ENERGETIKA. 2009. T. 55. Nr. 3. P. 167–171
© Lietuvos mokslų akademija, 2009
© Lietuvos mokslų akademijos leidykla, 2009

Nestacionariųjų šilumos mainų pastatuose skaičiavimo metodo eksperimentinis patikrinimas

Jonas Juodvalkis,

Egidijus Blaževičius

Kauno technologijos universiteto Architektūros ir statybos institutas, Energetinių sistemų laboratorija, Tunelio g. 60, LT-44405 Kaunas
El. paštas: eblazev@asi.lt

Kauno technologijos universiteto Architektūros ir statybos institute buvo atlikti nestacionariųjų šilumos mainų pastatuose teoriniai nagrinėjimai. Sudaryta nestacionariųjų šilumos mainų balansinių diferencialinių lygčių sistema, kuria remiantis buvo atliekama realių pastatų šiluminės būklės analizė. Teorinių išvadų patikrinimui buvo atliktas eksperimentas su pastato supaprastintu modeliu, klimatinėje kameroje. Tokia modeliavimo praktika yra taikoma ir kitų šalių mokslinio tyrimo įstaigose. Eksperimento tikslas – nustatyti, kiek gauti balansinių diferencialinių lygčių sistemos skaitmeniniai sprendiniai atitinka eksperimento rezultatus. Eksperimento rezultatai yra teigiami. Paruoštos nestacionariųjų šilumos mainų balansinės lygtys ir skaičiavimo metodika gali būti naudojamos realių pastatų energinio efektyvumo analizei.

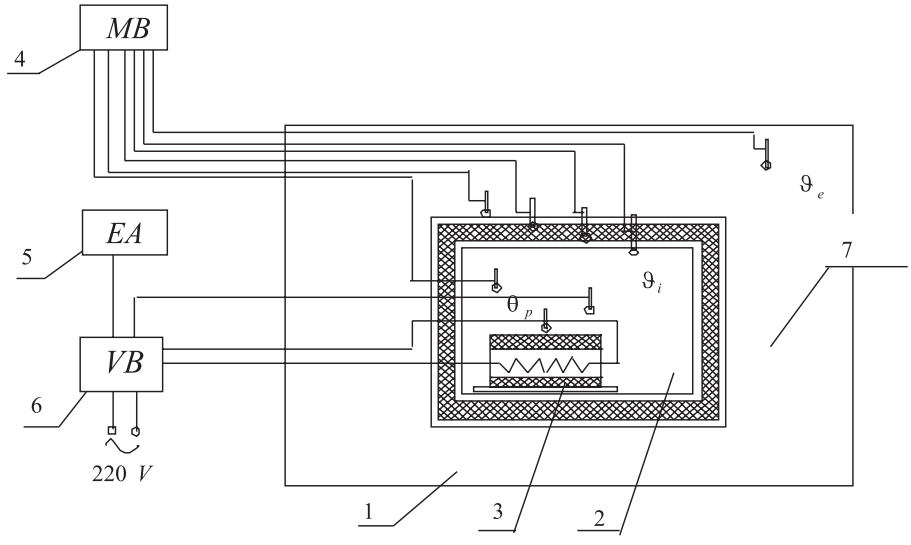
Raktažodžiai: nestacionarinis šilumos mainų režimas, šildymas, aitvarų konstrukcija, šilumos mainų reguliavimas

1. ĮVADAS

Kauno technologijos universiteto Architektūros ir statybos instituto Energetinių sistemų laboratorijoje atliekami teoriniai darbai nagrinėjant nestacionariuosius šilumos mainus pastatuose [1]. Išvestos nestacionariųjų šilumos mainų balansinės diferencialinės lygtys, kurių pagrindu nagrinėjama pastato ir jo komponentų masyvumo įtaka pastato šiluminei būklei bei jo energinėms charakteristikoms [2]. Laboratorijoje buvo atlikta daugelio pastatų nestacionariųjų šilumos režimų teorinė analizė, kuri parodė, kad naujai statomų ir renovuojamų pastatų atskiri komponentai energiniu požiūriu turi būti derinami tarpusavyje [3].

