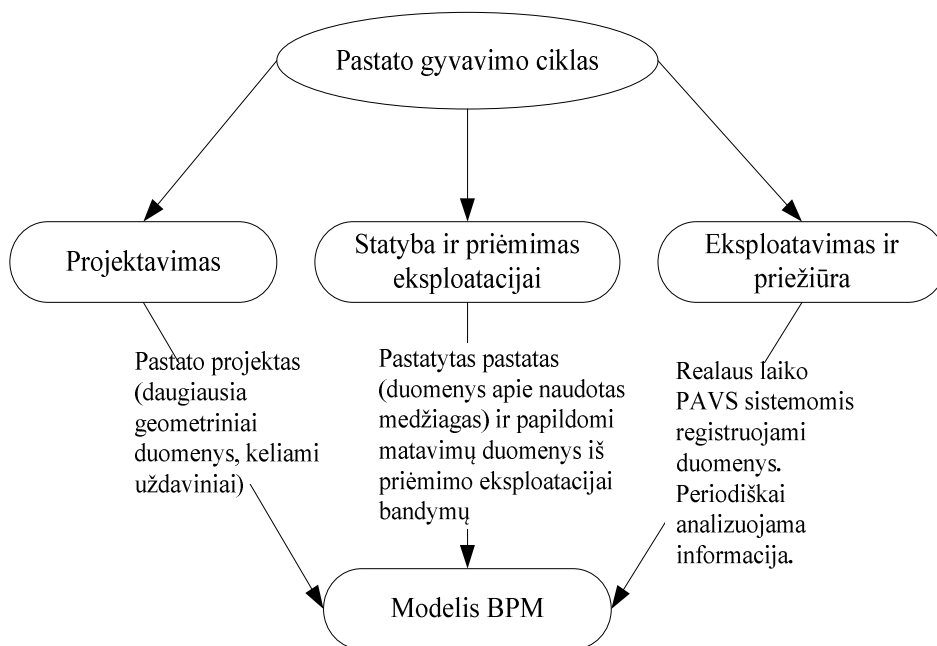
Optimalios pastato MKS valdymo strategijos parinkimas ir įdiegimas ne tik užtikrina komfortinę aplinką, bet ir efektyvų energijos vartojimą, tačiau tokios strategijos parinkimas yra sudėtingas uždavinys. Mathews ir kiti (Mathews, et al, 2000; Mathews, et al, 2001) šią problemą sprendė kompiuterine modeliavimo programą QUICKcontrol atlikdami sudėtingą ir visiškai integruotą pastato, MKS ir kontrolės sistemų imitacinį modeliavimą. Keleto variantų analizė modeliuojant leido parinkti tokią valdymo strategiją, kuri leido sutaupyti 34 proc. pastato vartojamos energijos. Modeliavimo rezultatus patvirtino ir atlikti faktiniai matavimai.

Tačiau sistemų valdymas yra ne vienintelė funkcija, kurią gali atlikti PAV sistemos. Pastaraisiais metais vis plačiau plinta PAV sistemos, turinčios vis geresnes įvairių parametru verčių matavimo ir kaupimo galimybes. Į sistemas integruojama papildoma programinė įranga suteikia galimybes atlikti kaupiamų duomenų analizę, apskaičiuoti įvairus rodiklius. Tačiau nors dabartiniu metu pastatuose sukauptos ar gali būti kaupiamos milžiniškos duomenų bazės, jų potencialas dar tik pradamas naudoti. Tai ypač svarbu atsižvelgiant į tai, kad pastato eksploatavimo vertinimas dabartiniu metu yra labai fragmentiškas. Net geriausios praktikos atveju tėra atliekami šie vertinimai: imitacinis modeliavimas pastato projektavimo metu ir pastato priėmimo eksploatacijai bandymai. Viso pastato gyvavimo ciklo požiūriu pastato vertinimas eksploataavimo metu yra silpniausia grandis, o nuolatinė stebėseną atliekama ypatingai retai. PAV sistemos kaip tik ir suteikia gali nedidelėmis papildomomis sąnaudomis atlikti pastato stebėseną eksploataavimo metu.

Egzistuoja daug kompiuterizuotų pastato stebėjimo ir kontrolės sistemų, kurios be savo pagrindinių funkcijų dar atlieka ir duomenų kaupimo funkciją. Sukaupti duomenys gali būti naudojami detaliam pastato energijos vartojimo, MKS funkcijų stebėsenai ir vertinimui. Tokiu būdu gali būti sutaupoma didelė dalis energijos, naudojamos pastate. Tačiau vis dar jaučiamas įrankių, skirtų PAV sistemose kaupiamų duomenų analizei, trūkumas, kuriant juos susiduriama su vertinimo kriterijų formulavimo problemomis (Basiri, et al, 2003). Viena iš pastato energetinių savybių gali būti šilumos poreikio priklausomybės nuo aplinkos oro temperatūros išraiška, gauta naudojant PAV sistemose sukauptų duomenų regresinę analizę (Ghiaus, 2006). Tokia pastato charakteristika būtų ypač naudinga tuo, kad atspindėtų faktines pastato energetines savybes eksploataavimo metu.

Pastatų energinio naudingumo stebėsenai reikia matuoti daugiau parametru, negu reikalinga MK sistemų valdymui, tačiau pastatų sistemoms tampant vis sudėtingesnėms, o energijos kainoms vis labiau augant, pastatų energinio naudingumo stebėseną tampa vis aktualesnė ir todėl vis plačiau taikoma (Gillespie, et al, 2006).

Standartinę PAV sistemų programinę įrangą galima papildyti įvairiais kompiuteriniais modeliais, leidžiančiais gauti papildomą sistemos funkcionalumą. Detalus ir išsamus tokio modelio pavyzdys pateikiamas O'Sullivan (2004). Siūloma integruoti pastato PAV sistemą ir kompiuterinį modelį, tokiu būdu sukuriant priemonę, leidžiančią per visą pastato gyvavimo ciklą matuoti ir kontroliuoti pastate vykstančius procesus, lemiančius energijos vartojimą. Tokio modelio, pavadinto BPM, įdiegimo į pastato stebėseną per visą gyvavimo ciklą schema pavaizduota 16 paveiksle.



16 pav. Modelio BPM panaudojimas informacijos apie pastatą sekimui

Kompiuterinis BPM modelis, sujungtas su pastato valdymo sistema ir kitomis informacinėmis technologijomis, sudarytą sistemą, leidžiančią stebėti, analizuoti ir valdyti pastatą per visą jo gyvavimo ciklą, remiantis eksploatacijos charakteristikų rinkiniu (O'Sullivan, 2004). Tokia sistema užpildytą spragą egzistuojančioje pastato eksploataavimo vertinimo praktikoje, kuri stokoja standartizuotų testinių procedūrų. Eksploatavimo parametrus apibūdinančių verčių

dokumentavimas ir kaupimas suteiktų nudingos informacijos pastato vertinimui viso pastato gyvavimo ciklo laikotarpiu, nuo projektavimo ir statybos, per visą eksploataavimo laikotarpį iki pastato gyvavimo ciklo pabaigos.

Sparčiai tobulėjant PAV sistemų techninei įrangai, ypatingas dėmesys teiktinas programiniam aprūpinimui: valdymo ir duomenų kaupimo algoritmams, modeliavimo algoritmams, duomenų analizei skirtoms modeliavimo programoms. PAV sistemų projektavimą galima suskirstyti į keletą etapų (Bielinskis, Bachanovas, 2001):

- informacinės loginės struktūros parinkimas;
- reikalavimų informaciniam aprūpinimui parinkimas;
- reikalavimų matematiniam aprūpinimui parinkimas;
- techninės užduoties sudarymas.

Efektyviai veikiančios PAV sistemos įrengimas reikalauja detalios kiekvieno objekto, kuriame įrengiama ši sistema, specifikos analizės. Informacinės loginės struktūros parinkimo etapas apima reikalingų algoritmų nustatymą ir šių algoritmų struktūros sudarymą. Algoritmų struktūra yra sudaroma atsižvelgiant į PAV sistemos funkcijas ir informacijos registravimo technologijas: nustatomi informaciniai srautai, skirti PAV sistemos funkcionavimui užtikrinti, paruošiamos automatizavimo instrukcijos, suvienodinama įėjimo ir išėjimo srautų duomenų vienetų sistema, užtikrinamas sistemos jautrumas ir prognozuojamos sistemos gedimo tikimybės. Šiame etape labai svarbu išskirti duomenis, kurie turi būti apdorojami realiaje laike ir statistinius duomenis. Parinkta informacinė loginė PAV sistemos struktūra apsprendžia techninės įrangos poreikį.

Informacinis arba kitaip – programinis aprūpinimas susideda iš duomenų struktūros parinkimo, masyvo tipo ir struktūros parinkimo, masyvų tarpusavio suderinamumo schemos analizės, duomenų atrinkimo ir filtravimo užtikrinimo, duomenų paskirstymo informacinėje bazėje analizės, duomenų paėmimo iš duomenų bazės analizės.

Matematinio aprūpinimo parinkimas ypatingai priklauso nuo objekto specifikos, kiekvienu atveju dažniausiai kuriamas atskiras matematinis modelis (Bielinskis, Bachanovas, 2001). Matematinis modelis kuriamas priklausomai nuo sistemai keliamų uždavinių. Matematinis aprūpinimas apima analitinius, imitacinius ir skaitmeninius metodus.

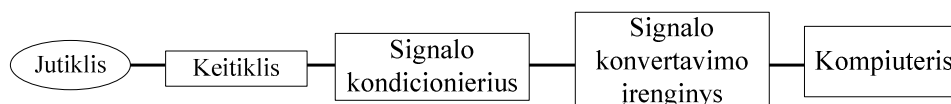
Lundin (2004) analizuojama galimybė įprastus PAV sistemomis registruojamus duomenis, tokius, kaip išorės ir patalpų oro temperatūros skirtumas ir tiekiamos šilumos srautas, pasitelkiant neuroninių tinklų metodą, panaudoti tokių pastato rodiklių, kaip šiluminės talpos, savitųjų šilumos nuostolių ir pritekėjusios šilumos panaudojimo faktorius, nustatymui, šių rodiklių svyravimų kasdien ar kas valandą stebėjimui ir kitimo grafiko sudarymui.

3.3. Pastatų automatizuoto valdymo sistemose kaupiami duomenys

Šiuolaikinėmis PAV sistemomis paprastai kontroliuojami šie patalpų mikroklimato ir MKS parametrai: temperatūra, drėgmė, slėgis, oro ir vandens debitas (ASHRAE 2007).

Vis labiau tobulinamos PAV sistemos leidžia vis tiksliau palaikyti kontroliuojamus mikroklimato parametrus (Price, Smith, Suby, 2007).

Siekiant išanalizuoti kaupiamų duomenų patikimumą, toliau pateikiamas matavimo, perdavimo ir kaupimo proceso aprašymas. Stebimo parametro matavimo duomenų registravimo procesą galima suskaidyti į penketą etapų, pavaizduotą 17 paveiksle.



17 pav. Matavimo proceso schema

Jutiklis skirtas fizinio dydžio matavimui, išmatuota vertė keitiklyje paverčiama elektriniu signalu, kuris gali būti įrašomas. Šis signalas, kuris gali būti įtampos, varžos ar srovės pavidalu, yra filtruojamas, apvalomas nuo trikdžių ir kitaip apdorojamas signalo kondicionieriuje. Konvertavimo įrenginys paverčia signalą skaitmeniniu, suderinamu su sistemos kompiuteriu. Visų paminėtų etapų metu patiriami informacijos nuostoliai, dėl kurių atsiranda kaupiamų duomenų neapibrėžtis. Tiesioginio skaitmeninio valdymo sistema skirta energijos vartojimo MKS įrenginiuose valdymui. Ši valdymo sistema remiasi matavimų duomenimis, todėl neišvengiamos duomenų paklaidos, atsirandančios dėl netobulų įrenginių valdymo grandinėje (Price, Smith, Suby, 2007). Skaitmeninės formos signalas gali būti saugomas ir naudojamas analizei be tolimesnio papildomų paklaidų atsiradimo, nebent atliekant skaičiavimas būtų naudojamas tarpinių rezultatų apvalinimas.

Pabrėžiama PAV sistemose kaupiamų duomenų patikimumo svarba. Duomenų patikimumas priklauso nuo tinkamo sistemos įrengimo ir nuo matavimo sistemos tikslumo. Matavimo sistemos tikslumas labai stipriai susijęs su investicijomis į PAV sistemų įrengimą. Todėl kiekvienu atveju siūloma įvertinti mažiausią reikalingą matavimo sistemos tikslumą (IEA Annex 34...2006).

Šilumos srauto nuo orinio šildymo įvertinimo neapibrėžties šaltiniai:

- oro temperatūros jutiklių paklaidos;
- slėgio jutiklių paklaidos;
- perdavimo į sistemą paklaidos (signalu transformavimas).

ASHRAE (2007) rekomenduojamas parametų matavimų, skirtų gyvenamųjų pastatų energijos vartojimo stebėsenai, tikslumas, pateiktas 10 lentelėje.

10 lentelė. Naudojamas matavimų tikslumas gyvenamųjų pastatų energijos vartojimo monitoringo sistemose

Matuojamas parametras	Siekiamas tikslumas
Pagrindiniai parametrai	
Elektros vartojimas	3 proc. parodymo vertės
Vidaus patalpų temperatūra	0,5 K
Karšto vandens vartojimas	3 proc. parodymo vertės
Dujų vartojimas	3 proc. parodymo vertės
Kiti parametrai	
Išorės oro temperatūra	0,5 K
Vidaus patalpų oro drėgnumas	5 proc. parodymo vertės
Saulės spinduliuotės intensyvumas	30 W/m ²
Aplinkos oro drėgnumas	5 proc. parodymo vertės
Vėjo greitis	0,2 m/s
Vėjo kryptis	5°

11 lentelėje pateikiamas matuojamų parametų tikslumas, kurio turi būti siekiama įvairios paskirties pastatų monitoringo atveju (Gillespie, et al, 2006).

11 lentelė. Pastato energijos vartojimo monitoringo sistemose naudojamas matavimų tikslumas

Matuojamas parametras	Siekiamas tikslumas
Išorės oro temperatūra	0,2 °F (~ 0,11 K)
Zonos temperatūra	0,5 °F (~ 0,28 K)
MKS elektros vartojimas	1,5 proc. parodymo vertės
Šaltnešio, šilumnešio temperatūra	0,1 °F (~ 0,06 K)
Šaltnešio, šilumnešio temperatūros skirtumas	2 proc. parodymo vertės
Oro debitas	5 proc. parodymo vertės
Galía	2 proc. parodymo vertės
Elektros vartojimas	2 proc. parodymo vertės

Remiantis atlikta apžvalga, atliekant neapibrėžties analizę šiame darbe priimamas 0,2 K patalpų vidaus, lauko oro, vėdinimo sistemomis tiekiamo ir šalinamo oro temperatūrų matavimo neapibrėžtis, 5 proc. parodymo vertės oro debito, tiekiamo ir šalinamo mechaninėmis vėdinimo sistemomis, matavimo neapibrėžtis, o šildymo sistema tiekiamo šilumos kiekio matavimo neapibrėžtis priimta 3 proc. parodymo vertės.

3.4. Trečiojo skyriaus išvados

Pastate vykstančių energijos procesų ir pastato efektyvumo vertinime per visą jo gyvavimo ciklą egzistuoja spraga. Nors pastatai daugiausia energijos suvartoja būtent jų eksploatavimo metu ir šiame etape galimybių didinti energijos vartojimo efektyvumą yra ne mažiau, negu pastato projektavimo metu, praktikoje vis dar trūksta metodų ir priemonių vykdyti pastato energijos vartojimo stebėseną jį eksploatuojant. Kiti tyrėjai jau atkreipė dėmesį į šią spragą ir į galimybę – apžvelgus mokslinę literatūrą pastebėta ryški tendencija PAV sistemų kaupiamus duomenis naudoti pastato eksploatavimo metu vykstančių procesų analizei ir vertinimui, tuo tikslu integruojant į PAV sistemas sudėtingus kompiuterinius modelius. Tačiau būtent oro infiltracijos vertinimo galimybė pagal sukauptus duomenis sudarant šilumos kiekių balanso lygčių sistemą nėra išanalizuota.

Oro infiltracijos intensyvumui vertinti pagal pastato šilumos kiekių balansą dažnai galima naudoti jau veikiančias PAV sistemas, nes daugumoje šiuolaikinių viešosios paskirties pastatų jau įrengiamos sistemos, galinčios matuoti įvairius pastato mikroklimato ir mikroklimato kondicionavimo sistemų parametrus ir kaupti šių matavimų duomenis. Taigi investicijos į techninę įrangą dažnai gali būti nereikalingos, užtektų pakoreguoti veikiančios sistemos programinę įrangą, kad reikalingų parametrų matavimo duomenys būtų registruojami pakankamu dažnumu ir sukaupiamas pakankamas analizei duomenų kiekis. Koks turi būti matavimo dažnis ir sukaupiamų kiekis, tiriama toliau, analizės rezultatai pateikiami 5 skyriuje. Sukaupiti duomenys toliau turi būti analizuojami konkrečiam pastatui parengtu modeliu, kurio apibendrintas algoritmas pateikiamas 4 skyriuje. Alternatyvus sprendimas yra įdiegti oro infiltracijos nustatymo algoritmą į dar projektuojamą PAV sistemą, kaip bendro pastato stebėsenos kompiuterinio modelio dalį.

4

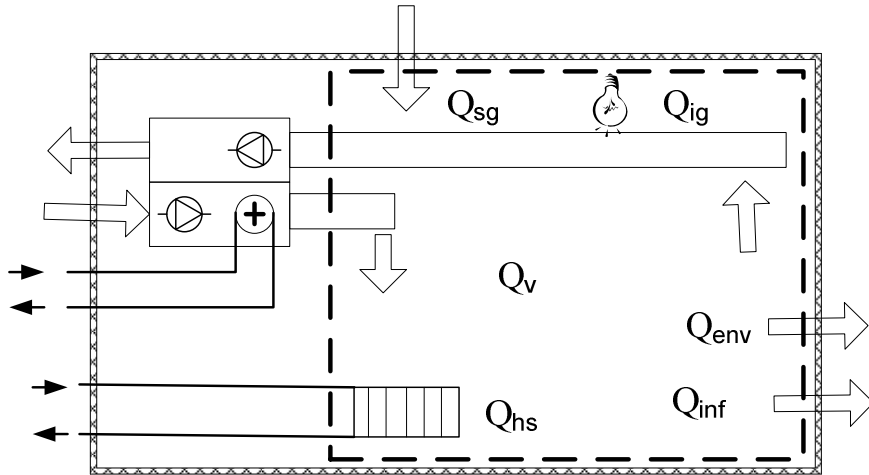
Oro infiltracijos nustatymas pagal pastato šilumos kiekių balansą

Ketvirtajame skyriuje formuluojamas siūlomas infiltracijos nustatymo pagal pastato šilumos kiekių balansą algoritmas, aprašomas sukurtas pagal šį algoritmą kompiuterinis modelis.

4.1. Pastato šilumos kiekių balanso sudarymas

Pastato šilumos kiekių balanso lygtis gali būti užrašoma įvairiais būdais, priklausomai nuo pasirinktų sistemos ribų. Be to, gali būti užrašomas tiek šilumos srautų, tiek šilumos kiekių balansas. Šilumos kiekių balanso metodas leidžia nustatyti tam tikro laikotarpio, pvz. mėnesio, vidutinę infiltracijos vertę. Galima nustatyti ir valandinę ar net momentinę vertę, tačiau šios vertės neapibrėžtis bus labai didelė. Tai ypač lems šilumos pritekio momentinės (ar valandos vidutinės) vertės neapibrėžtis. Vertinant šilumos kiekius per mėnesį, neapibrėžtis sumažėja, nes srautų vertės per ilgesnį laikotarpį paprastai linkę įgyti labiau vidutines vertes. Pavyzdžiui, šilumos pritekis nuo vidinių šilumos šaltinių paros metu gali labai stipriai svyruoti, tačiau mėnesio vidutinė vertė gali būti vertinama palyginti

tiksliai. Todėl pasirinktas variantas – nagrinėti pastato šilumos kiekių balansą ir nustatyti oro kaitos dėl infiltracijos vidutinę pasirinkto laikotarpio vertę.



18 pav. Pastato šilumos kiekių balanso schema (punctyrynė linija žymi pasirinktas sistemos ribas)

Pastato šilumos kiekių balanso lygtis bendruoju atveju, sistemos riboms esant tokioms, kaip pažymėta 18 paveiksle, gali būti užrašyta tokiu būdu:

$$Q_{inf} = Q_v + Q_{ig} + Q_{sg} + Q_{hs} + Q_{env}, \quad (4.1)$$

čia

Q_{inf} – šilumos kiekis dėl oro infiltracijos (MWh);

Q_v – šilumos kiekis, tiekiamas vėdinimo sistemomis (MWh);

Q_{ig} – šilumos kiekis nuo vidinių šilumos šaltinių (MWh);

Q_{sg} – šilumos kiekis dėl saulės spinduliuotės (MWh);

Q_{hs} – šilumos kiekis, tiekiamas šildymo (arba vėsinimo) sistemomis (MWh);

Q_{env} – šilumos kiekis dėl nuostolių per išorines pastato atitvaras ir ilginius šilumos tiltelius (MWh).

Kai kurios iš šių šilumos kiekių balanso dedamųjų (Q_{inf} , Q_{env} , Q_v ir Q_{hs}) gali įgyti neigiamą vertę. Q_{inf} ir Q_{env} neigiamą vertę įgyja, kai pastato vidaus oro temperatūra yra žemesnė, negu pastato aplinkos oro temperatūra. Q_v neigiamą vertę įgyja, kai vėdinimo sistema atlieka vėsinimo funkciją, t.y. kai į pastatą šia sistema tiekiamo oro temperatūra yra žemesnė, negu pastato vidaus oro temperatūra, o Q_{hs} – kai veikia ne šildymo, o vėsinimo sistema.

Šilumos kiekis, tiekiamas vėdinimo sistemomis gali būt apskaičiuojamas pagal šią lygybę:

$$Q_v = c \cdot \rho \cdot L_s \cdot (\theta_s - \theta_{\text{exh}}) \cdot z \cdot 10^{-6}, \quad (4.2)$$

čia

c – savitoji oro šiluma $\left(\frac{W}{kg \cdot K}\right)$;

ρ – oro tankis (kg/m^3);

L_s – vėdinimo sistema tiekiamo oro debitas (m^3/h);

θ_s – vėdinimo sistema tiekiamo oro temperatūra ($^{\circ}C$);

θ_{exh} – vėdinimo sistema ištraukiamo oro temperatūra ($^{\circ}C$);

z – valandų skaičius per vertinamąjį laikotarpį (h).

Šilumos nuostoliai per pastato išorines atitvaras ir ilginius šilumos tiltelius gali būt apskaičiuojami:

$$Q_{\text{env}} = H_T \cdot (\theta_{\text{in}} - \theta_{\text{ex}}) \cdot z \cdot 10^{-6}, \quad (4.3)$$

čia

H_T – savitieji pastato šilumos nuostoliai per atitvaras ir ilginius šilumos tiltelius (W/K).

θ_{in} – pastato vidaus oro temperatūra ($^{\circ}C$);

θ_{ex} – pastato aplinkos oro temperatūra ($^{\circ}C$).

Šilumos kiekis dėl šildymo sistemos veikimo Q_{hs} gali būti išmatuojamas šilumos apskaitos prietaisu.

Šilumos kiekis, pritekėjęs nuo vidinių šilumos šaltinių gali būti įvertinamas remiantis elektros apskaitos, apšvietimo sistemos, kitų veikiančių įrenginių darbo režimo ir efektyvumo, žmonių srautų duomenimis.

Šilumos kiekis dėl saulės spinduliuotės gali būti įvertinamas remiantis saulės spinduliuotės intensyvumo matavimo, debesuotumo vertinimo ir skaidrių išorinių atitvarų parametru duomenimis.

Vidutinė mėnesio oro kaita dėl infiltracijos gali būti išreiškiama šia lygybe:

$$n = \frac{Q_{\text{inf}}}{c \cdot \rho \cdot V \cdot \Delta\theta \cdot z \cdot 10^{-6}}, \quad (4.4)$$

čia

V – pastato tūris (m^3);

$\Delta\theta$ – aplinkos ir patalpų oro temperatūrų skirtumas ($^{\circ}\text{C}$).

Siekiant didesnio šilumos kiekių balanso tikslumo, kur įmanoma reikia naudoti ne apskaičiuotus ar kitaip įvertintus, bet išmatuotus įvesties parametrus.

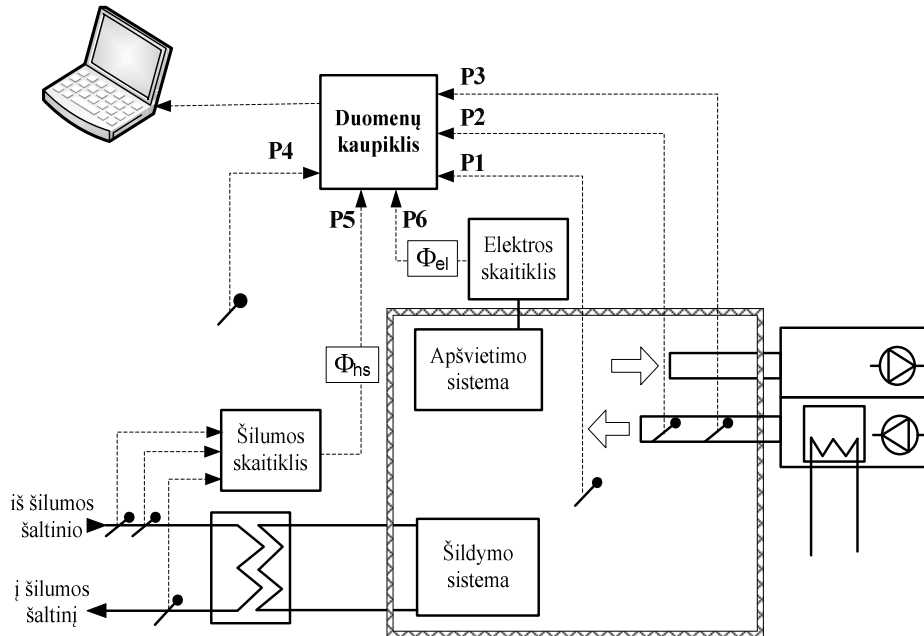
Analizuojant pateiktas aukščiau lygybes (4.1–4.4) matyti, kad norint nustatyti mėnesio vidutinę oro kaitą dėl infiltracijos, reikalingi šie matavimais gauti įvesties duomenys:

- mechaninėmis vėdinimo sistemomis tiekiamo oro debitas;
- mechaninėmis vėdinimo sistemomis tiekiamo oro temperatūra;
- mechaninėmis vėdinimo sistemomis šalinamo oro temperatūra;
- patalpų oro temperatūra;
- pastato aplinkos oro temperatūra;
- šildymo sistema tiekiamas šilumos kiekis.

Geresniam šilumos pritekio įvertinimo tikslumui naudinga papildomai matuoti šiuos parametrus:

- saulės spinduliuotės intensyvumą;
- suvartojamas elektros energijos kiekį.

19 paveiksle pateikiama modeliuojamos MK ir PAV sistemų schema.



