

Infiltracijos nustatymo pagal pastato šilumos balansą neapibrėžties analizė

Eglė Jaraminienė,

Egidijus Saulius Juodis

Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Šildymo ir vėdinimo katedra, Saulėtekio al. 11-2414, LT-10223 Vilnius

El. paštas: egle@ap.vgtu.lt,

Egidijus.Juodis@ap.vgtu.lt

Esami oro infiltracijos nustatymo metodai, taikant juos didelio tūrio pastatuose, tampa pernelyg brangūs arba nežinomos neapibrėžties. Straipsnyje analizuojamas oro infiltracijos pastatuose nustatymo metodas, kai pasinaudojama pastato šilumos balanso duomenimis. Šis metodas tapo įmanomas įdiegus automatines pastatų energinio valdymo sistemas su duomenų kaupikliais. Kiekvienam parametrai būdinga tam tikra neapibrėžtis, sąlygojanti šilumos balanso dėmens neapibrėžtį. Dėl statistinio aibės matavimo rezultatų ir pastato šilumos balanso dedamųjų apdorojimo sumažėja ieškomos dedamosios – infiltracijos – neapibrėžtis. Metodo pranašumas – visiškai netrikdomi procesai, kurie vyksta pastate, nereikia jokių papildomų inžinerinių darbų. Metodo sritis – pasirinkto laikotarpio vidutinio infiltracijos intensyvumo nustatymas, t. y. infiltracija nustatoma periodui, per kurį galima sukaupti pakankamai duomenų statistiniam apdorojimui.

Raktažodžiai: oro infiltracijos vertinimas, pastato šilumos balansas, neapibrėžties analizė

1. ĮVADAS

Infiltracijos intensyvumui nustatyti taikomi du matavimais paremti metodai: viršslėgio sudarymo ir žymėtujų dujų. Viršslėgio sudarymo metodu nustatomas pastato sandarumas standartizuotomis sąlygomis. Šis metodas gali būti naudingas visiems, bet kurio dydžio ir paskirties pastatams, tačiau praktiškai susiduriama su techninėmis kliūtimis – reikiamo dydžio pertekliniam slėgiui palaikyti dideliuose pastatuose turi būti naudojami laikini itin dideli ventiliatoriai [1]. Būtina sąlyga pakankamam matavimų tikslumui pasiekti žymėtujų dujų metodu – tolygus žymėtujų dujų sumaišymas su patalpos oru. Didelio tūrio patalpose labai sudėtinga tolygiai paskleisti žymėtąsias dujas visoje erdvėje, todėl šis metodas paprastai taikomas matuojant oro kaitą nedidelėse patalpose [2]. Taigi reikalingas metodas, kuris užpildytą spragą, kurios neapima viršslėgio sudarymo ir žymėtujų dujų metodai – oro infiltracijos didelio tūrio patalpose nustatymą.

Šilumos balanso sudarymas yra plačiai taikomas vertinant pastato energijos poreikius, skaičiuojant pastato šilumos ir vėsos poreikius [3, 4]. Kadangi nesutapimas tarp šilumos nuostolių per atitvaras, šilumos pritekėjimų ir kitų balanso dedamųjų dažnai gali būti priskiriamas šilumos nuostoliams dėl infiltracijos, šilumos balansas gali būti pritaikytas ir oro infiltracijos pastate vertinimui [5]. Oro kaitos dėl infiltracijos nustatymui pastato šilumos balansas iki šiol buvo naudojamas tik atliekant apibendrintus, didelio tikslumo nereikalaujančius skaičiavimus [5], tačiau pastato automatizavimo ir valdymo (PAV) sistemose kaupiami matavimų duomenys suteikia galimybę tikslesniam infiltracijos vertinimui [6]. Kadangi būtent gaunamo rezultato

tikslumas riboja infiltracijos vertinimą pagal šilumos balansą, šilumos balanso metodo taikymo sąlygos ir apribojimai turi būti nustatomi atliekant neapibrėžties analizę. Neapibrėžties analizė yra plačiai taikoma vertinant matavimų rezultatų, energijos gamybos objektų patikimumą [7, 8], tačiau pastato šilumos balanso neapibrėžties vertinimas dar nėra paplitęs.

Šiame straipsnyje pateikiamas infiltracijos nustatymo pagal šilumos balansą, panaudojant PAV sistemose kaupiamus duomenis, metodo algoritmas ir metodo taikymo sąlygų ir ribų analizės rezultatai.

2. METODIKA

Straipsnyje pateikiamas metodas oro infiltracijai pastate nustatyti remiasi pastato šilumos balansu. Principinė aprašyto pastato šilumos balanso šildymo sezono laikotarpiu schema su pažymėtomis sistemos ribomis parodyta 1 pav.