Natūriniai pastatų šiluminių režimų bandymai yra labai brangus ir ilgai trunkantis darbas. Tikslų nagrinėjamo pastato eksperimentinį modelį pagaminti yra sudėtinga, todėl nestacionariųjų šilumos mainų pastatuose (heterogeniniuose kūnuose) procesui patikrinti pasirinktas paprastesnis kelias: sukonstruotas maketas, kuriam sudarytas matematinis kintamų šilumos mainų modelis (1 pav.). Tokia modeliavimo metodika yra naudojama ir kitų šalių mokslinio tyrimo įstaigose [4]. Maketui pagaminti panaudotos statybų praktikoje naudojamos medžiagos.

Eksperimento tikslas – nustatyti, kiek gauti balansinių diferencialinių lygčių sistemos skaitmeniniai sprendiniai atitinka eksperimento metu atliktus matavimus.



1 pav. Eksperimentinio stendo komponavimo schema.
1 – klimatinė kamera, *2* – bandomasis pastato maketas, *3* – šilumos šaltinis, *4* – temperatūros matavimo-registravimo prietaisas, *5* – energijos apskaitos prietaisas, *6* – šilumos režimo palaikymo įrenginys, *7* – termoporos

2. EKSPERIMENTINĖS ĮRANGOS APRAŠYMAS

2.1. Maketas

Pagal disponuojamos klimatinės kameros gabaritus sandarintais skydų sudūrimais buvo sukonstruota dėžė. Eksperimentui atlikti buvo pagaminti keli maketo variantai su padidinto masyvumo atitvaromis (2 pav.). Lengvų konstrukcijų atveju maketo atitvarose buvo išimtas chromo–magnezito sluoksnis. Dėžės viduje buvo sumontuotas elektrinis šildytuvas, vidaus oro ir atitvarų paviršių bei aitvarų tarpsluoksnių temperatūros matavimo davikliai, šilumos šaltinio sunaudotos energijos apskaita.

2.2. Šilumos šaltinis

Šilumos šaltinis – elektrinis šildytuvas. Nustatant šilumos šaltinio charakteristikas, buvo atlikti jo šilumą atiduodančių paviršių temperatūrų matavimai nusistovėjusio šilumos režimo ir aušimo fazėje už bandymo stendo ribų (1 lentelė).

Šilumos šaltinio masyvumo įtakai bandomojo maketo šiluminiam režimui nustatyti buvo atlikti du eksperimento variantai:

– su masyviu šilumos šaltiniu,

– su lengvu šilumos šaltiniu.

3. EKSPERIMENTO REZULTATAI

Eksperimento tikslas – nustatyti eksperimentinio maketo terminio režimo kaitos atitikimą sudarytam matematiniam to paties maketo modeliui. Teorinis matematinis maketo modelis sudarytas diferencialinių balansinių lygčių sistemos pagrindu:

$$\begin{cases} \dfrac{d\theta}{d\tau} = k - m_a(\theta - \vartheta_i), \\ \dfrac{d\vartheta_i}{d\tau} = \dfrac{1}{\mu_i}\left[m_a(\theta - \vartheta_i) - \mu_E m_{Ei}(\vartheta_i - \vartheta_E)\right], \\ \dfrac{d\vartheta_E}{d\tau} = m_{Ei}(\vartheta_e - \vartheta_E) - m_{Ee}(\vartheta_E - \vartheta_e), \\ \vartheta_e = \Delta\vartheta_e \sin\dfrac{2\pi}{\nu}\tau; \end{cases}$$