19 pav. Modelio mikro klimato kondicionavimo ir PAV sistemų schema

Parametrai 19 paveiksle pateiktame modelyje:

P1 – patalpų oro temperatūra;

- P2 – mechanine vėdinimo sistema tiekiamo oro temperatūra;
- P3 – mechanine vėdinimo sistema tiekiamo oro debitas;
- P4 – pastato aplinkos oro temperatūra;
- P5 – šilumos srautas nuo šildymo sistemos;
- P6 – elektros suvartojimas.

19 paveiksle pavaizduotoje schemoje P1–P6 pažymėti parametrai, kurių vertės gali būti kaupiamos PAV sistemose ir vėliau panaudojamos pastato šilumos kiekių balanso sudarymui ir infiltracijos nustatymui.

4.2. Oro infiltracijos intensyvumo įvertinimo pagal pastato šilumos kiekių balansą algoritmas

Oro infiltracijos intensyvumas (oro kaita) pastatuose pagal šilumos kiekių balansą gali būti nustatoma pagal žemiau pateiktą algoritmą.

1. Atsižvelgiant į pastato ir MKS specifiką, analizuojamo pastato šilumos kiekių balansas aprašomas priklausomybėmis.
2. Pagal priklausomybes parengiamas šilumos kiekių balanso modelis.
3. Nustatomi reikalingi įvesties parametrai.
4. Įvertinama, kurie iš įvesties parametrų gali būti pateikiami kaip matavimų duomenys, sukaupti PAV sistemose.
5. Apskaičiuojami savitieji pastato šilumos nuostoliai per atitvaras bei ilginius šilumos tiltelius ir jų neapibrėžtis (galima naudoti MKA metodu pagrįstą kompiuterinį modelį).
6. Turimi matavimų duomenys apdorojami statistinės analizės metodais.
7. Trūkstanti įvesties parametrai ir jų neapibrėžtis įvedami remiantis ekspertiniu vertinimu, pagal analogus ar kitais būdais.

Čia pateiktas tik apibendrintas infiltracijos vertinimo pagal pastato šilumos kiekių balansą algoritmas, nes kiekvienam pastatui jis bus skirtingas priklausomai nuo pastato charakteristikų ir pastate įrengtų mikroklimato kondicionavimo ir PAV sistemų.

4.3. Infiltracijos įvertinimo neapibrėžties analizės schema

Šiame skyrelyje pateikiama vidutinės oro kaitos dėl infiltracijos vertinimo pagal pastato šilumos kiekių balansą neapibrėžties nustatymo schema.

Infiltracija, nustatant ją pagal šilumos kiekių balansą, yra gaunama iš išmatuotų ar apskaičiuotų pradinių (įėjimo) dydžių, kurių kiekvienas turi savo neapibrėžtį. Todėl infiltracijos vertės neapibrėžtis yra gaunama kaip jungtinė neapibrėžtis, įvertinant įėjimo dydžių neapibrėžtis.

Nustatant jungtinės neapibrėžties dydį, pirmiausia turi būti sudaromas matematinis neapibrėžties įvertinimo modelis, kuris nusako ryšį tarp matuojamojo dydžio (išėjimo dydžio) ir kitų dydžių (įėjimo dydžių), į kuriuos reikia atsižvelgti, vertinant išėjimo dydį. Po to paruošiami (analizuojami) matavimo rezultatai ir kiti turimi duomenys. Šie duomenys panaudojami matavimo neapibrėžčiai apskaičiuoti pagal sudarytą matematinį modelį. Atlikus skaičiavimus, pateikiamas visas išėjimo dydžio matavimo rezultatas, kuriame viena ar kita forma nurodomas ir neapibrėžties dydis. Darbe pasirinkta neapibrėžties pateikimo forma aprašyta 2.2.1 skyrelyje.

Kiekviena šilumos kiekių balanso, išreikšto lygybe (4.1), dedamoji turi savo neapibrėžtį, kuri pereina į oro kaitos dėl infiltracijos, nustatomos pagal priklausomybę (4.2) neapibrėžtį. Naudojantis paklaidų kvadratų sumavimo taisykle, infiltracijos neapibrėžtis gali būti išreiškiama šia lygybe:

$$\frac{\delta(n)}{|n|} = \sqrt{\left(\frac{\delta(Q_{inf})}{|Q_{inf}|}\right)^2 + \left(\frac{\delta(V)}{|V|}\right)^2 + \left(\frac{\delta(\Delta\theta)}{|\Delta\theta|}\right)^2}, \quad (4.5)$$

čia

δ – rodo parametro neapibrėžtį.

Skirtumo tarp patalpų vidaus ir lauko oro temperatūrų neapibrėžtis skaičiuojama pagal lygybę

$$\delta(\Delta\theta) = \sqrt{\delta^2(\theta_{in}) + \delta^2(\theta_{ex})}, \quad (4.6)$$

Vidutinių laikotarpio temperatūrų įverčiai ir jų neapibrėžtis nustatomi pagal matavimų duomenis analizuojant statistiniais metodais.

Pastato tūrio skaičiavimo neapibrėžtis paprasčiausiu atveju, kai pastatas yra stačiakampio gretasienio formos, gali būti įvertinama pagal šią paprastą paklaidos vertinimo išraišką:

$$\frac{\delta(V)}{|V|} = \sqrt{\left(\frac{\delta(a)}{|a|}\right)^2 + \left(\frac{\delta(b)}{|b|}\right)^2 + \left(\frac{\delta(h)}{|h|}\right)^2}, \quad (4.7)$$

čia

a, b, h – atitinkamai pastato plotis, ilgis ir aukštis (m).

Esant sudėtingesnei pastato architektūrinei formai, pastato tūrio skaičiavimo neapibrėžties vertinimui gali būt pasitelktas Monte Karlo būdas.

Kiekviena šilumos kiekių balanso, išreikšto lygybe (4.1), dedamoji turi savo neapibrėžtį, kurias sumuojant gaunama šilumos kiekių balanso dedamosios dėl infiltracijos neapibrėžtis:

$$\delta(Q_{inf}) = \sqrt{\delta^2(Q_{env}) + \delta^2(Q_{ig}) + \delta^2(Q_{sg}) + \delta^2(Q_{hs}) + \delta^2(Q_v)}, \quad (4.8)$$

čia

$\delta(Q_{inf})$, $\delta(Q_{env})$, $\delta(Q_{ig})$, $\delta(Q_{sg})$, $\delta(Q_{hs})$, $\delta(Q_v)$ – atitinkamai kiekvienos šilumos kiekių balanso dedamosios, kaip aprašyta lygybėje (4.1), neapibrėžtis.

Toliau atskirai pateikiamas kiekvienos šilumos kiekių balanso dedamosios neapibrėžties analizės aprašymas.

4.3.1. Šilumos nuostolių per atitvaras neapibrėžtis

Pastatų atitvaros sudarytos iš keleto sluoksnių, kiekvienas sluoksnis taip pat nėra vienalytis. Kiekvieno atitvaros sluoksnio šiluminės savybes lemia keletas parametrų, iš kurių kiekvieno vertei apibūdinti geriau tinka tikimybinis skirstinys nei vienas skaičius (Salonvaara, Karagiozis., Holm, 2001). Todėl tiek kiekvienos atitvaros šilumos perdavimo koeficiento vertė, tiek savitieji pastato šilumos nuostoliai per atitvaras yra atsitiktinis dydis, kuris gali būti nusakomas tikimybinio skirstinio arba tikėtinų verčių intervalu.

Šilumos nuostoliai per atitvaras ir ilginius šilumos tiltelius išreiškiami priklausomybe (4.3). Tuomet dėmens Q_{env} neapibrėžtis gali būti išreikšta šia forma:

$$\frac{\delta(Q_{env})}{|Q_{env}|} = \sqrt{\left(\frac{\delta(H_T)}{|H_T|}\right)^2 + \left(\frac{\delta(\Delta\theta)}{|\Delta\theta|}\right)^2}, \quad (4.9)$$

Savitieji šilumos nuostoliai per atitvaras ir ilginius šilumos tiltelius H_T gali būti apskaičiuojami pagal Lietuvos statybos normose (STR 2.05.01...2005) pateiktą metodiką.

Metodikos pasirinkimą lėmė siekis formuluojant metodo algoritmą išvengti papildomų sąnaudų reikalaujančių procedūrų įtraukimo. Kadangi yra pasirinktas įprastinis praktikoje taikomas metodas, papildomai reikalinga įtraukti tik neapibrėžties analizę.

Kadangi savitieji šilumos nuostoliai per atitvaras ir ilginius šilumos tiltelius yra skaičiuojami pagal didelį kiekį įvesties parametrų, kurių kiekvienas turi savo neapibrėžtį, ir šiuos parametrus bei rezultatą sieja nemažai gana sudėtingų lygčių, paprastos paklaidų sumavimo taisyklės rezultato neapibrėžties vertinimui netinka. Todėl darbe savitųjų šilumos nuostolių per atitvaras ir ilginius šilumos tiltelius skaičiavimo neapibrėžties vertinimui yra taikomas Monte Karlo metodas. Šio metodo pagrindu savitųjų nuostolių ir jų neapibrėžties vertinimui sudarytas kompiuterinis modelis aprašomas 4.4 skyrelyje.

Medžiagų šiluminių savybių tikimybiniai skirstiniai parinkti remiantis atlikta literatūros analize, pagrindiniai šaltiniai: (Struck, Hensen, 2006; Vik, Uvsløkk, Anton, 2002).

Savitieji šilumos nuostoliai per atitvaras ir ilginius šilumos tiltelius H_T gali būti apskaičiuojami:

$$H_T = \sum A_i \cdot U_i + \sum l_i \cdot \Psi_i, \quad (4.10)$$

čia

A_i – išorinės atitvaros arba jos dalies plotas (m^2);

U_i – išorinės atitvaros šilumos perdavimo koeficientas (W/Km^2);

l_i – ilginio šilumos tiltelio ilgis (m);

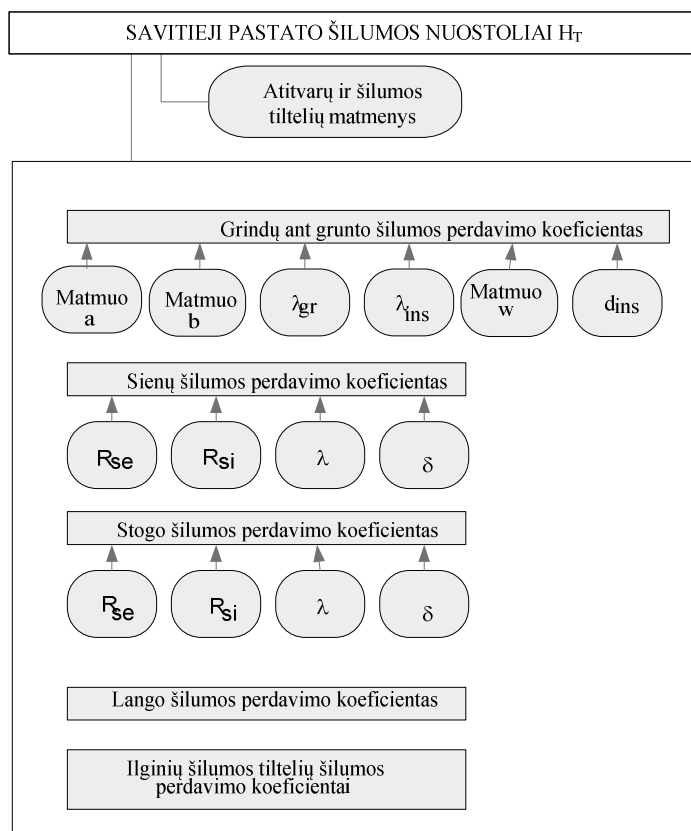
Ψ_i – ilginio šilumos tiltelio šilumos perdavimo koeficientas ($W/K \cdot m$).

Šilumos perdavimo per atitvaras koeficiento neapibrėžtis yra nulemiama dviejų veiksnių grupių: modeliavimo prielaidų ir modelyje naudojamų parametrų neapibrėžties. Modelis kuriamas pagal (STR 2.05.01...2005) pateikiamą metodiką. Ši metodika šilumos perdavimo per atitvaras koeficiento skaičiavimui sudaryta sujungiant Furje dėsnį, aprašantį šilumos mainus laidumu, ir Niutono lygtį, aprašančią šilumos mainus konvekcija tarp atitvaros ir lauko bei patalpų oro. Į šilumos mainus spinduliavimu neatsižvelgiama. Sudarant modelį laikytasi šilumos mainų stacionarumo prielaidos, be to priimama, kad atitvaros sluoksnių paviršiai izoterminiai ir todėl atitvaros temperatūros laukas laikomas vienmačiu. Šie metodikoje taikomi supaprastinimai neišvengiamai lemia tam tikrą gaunamų rezultatų neapibrėžtį, tačiau remiantis kitų autorių pateikiamais duomenimis (Clarke, Yaneske, Pinney, 1991) šiuo metodu įvertinami atitvarų šilumos perdavimo koeficientai nuo išmatuotų skiriasi nežymiai.

Šiame darbe analizuojama neapibrėžtis, kylanti iš skaičiavimams naudojamų parametrų verčių neapibrėžties. Neapibrėžties analizė šiuo atveju atsako į

klausimą, koks yra gaunamo rezultato patikimumas, kai nėra žinomos tikrosios skaičiavimuose naudojamos parametrų vertės.

20 paveiksle pateikta schema, kurioje vaizduojami įvesties parametrai, pagal kuriuos skaičiuojami savitieji pastato šilumos nuostoliai.



20 pav. Savitųjų šilumos nuostolių įvertinimo schema

Kaip galima spręsti iš anksčiau pateikto aprašymo ir iš 20 paveikslo, savitųjų šilumos nuostolių per atitvaras vertinimo schema yra gana sudėtinga, sudaryta iš daugelio veiksmų, tarpusavyje susijusių įvairiomis priklausomybėmis. Todėl savitųjų šilumos nuostolių per atitvaras neapibrėžties vertinimui darbe buvo taikyta Monte Karlo analizė. Analizės rezultatai pateikiami 5 skyriuje.

Sienų ir stogo šiluminės varžos vertinimas

Šilumos perdavimo koeficientai sienoms ir stogui skaičiuojami pagal formulę:

$$U = \frac{1}{R_t}, \quad (4.11)$$

čia

R_t – suminė atitvaros šiluminė varža $\left(\frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}\right)$;

U – atitvaros šilumos perdavimo koeficientas $\left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}\right)$.

Suminė atitvaros šiluminė varža skaičiuojama:

$$R_t = R_{si} + R_{se} + R_s, \quad (4.12)$$

čia

R_{si} – atitvaros vidinio paviršiaus šiluminė varža $\left(\frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}\right)$;

R_{se} – atitvaros išorinio paviršiaus šiluminė varža $\left(\frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}\right)$;

R_s – atitvaros sluoksnių šiluminė varža $\left(\frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}\right)$;

Atitvaros sluoksnių šiluminė varža skaičiuojama kaip kiekvieno iš sluoksnių varžų suma:

$$R_s = \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\lambda_i}, \quad (4.13)$$

čia

d_i – atitvaros sluoksnio storis (mm);

λ_i – atitvaros sluoksnio šiluminis laidumas $\left(\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}\right)$.

Atitvaros paviršiaus varžos R_{se} ir R_{si} bendru atveju priklauso nuo paviršiaus formos, paviršiaus matmenų, oro dinaminio klampumo koeficiento, oro terminio tūrio plėtimosi koeficiento, oro šilumos laidumo koeficiento, savitosios oro šilumos, oro greičio, oro tankio, paviršiaus ir oro temperatūrų (Fisher, Pedersen, 1997; Khalifa, Marshall, 1990). R_{se} ir R_{si} pateikiama metodikoje (STR 2.05.01...2005) priklausomai nuo srauto krypties. Atitvaros išorinio paviršiaus

varža R_{se} stipriai priklauso dar ir nuo vėjo greičio, o vidinio paviršiaus varža priklauso nuo paviršiaus ir patalpų oro temperatūrų skirtumo. Atitvaros paviršiaus varžos R_{se} ir R_{si} yra eile mažesnės už R_s ir todėl jų neapibrėžties galima nepaisyti.

Statybinių medžiagų šilumos laidumo nustatymas reglamentuojamas norminiame dokumente (STR 2.01.03...2003). Šiame dokumente pateikiama deklaruojamosios šilumos laidumo vertės nustatymo metodika ir šios vertės perskaičiavimas į projektinę pagal projektines drėgmės ir atitvaros konstrukcijos sąlygas.

Grindų šiluminės varžos vertinimas

Nagrinėjamas variantas – gerai apšiltintos ($d_t \geq B'$) grindys ant grunto, papildomai pakraščiuose neapšiltintos. Naudojamas skaičiavimo metodas, pateiktas statybos norminiuose dokumentuose (STR 2.05.01...2005). Grindų ant grunto šilumos perdavimo koeficientas skaičiuojamas:

$$U = \frac{\lambda_{gr}}{0,457 \cdot B' + d_t}, \quad (4.14)$$

čia

B' – būdingasis grindų matmuo;

λ_{gr} – grunto projektinis šilumos laidumo koeficientas $\left(\frac{W}{m \cdot K}\right)$;

d_t – atstojamasis grindų plokštės storis, išreikštas grunto sluoksnio storium (m):

Būdingasis grindų matmuo B' apskaičiuojamas taip:

$$B' = \frac{A}{0,5 \cdot P}, \quad (4.15)$$

čia

A – bendras grindų ant grunto plotas (m^2);

P – grindų perimetras (m).

Atstojamasis grindų plokštės storis d_t skaičiuojamas pagal lygybę:

$$d_t = w + \lambda_{gr} \cdot (R_{se} + R_f + R_{si}), \quad (4.16)$$

čia

R_f – grindų šiluminė varža, $\left(\frac{m^2 \cdot K}{W}\right)$;

w – grindis ribojančios sienos storis (m).

Langų ir durų šilumos perdavimo koeficientų vertinimas

Skaičiuojant priimama, kad langų ir durų šilumos perdavimo koeficientai yra atsitiktiniai dydžiai, pasiskirstę pagal log normalųjį dėsnį. Vidurkiai prilyginti deklaruojamoms šilumos perdavimo koeficiento vertėms. Standartinis nuokrypis

prilygintas $0,05 \frac{W}{m^2 \cdot K}$, remiantis normatyvinių dokumentų nuostata, kad dek-

laruojamosios vertės turi būti vertinamos $0,1 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ tikslumu (STR 2.01.09...2005).

Ilginių šilumos tiltelių skaičiavimas

Skaičiavimuose buvo įvertinti trijų tipų ilginiai šilumos tilteliai:

- sienos kampas;
- sienos-stogo sandūra;
- langų ir durų sandūros.

Priimta, kad šiluminių tiltelių šilumos perdavimo koeficientai yra atsitiktiniai dydžiai, pasiskirstę pagal log normalųjį dėsnį. Vidutinės vertės priimtos pa-

gal (STR 2.05.01...2005), o standartinis nuokrypis $0,01 \frac{W}{m \cdot K}$, remiantis (STR 2.01.09...2005) reikalavimais.

4.3.2. Šilumos pritekio nuo vidinių šilumos šaltinių neapibrėžtis

Šilumos pritekis priklauso nuo daugelio faktorių, tarp jų ir atsitiktinių. Be to, šilumos pritekis negali būti išmatuojamas. Išmatuojami gali būti tik atskiri šilumos pritekį lemiantys faktoriai, pavyzdžiui, saulės spinduliuotė, apšvietimo sistemos ar technologinių įrenginių naudojama elektros galia, tačiau daugelis kitų lemiamų faktorių nematuojami. Toks šilumos pritekio pobūdis lemia, kad ši pastato šilumos kiekių balanso dedamoji yra labiausiai neapibrėžta, ypač jei kalbama apie šilumos srautų balansą. Tačiau jei vertinamas šilumos kiekių balansas, galima laukti, kad ilgesnio laikotarpio šilumos pritekio vertės įgaus vertes, artimas vidutinėms ir todėl vertinimo neapibrėžtis sumažės.

Vertinant šilumos pritekio neapibrėžtį dėl matavimo duomenų trūkumo dažniausiai tenka taikyti B tipo neapibrėžties vertinimo metodus. Todėl toliau atliekama šilumos pritekio vertinimo apžvalga.

Šildymo sezono metu pastatuose galima išskirti du šilumos pritekio šaltinius: saulės spinduliuotę ir vidinius šilumos šaltinius, kuriuos, savo ruožtu, sudaro apšvietimo sistema, technologiniai įrenginiai ir žmonės.

Pagal pritekio vertinimo galimybes pritekio šaltinius patogu suskirstyti į tris grupes:

- nuo apšvietimo sistemos ir kitos elektrą vartojančios įrangos,
- dėl saulės spinduliuotės,
- nuo žmonių.

Pastate visa elektros energija suvartojama įrenginiuose, kurie paverčia suvartotą energiją šiluma, todėl iš esmės šilumos pritekis nuo pastate įrengtos apšvietimo sistemos ir kitų elektrą vartojančių įrenginių gali būti vertinami prilyginant juos elektros sąnaudoms. Faktinės elektros sąnaudos mėnesiui praktiškai visuomet gali būti nustatomos pagal apskaitos prietaisus. Šiuo atveju šilumos pritekio nuo apšvietimo sistemos ir kitų elektrą vartojančių įrenginių neapibrėžtis sudaryta iš dviejų komponentų: elektros apskaitos prietaiso tikslumas ir skirtumas tarp šilumos pritekio ir suvartotos elektros energijos.

Saulės spinduliuotės lemiamas šilumos pritekis gali būti vertinamas remiantis statistiniais duomenimis apie vietovei ir metų laikui būdingas saulės radiacijos vertes. Didesnį tikslumą lemtų faktinių verčių matavimas, tačiau tam reikėtų įrengti meteorologinę stotelę. Šio pritekio vertės neapibrėžtį lemia ne tik saulės spinduliuotės verčių neapibrėžtis, bet ir kiti faktoriai, ypač įstiklintų atitvarų optinės savybės.

Sudėtingiausias yra šilumos pritekio nuo žmonių vertinimas – jei vidutinis šilumos pritekis, tenkantis vienam žmogui, dar gali būti įvertinamas žinant pastate esančių žmonių veiklos pobūdį, tai žmonių skaičius ir buvimo laikas dauge-liu atveju yra nežinomas.

Normose ir įvairiose šilumos kiekių balanso sudarymo metodikose pateikiama šilumos srauto nuo atskirų vidinių šilumos šaltinių galia, tenkanti 1m^2 grindų. Šis rodiklis pateikiamas priklausomai nuo pastatų tipo. Lietuvos normatyvuose (STR 2.09.04...2002) pramoninių ir maisto prekių parduotuvėms siūlomos vertės pateikiamos 12 lentelėje. EN 832 šiuo atveju siūloma taikyti nacionalinius standartus (EN 832...1998). ASHRAE tokio pobūdžio pastatuose rekomenduojami $10\text{--}25\text{ W/m}^2$ nuo žmonių ir $10\text{--}20\text{ W/m}^2$ šilumos pritekėjimai nuo apšvietimo sistemų (ASHRAE 2007).

12 lentelė. Vidinių šilumos šaltinių šilumos srauto tankis, W/m^2 patalpų grindų ploto

Pastato paskirtis	Šilumos srauto tankis q , W/m^2		
	Apšvietimas	Prietaisai	Žmonės
Maisto prekių parduotuvės	15	4,0	10,0
Pramoninių prekių parduotuvės	15	1,0	10,0

Pagal Lietuvos higienos normas, dideliems verslo prekybos centrams apšvietos ribinės vertės yra $500\text{--}750$ liuksų (HN 98...2000). 5 skyriuje nagrinėjama prekybos centre nuomojamų plotų apšvietimas siekia $900\text{--}1200\text{ lx}$, o pre-

kybos salės net 1500 lx. ASHRAE siūloma naudoti apšvietumo normas, taikomas projektuojamam pastatui ir atsižvelgti į naudojamų analizuojamose patalpose šviestuvų efektyvumo koeficientus (ASHRAE 2007).

Šilumos srautas nuo žmogaus priklauso nuo žmogaus veiklos pobūdžio ir aprangos šiluminės varžos. Šilumos atidavimo nuo žmogaus pobūdis priklauso nuo aplinkos temperatūros: kuo temperatūra aukštesnė, tuo mažesnė šilumos dalis atiduodama konvekcijos būdu ir tuo didesnė šilumos dalis perduodama aplinkos orui kaip garavimo šiluma.

Saulės spinduliuotės šiluma į pastatą patenka spinduliavimo keliu per įstiklintas atitvaras ir laidumu bei konvekcija per masyvias atitvaras. Dėl didelės masyvių atitvarų šiluminės varžos ir didelės inercijos šilumos srautas į pastatą patenka su uždelsimu. Todėl per pastato sienas patenkančio šilumos kiekio galima nevertinti, jis daug mažesnis už šilumos kiekį, patenkančią per langus. Tačiau būtina vertinti šilumą, patenkančią per sutapdintą stogą, nes jo juodas hidroizoliacijos paviršius įkaista iki 50 °C.

Saulės spinduliuotės pritekis konkrečiu laiko momentu taip pat yra atsitiktinis dydis, priklausantis nuo debesuotumo. Kitus parametrus, kurių funkcija yra saulės spinduliuotės pritekis, galima įvertinti skaičiavimuose, tai: įstiklintų atitvarų plotas ir orientacija, stiklo pralaidumas, šešėlių sudarančios kliūtys, saulės padėtis, priklausomai nuo paros ir metų laiko. Vis tik debesuotumas lemia saulės spinduliuotės pritekio tikimybinį pobūdį.

Šilumos pritekis, vertinamas 1 m² naudingojo ploto, nuo vidinių šilumos šaltinių nuo pastato dydžio nepriklauso, bet priklauso nuo pastato paskirties, nes skiriasi reikalavimai dirbtinio apšvietimo intensyvumui, eksploatuojama technologinė įranga ar buities prietaisai, žmonių skaičius ir jų veiklos intensyvumas.

Šilumos pritekis nuo apšvietimo sistemų ir technologinių įrenginių gali būti įvertinamas pagal žinomą instaliuotą apšvietimo prietaisų galią ir pagal jų veikimo grafiką. Šilumos pritekio nuo technologinių įrenginių įvertinimas yra komplikotas, nes jų poveikis gali būti lokalus (šilumos pertekį nuo kepimo krosnių ir pan. dažniausiai nutraukiamas vietinėmis vėdinimo sistemomis), todėl sunku įvertinti, kokia dalis pritekėjusios šilumos gali būti vertinama bendrame pastato šilumos kiekių balanse.

Elektros vartojimo ir tuo pačiu šilumos pritekio vertinimas pagal instaliuotą įrenginių galią netinkamas, nes dauguma įrengimų nuolat veikia žymiai mažesne galia (Duska, et al, 2007).

Šilumos pritekėjimas sudaro žymią šilumos kiekių balanso dalį, todėl jo vertės neapibrėžtis stipriai įtakotų infiltracijos vertinimo rezultatus. Metodo taikymui būtina išvengti šilumos pritekėjimo ar nežinomų jo komponentų (pvz., imti tik naktinius matavimus, jei nėra galimybės matuoti saulės spinduliuotės intensyvumo), arba šilumos pritekėjimų vertes paremti gana tiksliais matavimais.

4.3.3. Šilumos pritekio dėl saulės spinduliuotės neapibrėžtis

Laikotarpio vidutinė projektinė į patalpą iš išorės pritekėjusi šiluma dėl saulės spinduliuotės:

$$Q_{sg} = \sum q_{s,j} \cdot s \cdot A_{gl} \cdot a \cdot z \cdot 10^{-6}, \quad (4.17)$$

čia

$\sum q_{s,j}$ – vidutinis paros saulės spinduliuotės šilumos srauto tankis, patenkantis pro atitinkamos orientacijos langą per nagrinėjamąjį mėnesį, (W/m^2);

s – įstiklintų plotų saulės spinduliuotės praleisties faktorius;

A_{gl} – įstiklintos lango dalies plotas, (m^2);

a – pataisa dėl lango užtemdymo.

