

Pastato kintamo šiluminio režimo modeliavimas

Jonas Pagojus

*Kauno technologijos universitetas,
Architektūros ir statybos institutas,
Tunelio g. 60, LT-44405 Kaunas*

Panaudojus pastato nestacionarinių šilumos mainų matematiną modelį, išreikštą diferencialinių lygčių sistema, sudarytas kompiuterinis modelis ir, priklausomai nuo pastato konstrukcinių sprendimų (atitvarų, vidaus konstrukcijų, šildymo sistemos), išorės oro temperatūros, šilumnešio temperatūros, sumodeliuotas pastato patalpų mikroklimatas. Pateikiami dviejų daugiaaukštėse gyvenamųjų namų šiluminio režimo modeliavimo rezultatai. Modeliavimui ir jo rezultatams patikrinti panaudoti natūrinio tyrimo duomenys: vidaus oro, išorės oro, šilumnešio temperatūrų kitimas bei šilumos suvartojimas. Pagal išmatuotas šilumnešio ir išorės oro temperatūras, apskaičiuotas vidaus oro temperatūros kitimas; pagal numatytą vidaus oro temperatūrą nustatyta, kaip kinta šilumos dalinio temperatūra, kai reguliuojama pagal išorės temperatūrą; taip pat apskaičiuotas šilumos sąnaudos šildymui per tam tikrą laikotarpį. Modeliavimo rezultatai palyginti su natūrinio tyrimo duomenimis. Taip pat pateikiamas vidaus oro temperatūros kitimas vėjo greičio ir saulės spinduliuotės atpildymu. Palyginimas rodo, kad turimas modelis gerai išreiškia pastato konstrukcinių sprendimų, išorės oro temperatūros, šildymo sistemos darbo režimo įtaką jo šiluminei būsenai.

Raktažodžiai: pastatas, šilumos mainai, dinaminis modelis, oro temperatūra, šildymas, kompiuterinis modeliavimas

1. AVADAS

Pastato šiluminis režimas priklauso ne vien nuo šilumos nuostolių per atitvaras, šilumos srauto nuo šildymo prietaisų, kitų šilumos pritekėjimų, išorės veiksnių (vėjo greičio, saulės spinduliuotės), bet ir nuo visų pastatą sudarančių elementų (atitvarų, vidaus konstrukcijų, šildymo sistemos) šilumos talpos. Atliekama daug tyrimų [1–3], kuriais siekiama rasti optimalius pastatų konstrukcijų variantus, šildymo, kondicionavimo sistemų valdymo algoritmus, kad būtų sumažintos energijos sąnaudos ir patalpose būtų užtikrintos reikiamos komforto sąlygos.

Pastato šilumos suvartojimo, vidaus mikroklimato parametrų, priklausančių nuo pastato konstrukcijų bei išorės klimato sąlygų, analizė gali būti atliekama tiriant realius pastatus arba taikant įvairius modeliavimo metodus, modelius ar kompiuterines priemones, kurių panaudojimas leidžia kur kas greičiau ir ekonomiškiau nei eksperimentiškai tirti pastatuose vykstančius šiluminius procesus. Tokios priemonės sėkmingai taikomos parenkant izoliacines medžiagas, analizuojant šildymo, vėdinimo, kondicionavimo sistemų valdymo būdus, parenkant iš šių sistemų variantus ir optimalias galias, kad patalpose būtų palaikomi komfortiniai mikroklimato parametrai ir mažinamos energijos sąnaudos.

Šiame darbe pastato patalpų mikroklimato ir šilumos suvartojimo priklausomybei nuo pastato kon-

strukcijų, šildymo sistemos, išorės veiksnių nustatyti panaudotas pastato nestacionarinių šilumos mainų matematinis modelis ir natūrinio tyrimo duomenys.

2. TYRIMŲ OBJEKTAI IR METODIKA

Darbo tikslas – patikrinti, kaip turimas matematinis modelis atitinka realias sąlygas. Tam panaudoti Architektūros ir statybos instituto darbuotojų 2000 m. vasario–kovo mėn. atlikto penkių daugiaaukštėse gyvenamųjų namų energetinio audito duomenys [4, 5]. Čia aprašomi du pastatai ir pateikiami jų rezultatai.