čia θ – apibendrinta šilumos šaltinio temperatūra K (°C), ϑ_i – nagrinėjamos patalpos apibendrinta temperatūra K (°C), ϑ_E – apibendrinta atitvarų temperatūra K (°C), ϑ_e – išorės (lauko) oro temperatūra K (°C), ϑ – pasirinktas patalpos oro temperatūros grafikas $\vartheta = f(\tau)$ °C, k – šilumos šaltinio šilimo greitis, esant pastovios galios energijos srautui, k/h, m_a – šilumos šaltinio šilimo–aušimo tempas 1/h, m_{Ei} – atitvarų šilimo tempas 1/h, m_{Ee} – atitvarų aušimo tempas 1/h, μ_i – nagrinėjamos patalpos vidaus įrangos nedimensinė šilumos talpa, μ_E – nagrinėjamos patalpos aitvarų nedimensinė šilumos talpa, $\Delta\vartheta_e$ – išorės (lauko) temperatūros svyravimo amplitudė K (°C), ν – patalpos oro temperatūros svyravimo periodo trukmė h.

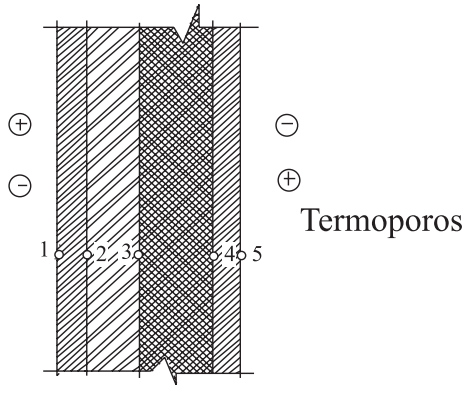
Prieš bandymą maketai preliminariai buvo išdžiovinti. Pirmojo maketo bandymų metu klimatinėje kameroje buvo palaikoma pastovi temperatūra $\vartheta_e = -5{,}0 \pm 0{,}5$ °C, antrojo maketo bandymo metu – $\vartheta_e = 0{,}0 \pm 0{,}5$ °C arba $\Delta\vartheta_e = 0$.

Norint patikrinti teorinių prielaidų ir skaičiavimo metodikos patikimumą, buvo atlikta keletas bandymų, kurių tikslas – nustatyti, kiek gauti balansinių diferencialinių lygčių sistemos skaitmeniniai sprendiniai atitinka eksperimento metu gautus rezultatus.

Būdingų pastato maketo komponavimo variantų eksperimentinio patikrinimo palyginamieji energiniai rodikliai pateikti 2 ir 3 lentelėse, o 3 paveiksle parodytos skaičiuotina ir eksperimentinė vidaus oro temperatūros kreivės pašildymo–aušinimo ciklo metu.

Eksperimento rezultatai rodo, kad, esant maketo atitvaros izoliacijos sluoksniui iš vidinės pusės, maksimalus maketo atitvarose akumuliuotos šilumos kiekis yra 2,7 karto mažesnis, palyginti su atitvara esant izoliacijos sluoksniui iš išorės. Taigi šildymo nutraukimo atveju į aplinką šilumos bus atiduodama 2,7 karto daugiau negu esant atitvaros izoliacijai iš vidinės pusės.

Norint įvertinti šilumos šaltinio galios įtaką patalpos oro terminiam komfortabilumui buvo atlikti bandymai, keičiant šilumos šaltinio galią 1,5 karto, perėjimas nuo žemutinės temperatūros (+10 °C) ribos iki viršutinės užtrunka 2,6 h; aušimo stadija šiek tiek pailgėja – 2,1 h. Energijos sąnaudos padidėja iki 3,12 kWh / parą, tačiau patalpos oro terminis komfortabilumas pakyla iki 96,7 %. Patalpos terminio komfortabilumo padidėjimas pasiekiamas energijos sąnaudų sąskaita. Tiek teoriniai nagrinėjimai, tiek eksperimento rezultatai patvirtina pastato atitvarų izoliavimo iš vidinės pusės energinį pranašumą. Įrengiant pastato aitvarų izoliacijos sluoksnį iš vidinės pusės, apibendrinta atitvaros temperatūra yra žemesnė, palyginti su izoliacijos sluoksnio iš išorinės pusės įrengimo variantu, todėl, esant