Q_{sg} neapibrėžtis $\delta(Q_{sg})$ įvertinama atliekant 1000 Monte Karlo modeliavimo procedūrų, kuriose išvardinti įvesties parametrai pateikiami kaip tikimybiniai skirstiniai.

4.3.4. Šilumos srautų dėl mikroklimato kondicionavimo sistemų veikimo neapibrėžtis

Šilumos srautai dėl pastato mikroklimato kondicionavimo sistemų veikimo gali būti tiesiogiai arba netiesiogiai matuojami. Todėl šios šilumos kiekių balanso dedamosios neapibrėžtis gali būti vertinama naudojant statistinius duomenų analizės metodus, aprašomus 2.3 skyrelyje. Atliekant statistinę PAV sistemoje kaupiamų duomenų analizę, gaunami statistiniai parametru įverčiai ir šių įverčių standartiniai nuokrypiai. Pagal šiuos įverčius randamos šilumos kiekių balanso dedamųjų dėl MKS veikimo vertės, o pagal standartinius nuokrypius apskaičiuojama šių dedamųjų neapibrėžtis. Šilumos kiekio tiekiamo ar šalinamo su vėdinimo sistemų oru vertės santykinė neapibrėžtis $\frac{\delta(Q_v)}{|Q_v|}$ skaičiuojama pagal for-

mulę:

$$\frac{\delta(Q_v)}{|Q_v|} = \sqrt{\left(\frac{\delta(L_s)}{|L_s|}\right)^2 + \left(\frac{\delta(\Delta\theta)}{|\Delta\theta|}\right)^2}, \quad (4.18)$$

čia

$\delta(L_s)$ – vėdinimo sistema tiekiamo oro debito neapibrėžtis (m^3/h);

$\Delta\theta$ – vėdinimo sistema tiekiamo ir šalinamo oro temperatūros skirtumas ($^{\circ}\text{C}$, K);

$\delta(\Delta\theta)$ – vėdinimo sistema tiekiamo ir šalinamo oro temperatūros skirtumo neapibrėžtis ($^{\circ}\text{C}$, K), skaičiuojama:

$$\delta(\Delta\theta) = \sqrt{\delta^2(\theta_s) + \delta^2(\theta_{\text{exh}})}, \quad (4.19)$$

čia

$\delta(L_s)$ – vėdinimo sistema tiekiamo oro debito neapibrėžtis (m^3/h);

$\delta(\theta_s)$ – vėdinimo sistema tiekiamo oro temperatūros neapibrėžtis ($^{\circ}\text{C}$);

$\delta(\theta_{\text{exh}})$ – vėdinimo sistema šalinamo oro temperatūros neapibrėžtis ($^{\circ}\text{C}$).

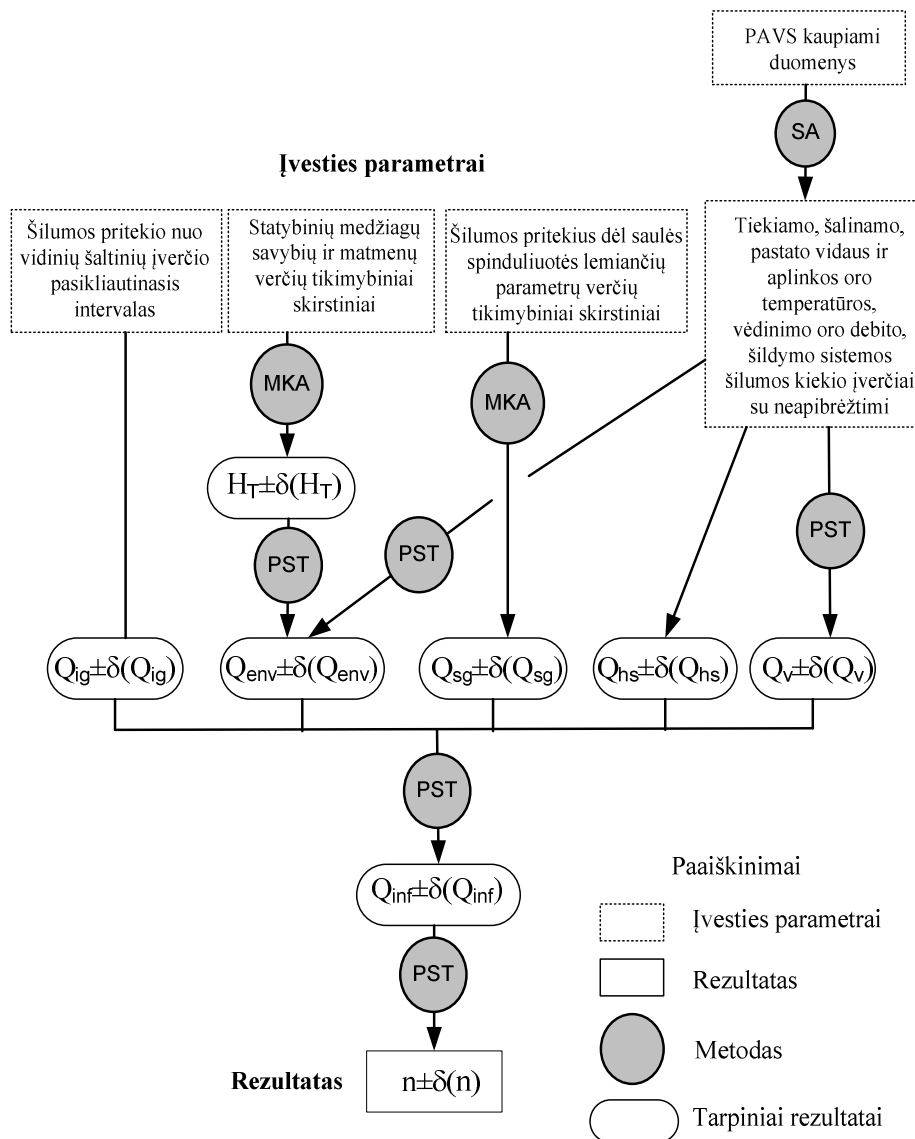
Kaip jau minėta, parametrų L_s , θ_s , θ_{exh} įverčiai ir jų neapibrėžtis nustatomi atliekant PAV sistemoje sukauptų šių parametrų verčių statistinę analizę. Tokiu pačiu būdu nustatomas ir šildymo sistema patiekto šilumos kiekio įvertis Q_{hs} ir jo neapibrėžtis $\delta(Q_{\text{hs}})$.

4.4. Infiltracijos vertinimo kompiuterinis modelis

Parengtas kompiuterinis modelis yra skirtas infiltracijos nustatymui pagal pastato šilumos kiekių balansą, kai turimi šie įvesties duomenys: išmatuotos pastato vidaus ir aplinkos oro temperatūros, mechaninėmis vėdinimo sistemomis tiekiamo oro temperatūra ir debitas, šildymo sistema tiekiamos šilumos kiekis; šių išvardintų parametrų matavimo tikslumas; apskaičiuoti savitieji šilumos nuostoliai per išorines pastato atitvaras ir ilginius šilumos tiltelius su įvertinta skaičiavimo neapibrėžtimi; šilumos kiekis, pritekėjęs dėl saulės spinduliuotės per vertinamąjį laikotarpį ir jo neapibrėžtis; šilumos kiekis, pritekėjęs vidinių šilumos šaltinių per vertinamąjį laikotarpį ir jo neapibrėžtis. Modelyje integruotais statistiniais duomenų analizės metodais (detalesniam aprašymui 2 skyriuje) apdorojus įvesties duomenis yra įvertinama vidutinė infiltracijos vertė per vertinamąjį laikotarpį, pateikiant rezultatai kaip vidutinės infiltracijos pasikliautinąjį intervalą arba vidutinę vertę su neapibrėžties dydžiu.

Šis kompiuterinis modelis yra vienas iš variantų modelio, kuris turėtų būti įdiegtas į PAV sistemas, norint tirti pastato infiltraciją šilumos kiekių balanso metodu. Kaip jau minėta aprašant PAV sistemos projektavimą, kiekvieno objekto specifiškai lemia, kad matematiniai modeliai, diegiami į šias sistemas, turi būti sudaromi individualiai. Ne išimtis ir infiltracijos nustatymo modelis, todėl čia pateiktas modelis tinka tik konkrečiam išnagrinėtam atvejui. Tačiau modelio parengimo principai visiems pastatams bus tokie patys.

Kompiuterinio modelio schema pateikta 21 ir 22 paveiksluose. 21 paveiksle pateiktoje schemoje pavaizduoti metodai, kuriais į modelį integruojama neapibrėžties analizė.



21 pav. Kompiuterinio modelio infiltracijos vertinimui pagal šilumos kiekių balansą neapibrėžties analizės pirma schema (MKA – Monte Karlo analizė, SA – statistinė analizė, PST – paklaidų sumavimo taisyklės)

Kompiuterinis modelis sudarytas iš dviejų etapų. Pirmajame etape pagal pradinis įvesties duomenis įvertinami visų šilumos kiekių balanso dedamųjų, išskyrus infiltracijos dedamąją, verčių geriausi įverčiai ir jų neapibrėžtis.

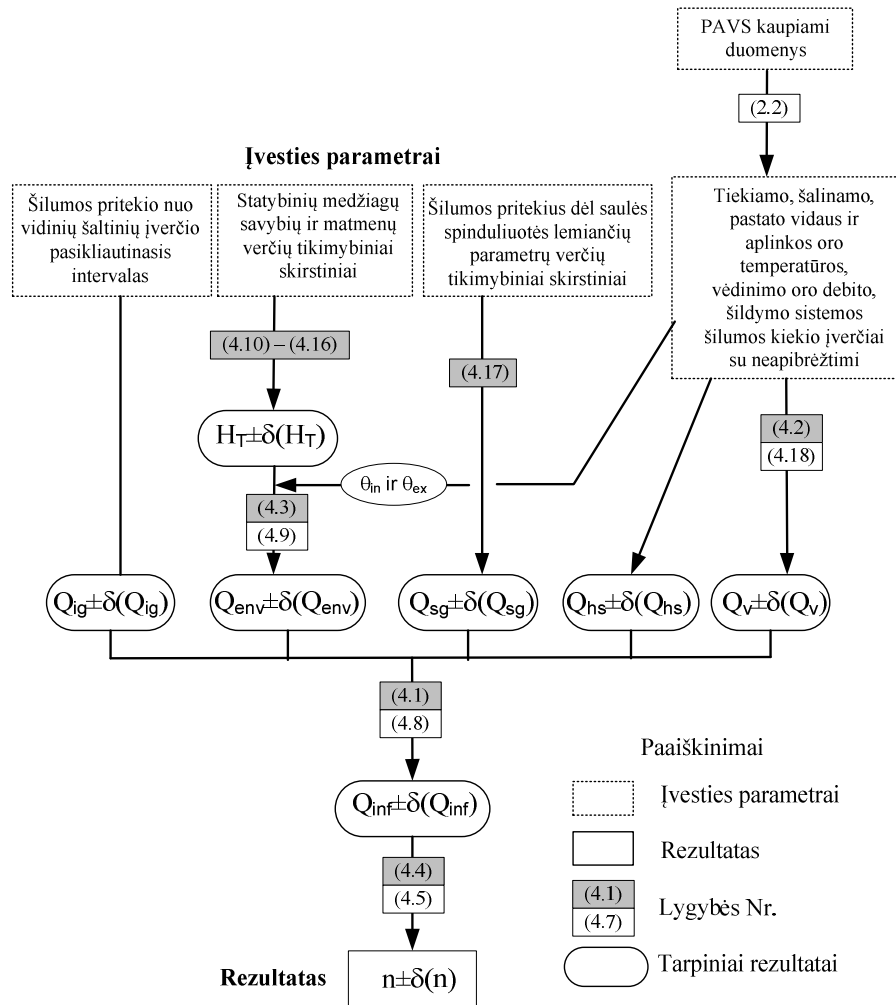
Šilumos kiekis, tiekiamas ar šalinamas vėdinimo sistemomis Q_v ir šilumos kiekis, tiekiamas (šalinamas) šildymo (arba vėsinimo) sistemomis, Q_{hs} įvertinami pagal matavimų duomenis, sukauptus PAV sistemose. Šios šilumos kiekių balanso dedamosios priklauso nuo parametrų, kurių neapibrėžtis yra A tipo ir įvertinama statistiniais duomenų analizės metodais, aprašytais 2.3 skyrelyje. Kiekvieno parametro vertė nustatoma pagal (2.1) lygybę, o neapibrėžtis – pagal (2.2) lygybę.

Visos kitos šilumos kiekių balanso dedamosios gali būti vertinamos B tipo neapibrėžčiai taikomais metodais. Kadangi savitieji šilumos nuostoliai per išorines pastato atitvaras ir ilginius šilumos tiltelius H_T yra lemiami didelio kiekio įvesties parametrų, susijusių tarpusavyje sudėtingomis priklausomybėmis, šios dedamosios neapibrėžtis yra vertinama taikant Monte Karlo metodą. Kiekvieno įvesties parametro tikimybinis skirstinys ir jo parametrai šiuo atveju nustatoma remiantis visais prieinamais informacijos šaltiniais, kaip aprašyta 2.4 ir 4.3 skyreliuose. Atliekamai Monte Karlo analizei, nustatant savitųjų šilumos nuostolių per atitvaras ir ilginius šilumos tiltelius, kompiuterinis modelis sudarytas pagal (4.10–4.16) lygybes. Šilumos kiekio per atitvaras ir ilginius šilumos tiltelius vertė apskaičiuojama pagal (4.3) lygybę, o neapibrėžtis įvertinama naudojant paklaidų sumavimo taisykles, kaip tai parodyta (4.9) lygybėje.

Šilumos kiekio nuo vidinių šilumos šaltinių Q_{ig} ir šilumos kiekio dėl saulės spinduliuotės Q_{sg} įverčio ir neapibrėžties nustatymas aprašytas atitinkamai 4.3.2 ir 4.3.3 skyreliuose. Šilumos pritekio nuo vidinių šilumos šaltinių vertė ir jos neapibrėžtis įvertinamos tiesiogiai. Šilumos pritekis dėl saulės spinduliuotės vertinamas įvertinant atskirus jį įtakančius parametrus, todėl šiuo atveju taip pat naudojamas Monte Karlo metodas. Monte Karlo analizės modelis šiuo atveju sudarytas pagal (4.17) lygybę.

Antrajame etape, naudojantis šilumos kiekių balanso lygtimi ir paklaidų sumavimo taisyklėmis, iš pradžių nustatoma šilumos kiekių balanso dedamosios dėl infiltracijos, o iš jos ir oro kaitos dėl infiltracijos vertė ir neapibrėžtis.

22 paveiksle pateiktoje schemoje parodyta, iš kokių anksčiau aprašytų lygybių sudarytas skaičiavimo modelis. Pilkos spalvos langeliuose pažymėti lygybių, išreiškiančių funkcines priklausomybes tarp įvesties parametrų ir rezultatų, numeriai, o baltos spalvos langeliuose įrašyti numeriai lygybių, pagal kurias skaičiuojama atitinkamų įverčių neapibrėžtis, kai ji nustatoma remiantis paklaidų sumavimo taisyklėmis.



22 pav. Kompiuterinio modelio infiltracijos vertinimui pagal šilumos kiekį balansą neapibrėžties analizės antra schema

Modelis tikslingai sudarytas taip, kad būtų matomas ne tik galutinis, bet ir tarpiniai rezultatai. Tai leidžia analizuoti, kurie parametrai galutinio rezultato neapibrėžtį nulemia stipriausiai ir atitinkamai koreguoti įvesties parametrų neapibrėžtį.

4.5. Modeliavimo rezultatų palyginimas su matavimų duomenimis

Dalies šiame skyrelyje pateikiamų rezultatų pagrindu buvo parengtas ir tarptautinėje mokslinėje konferencijoje „Energija pastatams“ skaitytas pranešimas, atspausdintas šios konferencijos pranešimų rinkinyje (Sribikytė, Juodis 2004a). Pagrindiniai rezultatai buvo publikuoti periodiniame mokslo leidinyje (Jaramienė, Juodis 2006).

Šilumos nuostolių per atitvaras tyrimas atliekamas kompiuteriniu modeliu, sukurtu Monte Karlo metodo pagrindu, kaip aprašyta 4.4 skyrelyje. Siekiant patikrinti sukurtą modelį, atliktas realių šilumos sąnaudų skirtumo tarp identiškų daugiabučių gyvenamųjų pastatų ir modeliu gautos neapibrėžties palyginimas.

Atliekant tyrimą modelis buvo modifikuotas taip, kad įvertintų ne tik šilumos nuostolius per atitvaras, bet ir kitas šilumos kiekių balanso, būdingo daugiabučiams namams, dedamąsias. Vietoje savitųjų šilumos nuostolių per atitvaras, modifikuoto modelio rezultatas yra šilumos sąnaudos, tenkančios vienam kvadratiniam metrui šildomo ploto:

$$q = \frac{((H_r + \rho \cdot c \cdot n \cdot V) \cdot (\theta_m - \theta_{ex}) - \eta_o \cdot \Psi_{hg}) \cdot 732}{A_f \cdot 1000}, \quad (4.19)$$

čia

q – savitasis pastato šilumos mėnesio poreikis $\left(\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{mėn.}} \right)$;

η_o – šilumos pritekio nuo vidinių šilumos šaltinių panaudojimo koeficientas;

732 – valandų skaičius per standartinį mėnesį (h/mėn.).

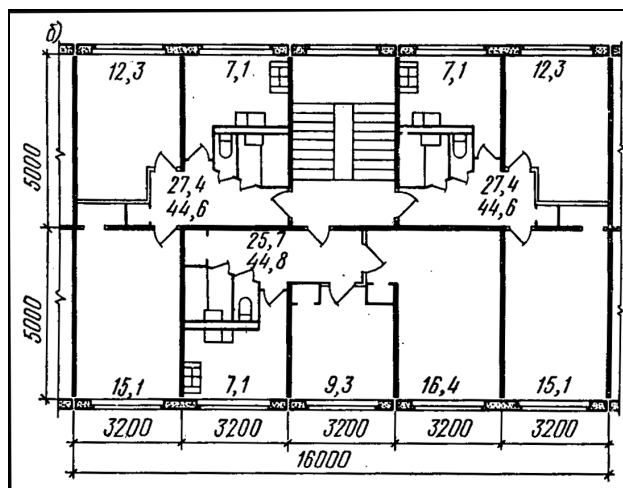
A_f – pastato bendrasis plotas (m^2).

Kai patalpose nėra šilumos reguliavimo įtaisų, šilumos pritekio nuo vidinių šilumos šaltinių panaudojimo koeficientas yra lygus 0,1 (STR 2.09.04...2002).

Standartiniu mėnesiu čia laikomas mėnuo, kurio vidutinė lauko oro temperatūra yra 0,2 °C, o trukmė 30,5 parų arba 732 valandos. Saulės spinduliuotės intensyvumas atitinka vidutinį vasario mėn. intensyvumą.

Modelio patikrinimui analizuojamas senos statybos daugiabutis gyvenamasis namas. Toks pastatas reprezentuoja tipinį 1960–1980 metų statybos gyvenamųjų pastatų grupę, kuri sudaro apie ketvirtadalį viso Lietuvos gyvenamojo ploto. Tik šių pastatų grupėje galima rasti identiškų arba labai mažai besiskiriančių pastatų, be to, egzistuoja sukaupta nemaža duomenų bazė apie šių pastatų šilumos suvartojimą, nes dauguma daugiabučių yra aprūpinami šiluma iš centralizuotų šilumos tiekimo sistemų, kuriose už suvartotą šilumą atsiskaitoma pagal

pastatuose įrengtus šilumos apskaitos prietaisus. Šią pastatų grupę sudaro daugiausia penkiaaukščiai ir devynaukščiai namai, pastatyti iš $1100\text{--}1200\text{ kg/m}^3$ tankio keramzito blokų. Analizei pasirinktas penkiaaukštis pastatas, kurio kiekvienas aukštas sudarytas iš trijų tipinių sekcijų, kurios planas pavaizduotas 23 paveiksle.



23 pav. Tipinio daugiabučio aukšto sekcijos planas

Kaip jau minėta, išorinės nagrinėjamo pastato sienos yra iš keramzitbetonio blokų, pastato grindys yra virš nešildomo rūšio, stogas sutapdintas. Bendras šildomas pastato plotas 2400 m^2 . Išorinių pastato atitvarų plotai pateikti 13 lentelėje.

13 lentelė. Analizuojamo daugiabučio gyvenamojo pastato išorinių atitvarų plotai

Pastato išorinės atitvaros	Atitvarų plotas, m^2
Išorinės butų sienos	1089,75
Išorinės laiptinių sienos	111,60
Pirmo aukšto butų grindys	432,00
Pirmo aukšto laiptinių grindys	48,00
Stogas virš butų	432,00
Stogas virš laiptinių	48,00
Butų langai	506,25
Laiptinių langai	32,40
Išorinės laiptinių durys	6,00

Identiškuose daugiabučiuose gyvenamuosiuose pastatuose tomis pačiomis aplinkos sąlygomis suvartojamas šilumos kiekis gali skirtis dėl statybinių medžiagų savybių variacijos, oro kaitos ir šilumos pritekio, kuriuos lemia gyventojų elgesys, pvz., vėdinimas atidarant langus, buitinių prietaisų naudojimo intensyvumas ir pan. Modelyje įvesties parametrai ir jų neapibrėžtis nusakomi tikimybiniu skirstiniu, kurių tipas ir parametrai pateikti 14 lentelėje.

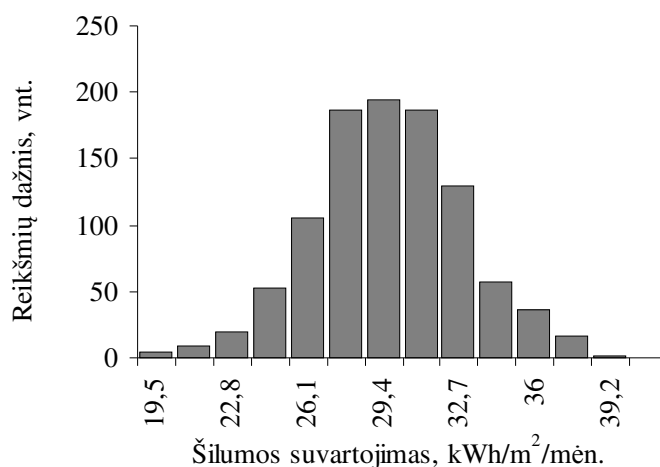
14 lentelė. Modelio daugiabučiui namui įvesties parametrai

Įvesties parametrai	Skirstinio tipas ir parametrai
Sienos šilumos perdavimo koeficientas, $W/(m^2 \cdot K)$	Log normalusis (1,25; 0,03)
Grindų šilumos perdavimo koeficientas, $W/(m^2 \cdot K)$	Log normalusis (1,43; 0,04)
Stogo šilumos perdavimo koeficientas, $W/(m^2 \cdot K)$	Log normalusis (0,69; 0,02)
Langu šilumos perdavimo koeficientas, $W/(m^2 \cdot K)$	Log normalusis (2,50; 0,06)
Oro kaita, h^{-1}	Log normalusis (0,85; 0,13)
Patalpų oro temperatūra butuose, °C	Normalusis (18,0; 0,45)
Oro temperatūra laiptinėse, °C	Normalusis (12,0; 0,30)
Šilumos pritekis nuo apšvietimo sistemų, W/m^2	Log normalusis (4,20; 0,21)
Šilumos pritekis nuo buitinių prietaisų, W/m^2	Log normalusis (2,70; 0,14)
Šilumos pritekis nuo žmonių, W/m^2	Log normalusis (3,10; 0,16)
Vidutinis saulės spinduliuotės intensyvumas, W/m^2	Tolydusis (32,4; 72,8)
Įstiklintų plotų saulės spinduliuotės praleisties faktorius	Log normalusis (0,75; 0,04)
Įstiklintos lango dalies plotas, m^2	Log normalusis (0,75; 0,04)
Pataisa dėl lango užtemdymo	Log normalusis (0,60; 0,03)

Kaip pateikta 14 lentelėje, vidutinio saulės spinduliuotės intensyvumo parametru priskirtas tolydusis skirstinys. Taip nuspręsta todėl, kad modeliuojant priimama, kad pastato vertikalių atitvarų orientacija su vienoda tikimybe gali būti bet kuri, pradedant nuo šiaurinės, baigiant pietine. Minimali reikšmė prilyginama vidutinei vasario mėn. reikšmei į šiaurės orientacijos atitvarą, o maksimali – į pietų orientacijos atitvarą. Kitiems tik teigiamas vertes galintiems įgyti parametrams priskirtas log normalusis skirstinys, o tokio apribojimo neturintiems parametrams – normalusis skirstinys.

Atlikus 1000 modeliavimo procedūrų gauta šilumos suvartojimo verčių sklaidos histograma pateikta 24 paveiksle. Horizontalioje ašyje atidėtas šilumos

suvartojimas, išreikštas kilovatvalandėmis, tenkančiomis vienam kvadratiniam šildomo ploto metrui. Vertikalioje ašyje atidėtas į kiekvieną šilumos suvartojimo intervalą patenkančių reikšmių kiekis.

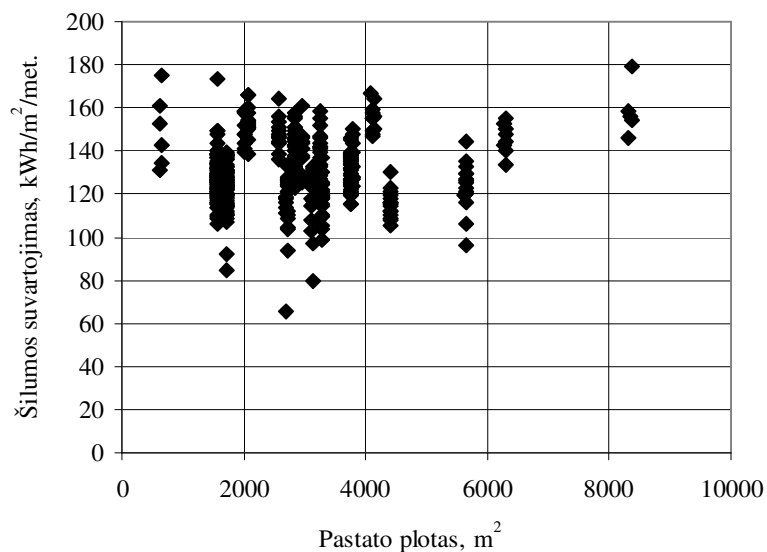


24 pav. Modeliavimu gautų verčių histograma

Kaip matyti iš 24 paveiksle pateiktos histogramos, modeliavimu gautos vertės pasiskirsto pagal normalųjį dėsnį. Šilumos suvartojimo vidurkis sudaro 28,8 kWh/m²/mėn., o standartinis nuokrypis 3,2 kWh/m²/mėn. Atlikto modeliavimo rezultatai rodo, kad šilumos vartojimo tikėtina sklaida, išreikšta iš vidurkio padalijus du standartinius nuokrypius, sudaro apie 22 proc. Ši sklaida yra nulėmta pastatų atitvarų savybių, infiltracijos ir kitų veiksnių variacijos.