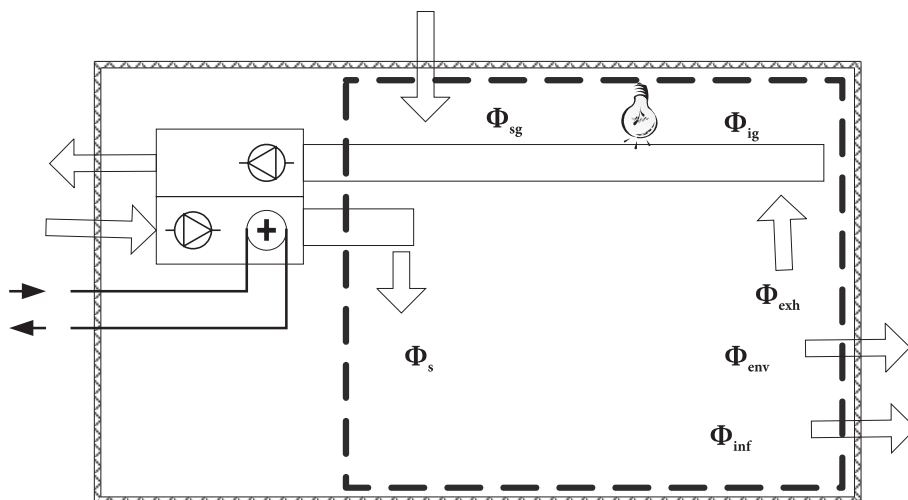
Pastato šilumos balansas, kai sistemos ribos, kaip pažymėta 1 pav. punktyrine linija, gali būti užrašytas kaip:

$$\Phi + \Phi_{exh} + \Phi_{sg} + \Phi_{ig} + \Phi_{env} + \Phi_{inf} = 0. \quad (1)$$

Šiame darbe sprendžiamas (1) lygybe užrašyto šilumos balanso dalinis atvejis. Tyrimui pasirenkamas pastatas be šilumos pritekėjimų, o patalpų oro temperatūra palaikoma orinio šildymo sistema, kuri kartu yra ir vėdinimo sistema. Tokio pastato šilumos balanso lygtis gali būti užrašoma:

$$\Phi_{hs} + \Phi_{env} + \Phi_{inf} = 0. \quad (2)$$

$$\Phi_{hs} + \Phi_s + \Phi_{exh} = 0. \quad (3)$$



1 pav. Pastato šilumos balanso schema

Išplėtus (2) lygybę, galima užrašyti:

$$c \cdot \rho \cdot m \cdot (\theta_s - \theta_{exh}) + H_T \cdot (\theta_{in} - \theta_{ex}) + c \cdot \rho \cdot V \cdot n \cdot (\theta_{in} \cdot \theta_{ex}) = 0. \quad (4)$$

Iš čia oro kaita dėl infiltracijos gali būti nustatoma pagal šią lygybę:

$$n = \frac{\Phi_{env} + \Phi_{hs}}{c \cdot \rho \cdot V \cdot (\theta_{in} - \theta_{ex})} = \frac{H_T}{c \cdot \rho \cdot V} + \frac{m \cdot (\theta_s - \theta_{exh})}{V \cdot (\theta_{in} - \theta_{ex})}. \quad (5)$$

Kadangi kai kuriais atvejais metodo taikymas gali lemti rezultato neapibrėžtį, didesnę už patį rezultatą, būtina atlikti neapibrėžties analizę, kurios rezultatai ir nulemia šio metodo taikymo sąlygas ir ribas.

Neapibrėžtis – tai parametras, susijęs su rezultatu ir nusakantis reikšmių sklaidą, kurios galima tikėtis matuojant dydį. Neapibrėžtis šiame straipsnyje išreikšta kaip standartinis nuokrypis, padaugintas iš dviejų; taip pat naudojama santykinė neapibrėžtis, t. y. vidurkio santykis su pasikliautinio intervalo kraštine reikšme, pasirinkus 95% pasiklovimo lygmenį.

Pagal (5) lygybę nustatyto oro kaitos kartotinumą dėl infiltracijos (toliau infiltracijos) neapibrėžtis bus lygi:

$$\delta(n) = \delta\left(\frac{H_T}{c \cdot \rho \cdot V}\right) + \delta\left(\frac{m \cdot (\theta_s - \theta_{exh})}{V \cdot (\theta_{in} - \theta_{ex})}\right). \quad (6)$$

Kaip matyti iš (6) lygybės, infiltracijos neapibrėžtį lemia du dėmenys, besiskiriantys savo pobūdžiu. Pirmą dėmenį sudaro tik pastovūs dydžiai, tuo tarpu antrąjį dėmenį sudaro ir dydžiai, kintantys laike dėl lauko oro temperatūros. Skirtingas šių dėmenų pobūdis lemia ir skirtingus būdus šių dėmenų neapibrėžčiai vertinti. Kadangi savitieji šilumos nuostoliai praktikoje yra skaičiuojami pagal projektinius duomenis, neatliekant matavimų, pirmo dėmens neapibrėžtis paprastai negali būti sumažinama be papildomų sąnaudų. Galimybės sumažinti antro dėmens neapibrėžtį kaupiant šilumos balanso duomenis ir taikant statistinius duomenų analizės metodus jų apdorojimui ir analizuojamos šiame straipsnyje.