a) šoninės, galinė sienelės ir dangtis

Medžio drožlių plokštės OSB, d = 12 mm Chromo–magnezito pl., d = 32 mm
Akmens vata ROB 50, d = 30 mm Medžio drožlių plokštės OSB, d = 12 mm

b) grindys

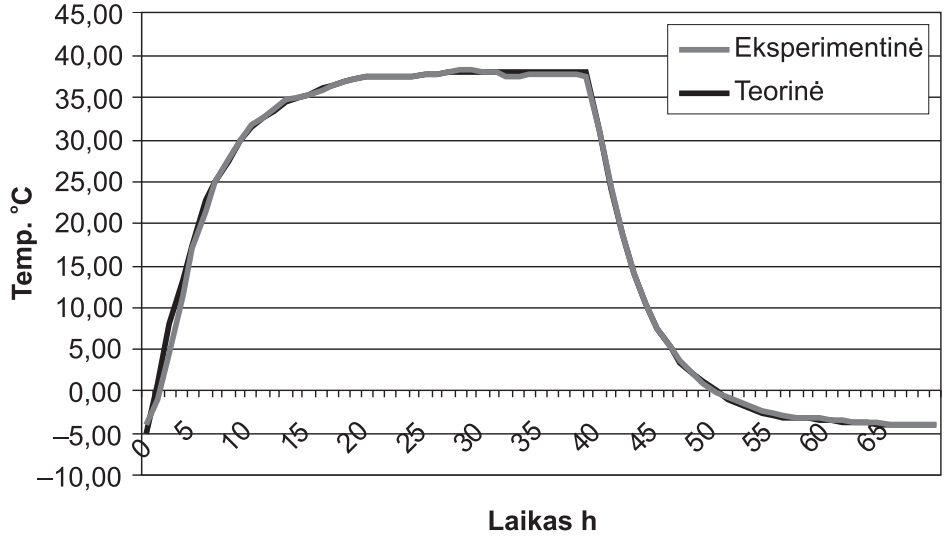
Medžio drožlių plokštės OSB, d = 12 mm Chromo–magnezito pl., d = 32 mm
Akmens vata ROB 50, d = 40 mm Medžio drožlių plokštės OSB, d = 12 mm