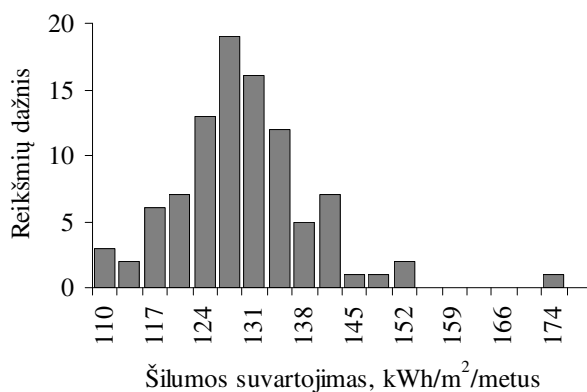
Modeliavimu gauta sklaida gali būti palyginta su faktinių šilumos sąnaudų sklaida identiškuose pastatuose. Tuo tikslu buvo surinkti visų Vilniaus daugiabučių namų šilumos sąnaudų per 2007 metus duomenys. Analizei buvo atrinkti tik senos statybos, pagal tipinius projektus pastatyti daugiabučiai. Modeliavimo rezultatas yra mėnesio sąnaudos, o faktiniai duomenys gauti metiniai, todėl galima lyginti tik verčių sklaidą, o ne pačias vertes.

Faktinių šilumos suvartojimo duomenų sklaida identiškuose pastatuose pa-vaizduota 25 paveiksle. Horizontalioje ašyje atidėti pastatų plotai, o vertikalioje – šilumos apskaitos prietaisais išmatuotas metinis šilumos suvartojimas tenkantis vienam pastato bendrojo ploto kvadratiniam metrui. Vienodo ploto pastatų grupes sudaro identiški pagal tipinius projektus pastatyti pastatai.



25 pav. Faktinės šilumos sąnaudos daugiabučiams pastatams

Kaip matyti 25 paveiksle, identiškų pastatų šilumos suvartojimo vertėms būdinga tam tikra sklaida. 26 paveiksle pateikta pastatų, kurių plotas yra nuo 1560 m² iki 1571 m², grupės šilumos suvartojimo verčių sklaidos histograma.



26 pav. Faktinių metinio šilumos suvartojimo verčių histograma

26 paveiksle pavaizduota didžiausios pastatų grupės šilumos vartojimo verčių histograma. 95 verčių pakanka, kad histograma įgytų normaliajam skirstiniui būdingą formą. Geriausiu įverčiu normaliojo skirstinio atveju yra vidurkis, lygus

127,8 kWh/m²/metus, o sklaidą galima išreikšti du standartinius nuokrypius padalijus iš vidurkio ir išreiškus procentais. Šios grupės atveju gauta 15 proc. sklaida. 15 lentelėje pateiktos visų pastatų grupių faktinio šilumos metinio suvartojimo duomenų sklaidos charakteristikos.

15 lentelė. Identiškų pastatų šilumos vartojimo sklaida

Mažiausias pastato plotas grupėje, m ²	Didžiausias pastato plotas grupėje, m ²	Pastatų skaičius grupėje	Standartinis nuokrypis	Santykinė sklaida, proc.
8327,85	8378,04	5	12,18	15
5634,14	6314,46	24	14,78	23
4405,29	4411,61	15	6,51	11
4093,18	4129,51	11	6,51	8
3755,85	3776,53	47	8,66	13
3241,34	3251,22	16	9,04	13
3120,52	3126,8	21	12,68	21
2949,4	2959,61	13	10,11	15
2848,5	2852,1	29	8,98	13
2699,69	2714,37	25	14,4	25
2004,27	2023,98	9	7,43	10
1725,58	1728,2	19	6,43	10
1720,02	1722,8	18	8,1	13
1712,7	1716	32	12,3	20
1560,2	1570,79	95	9,75	15

Kaip matyti iš 15 lentelėje pateiktų analizės rezultatų, faktinių duomenų sklaida sudaro nuo 8 proc. iki 25 proc., vidutinė sklaida 15 proc.

4.6. Realus pastato infiltracijos nustatymas

Šiame skyrelyje pateikiamas siūlomo metodo pritaikymas realiam pastatui. Oro kaita dėl infiltracijos yra nustatoma dideliame prekybos centrai naudojant faktinius duomenis, sukauptus šio pastato automatizuoto valdymo sistemoje.

4.6.1. Pastato charakteristikos

Tiriamasis pastatas – 16,8 tūkst. m² bendrojo ploto prekybos centras, esantis Kaune. Prekybos centras pastatytas ir pradėtas eksploatuoti 1999 metais. Pastatą sudaro prekybos salė su aplinkui įrengtomis nesandariomis stiklinėmis atitvaromis atskirtomis nedidelėmis parduotuvėmis ir pagalbinės patalpos, sandariomis vidinėmis atitvaromis atskirtos tiek nuo prekybos salės, tiek viena nuo kitos. In-

filtracijos tyrimui buvo pasirinkta prekybos salės su parduotuvėmis zona, kurios plotas 13 734, 00 m², tūris 70 835,00 m³.

Tiekiamo oro temperatūra reguliuojama pagal užduotą šalinamo oro temperatūrą. Tiekiamo oro temperatūra ribojama nuo 12 iki 25 °C.

Buvo pasirinkta pastato šilumos kiekių balansą sudaryti ir infiltraciją vertinti tik nakties metu, nes dienos metu šio pastato atveju yra labai daug nežinomųjų: dienos metu prekybos salę aptarnauja visos trys bendrosios apykaitos sistemos, kurios dar kartu aptarnauja ir likusią pastato dalį, prekybos salei tiekiamo oro kiekis nėra atskirai matuojamas; darbo metu prekybos salėje veikia technologiniai įrenginiai (pvz., kepimo įranga, kurios šilti paviršiai neizoliuoti nuo aplinkos), kurių šilumos išsiskyrimai duotu atveju buvo nežinomi.

Prekybos salėje instaliuotos dirbtinio apšvietimo sistemos galia – 320,4 kW. Apšvietimo sistema veikia visą parą. Visa apšvietimo sistemos sunaudojama energija virsta šiluma, tačiau nėra aišku, kuri dalis šios šilumos patenka į vertinamą erdvę. Kadangi prekybos salėje įrengtos efektyvios lempos, didžioji dalis jų energijos yra išspinduliuojama ir pasiekia darbo zoną. Kadangi vertinamas paros laikas yra nuo 24.00 iki 6.00 val., todėl šilumos pritekio dėl žmonių ir saulės spinduliuotės nėra. Šiuo metu neveikia ir technologiniai įrenginiai, išskiriantys daugiausia šilumos, tačiau veikia šaldikliai. Šaldiklių skaičius ir charakteristikos analizuojamo pastato atveju nežinomi, todėl priimta, kad 1 m² grindų ploto tenka 2 W šilumos pritekio dėl šaldiklių veikimo, kas sudaro 27,5 kW. Priimama, kad šilumos pritekio geriausias įvertis sudaro 348 kW, neapibrėžtis 20 proc.

4.6.2. Pastato savitieji šilumos nuostoliai per atitvaras

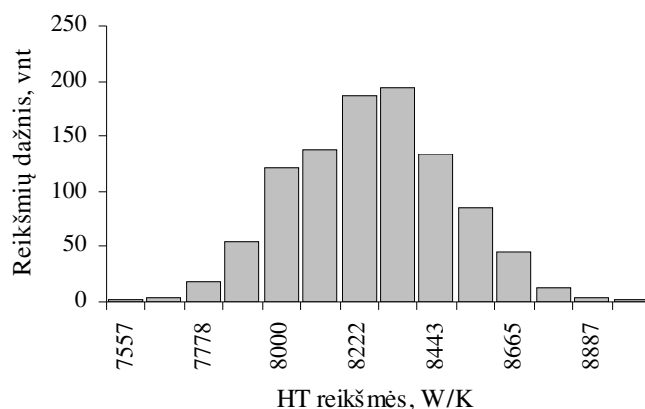
Vertinamos zonos išorinių atitvarų šilumos perdavimo koeficientai pateikti 16 lentelėje.

16 lentelė. Prekybos centro atitvarų šilumos perdavimo koeficientai

Atitvara	Atitvarų plotai, m ²	Šilumos perdavimo koeficientas, W/(m ² ·K)
Išorinės sienos	2175,80	0,32
Langai	847,31	2,00
Durys	70,84	2,00
Stogas	7551,02	0,25
Grindys	7231,30	0,50

Vertinant priimta, kad atitvarų plotai išmatuoti su 1 proc. neapibrėžtimi, o šilumos perdavimo koeficientų neapibrėžtis kiekvienos rūšies atitvarai yra 5 proc.

27 paveiksle pateikiama savitųjų šilumos nuostolių per atitvaras verčių histograma, gauta Monte Karlo metodu atlikus neapibrėžties analizę. Atliekant analizę buvo atlikta 1000 modeliavimo procedūrų.



27 pav. Savitųjų šilumos nuostolių per atitvaras verčių histograma

Savitieji šilumos nuostoliai per tiriamos zonos išorines atitvaras sudaro 8202 W/K. Neapibrėžties analizė, parodė, kad analizuojamo pastato savitųjų šilumos nuostolių per atitvaras neapibrėžtis sudaro 451 W/K, t.y. 5,5 proc.

Kadangi tiriamajam pastatui trūko duomenų, leidžiančių įvertinti šilumos nuostolius per ilginius šilumos tiltelius, priimta, kad tai lemia papildomą 10 proc. neapibrėžtį, ir bendra savitųjų šilumos nuostolių suma per pastato atitvaras ir ilginius šilumos tiltelius sudaro 15,5 proc. arba 1271 W/K.

4.6.3. Matuojamų duomenų analizė

Tyrimui naudojami duomenys, sukaupti pastato automatizuoto valdymo sistemoje 2002 m. sausio – kovo mėnesiais, atrenkant matavimų, atliktų nuo 24.00 iki 6.00 valandos, duomenis. Matavimai buvo kaupiami kas dvi valandas, todėl turimas per šį laikotarpį matavimo duomenų masyvas sudarytas iš 224 serijų. Buvo matuojamos šios parametru vertės:

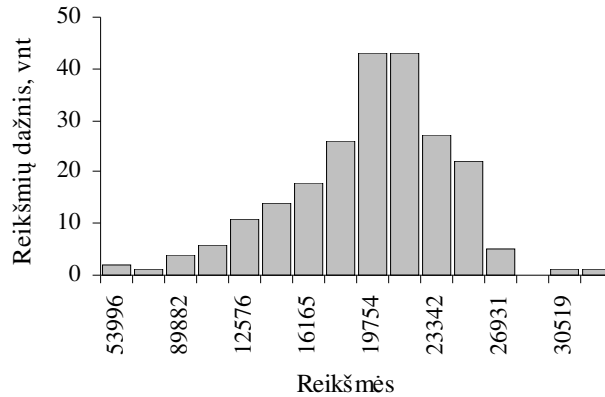
- mechaninių vėdinimo sistemų tiekiamo oro debitas;
- mechaninių vėdinimo sistemų tiekiamo oro temperatūra;
- mechaninių vėdinimo sistemų šalinamo oro temperatūra;
- lauko oro temperatūra.

Šalinamo oro debitas yra lygus tiekiamo oro debitui, o patalpų vidaus oro temperatūra priimama lygi vėdinimo sistema šalinamo oro temperatūrai. Nakties metu prekybos salė vėdinama viena vėdinimo sistema, tiekiamo ir šalinamo oro

debitas sudaro vidutiniškai 15 638 m³/h. Per visą vertinamąjį laikotarpį vėdinimo sistemos veikė vėsinimo režimu, t.y. tiekiamo oro temperatūra buvo žemesnė negu šalinamo oro temperatūra. Todėl toliau vėdinimo sistema tiekiamas šilumos srautas dėl srauto krypties žymimas kaip neigiamas dydis.

Oro temperatūra buvo matuojama 0,2 °C tikslumu, o ventiliatorių sukuriama slėgis – 1 proc. tikslumu.

Pagal faktinius matavimų duomenis buvo apskaičiuotas šilumos srauto skirtumas tiekiant ir šalinant orą vėdinimo sistemomis. Šių šilumos srautų skirtumo verčių sklaidą per vertinamąjį laikotarpį atspindi 28 paveiksle pateikta histograma.



28 pav. Šilumos kiekio, patekusio su vėdinimo oru, verčių histograma

17 lentelėje pateikti statistinės faktinių duomenų analizės rezultatai.

17 lentelė. Pastato šilumos srauto su vėdinimo oru matavimo neapibrėžties rezultatai

Vėdinimo dedamosios matavimų vidurkis	186 392
Matavimų standartinis nuokrypis	44 308
Matavimų skaičius	224
Stjudento kriterijus $t_{\alpha}(N-1)$	1,96
Vidurkio neapibrėžtis $\frac{S}{\sqrt{N}} \cdot t_{\alpha}(N-1)$	5 803
Vidurkio neapibrėžtis, proc.	3,1
Vidurkio pasikliautinojo intervalo minimali vertė	180 590
Vidurkio pasikliautinojo intervalo maksimali vertė	192 195

Kaip matyti iš 17 lentelėje pateiktų statistinės faktinių duomenų analizės rezultatų, šilumos srauto su vėdinimo oru vidutinės vertės pasikliautinis intervalas yra [180 590 W; 192 195 W]. Matavimų laikotarpiu vidutinė lauko oro temperatūra buvo 1,9 °C su 0,5 °C neapibrėžtimi, o zonos vidaus oro vidutinė temperatūra buvo 19,5 °C su 0,1 °C neapibrėžtimi. Iš čia apskaičiuojamas šilumos kiekio, pašalinamo su vėdinimo oru per vertinamąjį laikotarpį, geriausias įvertis yra -41,8 MWh, o jungtinės neapibrėžties vertinimo metodais nustatyta šio dydžio neapibrėžtis yra - 1,3 MWh arba 3,1 proc.

4.6.4. Infiltracijos vertinimo rezultatai

Nustačius atskirų šilumos kiekių balanso dedamųjų geriausius įverčius ir jų neapibrėžtį, skaičiuojamas oro kaitos dėl infiltracijos geriausias įvertis ir neapibrėžtis. Oro kaitos dėl infiltracijos vertinimo pagal faktinius matavimo duomenis, sukauptus prekybos centro PAV sistemoje, rezultatai pateikti 18 – 20 lentelėse.

18 lentelė. Šilumos kiekių balanso dedamųjų absoliutinės vertės

Q_{inf} , MWh	Q_v , MWh	Q_{ig} , MWh	Q_{sg} , MWh	Q_{hs} , MWh	Q_{env} , MWh
-3,9	-41,8	78,0	0,0	0,0	-32,3

19 lentelė. Atskirų šilumos kiekių balanso dedamųjų neapibrėžtis, MWh

$\delta(Q_{inf})$	$\delta(Q_v)$	$\delta(Q_{ig})$	$\delta(Q_{sg})$	$\delta(Q_{hs})$	$\delta(Q_{env})$
16,5	1,3	15,6	-	-	5,1
421 proc.	3,1 proc.	20 proc.	-	-	15,8 proc.

20 lentelė. Kiekvieno lygybės (4.5) dėmens indėlis į bendrą gaunamo rezultato neapibrėžtį

$\delta(n)$, h ⁻¹	n , h ⁻¹	$\frac{\delta(n)}{ n }$	$\frac{\delta(Q_{inf})}{ Q_{inf} }$	$\frac{\delta(V)}{ V }$	$\frac{\delta(\Delta\theta)}{ \Delta\theta }$
0,17	0,04	421 proc.	421 proc.	0,1 proc.	3,1 proc.

Nustatyta per laikotarpį nuo 2002 m. sausio 24 d. iki kovo 20 d. nakties metu buvusi vidutinė infiltracija yra 0,04 h⁻¹, tačiau vertinimo neapibrėžtis yra daugiau nei keturis kartus didesnė už patį rezultatą. Tokią rezultato neapibrėžtį lemia didelė šilumos pritekio vertinimo absoliutinė neapibrėžties vertė ir mažas infiltracijos intensyvumas. Taip pat didelę įtaką turi ir informacijos apie atitvarų konstrukcijas trūkumas, lėmęs didelę šilumos kiekio dėl nuostolių per atitvaras ir ilginis šilumos tiltelius neapibrėžtį.

4.7. Ketvirtojo skyriaus apibendrinimas

Ketvirtajame skyriuje aprašytas šilumos kiekių balanso modelis oro kaitos dėl infiltracijos nustatymui. Pateikta šiuo metodu gaunamo rezultato neapibrėžties analizės schema, integruojant Monte Karlo, jautrumo analizės ir paklaidų sumavimo metodus. Parengtas šilumos kiekių balanso metodo infiltracijos nustatymui su integruota neapibrėžties analize algoritmas.

Modelio tinkamumas patikrintas lyginant modeliavimo rezultatus su faktiniais duomenimis. Modeliuojant gauta šilumos vartojimo daugiabučiame name verčių sklaida visiškai atitiko faktinę. Todėl galima daryti išvadą, kad taikomas modelis yra tinkamas, o įvesties parametrų neapibrėžties įvertinimas gerai atspindi realybę.

Atlikus infiltracijos vertinimą pagal realaus pastato šilumos kiekių balansą, sudarytą naudojant faktinius duomenis, sukauptus šio pastato PAV sistemoje, buvo nustatyta, kad šio pastato vidutinė oro kaita dėl infiltracijos per vertinamąjį laikotarpį sudarė $0,04 \text{ h}^{-1}$. Tačiau vertinimo neapibrėžtis siekia daugiau nei 400 proc. ir todėl nėra priimtina. Tokią vertinimo neapibrėžtį lėmė tai, kad tyrimo atveju turėta labai mažai informacijos apie pastate esančius vidinius šilumos šaltinius, jų charakteristikas ir veikimo režimus, taip pat atitvarų konstrukcijas. Todėl negalima daryti išvados apie šiame skyriuje tirtą pastato tinkamumą arba netinkamumą infiltracijos vertinimui pagal šilumos kiekių balansą. Pagrindiniu šiame skyriuje atliktos analizės rezultatu galima laikyti tai, kad nustatyti sunkumai, su kuriais susiduriama realiais atvejais renkant informaciją, reikalingą pastato šilumos kiekių balanso sudarymui.

Atliktas realiame pastate kaupiamų duomenų tyrimas parodė, kad pastatuose įrengtose PAV sistemose kaupiama pakankamai duomenų, leidžiančių nustatyti šilumos kiekius dėl mikroklimato kondicionavimo sistemų veikimo su nedidele neapibrėžtimi. Kadangi egzistuoja teorinė galimybė turint daugiau duomenų apie aukščiau minėtus faktorius tiksliau nustatyti ir kitas šilumos kiekių balanso dedamąsias, reikalinga atlikti tolimesnę analizę. Turimų realių duomenų tokiai analizei nepakako, todėl kitame skyriuje tyrimui duomenys generuojami dirbtinai.

Oro infiltracijos vertinimo neapibrėžties jautrumo analizė

Infiltracijos vertinimo pagal pastato šilumos kiekių balansą galimybės ir ribos yra lemiamos tokio vertinimo rezultatų neapibrėžties. Todėl norint nustatyti metodo taikymo ribas ir sąlygas, atliekama infiltracijos įvertinimo neapibrėžties jautrumo analizė.

5.1. Kompiuterinis pastato šilumos kiekių balanso imitavimo modelis

Kaip aišku iš 4 skyriuje atliktos realaus pastato analizės rezultatų, faktinių duomenų naudojimas tokiai analizei komplikuoatas, todėl vietoje faktinių panaudojami dirbtinai generuojami duomenys. Siekiant dirbtinai generuoti duomenis, reikalingus neapibrėžties analizei, pasinaudojant MS Excel ir MS Visual Basic for Application priemonėmis buvo sudarytas kompiuterinis pastato šilumos kiekių balanso imitavimo modelis. Atsitiktiniai skaičiai buvo generuojami MS Excel įskiepiu PopTools 3.0.2 (Hood, 2008).

Darbe atliekamai analizei sukurtas naujas modelis, o ne naudoti esami todėl, kad reikalinga modeliuoti parametrų neapibrėžtį. To kol kas neleidžia įprastos

pastato inžinerinių sistemų ir mikroklimato imitacinio modeliavimo programos. Egzistuoja daug šilumos kiekių balanso principu paremtų šilumos poreikio skaičiavimo programų, tačiau daugumoje jų įvedamų parametru ir gaunamų rezultatų neapibrėžtis nėra įvertinama. Atlikta tokių programų apžvalga parodė, kad neapibrėžties vertinimo problema šilumos poreikio skaičiavime imta nagrinėti tik pastaruosiu laiku.

Matavimų duomenys, reikalingi pastato šilumos kiekių balanso sudarymui, tai pastato vidaus ir aplinkos oro temperatūra, į pastatą mechaninėmis vėdinimo sistemomis tiekiamo oro temperatūra ir debitas, šildymo sistemomis tiekiamas šiluma.

Duomenų iš PAV sistemų generavimui sudaromas hipotetinis pastato modelis. Pastato atitvarų šilumos izoliacija atitinka norminių dokumentų reikalavimus. Pastate įrengta MKS, kuri palaiko pastovią temperatūrą. MKS parametrai kaupiami PAV sistemose.

Kompiuterinis modelis yra parengtas remiantis 4 skyriuje pateikta šilumos kiekių balanso schema ir aprašymu. Žemiau detalai aprašomas kiekvienos iš šilumos kiekių balanso dedamųjų modeliavimui taikyti metodai ir funkcijos.

5.1.1. Oro infiltracijos modeliavimas

Imitaciniuose modeliuose paprastai naudojami keli besiskiriantys savo sudėtingumu oro infiltracijos modeliavimo būdai: nuo pusiau empirinių iki pagrįstų detaliu fluidų judėjimo modeliavimu (Hensen, 1991). Šiame darbe pasirinktas empirinis LBL metodas, leidžiantis pagal užsiduotą pastato sandarumo vertę generuoti valandines oro kaitos dėl infiltracijos vertes, priklausomai nuo kintančios aplinkos oro temperatūros ir vėjo greičio.

Šilumos srautas dėl infiltracijos generuojamas pagal priklausomybę:

$$\Phi_{\text{inf}}(t) = c \cdot \rho \cdot V \cdot n(t) \cdot (\theta_{\text{in}}(t) - \theta_{\text{ex}}(t)) \quad (5.1)$$

čia

$\Phi_{\text{inf}}(t)$ – šilumos srautas dėl oro infiltracijos laiko momentu t (W);

$n(t)$ – oro kaita dėl infiltracijos laiko momentu t (W).

Oro kaitos dėl infiltracijos nustatymas pagal LBL modelį aprašytas 1.3.3 skyrelyje. Modeliuojant naudotos vidutinės LBL metodo parametru reikšmės. Kompiuteriniame pastato šilumos kiekių balanso imitavimo modelyje nenumatytų faktorių poveikis imituojamas įvedant atsitiktinę funkciją, turinčią log normalųjį pasiskirstymą.

5.1.2. Šilumos pritekio modeliavimas

Šilumos pritekis nuo vidinių šilumos šaltinių imituojamas taikant du šilumos išsiskyrimo režimus, priklausomai nuo paros laiko. Kiekvieno režimo atveju vertės generuojamos kaip atsitiktinis dydis, pasiskirstęs pagal log normalųjį dėsnį, kurio parametrai atspindi vidutinę vertę ir verčių sklaidą.

Šilumos pritekis dėl saulės spinduliuotės varijuoja priklausomai nuo paros laiko ir priklausomai nuo tokių atsitiktinių faktorių kaip debesuotumas ir atitvarų užtemdymas dėl vartotojų elgesio. Valandinės šilumos pritekio dėl saulės spinduliuotės vertės vertinamos pagal faktinius debesuotumo duomenis ir naudojant metodą, pateikiamą statybos techniniame reglamente (STR 2.09.04...2002).

5.1.3. Šilumos nuostolių per atitvaras modeliavimas

Laikoma, kad savitieji pastato šilumos nuostoliai nekinta. Šilumos srauto vertės dėl šilumos nuostolių per atitvaras generuojamos pagal priklausomybę:

$$\Phi_{env}(t) = H_T \cdot (\theta_{in}(t) - \theta_{ex}(t)), \quad (5.2)$$

čia

$\Phi_{env}(t)$ – šilumos srautas dėl šilumos nuostolių per atitvaras ir ilginis šilumos tiltelius laiko momentu t (W);

H_T – savitieji šilumos nuostoliai per atitvaras ir ilginis šilumos tiltelius (W/K);

$\theta_{in}(t)$ – patalpos oro temperatūra laiko momentu t (°C);

$\theta_{ex}(t)$ – lauko oro temperatūra laiko momentu t (°C).

5.1.4. Patalpų oro temperatūros modeliavimas

Nors patalpų oro temperatūra palaikoma automatiškai reguliuojant MKS pagal užsiduotą šios temperatūros vertę, tačiau galimas nedidelis šios temperatūros vertės svyravimas.

Kompiuteriniame pastato šilumos kiekių balanso imitavimo modelyje taikoma prielaida, kad patalpų oro temperatūros faktinės vertės yra pasiskirsčiusios pagal normalųjį skirstinį, kurio vidurkis yra nustatyta palaikoma vertė, o standartinis nuokrypis lygus 1 °C. Standartinio nuokrypio vertė pagrįsta B komforto lygiui keliamo reikalavimo, kad temperatūra svyruotų ne daugiau kaip 2 °C.

$$\theta_{in}(t) = N(\mu; \sigma), \quad (5.3)$$

čia

$\theta_{in}(t)$ – pastato vidaus oro temperatūra laiko momentu t (°C);

$\mu = \theta_{in_set}$ – palaikoma patalpų oro temperatūra (°C);

σ – patalpų oro temperatūros faktinių verčių skirstinio standartinis nuokrypis (°C).

5.1.5. Mikroklimato kondicionavimo sistemų darbo režimo modeliavimas

Kompiuteriniame pastato šilumos kiekių balanso imitavimo modelyje priimta, kad šildymo sistema veikia kai lauko oro temperatūra yra žemesnė nei 10 °C ir reguliuojama priklausomai nuo lauko oro temperatūros. Tuomet šildymo sistemos funkcionavimas gali būti aprašomas šiomis priklausomybėmis:

$$\text{jei } \theta_{ex}(t) < 10 \text{ } ^\circ\text{C}, \text{ tai } \Phi_{hs} = \frac{\Phi_{hs(\text{design})} \cdot (\theta_{in}(t) - \theta_{ex}(t))}{\theta_{in_design} - \theta_{ex_design}}, \quad (5.4)$$

$$\text{jei } \theta_{ex}(t) \geq 10 \text{ } ^\circ\text{C}, \text{ tai } \Phi_{hs} = 0, \quad (5.5)$$

čia

$\Phi_{hs(\text{design})}$ – šildymo sistemos projektinė galia (W).

Priimta, kad mechaninio vėdinimo sistemomis tiekiamo ir šalinamo oro debitas yra pastovus. Tiekiamo oro temperatūra automatiškai reguliuojama pagal nustatytą patalpos oro temperatūrą. Tuomet tiekiamo oro temperatūra modelyje yra skaičiuojama pagal šią priklausomybę:

$$\theta_s(t) = \theta_{exh}(t) + \frac{\Phi_{inf} - \Phi_{hg} - \Phi_{hs} + \Phi_{env}}{c \cdot \rho \cdot L_v(t)}, \quad (5.6)$$

čia

$\theta_s(t)$ – tiekiamo oro temperatūra laiko momentu t (°C);

$\theta_{exh}(t)$ – šalinamo oro temperatūra laiko momentu t (°C);

$L_v(t)$ – sistemos oro debitas laiko momentu t (m³/h).