Šiuolaikiniuose viešosios paskirties pastatuose įrengtos pastato automatizavimo ir valdymo (PAV) sistemos matuoja ir registruoja pastato mikroklimato kondicionavimo sistemų parametrus: patalpų vidaus, išorės oro temperatūras, kiekvienos vėdinimo sistemos tiekiamo ir šalinamo oro debitus, tiekiamo ir šalinamo oro temperatūras, šildymo sistemų šilumnešių debitus ir temperatūras. Todėl praktiškai be papildomų išlaidų galima sukaupti masyvą duomenų, pagal kuriuos būtų galima sudaryti ne vieną, o aibę šilumos balanso lygčių.

PAV sistema remiasi matavimų duomenimis, todėl neišvengiamos duomenų paklaidos, atsirandančios dėl valdymo grandinę sudarančių netobulų įrenginių. PAV sistemoje kaupiamų duomenų neapibrėžtumas yra suma neapibrėžtumų, susidarantių atskirose sistemos grandyse, t. y. matuojant, apdorojant išmatuotus duomenis, atliekant duomenų signalo keitimus ir pan. Šiuolaikinėse praktikoje taikomose PAV sistemose atliekamų matavimų tikslumas siekia 0,2 K oro temperatūros matavimams ir 5% nuo matuojamos reikšmės vėdinimo sistemos debito matavimams [9].

Kadangi oro kaita dėl infiltracijos priklauso nuo temperatūrų skirtumo abipus išorinių pastato atitvarų, todėl statistiniams duomenų apdorojimui pasirinkta taikyti regresinę analizę.

Kai mažiausias temperatūrų skirtumas abipus išorinių pastato atitvarų lygus 5°C, infiltracijos reikšmė nuo temperatūrų skirtumo priklauso beveik tiesiškai – kaip matyti 2 pav. Tai leidžia infiltracijos statistinės priklausomybės nuo temperatūrų skirtumo įvertinimui taikyti tiesinę regresiją.

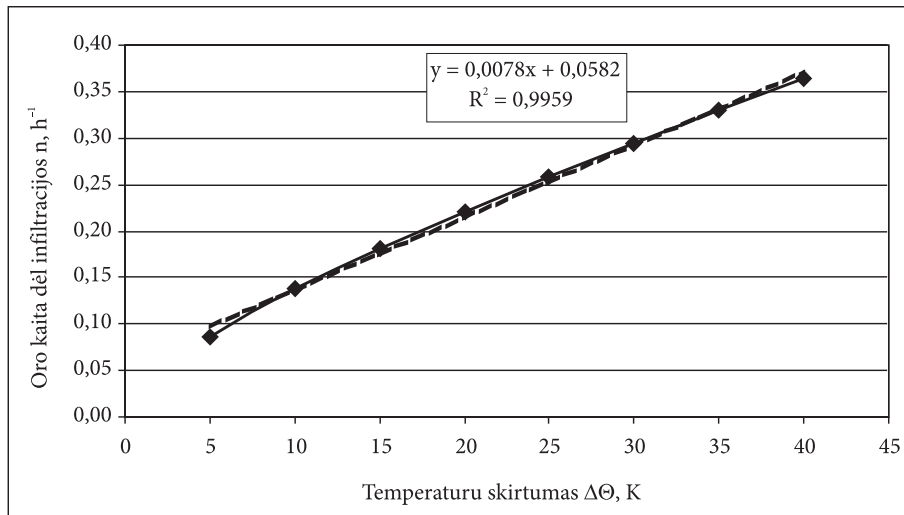
Tiesinės regresijos analizėje vidutinės prognozuojamos reikšmės neapibrėžtis Δ_a , kaip nusakyta anksčiau, skaičiuojama pagal šias formules [10]:

$$\Delta_a = \pm t_a(k-2) \sqrt{\frac{(x - \bar{x})^2 k(k-1)(s_y^2 - b^2 s_x^2) + (k-1)s_x^2}{k(k-1)(k-2)s_x^2}}. \quad (7)$$

Standartinio nuokrypio įverčiai apskaičiuojami:

$$s_x^2 = \frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k x_i^2 - \frac{1}{k} \left(\sum_{i=1}^k x_i \right)^2. \quad (8)$$

$$s_y^2 = \frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k y_i^2 - \frac{1}{k} \left(\sum_{i=1}^k y_i \right)^2. \quad (9)$$