2 pav. Maketo padidinto masyvumo aitvarų konstrukcija

Pastaba. Lengvų konstrukcijų atveju išimtas chromo–magnezito sluoksnis

1 lentelė. **Fizikiniai techniniai šilumos šaltinio parametrai**

Eil. Nr.	Šilumos šaltinio charakteristika	Matavimo vienetas	Variantas	
			Masyvus	Lengvas
1.	Masė $\Sigma V_i \rho_i$	kg	30,76	17,16
2.	Šilumą atiduodančių paviršių plotas ΣA_i	m²	0,3	0,188
3.	Galia N	W	667	667
4.	Apibendrintas tankis $\rho = \frac{\Sigma V_i \rho_i}{\Sigma V_i}$	$\frac{kg}{m^3}$	2671,0	2671,0
5.	Apibendrinta savitoji šilumos talpa $c_p = \frac{\Sigma V_i \rho_i c_{pi}}{\Sigma V_i \rho_i}$	$\frac{J}{kgK}$	836	836
6.	Šilumą akumuliuojančių komponentų šilumos laidumo koeficientas λ	$\frac{W}{mK}$	1,914	1,914
7.	Apibendrinta šilumą atiduodančio paviršiaus temperatūra esant nusistovėjusiam režimui, kai $N = 667W$, $\tau \to \infty$ $\theta_{pr} - \vartheta_i = \frac{\Sigma A_i (\theta_{pr} - \vartheta_i)_i}{\Sigma A_i}$	K	150,6	187,5
8.	Apibendrinta šilumą atiduodančio paviršiaus temperatūra praėjus $\Delta\tau(h)$ laikotarpiui nuo aušimo pradžios $\theta_{p\Delta\tau} - \vartheta_e = \frac{\Sigma A_i (\theta_{p\Delta\tau} - \vartheta_e)_i}{\Sigma A_i}$	K	17,7 $\Delta\tau = 4(h)$	14,5 $\Delta\tau = 3(h)$
9.	Šildymo prietaiso nuosavo aušimo tempas $m_a = \frac{\alpha A_E}{\Sigma V_i \rho_i c_i} = \frac{\alpha A_p}{\Sigma V_i \rho_i c_i} = \frac{\ln \frac{\theta_p - \vartheta_e}{\theta_{p\Delta\tau} - \vartheta_i}}{\Delta\tau}$	$\frac{1}{h}$	0,55	0,85
10.	Laiko konstanta $\tau_c = \frac{1}{m_a}$	h	1,82 (1 h 49 min)	1,176 (1 h 10 min)
11.	Aušimo pusperiodis $\tau_{1/2} = \frac{0,693}{m_a}$	h	1,26 (1 h 15 min)	0,815 (0 h 49 min)
12.	EMIP temperatūra nusistovėjus šildymo režimui ($\tau \to \infty$), kai $N = 667$ W $\theta_{Er} - \vartheta_i = \frac{N\tau_c}{\Sigma V_i \rho_i c_i}$	K	169,9	198,8
13.	Šilumos atidavimo nuo realaus šilumą atiduodančio paviršiaus koeficientas $\alpha = \frac{N}{A_p (\theta_{pr} - \vartheta_i)}$	$\frac{W}{m^2K}$	12,3	17,1
14.	Šilumos atidavimo nuo transformuoto (EMIP) šildymo prietaiso paviršiaus koeficientas $\overline{\alpha_{Ei}} = \frac{N}{A_E (\theta_{Er} - \vartheta_i)}$	$\frac{W}{m^2K}$	13,1	16,2
15.	Šilumos šaltinio šilimo greitis adiabatinėmis sąlygomis: $k = \frac{N}{V_a \rho_a c_a} (N = 300,5\,W)$	$\frac{K}{h}$	42,07	75,41



3 pav. Teorinė ir eksperimentinė vidaus oro temperatūros

2 lentelė. **Būdingų pastato maketo komponavimo variantų eksperimentinio patikrinimo palyginamieji energiniai rodikliai (pradinė maketo šildymo stadija)**

Maketo montavimo variantas	Maketo komponavimo struktūra	Šilumos šaltinio galia kW	Ribinė patalpos (maketo vidaus) oro temperatūra $(\vartheta_i - \vartheta_{io})$ rib, K	Ribinė apibendrinta atitvaros temperatūra $(\vartheta_i - \vartheta_{Eo})$ rib, K	Apibendrinta atitvaros savitoji šiluma J/kgK	Maksimalus atitvaroje akumuliuotos šilumos kiekis kJ	Atitvaros aušimo pusperiodis h	Laikotarpis, per kurį patalpos (maketo vidaus) oro temperatūra pakyla $((\vartheta_i - \vartheta_{io}) = 20$ K, h	Energijos sąnaudos patalpos oro pašildymui iki $(\vartheta_i - \vartheta_{io}) = 20$ K kWh	Pastaba
I	1. Lengvų konstrukcijų atitvaros 2. Masyvesnis šilumos šaltinis 3. Vidaus įranga minimali	0,30	37,0	22,9	1475,0	5863,0	3,763	3,64	1,09	
II	1. Masyvesnės atitvaros. Izoliacijos sluoksnis iš vidinės pusės 2. Masyvesnis šilumos šaltinis 3. Vidaus įranga minimali	0,20	39,0	8,2	988,0	5010,4	4,98	3,12	0,625	
III	1. Masyvesnės atitvaros. Izoliacijos sluoksnis iš išorinės pusės 2. Masyvesnis šilumos šaltinis 3. Vidaus įranga minimali	0,20	38,0	21,2	988,0	13649,0	12,96	8,0	1,6	
		0,30	58,0	31,8	988,0	19431,0	12,96	2,9	0,87	