2.1. Pastatai

Pastatas Nr. 1: 9 aukštų, 54 butų

Skaičiavimams priimta:

keramzitbartonio plokštėse sienos, $A = 2430 \text{ m}^2$, $R = 0,74 \text{ m}^2 \text{ K/W}$; suporinti langai, $A = 566,4 \text{ m}^2$, $R = 0,4 \text{ m}^2 \text{ K/W}$; stogas – plokštėse, $A = 489 \text{ m}^2$, $R = 1,4 \text{ m}^2 \text{ K/W}$; grindys á rûsá, $A = 489 \text{ m}^2$, $R = 0,7 \text{ m}^2 \text{ K/W}$; šildomas plotas – $3514,32 \text{ m}^2$;

šildymo sistemos galia – 375 kW ;

Pastatas Nr. 2: 9 aukštų, 36 butų

Skaičiavimams priimta:

sienos – keraminių plytų mûro, $A = 1770,2 \text{ m}^2$, $R = 0,9 \text{ m}^2 \text{ K/W}$; fragmentai iš keramzitbartonio plokštėse $A = 675,2 \text{ m}^2$, $R = 0,8 \text{ m}^2 \text{ K/W}$; suporinti langai, $A = 436,5 \text{ m}^2$, $R = 0,4 \text{ m}^2 \text{ K/W}$; stogas – plokštėse, $A = 351,3 \text{ m}^2$, $R = 1,3 \text{ m}^2 \text{ K/W}$; grindys á rûsá

$A = 351,3 \text{ m}^2$, $R = 0,7 \text{ m}^2 \text{ K/W}$; šildomas plotas – $2107,21 \text{ m}^2$; šildymo sistemos galia – 225 kW ;

Modeliavimas atliktas esant tokioms sąlygoms, kaip ir natūrinio tyrimo metu, t. y. panaudotos faktinė išorės oro, vidaus oro ir šilumnešio temperatūros, ávertinama oro maino (dėl vėdinimo ir infiltracijos) bei saulės spinduliuotės átaka.

2.2. Metodika

Bet kurio pastato šilumos maino vyksmà (šilumos balansà) bei atskiro jo elementø temperatūros kitimà apraðo diferencialinio lygèio sistema [6]:

– apibendrinta šilumos áaltinio (šildymo sistemos) temperatūra – vidutinė šilumnešio ir sistemos vamzdynø, šildymo prietaisø temperatūra

$$\frac{d\theta_s}{dt} = k_s - m_s \cdot (\theta_s - \theta_i), \quad (1)$$

– apibendrinta vidaus oro ir vidinio konstrukcijø temperatūra

$$\frac{d\theta_i}{dt} = \frac{1}{\mu_c} \cdot [m_s \cdot (\theta_s - \theta_i) - \mu_1 \cdot m_1 \cdot (\theta_i - \theta_1)], \quad (2)$$

– apibendrinta atitvarinio konstrukcijø temperatūra

$$\frac{d\theta_1}{dt} = m_1 \cdot (\theta_i - \theta_1) - m_{1e} \cdot (\theta_1 - \theta_e), \quad (3)$$

– išorės oro temperatūra

$$\theta_e = \theta_{evid.} + A_{\theta_e} \cdot \sin \frac{2\pi \cdot t}{T}; \quad (4)$$

èia θ_s , θ_p , θ_i , θ_e – atitinkamai šilumos áaltinio, vidaus oro, išorinio atitvarø ir išorės oro temperatūra °C; $\theta_{evid.}$ – vidutinė išorės oro temperatūra °C; A_{θ_e} – išorės oro temperatūros svyravimo amplitudė °C; T – svyravimo periodas h; t – laikas h; k_s – šilumos šaltinio šilimo (kaitimo) greitis K/h; m_s – šilumos šaltinio aušimo tempas 1/h; m_1 – atitvarø konstrukcijø šilimo tempas 1/h; m_{1e} – atitvarø konstrukcijø aušimo tempas 1/h; μ_c – tariamoji pastato vidinio konstrukcijø šilumos talpa; μ_1 – tariamoji pastato išorinio konstrukcijø šilumos talpa.

Dydis m išreiðkia, kurià akumuliuotos šilumos dalá sudaro kiekvienas elementas šilumà atiduodanèio kûno (šildymo sistemos) atþvilgiu, esant vieno laipsnio temperatūrø skirtumui. Lygèio sistemoje šilumos srautai tarp kûnø yra proporcingi temperatūrø skirtumui tarp jø ir kiekvieno atskiro elemento šiluminė bûsena priklauso nuo šilimo bei aušimo tempo: šilumos áaltinio temperatūra (1) priklauso nuo jo kaitimo intensyvumo bei aušimo tempo; vidaus oro temperatūra (2) priklauso nuo šildymo sistemos aušimo tempo (oro šilimo intensyvumo), vidinio konstrukcijø šilumos talpos ir išorinio atitvarø šilimo tempo; atitvarø temperatūra (3) priklauso nuo jø šilimo bei aušimo tempo. Dydis m savo ruoþtu priklauso nuo kûno medþiagos fizi-

niø šiluminiø savybiø, formos ir matmenø bei šilumos mainø ant pavirðiaus.