2 pav. Oro kaitos dėl infiltracijos priklausomybė nuo temperatūrų skirtumo abipus atitvarų

Regresijos tiesės krypties koeficientas b apskaičiuojamas:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^k x_i y_i - \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k x_i \sum_{i=1}^k y_i}{\sum_{i=1}^k x_i - \frac{1}{k} \left(\sum_{i=1}^k y_i \right)^2} \quad (10)$$

Nepriklausomo kintamojo reikšmės x_i atliekamame tyrime atitinka temperatūrų skirtumas abipus pastato išorinių atitvarų ($\theta_{in} - \theta_{ex}$), o priklausomojo kintamojo reikšmės y_i – (6) lygybės antrojo dėmens $\frac{m \cdot (\theta_s - \theta_{exh})}{V \cdot (\theta_{in} - \theta_{ex})}$ atitinkamos reikšmės. Tiesinės regresijos vidutinės prognozuojamos reikšmės neapibrėžtis Δ_n atitinka (6) lygybės antrąjį narį $\delta \left(\frac{m \cdot (\theta_s - \theta_{exh})}{V \cdot (\theta_{in} - \theta_{ex})} \right)$.

Atliekamos regresinės analizės rezultatas – pagal (7) formulę įvertinta prognozuojamos vidutinės infiltracijos reikšmės neapibrėžtis – atspindi bendros infiltracijos nustatymo neapibrėžties priklausomybę nuo tam tikrų veiksnių ir leidžia daryti išvadas apie metodo taikymo ribas ir sąlygas.

Atliekant metodo taikomumo tyrimą, analizei vietoje faktinių PAV sistemomis sukauptų duomenų, naudojami kompiuteriniu modeliu sugeneruoti duomenys remiantis MS Excel ir MS VBA priemonėmis.

Vertinant rezultatus, sąlygų tinkamumo kriterijumi taip pat laikomas ir jau minėtas determinacijos koeficientas R^2 :

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}(x_i) - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (11)$$

Mažesnė nei 0,25 determinacijos koeficiento R^2 reikšmė rodo, kad nurodytomis sąlygomis tiesinė regresija duomenų analizei netaikytina [11].

3. TYRIMO OBJEKTAS

Analizė atliekama tipiniam viešosios paskirties pastatui, naudojant parametrus, nurodytus statybos normose. Pastatas

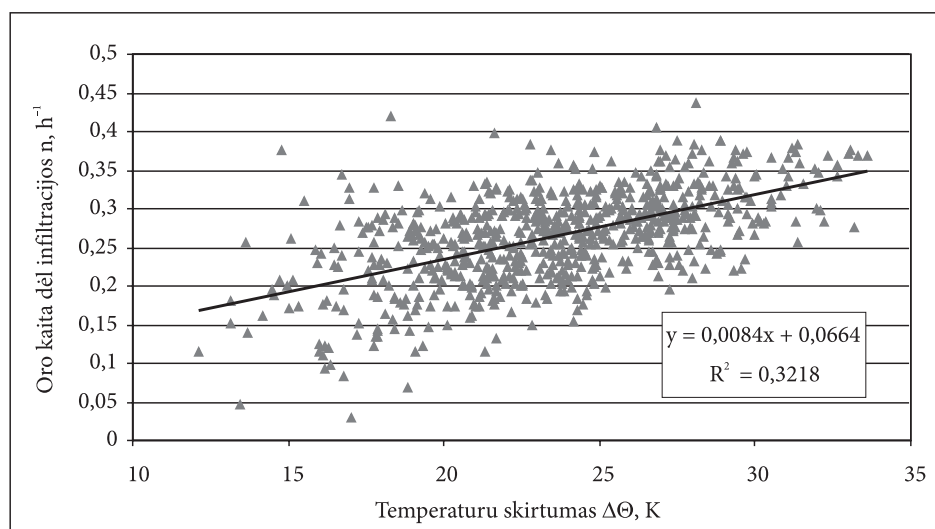
vieno aukšto, stačiakampio gretasienio formos, pastato plotas 1000 m², aukštis 5 m. Įstiklintas plotas sudaro 30% išorinių sienų ploto. Palaikoma vidaus oro temperatūra yra 20°C. Pastato savitieji šilumos nuostoliai per atitvaras atitinka statybos normų reikalavimus [12] viešosios paskirties pastatams ir sudaro 968 W/K; pastato sandarumas taip pat atitinka statybos normų reikalavimus [12], t.y. oro kaita dėl infiltracijos esant 50 Pa slėgio skirtumui yra 1,1 h⁻¹ (mažiau kaip 1,5 h⁻¹). Lauko oro temperatūra vertinamuoju laikotarpiu kinta intervale [-15°C; 8°C], oro kaitos dėl infiltracijos reikšmė vertinama esant 0,2°C išorės oro temperatūrai (vidutinė šildymo sezono temperatūra Vilniaus mieste).