Modeliuojant priimama, kad oras šalinamas iš darbo zonos, todėl šalinamo oro temperatūra yra lygi patalpų oro temperatūrai:

$$\theta_{exh}(t) = \theta_{in}(t). \quad (5.7)$$

Modeliuojant priimama, kad išlaikomas pastovus mechaninio vėdinimo sistemų tiekiamas ir šalinamas oro debitas. Tačiau dėl įvairių atsitiktinio pobūdžio veiksnių galimas nežymus debito svyravimas, kuris imituojamas laikant, kad faktinės vertės yra pasiskirsčiusios pagal normalųjį skirstinį, kurio vidurkis yra

nustatyta palaikoma vertė, o standartinis nuokrypis lygus 5 proc. nuo vidurkio vertės.

$$L_v(t) = N(\mu; \sigma), \quad (5.8)$$

čia

$\mu = L_{v_set}$ – palaikomas mechanine vėdinimo sistema tiekiamo oro debitas (m^3/h).

σ – mechanine vėdinimo sistema tiekiamo oro debito faktinių verčių skirstinio standartinis nuokrypis (m^3/h).

5.1.6. Matavimo duomenų modeliavimas

Kaip jau buvo minėta, kompiuterinio pastato šilumos kiekių balanso imitavimo modelio užduotis yra generuoti tyrimui reikalingus duomenis, kurie praktikoje taikant šilumos kiekių balanso metodą infiltracijos nustatymui būtų gaunami matavimais.

Faktinės parametru vertės imituojamos:

- Patalpų oro temperatūros faktinė vertė laiko momentu t $\theta_{in}(t)$ generuojama kaip aprašyta 5.1.4 skyrelyje.
- Mechanine vėdinimo sistema tiekiamo oro temperatūros faktinė vertė laiko momentu t $\theta_s(t)$ yra generuojama kaip aprašyta 5.1.5 skyrelyje.
- Mechanine vėdinimo sistema tiekiamo oro debito faktinė vertė laiko momentu t $L_v(t)$ yra generuojama kaip aprašyta 5.1.5 skyrelyje.

Pagal faktines parametru vertes, imituojant matavimų lemiamą netikslumą, matavimų duomenys generuojami pagal normalųjį skirstinį:

$$\tilde{\theta}_{in}(t) = N(\theta_{in}(t); \sigma_m) \quad (5.9)$$

$$\tilde{\theta}_s(t) = N(\theta_s(t); \sigma_m) \quad (5.10)$$

čia

σ_m – temperatūros matavimo tikslumas ($^{\circ}C$).

$$\tilde{L}_v(t) = N(L_v(t); \sigma_m) \quad (5.11)$$

čia

σ_m – oro debito matavimo tikslumas (m^3/h).

Pastato aplinkos oro temperatūros faktinė vertė laiko momentu t $\theta_{ex}(t)$ yra imama pagal turimus faktinius matavimų duomenis.

5.2. Atliekamos analizės schema ir pradiniai duomenys

5.2.1. Tiriamų pastatų variantų pasirinkimo pagrindimas

Šilumos kiekių balanso metodas netinka infiltracijai nustatyti pastatuose, kurių vidinė erdvė suskaidyta atitvaromis (pvz., daugiabučiai gyvenamieji namai, administraciniai pastatai, ligoninės, mokymo įstaigos ir kiti viešosios paskirties pastatai). Šilumos kiekių balanso metodas tokiuose pastatuose galėtų būti pritaikytas tik atskiroms patalpoms. Todėl tokio tipo pastatai toliau nenagrinėjami.

Kiti pastatai gali būti suskirstyti į keletą grupių, kurių kiekvienos šilumos kiekių balansas turi išskirtinių savybių. Individualūs gyvenamieji namai pasižymi nedideliu plotu ir tūriu, geromis atitvarų šiluminėmis savybėmis, vidutinio dydžio ir nepastoviu šilumos pritekėjimu, natūraliomis vėdinimo sistemomis. Būdinga, kad šiuose pastatuose vidaus oro temperatūra palaikoma šildymo sistemomis, kuriose šilumnešis yra vanduo. Mechaninės vėdinimo sistemos įrengiamos retai, dar rečiau jos atlieka patalpų oro temperatūros palaikymo funkciją ir todėl pastato šilumos kiekių balanse, kaip jis buvo aprašytas 4 skyriuje, nedalyvauja.

Komercinės paskirties pastatai, tokie kaip prekybos centrai gali būti labai įvairaus dydžio. Dažniausiai pasižymi gana vientisa vidine erdve: vidinės atitvaros nesandarios arba jų visai nėra. Sporto klubų ir baseinų pastatai pasižymi keliomis aiškiai atskirtomis zonomis su skirtingu šiluminiu režimu. Gamybinės paskirties pastatų grupė labai nevienalytė, pastatai stipriai skiriasi priklausomai nuo gamybos procesų pobūdžio.

Tolimesnei analizei pasirinkti šie pastatų variantai:

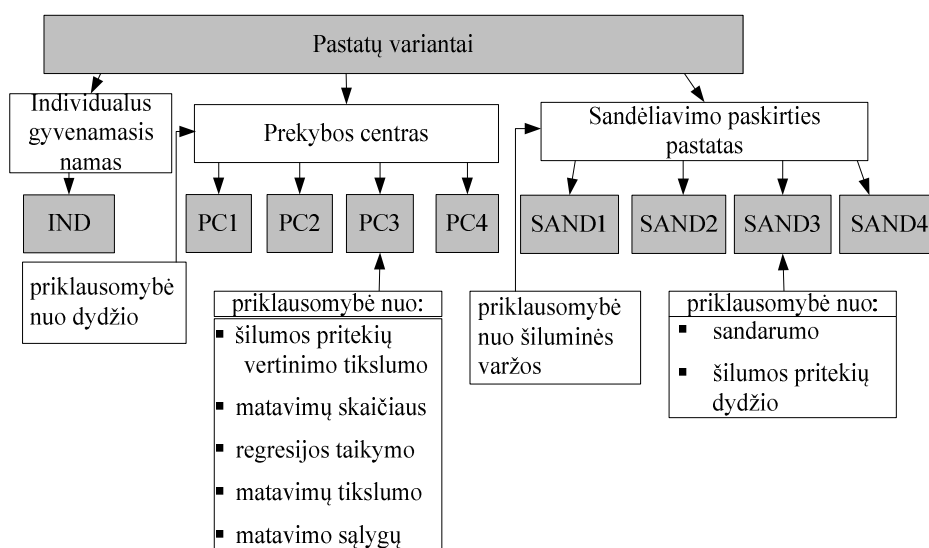
IND variantas atitinka individualų gyvenamąjį namą. Jo pavyzdžiu išanalizuota infiltracijos nustatymo šilumos kiekių balanso metodu neapibrėžtis nedideliose pastatuose, kuriuose nėra įrengtos PAV sistemos ir vienintelis matuojamas parametras – šildymo sistema patiekiamas šilumos kiekis.

PC1–PC4 variantai atitinka įvairaus dydžio prekybos centrus. Prekybos centras pasirinktas analizės objektu, nes prekybos centrai sudaro didelę grupę pastatų, pasižymi būdingu šilumos kiekių balansu, juose dažnai yra įrengtos PAV sistemos.

SAND1–SAND4 variantai atitinka gamybinės arba sandėliavimo paskirties pastatų grupę. Šie pastatai leidžia analizuoti infiltracijos nustatymo neapibrėžtį

esant įvairioms pastato charakteristikoms, skirtingoms proporcijoms tarp šilumos kiekių balanso dedamųjų.

29 paveiksle pateikiama atliekamos analizės schema.

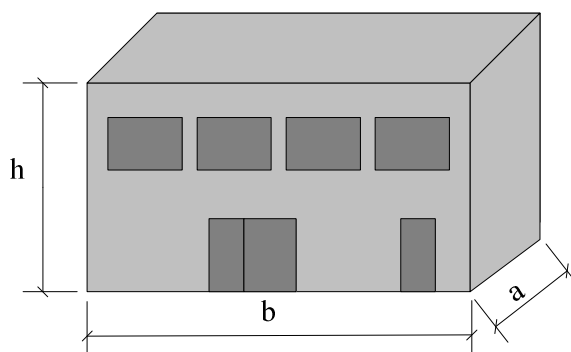


29 pav. Neapibrėžties analizės variantų schema

Kaip pavaizduota 29 paveiksle, modeliuojant prekybos centrų šilumos kiekių balansą įvertinama infiltracijos vertinimo neapibrėžties priklausomybė nuo pastato dydžio, šilumos vertinimo neapibrėžties ir matavimo duomenų. Pramoninio pastato modelis skirtas infiltracijos vertinimo neapibrėžties jautrumo atitvarų šiluminės varžos, pastato sandarumo ir šilumos pritekio vertėms tyrimui.

5.2.2. Tiriamų pastatų charakteristikos

Pasirinkti analizei pastatai yra vieno aukšto, pastatų planas stačiakampis. Analizuojamuose variantuose keičiami pastato matmenys – pastato ilgis, plotis ir aukštis – pavaizduoti 30 paveiksle, jų vertės kiekvienam variantui pateikiamos 21 lentelėje. IND, PC1–PC4 variantams įstiklintos atitvaros sudaro 25 proc. sienų ploto, SAND1–SAND4 variantuose įstiklintų atitvarų nėra. Pastatuose palaikoma +20 °C patalpų oro temperatūra.



30 pav. Tiriamų pastatų schematinis vaizdas

21 lentelė. Analizuojamų IND ir PC1–PC4 variantų pastatų matmenys ir šildymo sistemos galia

Pastato variantas	IND	PC1	PC2	PC3	PC4
Pastato plotis a, m	10	10	50	100	100
Pastato ilgis b, m	10	10	20	100	200
Pastato aukštis h, m	4	5	6	10	10
Pastato plotas, m ²	100	100	1000	10000	20000
Pastato tūris, m ³	400	500	6000	100000	200000
Šildymo sistemos galia, kW	9	1,5	15	150	300

Savitieji šilumos nuostoliai per atitvaras ir ilginius šilumos tiltelius atitinka statybos reglamento (STR 2.05.01...2005) reikalavimus gyvenamiesiems pastatams IND variantui, viešiesiems pastatams PC1–PC4 variantams.

22 lentelė. Modeliuojant tiriamus variantus priimti atsitiktinių dydžių skirstiniai

Dydis	Tikimybinis skirstinys	Parametras σ
Pastato matmenys, m	log normalusis	0,01
Langų ir durų deklaruojamas šilumos perdavimo koeficientas, W/K·m ²	log normalusis	0,1
Išorinių sienų ir stogo projektinis šilumos perdavimo koeficientas, W/K·m ²	log normalusis	0,01
Grindų ant grunto konstrukcijos projektinė šiluminė varža, K·m ² /W	log normalusis	0,01
R _{se} ir R _{si} , K·m ² /W	log normalusis	0,01

Pastato vėdinimui ir oriniam šildymui tiekiamo oro kiekis apskaičiuojamas taikant prielaidą, kad maksimali tiekiamo oro temperatūra gali būti 27 °C.

Priimta, kad tiriamo pastato sandarumas atitinka norminius reikalavimus ir yra 1,5 Pa esant 50 Pa slėgio skirtumui.

Šilumos pritekis analizuojamame variante kinta paros metu atsitiktinai, jo kitimui aprašyti taikomas log normalusis pasiskirstymo dėsnis, kurio parametrai pateikiami 23 lentelėje.

23 lentelė. Šilumos pritekio nuo vidinių šilumos šaltinių grafikas PC1–PC4 variantams

Paros laikas	22.00–8.00	8.00–22.00
Tikimybinis skirstinys ir jo parametrai, W/m ²	log normalusis (15; 1)	log normalusis (29; 5)

Vidutinė vertė pasirenkama pagal statybos reglamentą (STR 2.09.04...2002), apšvietimo sistema veikia visu galingumu visą parą. Darbo metu dar papildomai pridedamas šilumos pritekis nuo žmonių ir įrangos.

Skaičiuojant buvo priimta, kad šilumos pritekis nuo vidinių šilumos šaltinių per mėnesį įvertintas su 10 proc. neapibrėžtimi.

24 lentelėje pateikiamos įvesties parametrai, reikalingi įvertinti mėnesio šilumos pritekį dėl saulės spinduliuotės, vertės. Visiems parametrams priskiriamas log normalusis skirstinys, o skirstinio parametrai reikšmės priimamos įvertinant literatūroje randamas reikšmes.

24 lentelė. Šilumos pritekio nuo vidinių šilumos šaltinių grafikas IND, PC1–PC4 variantams

Įvesties parametrai	Tikimybinis skirstinys ir jo parametrai
Vidutinis saulės spinduliuotės intensyvumas, W/m ² , kai atitvaros orientacija	
Š	Log normalusis (32,4; 8,10)
R	Log normalusis (42,7; 10,68)
P	Log normalusis (72,8; 18,20)
V	Log normalusis (44,7; 11,18)
Įstiklintų plotų saulės spinduliuotės praleisties faktorius s	Log normalusis (0,67; 0,03)
Įstiklintos lango dalies plotas, m ²	Log normalusis (0,75; 0,04)
Pataisa dėl lango užtemdymo a	Log normalusis (0,6; 0,06)

Kai įvesties parametrai priimami kaip nurodyta 24 lentelėje, Monte Karlo metodu nustatyta mėnesio šilumos pritekio dėl saulės spinduliuotės vertės neapibrėžtis sudaro 35 proc.

SAND1–SAND4 variantų pastatų charakteristikos yra aprašomos 5.6 skyrelyje.

5.2.3. Mikroklimato kondicionavimo ir pastato automatizuoto valdymo sistemos tiriamuosiuose pastatuose

MK sistemos skirtos patalpų mikroklimato palaikymui, jomis palaikoma patalpų oro temperatūra, oro kokybė, gali būti reguliuojamas ir oro drėgmė. Šiame darbe analizuojamos tik šildymo sezono metu veikiančios sistemos. Tačiau vėdinimo sistema gali veikti ir kaip šildymo, ir kaip vėsinimo sistema. Analizuojamu atveju priimama, kad oro drėgnumas nėra reguliuojamas parametras. Tyrimas apima tik šias MK sistemas:

- mechaninio vėdinimo sistemą;
- šildymo sistemą.
- Galima išskirti šiuos šilumos srautus nuo nagrinėjamų MK sistemų:
- šiluma, įnešama su vėdinimo sistemomis tiekiamu oru;
- šiluma, išnešama su vėdinimo sistemomis šalinamu oru;
- šiluma nuo šildymo prietaisų ir vamzdinių.

Šilumos srautai tiekiami ir šalinami iš pastato su vėdinimo sistemų oru, gali būti nustatomi žinant tiekiamo ir šalinamo oro debitą, tiekiamo, šalinamo ir patalpos oro temperatūrą. Šilumos srautas nuo šildymo sistemos gali būti įvertinamas žinant sistemoje cirkuliuojančio šilumnešio debitą, tiekiamo į sistemas ir grįžtančio šilumnešio temperatūras.

Dažniausiai šildymo sezono metu naudojami tokie patalpų oro reguliavimo būdai:

- vėdinama natūraliai, todėl patenkantis lauko oras pašildomas šildymo sistemomis, užduota patalpų oro temperatūra palaikoma šildymo sistemomis;
- užduota patalpų oro temperatūra palaikoma šildymo sistemomis, o vėdinimui tiekiamas oras pašildomas iki patalpos temperatūros;
- taikomas orinis šildymas, kuomet užduota patalpų oro temperatūra palaikoma tiekiant šiltesnį už patalpos orą;
- taikomas kombinuotas šildymas, kuomet dalį šilumos nuostolių dengia šildymo sistema, dalį vėdinimo sistema.

Pirmuoju atveju vėdinimo sistema įtakos pastato šilumos kiekių balansui neturės, trečiuoju atveju – nebus šilumos srauto nuo šildymo sistemos dedamosios. Antruoju ir ketvirtuoju atveju sudarant pastato šilumos kiekių balansą reikia ver-

tinti ir vėdinimo ir šildymo dedamąsias. Tiriamuosiuose pastatuose yra būtent antrasis (IND variantas) ir ketvirtasis (PC1–PC4, SAND1–SAND4 variantai) atvejai.

IND pastato varianto atveju matavimai nėra atliekami, o visuose likusiuose variantuose PAV sistemomis registruojami matavimų duomenys. Matuojami parametrai ir tyrimui priimtas matavimų tikslumas pateikiami 25 lentelėje.

25 lentelė. Atliekamų matavimų tikslumas PC1–PC4 variantams

Aplinkos oro temperatūros, °C	0,2
Patalpų oro temperatūros, °C	0,2
Tiekiamo oro temperatūros, °C	0,2
Tiekiamo oro debito, proc.	5
Šildymo sistema tiekiamo šilumos kiekio, proc.	3

Tyrimo priimtas matavimų tikslumas atitinka šiuolaikinių sistemų galimybes (žr. 3 skyrių).

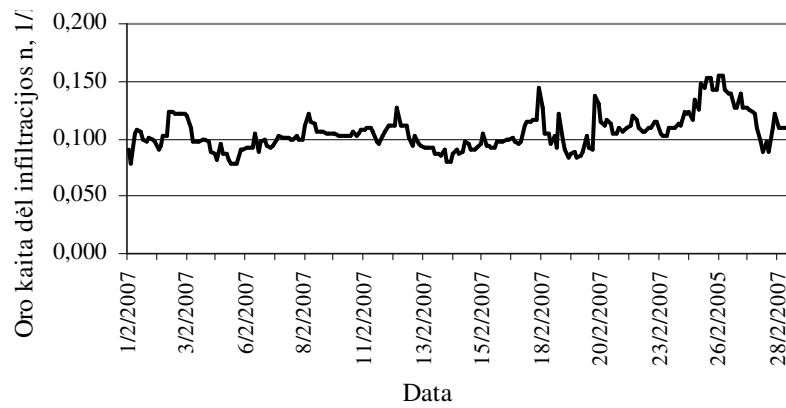
5.2.4. Skaičiavimams naudoti klimatiniai duomenys

Šilumos kiekių balanso imitaciniam modeliavimui buvo naudojami faktiniai klimatiniai duomenys. Vėjo greičio, lauko oro temperatūros ir debesuotumo matavimo dažnis – trys valandos. Matavimų laikotarpis buvo 2007 metų vasario mėnuo, matavimai atliekami Vilniaus mieste. Vidutinė lauko oro temperatūra matavimo laikotarpiu buvo -7,6 °C, temperatūra kito nuo -22 °C iki +2 °C. Vidutinis vėjo greitis buvo 3,1 m/s ir kito nuo 0 iki 8,0 m/s. Matavimų laikotarpiu dažniausiai buvo apsiniaukę.

5.3. Neapibrėžties analizės IND variantui rezultatai

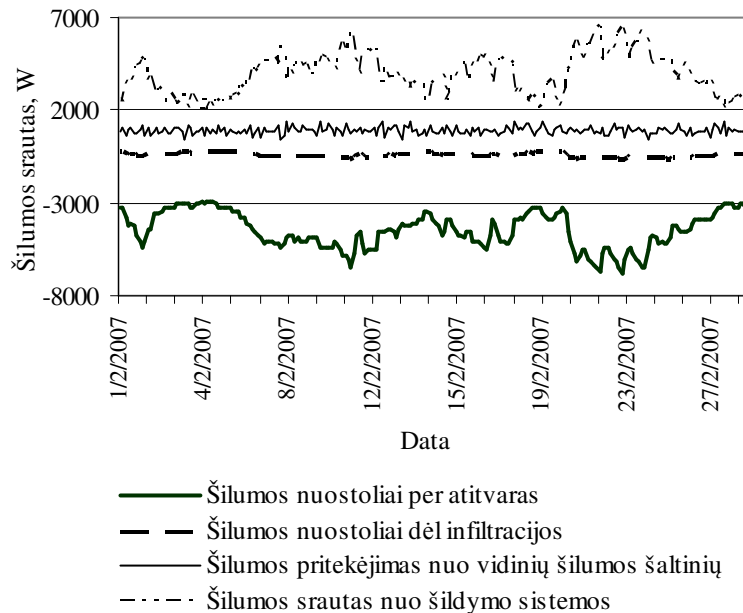
5.3.1. Šilumos kiekių balanso IND variantui analizė

Pastato šilumos kiekių balanso imitavimo modeliu, aprašytu 5.1 skyrelyje, sugeneruoti individualaus namo (IND varianto) pastato šilumos kiekių balanso duomenys. Modeliuojama oro kaita dėl infiltracijos pateikta 31 paveiksle.



31 pav. Infiltracijos oro kaita IND varianto pastate per vertinamąjį laikotarpį

Oro kaitos dėl infiltracijos vertės kitimas per vertinamąjį mėnesį priklausė nuo aplinkos oro temperatūros ir vėjo greičio kitimo. Vidutinė sumodeliuota vertė buvo $0,15 \text{ h}^{-1}$.



32 pav. Šilumos srautų kitimas IND varianto pastate per vertinamąjį laikotarpį

32 paveiksle pavaizduotas sumodeliuotas šilumos srautų kitimas per vertinamąjį laikotarpį. Kaip matyti iš 32 paveiksle pateikto grafiko, šilumos pritekėjimas ir šilumos nuostoliai dėl infiltracijos svyravo žymiai mažiau palyginus su šilumos nuostoliais per atitvaras ir juos atkartojančiu šilumos srautu nuo šildymo sistemos.

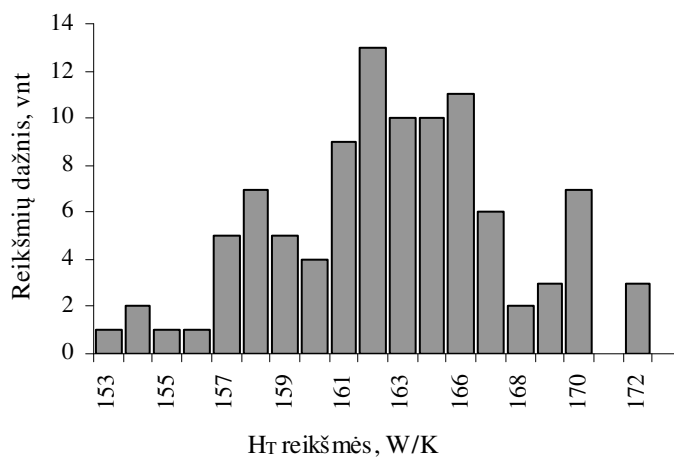
26 lentelė. Šilumos kiekių balanso dedamųjų absoliutinės vertės IND variantui

Q_{inf} , MWh	Q_v , MWh	Q_{ig} , MWh	Q_{sg} , MWh	Q_{hs} , MWh	Q_{env} , MWh
-0,40	0,00	0,60	0,16	2,64	-2,99

26 lentelėje pateiktos šilumos kiekių vertės pagal atskiras šilumos kiekių balanso dedamąsias rodo, kad šilumos nuostoliai per atitvaras pirmojo varianto pastate sudaro didžiausią šilumos nuostolių dalį, o tiek šilumos pritekis, tiek infiltracija įtakoja nedaug.

5.3.2. IND varianto savitųjų šilumos nuostolių neapibrėžtis

Naudojantis modeliu, aprašytu 4.4 skyriuje, buvo atlikta individualaus namo (IND varianto) savitųjų šilumos nuostolių per atitvaras neapibrėžties analizė. Analizės rezultatai pateikiami 33 paveiksle ir 27 lentelėje.



33 pav. IND varianto savitųjų šilumos nuostolių histograma

27 lentelė. IND variantu savitųjų šilumos nuostolių neapibrėžties analizės rezultatai

Vidurkis, W/K	162,6
Standartinis nuokrypis, W/K	4,2
Neapibrėžtis, W/K	8,4
Santykinė neapibrėžtis, proc.	5,2

Neapibrėžties analizė, atlikta Monte Karlo metodu, parodė, kad IND variantu savitųjų šilumos nuostolių per atitvaras neapibrėžtis sudaro 8,4 W/K, t.y. 5,2 proc. Ši reikšmė naudojama tolimesniuose skaičiavimuose.

5.3.3. IND variantu infiltracijos nustatymo rezultatai

Parngtu kompiuteriniu infiltracijos nustatymo šilumos kiekių balanso metodo modeliu atliktos analizės rezultatai pateikiami 30 ir 31 lentelėse.

28 lentelė. Atskirų šilumos kiekių balanso dedamųjų neapibrėžtis IND variante

$\delta(Q_{inf})$, MWh	$\delta(Q_v)$, MWh	$\delta(Q_{ig})$, MWh	$\delta(Q_{sg})$, MWh	$\delta(Q_{hs})$, MWh	$\delta(Q_{env})$, MWh
0,21	0,00	0,06	0,05	0,08	-0,18
53 proc.	0 proc.	10 proc.	35 proc.	3 proc.	5,9 proc.

28 lentelėje pateikti rezultatai rodo, kad net nedidelė santykinė šilumos nuostolių per atitvaras neapibrėžtis (5,9 proc.) lemia didelę santykinę infiltracijos dedamosios neapibrėžtį, kuri, savo ruožtu, kaip matyti 29 lentelėje, lemia didelę (53 proc.) infiltracijos nustatymo neapibrėžtį (žr. 29 lentelę).

29 lentelė. Kiekvieno lygybės (2.14) dėmens indėlis į bendrą gaunamo rezultato neapibrėžtį IND variante

$\delta(n)$, h ⁻¹	n, h ⁻¹	$\frac{\delta(n)}{ n }$	$\frac{\delta(Q_{inf})}{ Q_{inf} }$	$\frac{\delta(V)}{ V }$	$\frac{\delta(\Delta\theta)}{ \Delta\theta }$
0,08	0,15	52,9 proc.	52,9 proc.	0,1 proc.	2,8 proc.

Iš šilumos kiekių balanso nustatyta vidutinė oro kaita per vertinamąjį mėnesį pirmojo variantu pastate patenka į intervalą [0,07 h⁻¹; 0,23 h⁻¹] su 95 proc. pasiklovimo lygmeniu.

Individualaus gyvenamojo namo (IND variantu) atveju šilumos kiekių balanse ir tuo pačiu neapibrėžties dėmenų tarpe dominuoja šilumos nuostoliai per atitvaras. Kadangi šilumos nuostoliai per atitvaras yra apskaičiuojami, todėl nėra galimybių tiksliau nustatyti šios dedamosios, kaip matavimo duomenimis paremtą šilumos kiekio su vėdinimo oru atveju.

Kadangi IND variantu oro kaitos dėl infiltracijos neapibrėžtis sudaro 53 proc., ir nėra galimybių šią neapibrėžtį sumažinti, individualus namas laikytinas netinkamu objektu infiltracijos intensyvumo vertinimui pagal pastato šilumos kiekių balansą. Apibendrinant galima teigti, kad infiltracijos intensyvumas pagal pastato šilumos kiekių balansą nevertintinas pastatuose, kuriuose šilumos kiekių balanso sudarymui nėra galimybės naudoti matavimo duomenų.

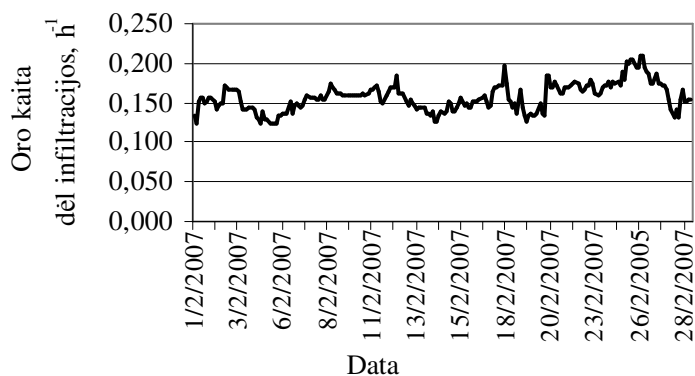
5.4. PC1–PC4 variantų modeliavimo rezultatai

Šiame skyrelyje pateikiami rezultatai buvo publikuoti periodiniame mokslo leidinyje (Jaraminienė, Juodis 2008a).