Pagrindiniai ðio darbo tikslai, sprendþiant pateiktà lygèio sistemà, yra:

1. Priklausomai nuo pastato konstrukcijø šilumos talpos, išorės oro temperatūros svyravimo, šilumos áaltinio darbo nustatyti vidaus oro temperatūros kitimà.

2. Nustatyti šilumos áaltinio darbo reþimà, kad patalpose pagal grafikà bûtø palaikoma numatyta temperatūra, bei apskaièiuoti energijos sànaudas.

Þiems uþdaviniams spræsti panaudotas procesø modeliavimo programinis paketas MATLAB [7]. Vidaus oro temperatūros kitimui nustatyti lygèio sistema supaprastinama:

$$\begin{cases} \frac{d\theta_i}{dt} = \frac{1}{\mu_c} \left[m_s \cdot (\theta_{svid.fakt.} - \theta_i) - \mu_1 \cdot m_1 \cdot (\theta_i - \theta_1) \right], \\ \frac{d\theta_1}{dt} = m_1 \cdot (\theta_i - \theta_1) - m_{1e} \cdot (\theta_1 - \theta_{efakt.}); \end{cases} \quad (5)$$

èia $\theta_{svid.fakt.}$ – natūrinio stebèjimø metu nustatyta vidutinė šilumnešio temperatūra (tiekiamos ir grãtamos temperatūrø vidurkis) °C; $\theta_{efakt.}$ – tyrimø metu išmatuota išorės oro temperatūra °C.

Antram uþdaviniui spræsti lygèio sistema bus to- kia:

$$\begin{cases} \frac{d\theta_s}{dt} = k_s - m_s (\theta_s - \theta_i), \\ \frac{d\theta_i}{dt} = \frac{1}{\mu_c} [m_s (\theta_s - \theta_i) - \mu_1 m_1 (\theta_i - \theta_1)], \\ \frac{d\theta_1}{dt} = m_1 (\theta_i - \theta_1) - m_{1e} (\theta_1 - \theta_{efakt.}). \end{cases} \quad (6)$$

Analiðiškai apskaièiuotos lygèio sistemos koeficientø skaitinës reikðmës abiems pastatams pateikiamos 1 lentelėje. Ðie koeficientai yra santykiniai dyðþiai, ávertinantys visø pastatà sudaranèio elementø fizines savybes, pastato šilumos nuostolius, vidinius šilumos pritekèimus, saulės spinduliuotà, oro mainus.

Saulės spinduliuotės ir oro mainø átakai vidaus oro temperatūrai bei šilumos sànaudoms ávertinti ta-

1 lentelė. Koeficientø skaitinës reikðmës

Koeficientas	Reikðmė	
	pastatas Nr. 1	pastatas Nr. 2
k_s	30,42	29,30
m_s	0,2521	0,3192
m_1	0,0342	0,0177
m_{1e}	0,0737	0,0418
μ_c	46,95	71,13
μ_1	24,03	60,84

riama, kad dėl saulės spinduliuotės tam tikru dydžiu padidėja šilumos šaltinio aušimo tempas, t. y. koeficientas m_s , o dėl oro mainų padidėja atitvarinių konstrukcijų aušimo greitis – koeficientas m_e . Skaičiuojant energijos sąnaudas, pagal vidaus ir išorės temperatūras, apskaičiuojamas ir šilumos kiekis vėdinimui pagal:

$$Q = \frac{nV\rho c}{3600} \cdot \int_0^t (\theta_i - \theta_e) dt; \quad (7)$$

čia $nV\rho c$ – orui šildyti reikalingas šilumos kiekis

$\text{kJ/h}; \int_0^t (\theta_i - \theta_e) dt$ išreiškia plotą, apribotą vidaus ir išorės oro temperatūrų kreivių.

3. REZULTATAI

Vidaus oro temperatūros modeliavimo rezultatai bei faktiniai duomenys anksčiau aprašytiems pastatams priklausomai nuo vidutinės šilumnešio temperatūros ir lauko oro temperatūros parodyti 1 pav. Modeliavimo laikotarpis – 7 paros: pastatui Nr. 1 – kovo 10–16 d., pastatui Nr. 2 – kovo 1–7 d.