Pastato šilumos nuostoliai yra kompensuojami bendra orinio šildymo ir vėdinimo sistema. Oriniam šildymui tiekiamas oro kiekis nustatomas pagal projektinį šilumos poreikį pastato šildymui. Maksimali leistina į darbo zoną tiekiamo oro temperatūra yra 23°C, kai darbo zonoje palaikoma temperatūra – 20°C [13]. Priimama, kad oras tiekiamas 2,5 m virš darbo zonos ir maksimali tiekiamo oro temperatūra yra 27°C. Nustatytas oro debitas 30355 m³/h (10,2 kg/s), arba 30,4 m³/h 1 m² grindų ploto, yra didesnis [13], nei reikalaujamas tiekti švaraus lauko oro kiekis (7,2 m³/h 1 m² grindų ploto).

4. REZULTATAI

Pradinė oro kaitos dėl infiltracijos vertinimo pagal šilumos balansą galimybių analizė atliekama baziniam parametrų neapibrėžties variantui, toliau parametrų neapibrėžtis keičiama ir nustatomas oro kaitos dėl infiltracijos jautrumas nagrinėjamų parametrų kitimui. Baziniam variantui taikoma 0,2 K oro temperatūros matavimo neapibrėžtis ir 5% vėdinimo sistemos debito santykinė neapibrėžtis. Vertinimas atliekamas sugeneravus 720 matavimo reikšmių rinkinių, o aplinkos oro temperatūros intervalas, kuriame atliekami matavimai, yra nuo -15 iki +8°C. Infiltracijos reikšmių svyravimas dėl regresijos modelyje neįvertintų veiksnių priimtas lygus 0,01 h⁻¹.

3 pav. pateiktas šilumos balanso metodu nustatytų infiltracijos reikšmių grafikas baziniam variantui su pažymėta regresijos tiese. Pateiktame grafike matyti infiltracijos reikšmių išsibarsčymas aplink tiesę, nusakančią oro kaitos dėl infiltracijos priklausomybę nuo temperatūrų skirtumo abipus atitvarų, gauna-



3 pav. Nustatytų oro kaitos dėl infiltracijos reikšmių priklausomybė nuo temperatūrų skirtumo abipus atitvarų

mas tiek dėl infiltracijos priklausomybės netiesiškumo, tiek dėl įtraukto atsitiktinio veiksnio, nuo kurio priklauso oro kaita, tiek dėl imituojamo matavimų netikslumo.

Duomenų sklaidą apie regresijos tiesę atspindintis determinacijos koeficientas R^2 , lygus 0,3218, rodo, kad tiesinės regresijos modelis gali būti taikomas. Modelis paaiškina apie 32% visos reikšmių sklaidos.

Parengtu kompiuteriniu modeliu sugeneravus šilumos balanso modelio įvesties duomenis, buvo atliktas tyrimas, kaip matavimo neapibrėžtis ir determinacijos koeficientas kinta dėl matavimo sąlygų. Išanalizuota, kaip infiltracijos nustatymo neapibrėžtis priklauso nuo:

1. Infiltracijos reikšmės svyravimo dėl vėjo ir kitų atsitiktinių veiksnių, išskyrus temperatūrų skirtumą abipus atitvarų;
2. Temperatūros matavimo neapibrėžties;
3. Tiekiamo oro debito matavimo neapibrėžties;
4. Sukauptų matavimų duomenų kiekio;
5. Aplinkos oro temperatūros intervalo, kuriame atliekami matavimai.

Atliktos analizės rezultatai pateikti 1–5 lentelėse. Bazinį variantą atitinkantys rezultatai lentelėse pateikti pusjuodžiu šriftu.

Visų pirma regresinės analizės ir kartu viso siūlomo metodo tinkamumas priklauso nuo infiltracijos reikšmės svyravimų, lemiamų atsitiktinių veiksnių (vėjo, vėdinimo sistemos veikimo kitimo). Todėl buvo analizuojama gaunamo rezultato neapibrėž-

tis esant skirtingam infiltracijos reikšmės galimam svyravimui, atliktos analizės rezultatai pateikti 1 lentelėje.

Determinacijos koeficientai, pateikti 1 lentelėje, rodo, kad šilumos balanso metodo taikymui būtina užtikrinti ne didesnę nei $0,03 \text{ h}^{-1}$ infiltracijos reikšmių kitimą, sukeliama ne temperatūros skirtumo, kuris įvertinamas tiesinės regresijos modelyje. Praktiškai tai reiškia, kad turi būti atrenkami matavimų duomenys, kai pastato vėdinimo sistemos veikia vienodu režimu ir kai pastatas nėra veikiamas stipraus vėjo. Priimtinas vėjo greitis turi būti nustatomas kiekvienu atveju.