5.4.1. Šilumos kiekių balanso PC1–PC4 variantams tyrimas

Sudarytu šilumos balanso imitavimo modeliu modeliuojami PC1–PC4 variantai. Iliustravimui paveikslai pasirinktas PC3 variantas, kadangi šis variantas, kaip vėliau paaiškėja, yra tinkamas infiltracijos nustatymui pagal šilumos kiekių balansą.

Parengtu kompiuteriniu modeliu sugeneravus PC3 varianto oro kaitą dėl infiltracijos, gauta infiltracijos kaita per mėnesį pavaizduota 34 paveiksle.



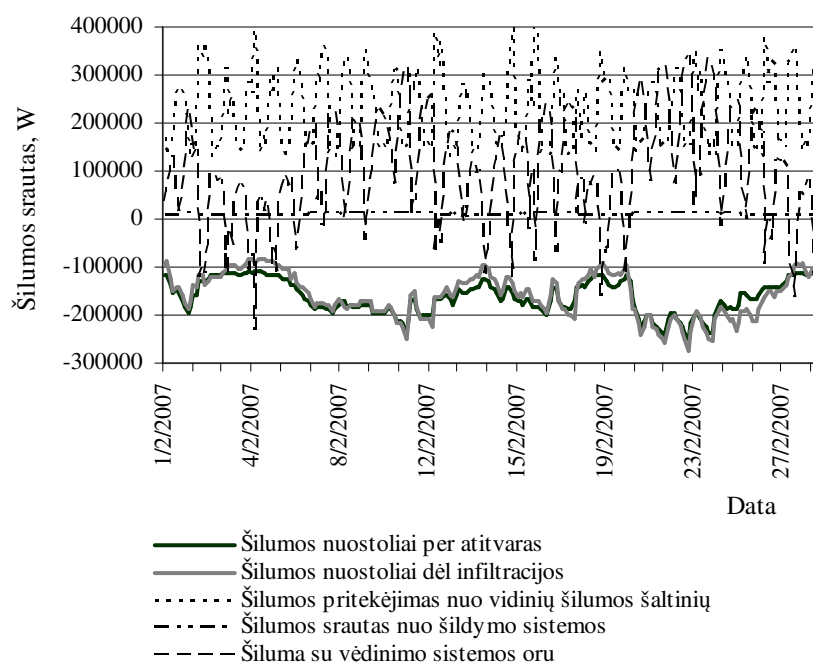
34 pav. Infiltracijos oro kaita pastate per vertinamąjį laikotarpį (PC3 variantas)

Vidutinės oro kaitos vertės analizuojamuose pastatuose per tiriamąjį laikotarpį buvo pateikiamos 30 lentelėje.

30 lentelė. Vidutinės oro kaitos vertės analizuojamuose PC1–PC4 variantų pastatuose

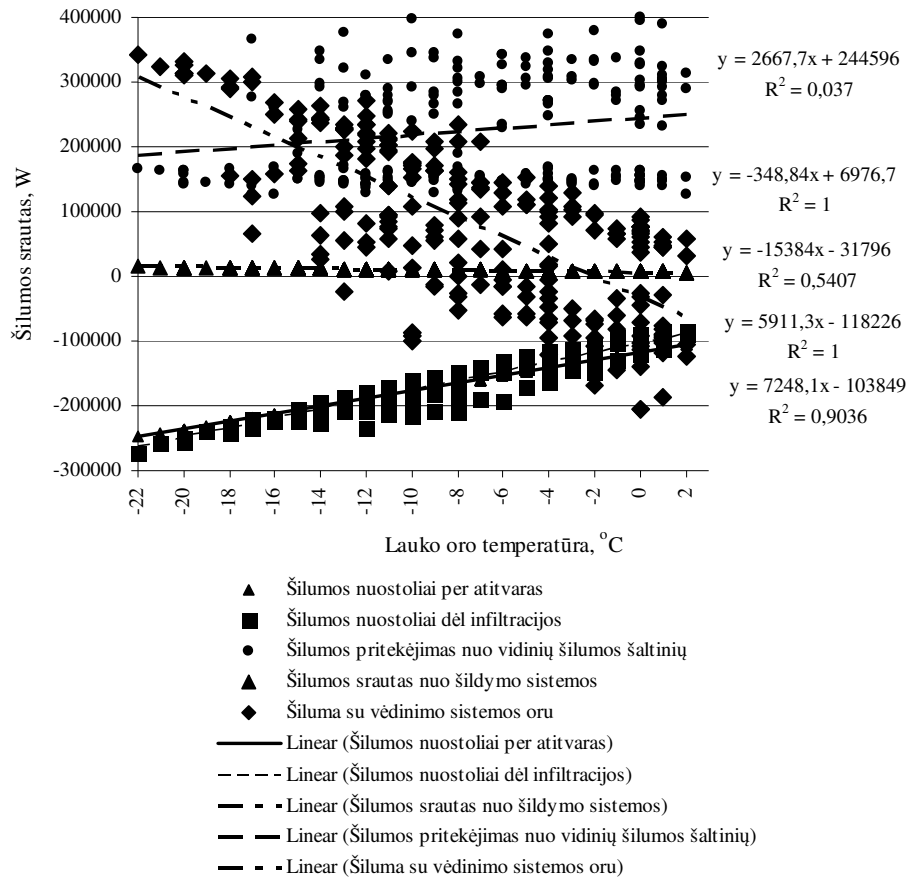
Pastato variantas	PC1	PC2	PC3	PC4
Oro kaita dėl infiltracijos n, h^{-1}	0,116	0,125	0,157	0,157
Standartinis nuokrypis, h^{-1}	0,016	0,016	0,018	0,018
Oro kaitos dėl infiltracijos 2 st. nuokrypiai, h^{-1}	0,032	0,033	0,036	0,036
Oro kaitos dėl infiltracijos 2 st. nuokrypiai, proc.	28	26	23	23

Šilumos srautų kitimo pastate grafikai per vertinamąjį mėnesį pateikti 35 paveiksle.

**35 pav.** Šilumos srautų kitimas per vertinamąjį mėnesį (PC3 variantas)

Kaip matyti iš 35 paveikslo, šilumos pritekis svyravo labiausiai. Taip pat galima pastebėti nagrinėjamo tipo pastatams būdingą tendenciją, kai atskirais momentais šilumos pritekis yra didesnis nei suminiai šilumos nuostoliai per atitvaras ir dėl infiltracijos, tuomet vėdinimo sistema ima veikti vėsinimo režimu. Šį režimą atitinka 35 paveiksle pavaizduotos šilumos, patenkančios su vėdinimo sistemos oru, neigiamos vertės.

36 paveiksle pateikta šilumos srautų modeliujamame pastate priklausomybė nuo pastato vidaus ir aplinkos oro temperatūros skirtumo. Šalia kiekvieno grafiko pateikta tiesinės regresijos lygtis kiekybiškai išreiškia šią priklausomybę, o R^2 vertė nusako tiesinės priklausomybės stiprumą.



36 pav. Šilumos srautų kitimo priklausomybė nuo aplinkos ir patalpų oro temperatūrų skirtumo (PC3 variantas)

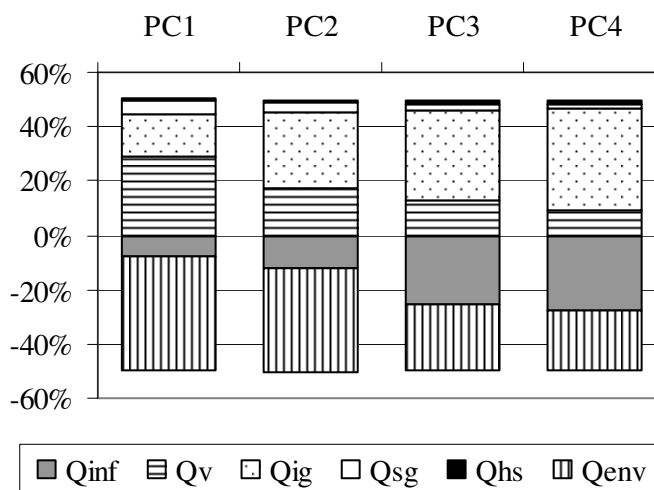
Stipriai tiesiškai nuo pastato vidaus ir aplinkos oro temperatūrų skirtumo priklauso šilumos nuostoliai per atitvaras, šiluma nuo šildymo sistemų ir infiltracijos nuostoliai. Nuo temperatūrų skirtumo visai nepriklauso šilumos pritekis. Silpna priklausomybė sieja temperatūrų skirtumą ir vėdinimo dedamąją šilumos kiekių balanse.

31 lentelėje pateiktos šilumos kiekių balanso dedamosios PC1–PC4 variantams. Neigiama vertė žymi šilumos nuostolius, o teigiama – šilumos pritekį.

31 lentelė. Šilumos kiekių balanso dedamųjų absoliutinės vertės

Pastato variantas	Q_{inf} , MWh	Q_v , MWh	Q_{ig} , MWh	Q_{sg} , MWh	Q_{hs} , MWh	Q_{env} , MWh
PC1	-0,8	2,9	1,5	0,5	0,1	-4,1
PC2	-6,6	9,1	14,8	2,0	0,6	-20,0
PC3	-111,0	55,9	147,8	9,8	6,4	-108,9
PC4	-221,2	73,5	295,7	14,6	12,8	-175,4

37 paveiksle pavaizduota šilumos kiekių balanso dedamųjų dalys bendrame kiekvienu iš PC1–PC4 variantų pastato balanse.



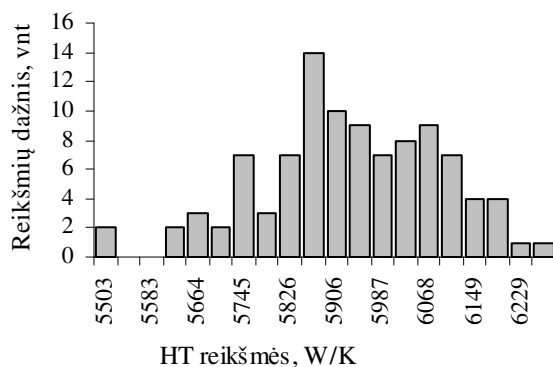
Q_{env} – šilumos kiekis dėl nuostolių per išorines pastato atitvaras ir ilginius šilumos tiltelius; Q_{hs} – šilumos kiekis, tiekiamas šildymo (arba vėsinimo) sistemomis; Q_{sg} – šilumos kiekis dėl saulės spinduliuotės; Q_{ig} – šilumos kiekis nuo vidinių šilumos šaltinių; Q_v – šilumos kiekis, tiekiamas vėdinimo sistemomis; Q_{inf} – šilumos kiekis dėl oro infiltracijos.

37 pav. Kiekvienos dedamosios dalis šilumos kiekių balanse

Kaip matyti 37 paveiksle, kuo didesnis pastatas, tuo didesnė šilumos nuostolių dalis tenka nuostoliams dėl infiltracijos ir mažesnė nuostoliams per atitvaras. Šilumos pritekio nuo vidinių šilumos šaltinių dalis didėja, o vėdinimo dedamosios – mažėja.

5.4.2. Savitųjų šilumos nuostolių PC1–PC4 variantams vertinimo neapibrėžtis

38 paveiksle pateikta PC3 varianto savitųjų šilumos nuostolių verčių histograma rodo, kad gali būti laikoma jog šios vertės pasiskirstę pagal normalųjį dėsnį, o tokia prielaida ir yra taikoma.



38 pav. Savitųjų šilumos nuostolių PC3 variantui histograma

Savitųjų šilumos nuostolių ir jų nustatymo neapibrėžtis, nustatyta Monte Karlo metodu, pateikta 32 lentelėje.

32 lentelė. PC1–PC4 variantų pastatų savitųjų šilumos nuostolių neapibrėžties analizės rezultatai

Pastato variantas	PC1	PC2	PC3	PC4
Vidurkis, W/K	223	1088	5911	9531
Standartinis nuokrypis, W/K	6	26	158	287
Neapibrėžtis, W/K	11	53	316	575
Santykinė neapibrėžtis, proc.	5,0	4,9	5,3	6,0

32 lentelėje pateikti savitųjų šilumos nuostolių ir jų nustatymo neapibrėžties rezultatai rodo, kad šios dedamosios santykinė neapibrėžtis yra mažai įtakojama pastato dydžio.

5.4.3. Matavimų duomenimis pagrįstų dedamųjų PC1–PC4 variantams neapibrėžties rezultatai

Matuojamų šilumos kiekių balanso komponentų neapibrėžtis, gauta atlikus modeliavimą, pateikta 33 lentelėje.

33 lentelė. PC1–PC4 variantų pastatų šilumos srauto su vėdinimo oru matavimo neapibrėžties rezultatai

Pastato variantas	PC1	PC2	PC3	PC4
Vėdinimo dedamosios matavimų vidurkis	4271	13592	83190	109346
Matavimų standartinis nuokrypis	1772	12832	123999	242139
Matavimų skaičius	224	224	224	224
Stjudento kriterijus $t_{\alpha}(N-1)$	1,96	1,96	1,96	1,96
Vidurkio neapibrėžtis $\frac{S}{\sqrt{N}} \cdot t_{\alpha}(N-1)$	232	1 680	16 239	31 710
Vidurkio neapibrėžtis, proc.	5	12	20	29
Vidurkio pasikliautinąjo intervalo minimali vertė	4039	11912	66952	77636
Vidurkio pasikliautinąjo intervalo maksimali vertė	4503	15273	99429	141056

33 lentelėje pateikti rezultatai rodo, kad santykinė vėdinimo dedamosios nustatymo neapibrėžtis stipriai sąlygojama pastato dydžio.

5.4.4. Oro kaitos dėl infiltracijos PC1–PC4 variantams vertinimo neapibrėžtis

34 lentelėje parodyta, kaip kiekviena lygybės (4.7) dedamoji sumuojasi į bendrą šilumos kiekių balanso infiltracijos dedamosios nustatymo neapibrėžtį. Atliktos šilumos kiekių balanso atskirų dedamųjų neapibrėžties analizės rezultatai, pateikti 34 lentelėje, rodo kad didžiausią įtaką rezultato neapibrėžčiai tiriamu atveju daro šilumos pritekis nuo vidinių šilumos šaltinių. Antro pagal vertingumą faktoriaus, šilumos nuostolių per atitvaras, įtaka analizuotu atveju yra kelis kartus mažesnė. Tačiau šilumos nuostolių per atitvaras neapibrėžtis gali tapti lemiamu infiltracijos nustatymo neapibrėžties faktoriumi, jei šilumos pritekis vertinamajame pastate bus labai mažas arba bus galimybė jį įvertinti pakankamai tiksliai.

34 lentelė. Atskirų šilumos kiekių balanso dedamųjų absoliutinė ir santykinė neapibrėžtis

Pastato variantas		$\delta(Q_{inf})$	$\delta(Q_v)$	$\delta(Q_{ig})$	$\delta(Q_{sg})$	$\delta(Q_{hs})$	$\delta(Q_{env})$
PC1	MWh	0,4	0,16	0,15	0,2	0,00	0,23
	proc.	40,4	5,4	10	35	3	5,7
PC2	MWh	2,3	1,13	1,48	0,7	0,02	1,13
	proc.	35,1	12,4	10	35	3	5,6
PC3	MWh	19,8	10,91	14,78	3,4	0,19	6,59
	proc.	17,9	19,5	10	35	3	6,1
PC4	MWh	38,6	21,31	29,57	5,1	0,38	11,69
	proc.	17,5	29,0	10	35	3	6,7

Priėmus ribinį atvejį, kai šilumos pritekis gali būti įvertinami visiškai tiksliai, t.y. kai $\delta(Q_{ig}) = 0$ ir $\delta(Q_{sg}) = 0$, tuomet neapibrėžtis kiekvieno pastato variantu sumažėja kaip parodyta 35 lentelėje.

35 lentelė. Infiltracijos vertinimo neapibrėžtis, kai šilumos pritekio neapibrėžtis lygi nuliui

Pastato variantas	$\delta(n), h^{-1}$	$\frac{\delta(n)}{ n }, \text{proc.}$
PC1	0,08	35,0
PC2	0,04	24,2
PC3	0,02	11,5
PC4	0,02	11,0

36 lentelė. Kiekvieno lygybės (4.5) dėmens indėlis į bendrą gaunamo rezultato neapibrėžtį

Pastato variantas	$\delta(n), h^{-1}$	n, h^{-1}	$\frac{\delta(n)}{ n }, \text{proc.}$	$\frac{\delta(Q_{inf})}{ Q_{inf} }, \text{proc.}$	$\frac{\delta(V)}{ V }, \text{proc.}$	$\frac{\delta(\Delta\theta)}{ \Delta\theta }, \text{proc.}$
PC1	0,10	0,240	40,5	40,4	0,1	3
PC2	0,06	0,164	35,2	35,1	0,1	3
PC3	0,03	0,167	18,1	17,9	0,1	3
PC4	0,03	0,166	17,7	17,5	0,1	3

37 lentelėje pateikiami apibendrinti rezultatai viems prekybos centro pastato variantams.

37 lentelė. Apibendrinta infiltracijos nustatymo neapibrėžties PC1–PC4 variantams rezultatų lentelė

Pastato variantas	PC1	PC2	PC3	PC4
Pastato plotas, m ²	100	1000	10000	20000
Pastato tūris, m ³	500	6000	100000	200000
n vidurkio įvertis, h ⁻¹	0,24	0,16	0,17	0,17
Neapibrėžtis, h ⁻¹	0,10	0,06	0,03	0,03
Neapibrėžtis, proc.	41	35	18,1	17,7

Mėnesio vidutinės oro kaitos dėl infiltracijos vertės, nustatytos šilumos kiekių balanso metodu, neapibrėžtis nagrinėtai PC1–PC4 variantais buvo nuo 0,03 iki 0,18 h⁻¹, t.y. sudarė nuo 19 iki 73 proc. vertės vidurkio. Gauto rezultato neapibrėžtis PC3 ir PC4 variantų pastatams yra tos pačios eilės, kaip ir nustatant infiltraciją tradiciniais metodais. Esamais matavimo metodais gali būti nustatoma daug tikslesnė pastato sandarumo orui vertė, tačiau pagal nesandarumą vertinant oro kaitą dėl infiltracijos pastato eksploatacijos sąlygomis, atsirandanti neapibrėžtis dažnai siekia apie 25 proc. (Awbi, 2003). Infiltracijos dydis gali būti matuojamas ir natūraliomis pastato eksploatavimo sąlygomis - tam naudojamos įvairios indikatorinių dujų metodo modifikacijos. Indikatorinių dujų metodais pasiekama neapibrėžtis yra maždaug 15 proc. (Modera, Persily, 1995). Tačiau kaip jau minėta 1 skyriuje, šie metodai yra brangūs ir techniškai sudėtingi, ypač didelio tūrio pastatuose. Tuo tarpu infiltracijos intensyvumo nustatymas pagal pastato šilumos kiekių balansą beveik nereikalauja papildomų sąnaudų pastatuose, kuriuose jau įrengtos PAV sistemos. O kaip parodė atlikta neapibrėžties analizė, šis siūlomas infiltracijos nustatymo metodas ypač tinkamas didelio tūrio pastatams, kadangi tokiuose pastatuose gaunamo rezultato neapibrėžtis yra mažesnė, palyginama su minėtais brangiais ir sudėtingais metodais.

Kadangi PC3 pastato varianto atveju gaunamas tikslumas pasiekia įprastinių metodų tikslumą, galima teigti, kad orientaciniu pastato dydžio rodikliu, kai infiltracijos įvertinimas pagal šilumos kiekių balansą gali būti tinkamu, galima laikyti 10.000 m² šildomą pastato plotą. PC3 variantas, kaip variantas, tinkamas oro kaitos dėl infiltracijos nustatymui pagal pastato šilumos kiekių balansą, pasirinktas kaip bazinis ir detalesnei neapibrėžties analizei, t.y. rezultato neapibrėžties jautrumo tokių veiksnių, kaip matavimų tikslumas ir skaičius, tyrimui.

5.5. Galimybių sumažinti neapibrėžtį PC3 varianto atveju analizė

Gauta PC3 variante infiltracijos nustatymo iš šilumos kiekių balanso neapibrėžtis sudaro 18 proc. Tokia neapibrėžtis nustatyta esant tam tikram matavimų tiks-

lumui ir skaičiui, todėl reikia ištirti kaip šie veiksniai įtakoja rezultato neapibrėžtį, ieškoti galimybių neapibrėžtį dar labiau sumažinti.

34 lentelėje pateikti tarpiniai analizės rezultatai rodo, kad didžiausia įtaką gauto rezultato neapibrėžčiai daro šios šilumos kiekių balanso dedamosios ir jų įvertinimo neapibrėžtis: šilumos pritekio nuo vidinių šaltinių, šilumos su vėdinimo oru ir šilumos pritekio dėl saulės spinduliuotės. Šilumos pritekio įtaką galima sumažinti dviem būdais: tiksliau vertinant pritekėjusį per vertinamąjį laikotarpį šilumos kiekį arba atliekant matavimus tik tuo metu, kai šilumos pritekio vertė yra santykinai nedidelė.

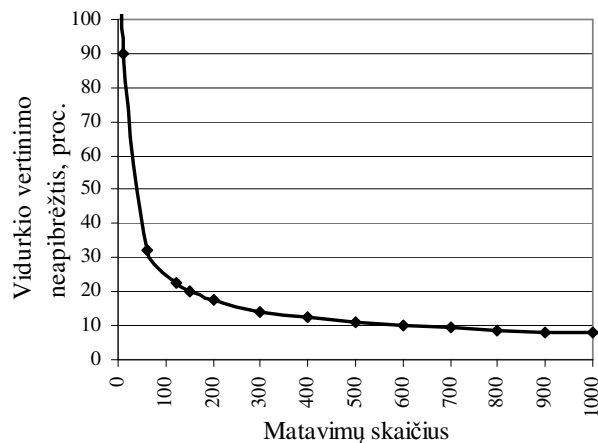
Kaip matyti iš lygybės (2.2), matavimais gaunamos vėdinimo dedamosios neapibrėžtis priklauso nuo:

- matavimų skaičiaus;
- duomenų sklaidos, kuri lygybėje (2.2) išreikšta duomenų imties standartinio nuokrypiu.

Toliau analizuojama baziniu pasirinkto PC3 varianto neapibrėžties jautrumas nuo šių faktorių. 5.5.1 skyrelyje analizuojamas jautrumas matavimų skaičiui ir nustatoma, koks matavimų skaičius būtų optimalus. 5.5.2 skyrelyje taikomas tiesinės regresijos metodas leidžia sumažinti duomenų sklaidą eliminuojant vieną iš šių sklaidą įtakančių faktorių.

5.5.1. Matavimų skaičius

Matavimais gaunamos vėdinimo dedamosios neapibrėžties priklausomybė nuo matavimų skaičiaus stiprumą iliustruoja 39 paveiksle pateiktas grafikas.



39 pav. Matavimais gaunamos vėdinimo dedamosios neapibrėžties priklausomybė nuo matavimų kiekio

Kaip matyti iš 39 paveiksle pateikto grafiko, neapibrėžtį galima sumažinti didinant matavimų skaičių, tačiau stipriau neapibrėžtis mažėja tik kai matavimų skaičius nedidelis.

PC3 varianto pastatui atlikus matavimus ne kas tris valandas, kaip prieš tai nagrinėtu atveju, o kas valandą, t.y. padidinus matavimų skaičių per vertinamą mėnesį nuo 224 iki 672 (3 kartus), gaunama mažesnė matavimo neapibrėžtis, vietoje 19,5 proc., esant visoms kitoms matavimo sąlygoms vienodoms, gaunama 11,3 proc. neapibrėžtis (sumažėja 8,2 proc.). Toliau didinant matavimų skaičių, neapibrėžtis mažėja lėčiau, pavyzdžiui, padidinus matavimų skaičių keturis kartus, t.y. registruojant matavimus kas 15 min., gaunama 5,6 proc. neapibrėžtis (sumažėja 5,7 proc.).

Vėdinimo dedamosios ir galutinio rezultato, t.y. infiltracijos, neapibrėžties priklausomybės nuo matavimų skaičiaus PC3 pastato variantui tyrimo rezultatai pateikiami 38 lentelėje.

38 lentelė. Neapibrėžties PC3 variantui priklausomybė nuo matavimų skaičiaus

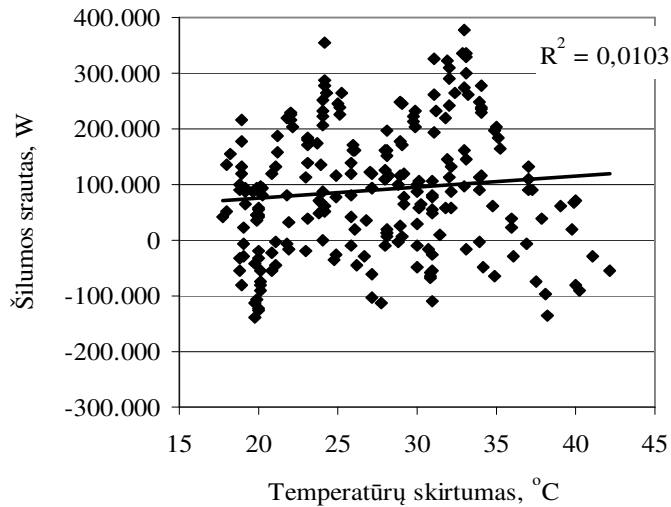
Matavimų skaičius	56	224	672	2688
Matavimo dažnumas	kas 12 val.	kas 3 val.	kas 1 val.	kas 15 min.
Matavimais gaunamos vėdinimo dedamosios neapibrėžtis, proc.	39,8	19,9	11,3	5,6
Vidutinės infiltracijos neapibrėžtis, proc.	26,5	19,5	18,2	17,5

Kaip matyti analizuojant 38 lentelėje pateiktus rezultatus, matavimų skaičiaus didinimas infiltracijos neapibrėžtį stipriau veikia matavimų skaičiui nesiekiant 200, toliau didinant matavimų skaičių, infiltracijos nustatymo neapibrėžtis mažėja nevertingai. Be to, yra riba, kai infiltracijos nustatymo neapibrėžtį ima lemti ne matavimais gauta vėdinimo dedamoji, bet kitos šilumos kiekių balanso dedamosios, kurių neapibrėžtis matavimais negali būti sumažinama. Nagrinėjamo PC3 varianto atveju tokia riba būtų apie 17,0 proc.

5.5.2. Tiesinės regresijos taikymas

Duomenų sklaidą galima sumažinti pašalinant sklaidą sąlygojančius faktorius ir didinant matavimų tikslumą. Vėdinimo sistema priklausomai nuo poreikio, veikia ir kaip šildymo oru, ir kaip vėsinimo sistema, tiekiamo oro temperatūra yra reguliuojama pagal palaikomą pastato vidaus oro temperatūrą. Todėl nagrinėjamu atveju šilumos srautas su vėdinimo sistemos oru priklauso nuo pastato vidaus ir aplinkos oro temperatūrų skirtumo. Tokiu būdu vėdinimo dedamosios neapibrėžtį galima tikėtis sumažinti taikant tiesinę regresiją. 40 paveiksle pa-

vaizduota šilumos srauto su vėdinimo sistemų oru verčių (juodi taškai) priklausomybė nuo pastato vidaus ir aplinkos oro temperatūros skirtumo.