3 lentelė. **Būdingų pastato maketo komponavimo variantų eksperimentinio patikrinimo palyginamieji energiniai rodikliai (nusistovėjusio kintamo terminio režimo stadija)**

Maketo montavimo variantas	Maketo komponavimo struktūra	Šilumos šaltinio galia kW	Pasirinkto patalpos terminio režimo +10 °C– +20 °C +20 °C periodo trukmė h	Laikotarpis, per kurį patalpos oro temperatūra nuo apatinės ribos pakyla iki viršutinės ribos, h	Laikotarpis, per kurį patalpos oro temperatūra nuo viršutinės ribos nukrinta iki apatinės ribos, h	Paros energijos sąnaudos, esant nereguliuojamam šildymo režimui, kWh	Paros energijos sąnaudos, esant reguliuojamam šildymo režimui, kWh	Patalpos oro terminis komfortabilumas %	Energijos ekonomija, palyginti su reguliuojamu šildymo režimu, kWh (%)	Pastaba
II	1. Masyvesnės atitvaros. Izoliacijos sluoksnis iš vidinės pusės 2. Masyvesnis šilumos šaltinis 3. Vidaus įranga minimali	0,2	12 + 12 = 24	5,1	1,3	4,31	2,92	95,0	1,4 (32,2)	
III	1. Masyvesnės atitvaros. Izoliacijos sluoksnis iš išorinės pusės 2. Masyvesnis šilumos šaltinis 3. Vidaus įranga minimali	0,2	12 + 12 = 24	Nepasiekia	–	4,32	2,92	90,6	1,4 (32,2)	
		0,3	12 + 12 = 24	2,6	2,1	4,34	3,12	96,7	1,22 (28,1)	

žemesnei masyvaus atitvaros sluoksnio temperatūrai, susidaro drėgmės kondensacijos tarp izoliacinio ir masyvaus atitvaros sluoksnių pavojus. Šio reiškinio būtų galima išvengti, įrengiant atitinkamose vietose hidroizoliacinius sluoksnius bei patalpose reguliuojant oro drėgmės režimą. Be to, įrengiant šilumos izoliacijos sluoksnį iš atitvaros vidinės pusės žymiai sumažėja vidinių atitvaros paviršių šilumos imlumo koeficientas, o tai daro teigiamą poveikį patalpoje esančių žmonių savijautai.

4. IŠVADOS

1. Gauti eksperimento rezultatai visiškai koreliuojasi su teoriniais skaičiavimais.

2. Paruoštos nestacionariųjų šilumos mainų balansinės lygtys ir skaičiavimo metodika gali būti naudojamos įvairių konstrukcijų pastatų ir jų komponentų energinio efektyvumo analizei.

3. Teorinė balansinių diferencialinių lygčių analizė bei eksperimentiniai tyrimai parodė, kad pastatų šilumos režimo valdymas yra lankstesnis ir energijos sąnaudos šildymui yra mažesnės, kai:

a) pastato atitvaros yra lengvų konstrukcijų,

b) pastato vidaus įranga (perdangos, pertvaros, patalpose esantys objektai) yra kuo lengvesni,

c) šilumos šaltinio (šildymo sistemos) galia optimali, masė minimali,

d) renovuojamų mūrinių blokinių pastatų aitvarų šiluminės izoliacijos sluoksnis – iš vidinės pusės.

4. Kuo mažesnė pastato komponentų masė dalyvauja šilumos mainuose – tuo lengviau pastato šiluminis režimas valdomas, tuo pastatas energiniu požiūriu yra efektyvesnis.

5. Paruošus atitinkamą kompiuterinę skaičiavimo programą galima operatyviai ir tiksliai atlikti nagrinėjamo pastato šilumos režimo analizę, ieškant optimalaus pastato komponavimo varianto, keičiant konstrukcinius sprendimus, medžiagas, išorinių ir vidinių veiksnių įtaką pastato terminei būklei.