Priimant eksploatuoti sumontuotas vėdinimo sistemas, standartai numato oro temperatūros matavimą 2 K neapibrėžtimi [14]. Tačiau temperatūros matavimas turi būti tikslesnis, dėl regresinei analizei taikyti reikalingos nepriklausomo kintamojo neatsitiktinio pobūdžio prielaidos. Tiek dėl šios prielaidos, tiek dėl 2 lentelėje matomos stiprios neapibrėžties priklausomybės oro temperatūra turėtų būti matuojama kuo tiksliau. Pakankamu temperatūros matavimo tikslumu nagrinėjamo pastato atveju gali būti laikomas 0,2 K. Kaip minėta, toks tikslumas pasiekiamas šiuolaikinėse komercinėse PAV sistemose.

Priimant eksploatuoti sumontuotas vėdinimo sistemas, standartai numato kiekvienos vėdinimo sistemos oro debito matavimą 10% neapibrėžtimi ir viso oro debito matavimą 15% neapibrėžtimi [14]. Kaip rodo 3 lentelėje pateiktos determinacijos koeficiento reikšmės, tokio tikslumo nepakanka infiltracijai nustatyti.

1 lentelė. Rezultato neapibrėžties priklausomybė nuo infiltracijos reikšmės kaitos

Infiltracijos reikšmės kaita h^{-1}	0,01	0,03	0,05	0,10	0,20
Prognozuojama vidutinė reikšmė h^{-1}	0,233	0,236	0,238	0,244	0,256
Nustatytos vidutinės oro kaitos dėl infiltracijos neapibrėžtis $\Delta_a (\text{h}^{-1})$	0,005	0,006	0,007	0,011	0,021
Nustatytos vidutinės oro kaitos dėl infiltracijos santykinė neapibrėžtis %	2	2	3	5	8
Determinacijos koeficientas R^2	0,3218	0,2487	0,1746	0,0722	0,0197

2 lentelė. Rezultato neapibrėžties priklausomybė nuo oro temperatūros matavimo neapibrėžties

Oro temperatūros matavimo neapibrėžtis K	0,01	0,1	0,2	0,5	2
Prognozuojama vidutinė reikšmė h^{-1}	0,231	0,232	0,233	0,240	0,342
Nustatytos vidutinės oro kaitos dėl infiltracijos neapibrėžtis $\Delta_a (\text{h}^{-1})$	0,002	0,003	0,005	0,011	0,041
Nustatytos vidutinės oro kaitos dėl infiltracijos santykinė neapibrėžtis %	1	1	2	5	12
Determinacijos koeficientas R^2	0,6810	0,5350	0,3218	0,0698	0,0144

3 lentelė. Rezultato neapibrėžties priklausomybė nuo tiekiamo oro debito matavimo neapibrėžties

Oro debito matavimo santykinė neapibrėžtis %	1	5	10	15
Prognozuojama vidutinė reikšmė h^{-1}	0,233	0,233	0,234	0,235
Nustatytos vidutinės oro kaitos dėl infiltracijos neapibrėžtis Δ_a (h^{-1})	0,004	0,005	0,006	0,008
Nustatytos vidutinės oro kaitos dėl infiltracijos santykinė neapibrėžtis %	2	2	3	3
Determinacijos koeficientas R^2	0,3627	0,3218	0,2375	0,1648

4 lentelė. Rezultato neapibrėžties priklausomybė nuo bandymų skaičiaus

Bandymų vnt.	20	60	120	720	2880
Prognozuojama vidutinė reikšmė h^{-1}	0,219	0,226	0,238	0,233	0,221
Nustatytos vidutinės oro kaitos dėl infiltracijos neapibrėžtis Δ_a (h^{-1})	0,027	0,017	0,012	0,005	0,002
Nustatytos vidutinės oro kaitos dėl infiltracijos santykinė neapibrėžtis %	12	8	5	2	1
Determinacijos koeficientas R^2	0,3218	0,3218	0,3218	0,3218	0,3218

5 lentelė. Rezultato neapibrėžties priklausomybė nuo aplinkos oro temperatūros intervalo

Temperatūros intervalas $^{\circ}C$	[-5; -2]	[-12; +5]	[-13; +6]	[-14; +7]	[-15; +8]
Prognozuojama vidutinė reikšmė h^{-1}	0,248	0,234	0,234	0,234	0,233
Nustatytos vidutinės oro kaitos dėl infiltracijos neapibrėžtis Δ_a (h^{-1})	0,015	0,006	0,005	0,005	0,005
Nustatytos vidutinės oro kaitos dėl infiltracijos santykinė neapibrėžtis %	6	2	2	2	2
Determinacijos koeficientas R^2	0,0062	0,2099	0,2480	0,2856	0,3218

Kaip matyti 3 lentelėje, šiuolaikinėse PAV sistemose taikomas debito matavimo tikslumas jau yra pakankamas infiltracijai nustatyti šilumos balanso metodu nagrinėjamam pastatui.