40 pav. Regresinės analizės grafikas. Šilumos srauto su vėdinimo oru priklausomybė nuo aplinkos ir patalpų oro skirtumo (PC3 variantas)

Atlikta regresinė analizė rodo vertingą statistinę tiesinę priklausomybę tarp pastato vidaus ir aplinkos oro temperatūrų skirtumo ir vėdinimo dedamosios šilumos kiekių balanse. R^2 vertė (žr. 40 pav.) parodo, kad tiesinės regresijos modelis paaiškina 52 proc. verčių sklaidos, tuo parodydamas vidutiniškai stiprų tiesinį ryšį tarp modelio kintamųjų. Koreliacijos koeficientas lygus 0,72. Prognozuojant prie vidutinio per analizuojamą laikotarpį temperatūrų skirtumo, lygaus 27,41 °C, vėdinimo dedamosios 95 proc. pasikliautinis intervalas yra [48,3 MWh; 63,6 MWh], t.y. vidutinė prognozuojama vertė yra $56,0 \pm 7,6$ MWh. Kitaip tariant, tiesinės regresijos panaudojimas leidžia vėdinimo dedamosios neapibrėžtį sumažinti nuo 19,5 proc., iki 13,6 proc.

Tačiau įstačius šią regresinės analizės metodu sumažintą vėdinimo dedamosios neapibrėžties vertę vietoje anksčiau naudotos, gaunama infiltracijos nustatymo neapibrėžtis sumažėja tik nežymiai: nuo 19,9 proc. iki 18,6 proc. Taigi, atlikta analizė rodo, kad tiesinės regresijos metodo naudojimas rezultato neapibrėžtį sumažino tik labai nežymiai. Todėl šiuo atveju regresinės analizės įtraukimas į infiltracijos nustatymo šilumos kiekių balanso metodo algoritmą yra netikslingas.

5.5.3. Matavimų tikslumo įtaka oro infiltracijos nustatymo neapibrėžčiai

Toliau analizuojama, kurių parametų matavimo tikslumui gaunamo rezultato neapibrėžtis yra jautriausia. 39 lentelėje parodyta, kaip infiltracijos vertinimo neapibrėžtis priklauso nuo vėdinimo sistemų tiekiamo oro debito matavimo tikslumo.

39 lentelė. Neapibrėžties PC3 variantui priklausomybė nuo vėdinimo sistemomis tiekiamo oro debito matavimo tikslumo

Oro debito matavimo tikslumas, proc.	20	10	5	1
Matavimais gaunamos vėdinimo dedamosios neapibrėžtis $\delta(Q_v)$, MWh	10,84	10,78	10,75	10,39
Matavimais gaunamos vėdinimo dedamosios neapibrėžtis $\delta(Q_v)$, proc.	19,0	19,5	18,7	17,8
Infiltracijos dedamosios neapibrėžtis $\delta(Q_{inf})$, MWh	21,79	21,76	21,74	21,57
Vidutinė infiltracija, h^{-1}	0,169	0,166	0,169	0,170
Vidutinės infiltracijos neapibrėžtis, h^{-1}	0,033	0,033	0,033	0,033
Vidutinės infiltracijos neapibrėžtis, proc.	19,6	19,9	19,5	19,2

Oro debito matavimo tikslumui kintant nuo 20 iki 1 proc., rezultato neapibrėžtis sumažėja tik 0,4 proc.

40 lentelėje pateikiami jautrumo analizės rezultatai: kaip infiltracijos neapibrėžtis priklauso nuo vėdinimo sistemomis tiekiamo oro, pastato vidaus ir aplinkos oro temperatūros matavimo tikslumo.

40 lentelė. Neapibrėžties PC3 variantui priklausomybė nuo temperatūros matavimo tikslumo

Temperatūros matavimo tikslumas, °C	1,0	0,5	0,2	0,1	0,02
Matavimais gaunamos vėdinimo dedamosios neapibrėžtis $\delta(Q_v)$, MWh	11,74	10,75	10,75	10,88	10,68
Matavimais gaunamos vėdinimo dedamosios neapibrėžtis $\delta(Q_v)$, proc.	20,4	19,0	18,7	18,8	18,4
Infiltracijos dedamosios neapibrėžtis $\delta(Q_{inf})$, MWh	22,25	21,74	21,74	21,80	21,71
Vidutinė infiltracija, h^{-1}	0,169	0,168	0,169	0,169	0,170
Vidutinės infiltracijos neapibrėžtis, h^{-1}	0,034	0,033	0,033	0,033	0,033
Vidutinės infiltracijos neapibrėžtis, proc.	19,9	19,6	19,5	19,5	19,4

Kaip matyti iš 40 lentelėje pateikiamų analizės rezultatų, infiltracijos nustatymo neapibrėžtis temperatūros matavimo tikslumui taip pat nėra jautri – temperatūros matavimo tikslumui padidėjus nuo 1,0 °C iki 0,02 °C, rezultato neapibrėžtis sumažėja 0,5 proc.

Remiantis atliktos analizės rezultatais, galima teigti, kad šiuolaikinėse PAV sistemose atliekamų matavimų tikslumas (žr. 3 skyrių) yra pakankamas infiltracijos tyrimui pagal matavimų duomenis sudarant pastato šilumos kiekių balansą.

5.6. Pastato charakteristikų įtaka infiltracijos nustatymo neapibrėžčiai

Prekybos centro pastato charakteristikos gana apibrėžtos ir lemia tam tikrą santykį tarp šilumos kiekių balanso dedamųjų. Todėl, siekiant išanalizuoti pastato charakteristikų įtaką infiltracijos nustatymo pagal šilumos kiekių balansą neapibrėžčiai, pasirinkta plati gamybinės ir sandėliavimo paskirties pastatų grupė. Ši pastatų grupė pasižymi dideliu pastatų apšiltinimo lygio ir palaikomos vidaus oro temperatūros intervalu, įvairiu sandarumu orui, skirtingu tiekiamo oro debitu ir šilumos pritekio nuo vidinių šilumos šaltinių. Šioje pastatų grupėje galima rasti ir nedidelių ir labai didelio tūrio pastatų, tarp kurių yra ir turinčių bendrą, atitvaromis nesuskaidytą, erdvę. Daugumai šių pastatų būdinga paprasta archi-

tektūrinė forma. Visos išvardintos šios pastatų grupės savybės lemia šių pastatų tinkamumą atliekamam šilumos kiekių balanso metodo tinkamumo tyrimui. Tiesa, tokio tipo pastatuose PAV sistemos yra įrengiamos nedažnai.

Viena iš pagrindinių pastato charakteristikų, lemiančių pastato šilumos balansą, yra pastato atitvarų šiluminės savybės, kurios gali būti išreiškiamos savitaisiais pastato nuostoliais, skaičiuojamais kaip atskirų išorinių atitvarų dalių plotų bei šilumos tiltelių ilgių ir atitinkamai jų šilumos perdavimo koeficientų sandaugų suma (žr. (4.10) formulę). Todėl atliekama jautrumo analizė, kurioje tiriamas įvesties parametras yra pastato savitieji šilumos nuostoliai per atitvaras ir ilginius šilumos tiltelius. Priimama, kad tiriamieji SAND1–SAND4 variantų pastatai neturi skaidrių atitvarų. Pastato matmenys imami kaip variante PC3. Atitvarų šiluminė varža pasirenkama taip, kad SAND2 varianto pastatas atitiktų viešosios paskirties pastatams keliamus reikalavimus, SAND3 varianto – pramonės pastatams keliamus reikalavimus (STR 2.05.01...2005). SAND1 variantas atitinka geriau, nei pagal privalomus reikalavimus izoliuotą pastatą, o SAND4 variantas – seną pastatą izoliuotą pastatą.

41 lentelė. Infiltracijos nustatymo priklausomybė nuo pastato atitvarų šiluminės izoliacijos

Pastato variantas	SAND1	SAND2	SAND3	SAND4
Pastato savitieji šilumos nuostoliai, W/K	3882	6089	8100	15084
Santykinė savitųjų šilumos nuostolių neapibrėžtis, proc.	6,2	3,5	2,9	1,4
n vidurkio įvertis, h ⁻¹	0,156	0,161	0,158	0,158
Neapibrėžtis, h ⁻¹	0,03	0,03	0,03	0,03
Neapibrėžtis, proc.	17,9	17,8	18,9	21,7

Atlikta jautrumo analizė parodė, kaip iliustruoja 43 lentelėje pateikti analizės rezultatai, kad infiltracijos nustatymo neapibrėžties priklausomybė nuo pastato šiluminės izoliacijos lygio yra silpna, ribinių variantų atveju vertinimo neapibrėžtis skiriasi 3,8 proc.

Toliau buvo ištirtas rezultato neapibrėžties jautrumas pastato sandarumui. Tiriamos sandarumo reikšmių ribos pasirinktos taip, kad vidutinės reikšmės atitinka viešosios paskirties ir pramonės pastatams keliamus reikalavimus (STR 2.05.01...2005), o ribinė minimali vertė atitinka geriausią statybos praktiką.

42 lentelė. Infiltracijos vertinimo neapibrėžties priklausomybė nuo pastato sandarumo orui

Pastato sandarumas orui, h^{-1}	1,0	1,5	3,0	5,0
SAND3 variantas				
n vidurkio įvertis, h^{-1}	0,107	0,158	0,318	0,531
Neapibrėžtis, h^{-1}	0,03	0,03	0,03	0,03
Neapibrėžtis, proc.	26,8	18,9	10,5	7,7

Kaip matyti iš 42 lentelėje pateiktų skaičiavimo rezultatų, santykinė neapibrėžtis priklauso nuo sandarumo, nes kuo sandaresnis pastatas, tuo mažesnė vidutinė infiltracijos vertė. Jei priimtina neapibrėžtimi laikysime 20 proc. ribą, tai galima teigti, kad nagrinėjamu atveju pastato sandarumas turi būti ne didesnis negu $1,4 h^{-1}$ (prie 50 Pa). Kadangi rezultato neapibrėžtis priklauso ir nuo kitų faktorių, todėl pagrįstai ribine sandarumo verte, galima pasirinkti $1,2 h^{-1}$ (prie 50 Pa). T.y. infiltracijos nustatymo galimybes verta nagrinėti pastatams, kurių sandarumas yra mažesnis negu $1,2$ tūrio pasikeitimo per valandą esant 50 Pa slėgio skirtumui. Kaip galima pastebėti iš faktinių sandarumo matavimų duomenų apžvalgos (žr. 1.5 skyrelį), daugumos pastatų sandarumas yra kur kas mažesnis, nei $1,2 h^{-1}$ (prie 50 Pa). Taigi, įprastinėje statybos praktikoje pasiekiamas pastato sandarumas nėra siūlomo infiltracijos metodo taikymą ribojantis veiksnys.

Atliktas realaus pastato infiltracijos vertinimas (žr. 4 skyrių) parodė, kad taikant siūlomą metodą praktikoje sunkiausia tiksliai įvertinti šilumos pritekį nuo vidinių šilumos šaltinių. Sumodeliuotų variantų analizės rezultatai (žr. 34 lentelę) parodė, kad šilumos pritekio vertinimo neapibrėžtis stipriausiai įtakoja rezultato neapibrėžtį. Todėl buvo atlikta papildoma rezultato neapibrėžties jautrumo šilumos pritekio vertei ir jos neapibrėžčiai analizė.

43 lentelėje pateikiami jautrumo analizės rezultatai, kai SAND3 pastato variantui keičiama šilumos pritekio ir jo vertinimo neapibrėžties vertė.

43 lentelė. Infiltracijos nustatymo priklausomybė nuo šilumos pritekio

Šilumos pritekio nuo vidinių šilumos šaltinių vidutinė vertė, W/m^2	0	5	5	22	22
Šilumos pritekio nuo vidinių šilumos šaltinių standartinis nuokrypis, W/m^2	0	0	5	0	5
n vidurkio įvertis, h^{-1}	0,160	0,159	0,165	0,160	0,160
Neapibrėžtis, h^{-1}	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03
Neapibrėžtis, proc.	9,9	10,4	11,1	16,9	17,5

Kaip matyti iš 43 lentelėje pateikiamų jautrumo analizės rezultatų, jei šilumos pritekio nėra arba jis gali būti įvertinamas visiškai tiksliai, tuomet SAND3 varianto atveju rezultato neapibrėžtis sumažėja beveik dvigubai.

Kadangi, kaip matyti iš lygybių (4.5) ir (4.8), infiltracijos vertinimo neapibrėžtį lemia absoliutinės šilumos kiekių balanso dedamųjų vertės, galima nustatyti, kokia yra maksimali šilumos pritekio, tenkančio 1 m^3 pastato tūriui, neapibrėžties vertė, siekiant įvertinti infiltraciją su užsiduota neapibrėžtimi. Tarkim, jei oro kaitos dėl infiltracijos vidutinė vertė yra $0,15 \text{ h}^{-1}$ ir siekiama vertinimo neapibrėžtis yra 20 proc. ($0,03 \text{ h}^{-1}$), tai šilumos kiekių balanso dedamosios neapibrėžtis turi būti ne didesnė kaip $147 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^3 \cdot \text{mėn.}}$, kai vidutinis mėnesio tempe-

ratūrų skirtumas tarp pastato vidaus ir aplinkos oro lygus $20 \text{ }^\circ\text{C}$, ir ne didesnė nei $220 \text{ Wh/m}^3/\text{mėn.}$, temperatūrų skirtumas lygus $30 \text{ }^\circ\text{C}$. Iš to išplaukia, kad šilumos pritekio vertinimo neapibrėžtis turi būti mažesnė atitinkamai už $147 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^3 \cdot \text{mėn.}}$

ir $220 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^3 \cdot \text{mėn.}}$. Šiuo atveju skaičiavimai atliekami per standartinį 30 dienų mėnesį.

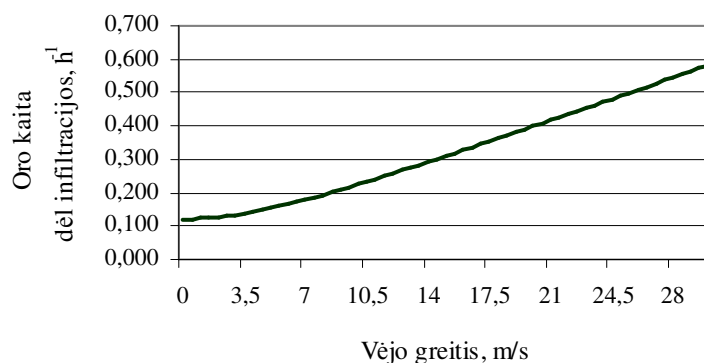
5.7. Aplinkos sąlygų įtaka infiltracijos nustatymo neapibrėžčiai

Aplinkos sąlygos, kurios gali turėti įtakos infiltracijos vertinimo neapibrėžčiai, yra aplinkos oro temperatūra ir vėjo greitis.

Tiek pastato aplinkos oro temperatūra, tiek vėjo greitis, turi įtakos infiltracijos intensyvumui. Temperatūros įtaka jau buvo nagrinėta 1.4 skyrelyje (žr. 6 pav.). Vėjo greičio įtaka analizuojama šiame skyrelyje.

Lietuvoje priklausomai nuo vietovės vidutinis metinis greitis yra nuo $2,7 \text{ m/s}$ (Varėnoje) iki $5,7 \text{ m/s}$ (Nidoje). Priklausomai nuo metų laiko, vidutinis mėnesio vėjo greitis, kaip pvz. Vilniuje, svyruoja nuo $2,7 \text{ m/s}$ (rugpjūčio mėn.) iki $4,3 \text{ m/s}$ (gruodžio, sausio mėn.). Metams bėgant vidutinio vėjo greičio svyravimai labai nedideli (RSN 156 – 94...1994). Tyrimams naudoto laikotarpio faktinis vėjo greitis kito nuo 0 iki $8,0 \text{ m/s}$, vidutinis vėjo greitis buvo $3,1 \text{ m/s}$.

Oro kaitos dėl infiltracijos priklausomybė nuo vėjo greičio, sudaryta pagal LBL modelį, aprašytą 1.3 skyrelyje, pateikiama 41 pav.



41 pav. Oro kaitos dėl infiltracijos priklausomybė nuo vėjo greičio

Reikalinga nustatyti, kaip infiltracijos vertinimo neapibrėžtį įtakoja vėjo greičio vertės, buvusios per matavimų laikotarpį. Kaip parodyta 41 paveiksle, vėjo greitis įtakoja infiltracijos intensyvumą. Tyrimui pasirinktas PC3 pastato variantas. Kadangi tiriamo pastato atveju patalpų vidaus oro temperatūra yra palaikoma reguliuojant vėdinimo sistemomis tiekiamo oro temperatūrą, dėl didesnės vėjo ir tuo pačiu infiltracijos svyravimo amplitudės, bus ir didesnė tiekiamo oro temperatūros verčių sklaida. Tai lems didesnę išmatuotos vėdinimo dedamosios neapibrėžtį. Atlikto modeliavimo rezultatai, rodantys vėjo stiprumo svyravimo įtaką infiltracijos vertinimo neapibrėžčiai, pateikti 44 lentelėje.

44 lentelė. Vėjo greičio svyravimo įtaka vertinimo neapibrėžčiai

Vėjo greičio verčių intervalas, m/s	[0; 0]	[0; 8]	[0; 10]	[0; 20]
Vėdinimo dedamosios neapibrėžtis, proc.	17,6	18,7	18,3	16,5
n vidurkio įvertis, h ⁻¹	0,171	0,169	0,170	0,175
n vidurkio neapibrėžtis, h ⁻¹	0,033	0,033	0,033	0,033
n vidurkio neapibrėžtis, proc.	19,1	19,3	19,4	18,6

Kaip matyti iš analizės rezultatų, pateiktų 44 lentelėje, vėjo greičio kitimo intervalas per vertinimo laikotarpį beveik neturi įtakos infiltracijos vertinimo neapibrėžčiai. Esant didesniam vėjo greičio svyravimui santykinė neapibrėžtis netgi sumažėja dėl tos priežasties, kad esant didesniam vėjo greičiui, didesnė ir infiltracijos vertė.

Tačiau jei siekiama nustatyti vidutinę laikotarpio (pvz., mėnesio) infiltracijos intensyvumo vertę naudoti sprendžiant apie pastato savybes vidutinėmis sąlygomis, tuomet pageidautina atsižvelgti į vertinamuoju laikotarpiu buvusį vidu-

tinį vėjo greitį. Šiuo atveju nustatant infiltraciją matavimus, atliktus vėjo greičiui esant didesniai nei 10 m/s, rekomenduotina atmesti.

Aplinkos oro temperatūra, skirtingai nuo vėjo greičio, įtakoja ne tik infiltracijos vertę, bet ir kitas pastato šilumos kiekių balanso dedamąsias. Todėl aplinkos oro temperatūros verčių įtaka matavimo laikotarpiu yra daug sudėtingesnė, nei vėjo greičio.

Jeigu aplinkos oro temperatūros vidurkis vienodas, šios temperatūros svyravimo amplitudė rezultato neapibrėžčiai didelės įtakos neturi. Tačiau skirtinga aplinkos oro vidurkio vertė vertinamuoju laikotarpiu lems kitokią, nei nagrinėtu atveju, kiekvienos šilumos kiekių balanso dedamosios įtaką rezultato neapibrėžčiai. Dėl sudėtingų šilumos kiekių balanso dedamųjų tarpusavio priklausomybių, vertinamojo laikotarpio vidutinės aplinkos oro temperatūros įtakos nustatymas infiltracijos vertinimo neapibrėžčiai reikalauja atskiro didelės apimties tyrimo ir todėl šiame darbe nėra atliktas.

5.8. Infiltracijos nustatymo pagal šilumos kiekių balansą ribos ir sąlygos

Šiame skyrelyje pateikiamo metodo taikymo ribos ir sąlygos yra nustatytos apibendrinant visus šiame darbe atlikto tyrimo rezultatus ir remiantis tyrime taikytomis prielaidomis.

Kadangi metodo rezultato neapibrėžtį, o tuo pačiu ir metodo taikymo ribas, nulemia daugelis tarpusavyje susijusių faktorių, aprašomos ribos yra tik orientacinės.

5.8.1. Pastato charakteristikos

Pagrindinės pastato charakteristikos, į kurias turi būti atsižvelgiama analizuojant metodo tinkamumą konkrečiam pastatui yra šios:

1. pastato dydis, išreikštas tūriu;
2. pastato atitvarų šiluminės izoliacijos lygis, išreikštas savitųjų šilumos nuostolių verte;
3. pastato sandarumas, išreikštas oro kaita, esant 50 Pa slėgio skirtumui;
4. šilumos pritekio nuo vidinių šilumos šaltinių vidutine verte, išreikšta šilumos srautu, tenkančiu pastato ploto kvadratiniam metrui.

5.8.2. Aplinkos sąlygų pasirinkimas matavimams

Kadangi darbe pateiktas infiltracijos nustatymo metodas remiasi PAV sistemų matavimų duomenimis, kurie gali būti kaupiami viso pastato eksploatavimo metu, galima nustatyti vidutinę infiltracijos vertę bet kuriam pasirinktam laikotarpiui.

5.8.3. Reikalavimai pastato automatizuoto valdymo sistemose kaupiamiems duomenims

Pastato PAV sistema turi būti įrengta laikantis visų reikalavimų, minimizuojančių matavimų paklaidas. Galima naudotis rekomendacijomis, pateikiamomis (IEA Annex 34...2006).

PAV sistemoje turėtų būti įrengti visi jutikliai, reikalingi įvertinti didžiausias šilumos kiekių balanso dedamąsias. Efektyviausia būtų įdiegti infiltracijos nustatymo galimybę jau PAV sistemos projektavimo metu. Tačiau įmanoma pritaikyti daugumą jau įrengtų PAV sistemą.

PAV sistemos pritaikymo etapai:

1. Atlikti šilumos kiekių balanso analizę pagal projektinius pastato ir MKS duomenis ir nustatyti reikalingus matuoti parametrus. Remiantis neapibrėžties analizės rezultatais, galima atmesti nebūtinus matuoti parametrus (jei vertinimas parodo nevertintiną jų įtaką rezultatui).

2. Nustatyti techninės įrangos poreikį.

3. Nustačius reikalingą kaupiamų duomenų dažnumą, parengti reikalingų duomenų registravimo ir saugojimo algoritmą.

4. Parengti infiltracijos nustatymo modelį ir įdiegti jį į bendrą sistemos programinį aprūpinimą.

Atliktos analizės rezultatai parodė, kad šiuo metu praktikoje įprastas PAV sistemos matavimų tikslumas jau yra pakankamas šilumos kiekių balanso metodo taikymui infiltracijai vertinti.

Bendrosios išvados

1. Informacijos šaltinių apžvalga ir darbe atliktas įprastiniais metodais gaunamų rezultatų neapibrėžties tyrimas rodo naujų metodų poreikį infiltracijai esamuose pastatuose nustatyti. Esamų matavimais pagrįstų infiltracijos vertinimo metodų neapibrėžtis siekia nuo 14 iki 25 proc., tačiau pastato sandarumo ir infiltracijos matavimai yra brangūs ir techniškai sudėtingi, ypač kai jei atliekami dideliuose pastatuose. Matavimais nepagrįstų metodų neapibrėžtis sunkiai įvertinama ir didesnė nei 50 proc.
2. Apžvelgus literatūros šaltinius apie pastato mikroklimato automatizuoto valdymo (PAV) sistemas, vis dažniau įrengiamas šiuolaikiniuose pastatuose, nustatyta, kad šiose sistemose nuolat kaupiamų matavimo duomenų pakanka pastato šilumos kiekių balanso sudarymui. Šilumos kiekių balansą sudarant pagal matavimų duomenis, galima nustatyti vidutinį faktinį infiltracijos intensyvumą pastato eksploatacijos sąlygomis.
3. Darbe pirmą kartą sudarytas oro infiltracijos intensyvumo nustatymo pagal pastato šilumos kiekių balansą algoritmas. Pagal šį algoritmą sukurtas kompiuterinis modelis su integruota neapibrėžties analize, leidžiantis įvertinti vidutinį infiltracijos intensyvumą ir šio vertinimo neapibrėžtį.

4. Darbe parengus kompiuterinį pastato šilumos kiekių balanso modelį, imituojantį stochastinį pastate vykstančių šiluminių reiškinių ir jų parametrų matavimų pobūdį, atlikta jautrumo ir neapibrėžties analizė keletui tipinių pastatų. Remiantis atlikto tyrimo rezultatais galima teigti, kad šiuolaikinių pastato automatizuoto valdymo sistemų atliekamų matavimų tikslumas (oro temperatūros – 0,2 K, oro debito – 5 proc. nuo matuojamos vertės, šilumos kiekio – 3 proc. nuo matuojamos vertės) yra pakankamas infiltracijos vertinimui. Pakankamas matavimų skaičius gaunamas vieną mėnesį registruojant matavimų duomenis kas tris valandas (gaunama apie 200 matavimų). Ne trumpesnis kaip mėnesio trukmės vertinimo laikotarpis pasirinktinai dėl šilumos pritekio paros ir savaitės svyravimo įtakos rezultato neapibrėžčiai sumažinimo.
5. Atliktos analizės rezultatai parodė, kad pasirinkus 20 proc. infiltracijos neapibrėžties vertinimo ribą, infiltracija pagal šilumos kiekių balansą gali būti nustatoma pastatuose, kurių šildomas plotas ne mažesnis nei 10 tūkst. m², o sandarumas ne didesnis negu 1,2 h⁻¹ prie 50 Pa. Infiltracijos vertinimo neapibrėžtis mažesnė pastatams, kurių atitvaros geriau izoliuotos, tačiau vertinimo neapibrėžties priklausomybė nuo atitvarų šiluminės varžos yra silpna, kai vertinamas pastatas atitinka aukščiau pateiktus pastato dydžio ir sandarumo kriterijus.
6. Analizė atlikta esant būdingoms Lietuvos klimatui šildymo sezono aplinkos oro temperatūroms ir vėjo greičiams. Atliktas tyrimas parodė, kad infiltracijos vertinimo pagal pastato šilumos kiekių balansą neapibrėžtis nėra jautri vėjo greičio svyravimams vertinamuoju laikotarpiu, vėjo greičio svyravimo poveikis sudarė ne daugiau nei 1 proc. vertinimo neapibrėžties. Analizės rezultatai taikytini, kai vertinamuoju laikotarpiu vidutinė lauko oro temperatūra yra lygi arba žemesnė nei 0,2 °C.
7. Infiltracijos intensyvumo vertinimo pagal pastato šilumos kiekių balansą neapibrėžtis jautri šilumos pritekio vertinimui, todėl metodas gali būti taikomas, kai šilumos pritekis sudaro nežymią šilumos kiekių balanso dalį arba gali būti pakankamai tiksliai įvertinamas. Siekiant gauti 20 proc. infiltracijos neapibrėžtį esant 0,15 h⁻¹ vidutinei infiltracijai, šilumos pritekio absoliutinė neapibrėžtis turi būti mažesnė nei 147 Wh/m³/mėn., kai vidutinis mėnesio temperatūrų skirtumas tarp pastato vidaus ir aplinkos oro lygus 20 °C, ir mažesnė nei 220 Wh/m³/mėn., kai temperatūrų skirtumas lygus 30 °C.