6. Metodas leidžia išvengti brangiai kainuojančių ir ilgalaikių natūrinių eksperimentų, nustatant pastato energines charakteristikas.

7. Projektuojant naujus arba renovuojant senus pastatus, ypač daug dėmesio turi būti skiriama pastato komponentų išdėstymui ir jų suderinamumui. Kuo mažesnės pastato komponentų masės dalyvauja kintamame šilumos mainų procese, tuo lengviau yra reguliuojamas patalpų mikroklimatas, tuo pastatas sunaudoja mažiau energijos šildymui.

8. Teorinė balansinių pastato lygčių sistemos analizė ir eksperimento rezultatai nenuginčijamai rodo pastato atitvarų apšiltinimo iš vidaus pusės energinius ir higieninius privalumus. Siekiant įvertinti drėgmės režimų pokyčius konstrukcijose, reikia išsamesnių tyrimų.

Gauta 2009 02 02
Priimta 2009 06 10

Literatūra

1. Juodvalkis J. The reguliation of temperature in premises depending on the massiveness of buildings // Energy and Mass Flow in the Life Cycle of Buildings. Vienna, 1996.
2. Juodvalkis J., Blaževičius E., Vipartas R. A. Methods of unstable heat transfer regime analysis and of power estimation // Regional Central and Eastern Europe Conference on Sustainable Building. Warshaw, 27–29 October, 2004. 8 p.
3. Juodvalkis J., Blaževičius E., Vipartas R. A. The posibilities of the loss minimization in buildings // 8th World Congress: "High Tech, Low Energy Experience of the Future of Building Technologies", Clima 2005, Lausanne. Paper N 304. 6 p.
4. Kažič N. Thermal feed-back as way to reach higher and lower temperature patential in low energy processes // Energy and Buildings. 2001. Vol. 33. Issue 8. P. 825–830.

Jonas Juodvalkis, Egidijus Blaževičius

EXPERIMENTAL VERIFICATION OF THE UNSTABLE HEAT EXCHANGE CALCULATION METHOD IN BUILDINGS

Summary

Theoretical analysis of heat exchange in buildings under unstable conditions was carried out at the Institute of Architecture and Construction of the Kaunas University of Technology. The thermal behavior analysis of real buildings was carried out on the basis of the compiled system of balance differential heat exchange equations. The experiment on simplified model in a climatic chamber was carried out with the purpose to verify the theoretical issues. Such system of verification by simulation is widely applied at other research institutions. The agreement of numerical solutions by the proposed balance differential equations system with the experimental results was the main task. Positive results were obtained in the experiment. The proposed system of balance differential heat exchange equations and the calculation method should be recommended for assessing thermal behaviour energy efficiency in real buildings.

Key words: heat exchange under unstable conditions, heating, structure of building elements, heat exchange control

Йонас Юодвалькис, Эгидиюс Блажявичюс

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА МЕТОДА РАСЧЕТА НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛООБМЕНА В ЗДАНИЯХ

Резюме

В Институте архитектуры и строительства Каунасского технологического университета проведены теоретические исследования нестационарного теплообмена в зданиях. Составлена система балансовых дифференциальных уравнений для нестационарного теплообмена гетерогенного тела-здания, на основании которой был проведен анализ теплового состояния реальных зданий. В целях проверки теоретических выводов проведен эксперимент с упрощенной моделью здания в климатической камере. Такая практика моделирования применяется и на научных предприятиях других стран. Цель эксперимента – проверить соответствия результатов цифровых решений дифференциальных уравнений с результатами эксперимента. Полученные результаты вполне удовлетворительны. Полученные дифференциальные балансовые уравнения и методика расчета могут быть применены для энергетического анализа реальных зданий.

Ключевые слова: нестационарный теплообмен, отопление, конструкция ограждений, регулирование теплообмена