Rezultato neapibrėžties priklausomybė nuo bandymų skaičiaus pateikiama 4 lentelėje.

4 lentelėje pateikti analizės rezultatai iliustruoja stiprią neapibrėžties priklausomybę nuo sukauptų duomenų kiekio. Šiuo atveju determinacijos koeficientas negali būti tinkamu palyginimui kriterijumi, nes skirtingas matavimų skaičius lemia skirtingą determinacijos koeficiento reikšmingumą.

5 lentelėje pateikiama rezultato neapibrėžties priklausomybė nuo aplinkos oro temperatūros intervalo, kuriame kaupiami analizuojami duomenys.

Kaip matyti iš 5 lentelėje pateiktųjų atliktos analizės rezultatų, tik esant pakankamam temperatūrų intervalo ilgiui determinacijos koeficientas tampa gana didelis, kad būtų galima pasitikėti tiesinės regresijos rezultatais. Be to, aplinkos oro temperatūros intervalas lemia infiltracijos reikšmių prognozavimo intervalą, nes regresinė analizė leidžia prognozuoti tik į duomenų intervalą patenkančias reikšmes [10].

5. IŠVADOS

1. Apskaičiuotos sąlygos, kada šilumos balanso metodu galima pasiekti praktikai pakankamą infiltracijos nustatymo tikslumą didelio tūrio pastate.

2. Šilumos balanso, sudaryto pagal pastato automatizuoto valdymo (PAV) sistemų kaupiamus duomenis, taikymo tinkamumas oro kaitai dėl infiltracijos nustatyti priklauso nuo gautų rezultatų neapibrėžties. Metodo taikymui būtina kaupti duomenis pakankamai ilgą laiką, nes metodo tinkamumas lemiamas lauko oro temperatūros intervalo, kuriame kaupiami duomenys, ilgio.

3. Pastato automatizuoto valdymo sistemoje kaupiamų duomenų apdorojimas statistiniais metodais leidžia ženkliai suma-

žinti šilumos balanso analizės neapibrėžtį. Rezultatai rodo, kad infiltracijos nustatymo neapibrėžtis jautriausia matavimų kiekiui, kai matavimų kiekis yra mažesnis nei 720 matavimų.

4. Infiltracijos nustatymo neapibrėžtis stipriai priklauso nuo temperatūros matavimo neapibrėžties. Temperatūros matavimo tikslumas, taikomas priimant vėdinimo sistemas eksploatacijai, yra nepakankamas infiltracijai nustatyti šilumos balanso metodu. Tačiau pakankamas oro temperatūros matavimo tikslumas, lygus 0,2 K, yra pasiekiamas šiuolaikinėse PAV sistemose taikomais matavimo įrenginiais.

Žymėjimai

Φ_s – šilumos srautas su tiekiamu vėdinimo ir orinio šildymo oru W

Φ_{exh} – šilumos srautas su ištraukiamu vėdinimo oru W

Φ_{sg} – šilumos srautas dėl saulės spinduliuotės W

Φ_{ig} – šilumos srautas nuo vidinių šilumos šaltinių W

Φ_{env} – šilumos srautas per išorines pastato atitvaras ir ilginčius šilumos tiltelius W

Φ_{inf} – šilumos srautas dėl oro infiltracijos W

Φ_{hs} – šilumos srautas nuo šildymo sistemos W

c – šiluminė oro talpa $W/(kg \cdot K)$

ρ – oro tankis kg/m^3

θ_s – tiekiamo oro temperatūra $^{\circ}C, K$

θ_{exh} – ištraukiamo oro temperatūra $^{\circ}C, K$

θ_{in} – patalpų vidaus oro temperatūra $^{\circ}C, K$

H_T – savitieji šilumos nuostoliai per atitvaras W/K

θ_{ex} – lauko oro temperatūra $^{\circ}C, K$

V – pastato tūris m^3

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

m – vėdinimo sistemomis tiekiamo oro debitas kg/s

k – matavimų skaičius

b – regresijos tiesės krypties koeficientas

s_x^2 – kintamojo x standartinio nuokrypio įvertis

s_y^2 – kintamojo y standartinio nuokrypio įvertis
 $t_x(k-2)$ – Stjudento skirstinys su $(k-2)$ laisvės laipsniais
 Δ_α – prognozuojamos reikšmės neapibrėžtis
 R^2 – determinacijos koeficientas
 $\hat{y}(x_i)$ – y reikšmė, prognozuojama pagal regresijos lygtį
 \bar{y} – kintamojo y imties vidurkis.