Literatūros sąrašas

- Air Barrier Solutions, 2001. BETEC/DOE/ORNL Spring Symposium, Pollock.
- Aksomaitis, A. 2000. Tikimybių teorija ir statistika. Kaunas: Technologija. 345 p. ISBN 9986-13-893-0.
- Anderson, M., et al. 2007. An experimental system for advanced heating, ventilating and air conditioning (HVAC) control. *Energy and Buildings* 39(3): 136–147.
- Anis, W. A. Y. 2001. The impact of airtightness on system design. *ASHRAE Journal* Dec., 2001: 31–35.
- Ashley, J. L.; Lagus P. L. 1984. Air infiltration measurements in large military aircraft hangers. *ASTP Special Tech.Pub.904*. 120–134.
- ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers) 2001. *Fundamentals Handbook (SI). Ventilation and Infiltration*.
- ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers). *HVAC 2007. Applications Handbook, SI Edition*. 1039 p. ISBN: 9781933742151.
- ASHRAE Guideline 2-1986 (RA96), *Engineering analysis of experimental data*, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc., Atlanta, 1986.
- ASTM. E779-87, *ASTM method for determining air leakage rates by fan pressurization test*, ASTM, 1987.
- ATTMA. *Measuring air permeability of building envelopes*. ATTMA, 2006.
- Awbi, H. B. 2003. *Ventilation of Buildings*. Taylor & Francis. 528 p. ISBN 0415270553.
- Barhoun, H.; Guarracino, G. 2004. Evaluating the energy impact of air infiltration through walls with a coupled heat and mass transfer method, in *Proceedings of the CIB held in Toronto, Canada*. 1–9.

- Barhoun, H.; Guarracino, G. 2006. Influence of air leakage in building's walls on heat transmission loss through its envelope, in Proceedings of AIVC 27th conference - EPIC2006AIVC "Technologies & sustainable policies for a radical decrease of the energy consumption in buildings, Lyon, France, 2006. 639–646.
- Barley, D., et al. 2005. Procedure for measuring and reporting commercial building energy performance. Technical report NREL/TP-550-38601, USA.
- Basiri, F., et al. 2003. Building automation systems used for function evaluation, in Proceedings of the 4th International Conference on Cold Climate Heating, Ventilation and Air-Conditioning, in 2003.
- Bearg, D. W. 2000. Monitoring for ventilation and airtightness. ASHRAE Transactions 106: 719 p.
- Beausoleil-Morrison, I. 2000. The adaptive coupling of heat and air flow modelling within dynamic whole-building simulation. Doctoral Thesis. ESRU.
- Bernard, A. M.; Lemaire, M. C. 2000. Influence of building air tightness on ventilation losses, in Proceedings of 21st AIVC Annual Conference "Innovations in Ventilation Technology", held The Hague, Netherlands, paper 29. UK, Air Infiltration and Ventilation Centre.
- Bielinskis, F.; Bachanovas, F. 2001. Kompiuterizuotų energijos apskaitos ir monitoringo sistemų projektavimas. Energetika, 3(1): 16–23.
- Blackwell, B. F.; Dowding, K. J. 2002. Sensitivity and uncertainty analysis for thermal problems. Proceedings of the 4th International Conference on Inverse Problems in Engineering. 2002.
- BRE. 2005. BREEAM Building research establishment environmental assessment method. Watford, UK: Building Research Establishment.
- Brennan, T., et al. 2007. Measuring airtightness at ASHRAE headquarters. ASHRAE Journal, Sep 2007: 26–32.
- Canbay, C. S., et al. 2004. Evaluating performance indices of a shopping centre and implementing HVAC control principles to minimize energy usage. Energy and Buildings 36(6): 587–598.
- Carey, P. S., Ethwidge, D. W. 2001. Leakage measurements using unsteady techniques with particular reference to large buildings. Building Services Engineering Research & Technology 22: 69–82.
- CGSB Standard CAN/CGSB-149.10-M-86, Determination of the airtightness of building envelopes by the fan depressurization method. Canadian General Standards Board, Ottawa, 1986.
- Chan, W. R., et al. 2003. Analysis of U.S. Residential Air Leakage Database. Lawrence Berkeley National Laboratory Report number 53367.
- Chouquet, J.; Kohler N.; Bodin O. 2003. Dealing with sensitivity and uncertainty analysis in integrated building LCA model. Internationales Kolloquium über Anwendungen der Informatik und Mathematik in Architektur und Bauwesen, IKM, 16. Weimar, Bauhaus-Universität. Gali būti rastas internete: <http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/3842003>.
- Chow, W. K.; Fung, W. Y.; Wong, L.T. 2002. Preliminary studies on a new method for assessing ventilation in large spaces. Building and Environment 37: 145–152.
- CIBSE Technical Memorandum TM23. Testing Buildings for air leakage. 2000.
- Clarke, J.A.; Yaneske, P.P; Pinney, A.A. 1991. The harmonisation of thermal properties of building materials, Report TN91/6, BRE, Garston, Watford, UK.
- Coleman, H. W.; Style, W. G. 1999. Experimentation and uncertainty analysis for engineers. John Wiley & Sons, Inc., New York. 298 p.

- Demokritou, P., et al. 2002. An experimental method for contaminant dispersal characterization in large industrial buildings for indoor air quality (IAQ) applications. *Building and Environment*, 37(3): 305–312.
- Deru, M.; Sherman M. 2003. Final project report for DPD, Inc. Office Building in Lansing, Michigan. NREL/TP-550-33108.
- Duska, M., et al, 2007. Trend in heat gains from office equipment. *Proceedings of Indoor Climate of Buildings, Strbske Pleso, 28 Nov–1 Dec, SSTEP, Bratislava, [CD-ROM]*.
- Edwards, C. 1999. Modelling of ventilation and infiltration energy impacts in mid and high-rise apartment buildings. *Shelt Air, Ontario*. 54 p.
- Emery, A. F. 2000. 3rd Order analysis of stochastic thermal systems with correlated uncertain properties. *proceedings of the 8th ASCE Specialty Conference on Probabilistic Mechanics and Structural Reliability, 2000*.
- Emmerich, S. J.; McDowell, T. P.; Anis W. 2005. Investigation of the impact of commercial building envelope airtightness on HVAC energy use. National Institute of Standards and Technology, TESS, Inc. Shepley Bulfinch Richardson and Abbott. NISTIR 7238, Gaithersburg, MD. 48 p.
- Emmerich, S. J.; McDowell, T.; Anis, W. 2007. Simulation of the impact of commercial building envelope airtightness on building energy utilization. *ASHRAE Transactions* 113(2).
- Emmerich, S. J.; Persily A. K. 2005. Airtightness of commercial buildings in the U.S. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD. 26th AIVC Conference. 6 p.
- Emmerich, S. J; Persily A. K. 1999. Energy impacts of infiltration and ventilation in U.S. office buildings using multizone airflow simulation. USA, ASHRAE, "IAQ and Energy 98: Using ASHRAE Standards 62 and 90.1", 1998. 191–203.
- EN 13829:2001 Thermal performance of buildings. Determination of air permeability of buildings. Fan pressurization method. Brussels, 2001.
- EN 832 Thermal performance of buildings - Calculation of energy use for heating – Residential buildings. European Committee for Standardisation. Brussels, 1998.
- Feldman, D., et al, 1998. A simple apparatus for the evaluation of air infiltration through building envelope components. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 77–78: 479–489.
- Fisher, D.E.; Pedersen, C.O. 1997. Convective heat transfer in building energy and thermal load calculations. *ASHRAE Transactions*, 103(2).
- Fracastoro, G. V. et al, 2002. Experimental and theoretical analysis of natural ventilation by windows opening. *Energy and Buildings* 34(2): 817–827.
- Furbringer, J.-M.; Roulet, C.-A. 1991. Study of the errors occurring in measurement of leakage distribution in buildings by multifan pressurisation. *Building and Environment* 26(2): 111–120.
- Geissler, A. 2001. Error Estimation of measurement methods by computer simulation, in *Proceedings of Seventh International IBPSA Conference, held in Rio de Janeiro, Brazil, 2001*.
- Ghiaus, C. 2006. Experimental estimation of building energy performance by robust regression. *Energy and Buildings*, 38(6): 582–587.
- Gillespie, K. L., et al. 2006. A guide for specifying performance monitoring systems in commercial and institutional buildings. *Proceedings of National Conference on Building Commissioning, San Francisco, 2006*.

- Guyon, G. 1999. Influence of turbulent wind on air change rates an application with clim2000 software program. Proc. Building Simulation '99, IBPSA conference, Kyoto, Japan. 683–695.
- Haarhoff, J.; Mathews, E. H. 2006. A Monte Karlo method for thermal building simulation. *Energy and Buildings* 38(12): 1395–1399.
- Haghighat, F.; Brohus, H.; Rao, J. 2000. Modelling air infiltration due to wind – fluctuations - a review. *Building and Environment* 35: 377–385.
- Hancock, E.; Norton, P.; Hendron, B. 2002. building america system performance test practices: Part 2, Air-exchange measurements. U.S. National Renewable Energy Laboratory.
- Heijmans, N.; Wouters, P. 2002. Impact of the uncertainties on wind pressures on the prediction of thermal comfort performances. International Energy Agency Annex 35 project Technical Report, Aalborg University, Denmark.
- Hensen, J. L. M. 1991. On the thermal interaction of building structure and heating and ventilating system. Doctoral Thesis, ESRU.
- Hensen, J. L. M. 1998. Towards integrated environmental engineering using information & communication technology. Habilitation Thesis, Czech Technical University in Prague.
- HN 98:2000. Natūralus ir dirbtinis darbo vietų apšvietimas. Apšvietos ribinės vertės ir bendrieji matavimo reikalavimai. LR sveikatos apsaugos ministerija. Vilnius, 2000.
- Holm, A. H.; Künzeli, H. M. 2002. Uncertainty of hygrothermal calculations. 6th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries (Trondheim, Norway, 6/17/2002), July 01: 611–618.
- Hood, G.M. 2008. PopTools version 3.0.2. Prieiga per internetą: <<http://www.cse.csiro.au/poptools>>.
- Hopfe, C., et al. 2007. Model uncertainty and sensitivity analysis for thermal comfort prediction, in Proceedings of the 12th Symp for Building Physics, held on 19–31 March, Technische Universität Dresden, 2007. 103–112.
- Hopfe, C., et al. 2007. Uncertainty analysis for building performance simulation – a comparison of four tools. Proceedings of the 10th IBPSA Building Simulation Conference, 3-5 September, Tsinghua University, Beijing, 2007. 1383–1388.
- Hopfe, C.; Hensen, J.; Plokker, W. 2006. Introducing uncertainty and sensitivity analysis in non-modifiable building performance software.
- Hopfe, C.; Hensen, J.; Plokker, W. 2007. Uncertainty and sensitivity analysis for detailed design support. Proceedings of the 10th IBPSA Building Simulation Conference, 3-5 September, Tsinghua University, Beijing, China, 2007. 1799–1804.
- IEA Annex 25. 1996. Building Optimization and Fault Diagnosis Source Book, Edited by J. Hyvärinen and S. Kärki, Technical Research Centre of Finland.
- IEA Annex 34. 2006. Collaborative computer-aided evaluation of HVAC system performance. Edited by R. Jagpal, UK, Faber Maunsell Ltd.
- Iowa Energy Center. 2008. An overview of direct digital controls. Prieiga per internetą: <<http://www.kjww.com>>.
- Jennings, P. 2000. Airtightness in buildings. Building for a future, Winter magazine. Prieiga per internetą: <<http://www.buildingforafuture.co.uk>>.
- Jiang, Y.; Chen, Q. 2001. Study of natural ventilation in buildings by large eddy simulation. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 89: 1155–1178.

- Juodis, E. 2003. Thermal balance of a building as a tool for evaluating infiltration rate. In: Proceedings of the 4th international conference on Cold Climate HVAC, Trondheim, Norway, 2003. 109 p.
- Karagiozis, A. N. 2001. Impact of air leakage on the thermal and moisture performance of the building envelope. Air Barriers III: Air Barrier Solutions for Buildings in North American Climates. Washington, DC USA,
- Khalifa, A.J.N.; Marshall, R. H. 1990. Validation of heat transfer coefficients on interior building surfaces using a real-sized indoor test cell. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 33(10): 2219–2236.
- Kopustinskas, V.; Alzbutas, R.; Augutis, J. 2007. Matematinų modelių parametų jautrumo ir rezultatų neapibrėžtumo statistiniai tyrimo metodai. *Energetika* 53(3): 10–15. Vilnius: Lietuvos mokslų akademijos leidykla.
- Kotek, P., et al. 2007. Technique of uncertainty and sensitivity analysis for sustainable building energy systems performance calculations, in Proceedings of the 10th IBPSA Building Simulation Conference, 3-5 September, Tsinghua University, Beijing, China, 2007. 629–636.
- Kugelevičius, J. A.; Kuprys, A. 2003. Stochastinių energijos sunaudojimo procesų identifikacija. *Energetika* 4: 42–48. Vilnius: Lietuvos mokslų akademijos leidykla.
- Levermore, G. J. 2000. Building energy management systems: an application to heating, natural ventilation, lighting and occupant satisfaction. Taylor & Francis. 519 p. ISBN:0419225900.
- Li, Y., Delsante, A. 2001. Natural ventilation induced by combined wind and thermal forces. *Building and Environment* 36: 59–71.
- Liddament, M. W.; Orme, M. 1998. Energy and ventilation. *Applied Thermal Engineering* 18(11): 1101–1109.
- Lowe, R.; Bell, M.; Roberts, D. 2003. Developing future UK energy performance standards. Centre for the Built Environment.
- LST EN ISO 12569:2002. Statinių šilumos izoliacija. Oro apykaitos pastatuose nustatymas. Žymėtųjų dujų praskiedimo metodas.
- Lundin, M. 2004. Development and validation of a method aimed at estimating building performance parameters. *Energy and Buildings* 36(11): 905–914.
- Lyberg, M. D. 1997. Air infiltration Basics. *Building and Environment* 32(2): 95–100.
- Macdonald, I. A. Quantifying the effects of uncertainty in building simulation. Ph.D. thesis. Department of Mechanical Engineering, University of Strathclyde, 2002.
- Macdonald, I. A; Clarke, J. A. 2007. Applying uncertainty considerations to energy conservation equations. *Energy and Buildings* 39(9): 1019–1026.
- Macdonald, I. A; Clarke, J. A; Strachan, P. A. 1999. Assessing uncertainty in building simulation, in Proceedings of the International Conference “Building Simulation '99”, held in Kyoto, Japan, in 1999. 683–695.
- Macdonald, I.; Strachan, P. 2001. Practical application of uncertainty analysis. *Energy and Buildings* 33: 219–227.
- Mathews, E. H., et al. 2000. Developing cost efficient control strategies to ensure optimal energy use and sufficient indoor comfort. *Applied Energy* 66: 135–159.
- Mathews, E. H., et al. 2001. HVAC control strategies to enhance comfort and minimize energy usage. *Energy and Buildings* 33: 853–863.

- McWilliams, J. 2002. Review of airflow measurement techniques. Lawrence Berkeley National Laboratory, Lawrence Berkeley National Laboratory Report number 49747.
- McWilliams, J.; Jung, M. 2006. Development of a mathematical air-leakage model from measured data. Lawrence Berkeley National Laboratory Report number 59041.
- Miguel, A. F. 2001. Wind-induced airflow through permeable materials Part II: air infiltration in enclosures. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 89: 59-72.
- Modera, M. P.; Persily, A. K. 1995. Airflow performance of building envelopes, components and systems. ASTM International. ISBN 0803120230. 302 p.
- O'Sullivan D. T. J. 2004. Improving building operation by tracking performance metrics throughout the building lifecycle (BLC). *Energy and Buildings* 36(11): 1075-1090.
- Orme, M. 2001. Estimates of the energy impact of ventilation and associated financial expenditures. *Energy and Buildings* 33: 199-205.
- Pedersen, C. O.; Fisher, D. E.; Liesen, R. J. 1997. Development of a heat balance procedure for calculating cooling loads, *ASHRAE Transactions* 103(2): 459-468.
- Persily, A. K. 1998. Airtightness of commercial and institutional buildings: blowing holes in the myth of tight buildings. USA, Atlanta, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE), 1998, proceedings of "Thermal performance of the exterior envelopes of buildings VII" a conference held Sheraton Sand Key Hotel, Clearwater Beach, Florida, 1998. 829-837.
- Persily, A. K. 1999. Myths about building envelopes. *ASRAE Journal*.
- Persily, A. K. 2004. Building ventilation and pressurization as a security tool. *ASHRAE Journal* 46(9): 18-26. ProQuest Education Journals.
- Price, A.; Smith, T.F.; Suby A.A. 2007. Estimating the errors of measured variables and determining how the errors propagate. *HPAC Engineering Web*. Prieiga per internetą: <<http://www.hpac.com>>.
- Proskiw, G; Phillips, B., 2001. Air leakage characteristics, test methods, and specifications for large buildings, Report, Canada Mortgage and Housing Corporation.
- Roulet, C.-A. 2007. Ventilation and airflow in buildings: methods for diagnosis and evaluation. 128 p. ISBN 184407451X. Earthscan.
- RSN 156 – 94. Statybinė klimatologija. LR aplinkos ministerija. Vilnius, 1994.
- Said, M. N. A. 1997. Measurements of air change rates and air flow patterns in large single-cell buildings. *Energy and Buildings* 26:175-182.
- Salonvaara, M.; Karagiozis, A.; Holm, A. 2001. Stochastic building envelope modelling – the influence of material properties, in Proceedings for Performance of Exterior Envelopes of Whole Buildings VIII: Integration of Building Envelopes, December 2-7, Clearwater Beach, Florida, 2001.
- Schein, J., et al. 2006. A rule-based fault detection method for air handling units. *Energy and Buildings* 38(12): 1485-1492.
- Seem, J. E. 2007. Using intelligent data analysis to detect abnormal energy consumption in buildings. *Energy and Buildings* 39(1): 52-58.
- Sharples, S.; Closs, S. 2004. Airtightness: the largest building ever tested. *Air Information Review*. 25(3): 1-4.
- Sharples, S.; Closs, S.; Chilengwe, N. 2005. Air tightness testing of very large buildings: a case study. *Building Services Engineering Research & Technology*, 26 (2): 167-172.

- Shaw, C. Y. 1981. Air tightness: Supermarkets and Shopping Malls. ASRAE Journal. 44–46.
- Sherman, M. H. 1989a. Uncertainty in air flow calculations using tracer gas measurements. Building and Environment 24(1): 347–354.
- Sherman, M. H. 1989b. Air infiltration measurement techniques, in proceedings of the 10th air infiltration and ventilation centre conference, ESPOO, Finland, 1989. Lawrence Berkeley National Laboratory Report number 10705..
- Sherman, M. H. 1990. Air infiltration measurement techniques, in Proceedings, 10th AIVC Conference: Progress and Trends in Air Infiltration and Ventilation Research, Vol. 1, Conventry, Great Britain: Air Infiltration and Ventilation Centre, 1990. Lawrence Berkeley National Laboratory Report number 27656. 63–87.
- Sherman, M. H. 1998. The use of blower – door data. Lawrence Berkeley National Laboratory report number 36173.
- Sherman, M. H. 2006. Air Tightness of US Homes: Model Development. Lawrence Berkeley National Laboratory Report number 59202.
- Sherman, M. H.; Chan, R. 2004. Building Airtightness: Research and Practice. Lawrence Berkeley National Laboratory Report number 53356.
- Sherman, M. H.; Modera, M. 1984. ASTM STP904, Comparison of Measured and Predicted Infiltration using the LBL Infiltration Model, West Conshohocken, Pennsylvania: American Society for Testing and Materials.
- Sherman, M. H; Palmiter, L. 1994. Uncertainty in Fan Pressurization Measurements. Lawrence Berkeley National Laboratory Report number 32115. Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- Sherman, M.H.; Dickeroff D.J. 1998. Air Tightness of U.S. Dwellings. ASHRAE Transactions.1359–1367.
- Stankevičius, V.; Karbauskaitė, J.; Bliūdžius, R. 2002. Šilumos suvartojimo pastatuose analizė. Energetika 2: 57–61. Vilnius: Lietuvos mokslų akademijos leidykla.
- STR 2.01.03:2003. Statybinių medžiagų ir gaminių šiluminių techninių dydžių deklaruojamosios ir projektinės vertės. LR aplinkos ministerija. Vilnius, 2003.
- STR 2.01.09:2005. Pastatų energinis naudingumas. Energinio naudingumo sertifikavimas. LR aplinkos ministerija. Vilnius, 2005.
- STR 2.05.01:2005. Pastatų atitvarų šiluminė technika. LR Aplinkos Ministerija. Vilnius, 2005.
- STR 2.09.04:2002. Pastato šildymo sistemos galia. Energijos sąnaudos šildymui. LR aplinkos ministerija. Vilnius, 2002.
- Strand, R. K. et al. 2001. Modularization and simulation techniques for heat balance based energy and load calculation programs: the experience of the ASHRAE loads toolkit and EnergyPlus, in Proceedings of the Seventh International IBPSA Conference, 2001.
- Struck, C.; Hensen, J. 2006. Uncertainty analysis for conceptual building design. A review of input data, in Proceedings of the 1st Int. IBPSA Germany/Austria Conf. BauSIM, 9 - 11 Oct, Technische Universitat Munchen, International Building Performance Simulation Association, [CD-ROM]. 2006.
- Struck, C.; Hensen, J. 2007. On supporting design decisions in conceptual design addressing specification uncertainties using performance simulation. Proceedings of the 10th IBPSA Building Simulation Conference, 3-5 September, Tsinghua University, Beijing, 2007. 1434–1439.

- Tonkonogij, J.; Pedišius, A. 2005. Neregistruojamo gamtinių dujų kiekio kitimo tyrimas. *Energetika* (4): 42–45. Vilnius: Lietuvos mokslų akademijos leidykla.
- Tuomas, E. 2003. Patalpų sandarumas ir jų vėdinimo tyrimas. *Šiluminė technika* 3(18).
- UK Office of the Deputy Prime Minister, 2006. The Building regulations. Conservation of fuel and power. Part L.
- Urbonas, R. 2002. Uncertainty and sensitivity analysis of Elektrogorsk-108 test facility experimental data RELAP5 model. *Energetika* 1: 31–40. Vilnius: Lietuvos mokslų akademijos leidykla.
- US DOE, High-performance building metrics project, US Department of Energy, Washington, DC, 2003.
- US Green Building Council, LEED. Leadership in energy and environmental design program, 2003. Prieiga per internetą: <[http://www.usgbc.org/LEED/LEED main.asp](http://www.usgbc.org/LEED/LEED%20main.asp)>.
- VanBronkhorst, D. A.; Persily, A. K.; Emmerich, S. J. 1995. Energy impacts of air leakage in US office buildings. Implementing the results of ventilation research. 16th AIVC Conference, Palm Springs, USA, 1995.
- Vekteris, V., et al. 2000. Matavimų teorija ir praktika. ISBN 9986-524-26-1. Vilnius: „Žiburio“ leidykla. 380 p.
- Vik, B.; Uvslūkk, S.; Anton, H. 2002. Documentation of thermal properties of building components. Transformation from a scientific approach to a practical approach in the European market place. A case study. *Building Physics*.
- Walker, I. S.; Wilson D. J.; Sherman M. H. 1998. A comparison of the power law to quadratic formulations for air infiltration calculations. *Energy and Buildings* 27.
- Walsh, P. J.; Dudley, C. S.; Copenhaver E.D. 1984. Indoor air quality. CRC Press. ISBN 0849350158. 216 p.
- WBCSD (World Business Council for Sustainable Development). 2007. energy efficiency in buildings: business realities and opportunities – facts and trends, 44 p.
- Weber, T. A 2004. Calculation method for air infiltration energy loss based on climatic data. *International Journal of Low-Energy and Sustainable Buildings* 3.
- Wit, S. 1997. Influence of modelling uncertainties on the simulation of building thermal comfort performance. International Building Performance Simulation Association, 1997, proceedings of "Building Simulation '97", the Fifth International IBSPA Conference, in Prague, Czech Republic 2: 95–102.
- Wit, S. 2001. Uncertainty in predictions of thermal comfort in buildings. Doctoral Thesis.
- Wit, S.; Augenbroe, G. 2002. Analysis of uncertainty in building design evaluations and its implications. *Energy and Buildings* 34: 951–958.

Autorės publikacijų sąrašas disertacijos tema

Recenzuojamuose periodiniuose mokslo leidiniuose:

- Jaraminienė, E.; Juodis, E. 2008a. Uncertainty analysis of infiltration assessment based on thermal balance of the building, *Energetika*, 54(2): 20–25 (in Lithuanian). ISSN 0235-7208. (INSPEC)
- Jaraminienė, E.; Juodis, E. 2006. Heat demand uncertainty evaluation of typical multi-flat panel building, *Journal of Civil Engineering and Management*, 12(1): 69–75. ISSN 1392-3730. (INSPEC)

Kituose leidiniuose:

- Jaraminienė, E.; Juodis, E. 2008b. The discrepancy between design heat demand and actual heat consumption due to air infiltration, in *Proceedings of the 7-th International Conference “Environmental Engineering”, held in Vilnius on 22–23 May, 2008*. Vilnius: Technika, 804–811. ISBN 9986-05-771-X (Thompson ISI Proceedings).
- Sribikytė E., Juodis E. 2004a. Uncertainty of heat demand in apartment buildings, in *Proceedings of the 6-th International Conference “Energy for Buildings”, held in Vilnius on 7–8 October, 2004*. Vilnius: Technika, 367–374. ISBN 9986-05-771-X (Thompson ISI Proceedings).
- Jaraminienė, E.; Juodis, E. 2008c. Uncertainty analysis of infiltration evaluation from building thermal balance, in *Proceedings of the Conference of Young Scientists on Energy Issues 2008, held in Kaunas on 29 May, 2008*. Kaunas, [CD-ROM]: IV-26–IV-35. ISSN 1822-7554.
- Jaraminienė, E.; Juodis, E. 2007. Feasibility of Air infiltration evaluation on the base of building thermal balance, in *Proceedings of the International Congress “E-nova 2007: Intelligent Energy Systems”, held in Pinkafeld on 9–11 November, 2007*. Oberwart: Schmidbauer GmbH, 53–57. ISBN 978-3-9500919-7-7.
- Jaraminienė, E. 2007. Pastato šilumos balanso analizė pagal automatizavimo ir valdymo sistemos duomenis, *respublikinės konferencijos „Pažangioji statyba“, įvykusios Kaune 2007 m. spalio 26–27 d., mokslinių pranešimų rinkinyje*. Kaunas: Technologija, 178–182. ISBN 978-9955-25-381-5.
- Sribikytė E., Juodis E. 2004b. Šilumos nuostolių per atitvaras skaičiavimo neapibrėžtumas, *respublikinės mokslinės konferencijos „Pastatų inžinerinės sistemos“, įvykusios Vilniuje 2004 m. vasario 23 d., mokslinių pranešimų rinkinyje*. Vilnius: Technika, 5–8. ISBN 9986-05-605-5.

Eglė Jaraminienė

ORO INFILTRACIJOS
PASTATUOSE TYRIMAS
TAIKANT NEAPIBRĖŽTIES
ANALIZĘ

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
Energetika ir termoinžinerija (06T)

INVESTIGATION OF AIR
INFILTRATION IN BUILDINGS
USING UNCERTAINTY ANALYSIS

Doctoral dissertation

Technological Sciences,
Energetics and Power Engineering (06T)

2008 10 09. 14,0 sp. l. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla "Technika", Saulėtekio al. 11,
10223 Vilnius, <http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino UAB "Baltijos kopija",
Kareivių g. 13B, 09109 Vilnius
<http://www.kopija.lt>