Gauta 2008 01 29
Priimta 2008 03 03

Literatūra

1. Sharples S., Closs S., Chilengwe N. Air tightness testing of very large buildings: a case study // Building Services Engineering Research & Technology. 2005. Vol. 26(2). P. 167–172.
2. Sherman M. H. Air Infiltration measurement techniques // Proceedings of the 10th Air Infiltration and Ventilation Centre Conference, Espoo, Finland, 1989.
3. Strand R. K. et al. Modularization and simulation techniques for heat balance based Energy and Load Calculation programs: The experience of the ASHRAE loads toolkit and EnergyPlus // Proceedings of the Seventh International IBPSA Conference, 2001.
4. Pedersen C. O., Fisher D. E., Liesen R. J. Development of a heat balance procedure for calculating cooling loads // ASHRAE Transactions. 1997. Vol. 103. Pt. 2. P. 459–468.
5. Liddament M. W., Orme M. Energy and Ventilation // Applied Thermal Engineering. November 1998. Vol. 18. No. 11. P. 1101–1109(9).
6. Juodis E. Thermal balance of a building as a tool for evaluating infiltration rate // Proceedings of the 4th International Conference on Cold Climate Heating, Ventilation and Air-Conditioning. Trondheim, Norway, June 15–18, 2003. P. 109.
7. Urbonas R. Uncertainty and sensitivity analysis of Elektrogorsk-108 test facility experimental data RELAP5 model // Energetika. 2002. Nr. 1. P. 31–40.
8. Tonkonogij J., Pedišius A. Neregistruojamo gamtinių dujų kiekio kitimo tyrimas // Energetika. 2005. Nr. 4. P. 42–45.
9. Gillespie K. L. et al. A Guide for specifying performance monitoring systems in commercial and institutional buildings // Proceedings of National Conference on Building Commissioning, San Francisco, 2006.
10. Vekteris V., Kasparaitis A., Kaušinis S., Kanapėnas R. Matavimų teorija ir praktika. Vilnius: Žiburys, 2000. P. 380.
11. Čekanavičius V., Murauskas G. Statistika ir jos taikymai II. Vilnius: TEV, 2001. P. 268.
12. STR 2.05.01:2005. Pastatų atitvarų šiluminė technika. LR aplinkos ministerija, 2005.
13. STR 2.09.02:2005. Šildymas, vėdinimas ir oro kondicionavimas. LR aplinkos ministerija, 2005.
14. LST EN 12599 + AC. Pastatų vėdinimas. Atiduodamų naudoti sumontuotų vėdinimo ir oro kondicionavimo sistemų bandymo metodikos ir matavimo metodai.

Eglė Jaraminienė, Egidijus Saulius Juodis

ANALYSIS OF INFILTRATION UNCERTAINTY EVALUATED BY THE BUILDING HEAT BALANCE METHOD

Summary

The existing methods of air infiltration estimation, when applied to large buildings, are not always feasible financially or their uncertainty is unknown. The air infiltration evaluation method employing data of a building thermal balance is described in the paper. This method became possible because of a wide spread of building automation systems with data storage equipment. Every measured parameter has its uncertainty which contributes to the uncertainty of the thermal balance. Statistical analysis of measurement data allows decreasing the uncertainty of air infiltration evaluation from the thermal balance equation. An advantage of the method is that there is no need to interrupt the building maintenance processes or apply additional engineering works. The method may be used to estimate the mean value of infiltration during a time interval allowing accumulating sufficient data for statistical analysis.

Key words: air infiltration, building, thermal balance, uncertainty analysis

Эгле Яраминене, Эгидиус-Саулюс Юодис

АНАЛИЗ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИНФИЛЬТРАЦИИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МЕТОДА ТЕПЛООВОГО БАЛАНСА ЗДАНИЯ

Резюме

Применяемые методы измерения инфильтрации воздуха в зданиях большой площади часто оказываются слишком дорогими или дают неопределенные результаты. В статье представлен метод, согласно которому инфильтрация определяется с помощью данных теплового баланса. Этот метод стал доступен, когда начали применяться системы автоматического регулирования теплового хозяйства здания с устройствами для накопления и хранения данных. Каждый измеряемый параметр имеет свою неопределенность, влияющую на неопределенность составляющих теплового баланса. Статистический анализ большого объема данных измерений и составляющих теплового баланса позволяет установить неизвестную составляющую баланса – инфильтрацию – с меньшей неопределенностью. Преимущества этого метода: нет необходимости нарушать процессы в здании, не требуются дополнительные инженерные работы. Область применения метода – оценка среднего значения инфильтрации за определенный период времени, необходимого для накопления объема данных, достаточного для статистического анализа.

Ключевые слова: инфильтрация воздуха, тепловой баланс здания, анализ неопределенности