Palyginimas rodo, kad modeliavimo rezultatai gerai atitinka faktinius duomenis (didžiausias skirtumas yra $0,45^\circ\text{C}$). Matyti ir pastato šiluminės inercijos įtaka vidaus oro temperatūrai. Šilumnešio temperatūra reguliuojama pagal išorės oro temperatūrą neįvertinant pastato šiluminės inercijos, todėl patalpų oro temperatūra, krintant šilumnešio temperatūrai, tam tikrą laiką didėja ir, atvirkščiai, kylant šilumnešio temperatūrai, – mažėja. Pastate Nr. 2, natūrinio stebėjimo metu, be reguliavimo pagal išorės oro temperatūrą, dar buvo vykdomas naktinis vidaus temperatūros pažeidimas, tačiau (3 pav. b) tokio reguliavimo efekto nematyti, nes ir dieną, ir naktį temperatūros yra panašios.

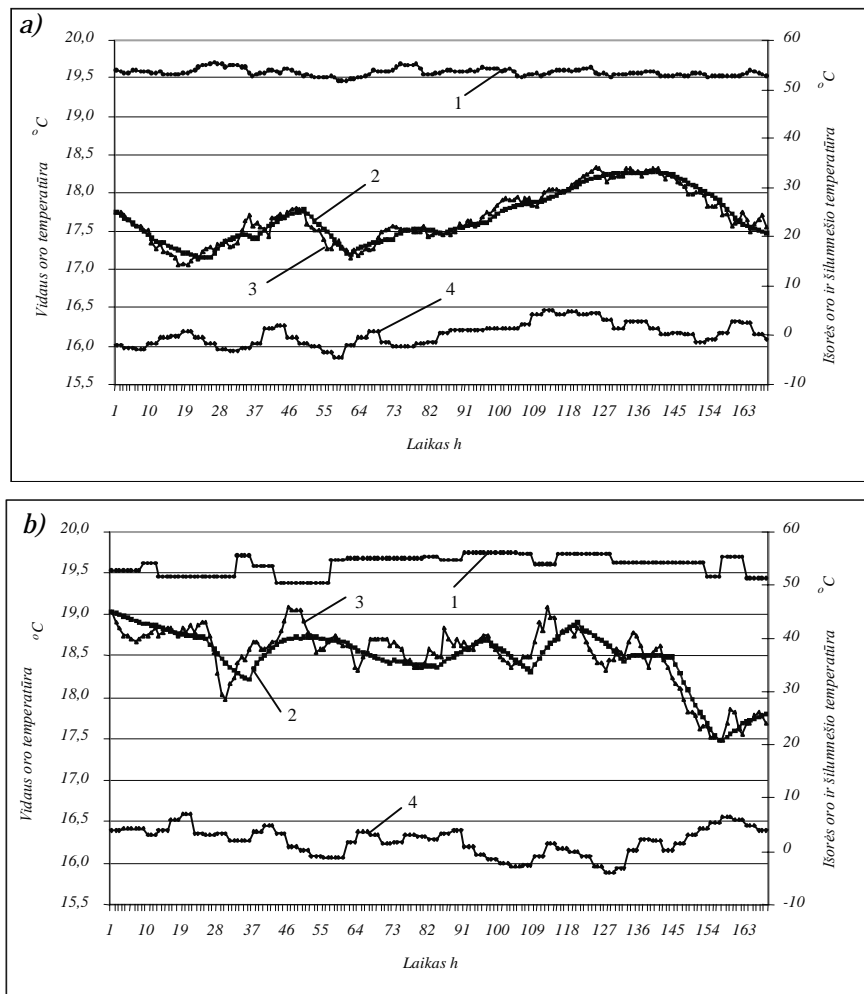
Siekiant nustatyti vėjo greičio ir saulės spinduliuotės įtaką, 2 pav. pateikiamas vidaus oro temperatūros kitimas šio veiksnio atžvilgiu. Nors atskiras momentais pakitus vėjo greičiui ar saulės spinduliuotei

patalpų temperatūra padidėja arba sumažėja, tiksliai viso pastato vidaus oro temperatūros priklausomybės nuo šių veiksnių negalima nustatyti: apatiniuose aukštuose vėjo įtaka yra mažesnė, viršutiniuose – didesnė, saulės įtaka taip pat skiriasi įvairiose pastato vietose.

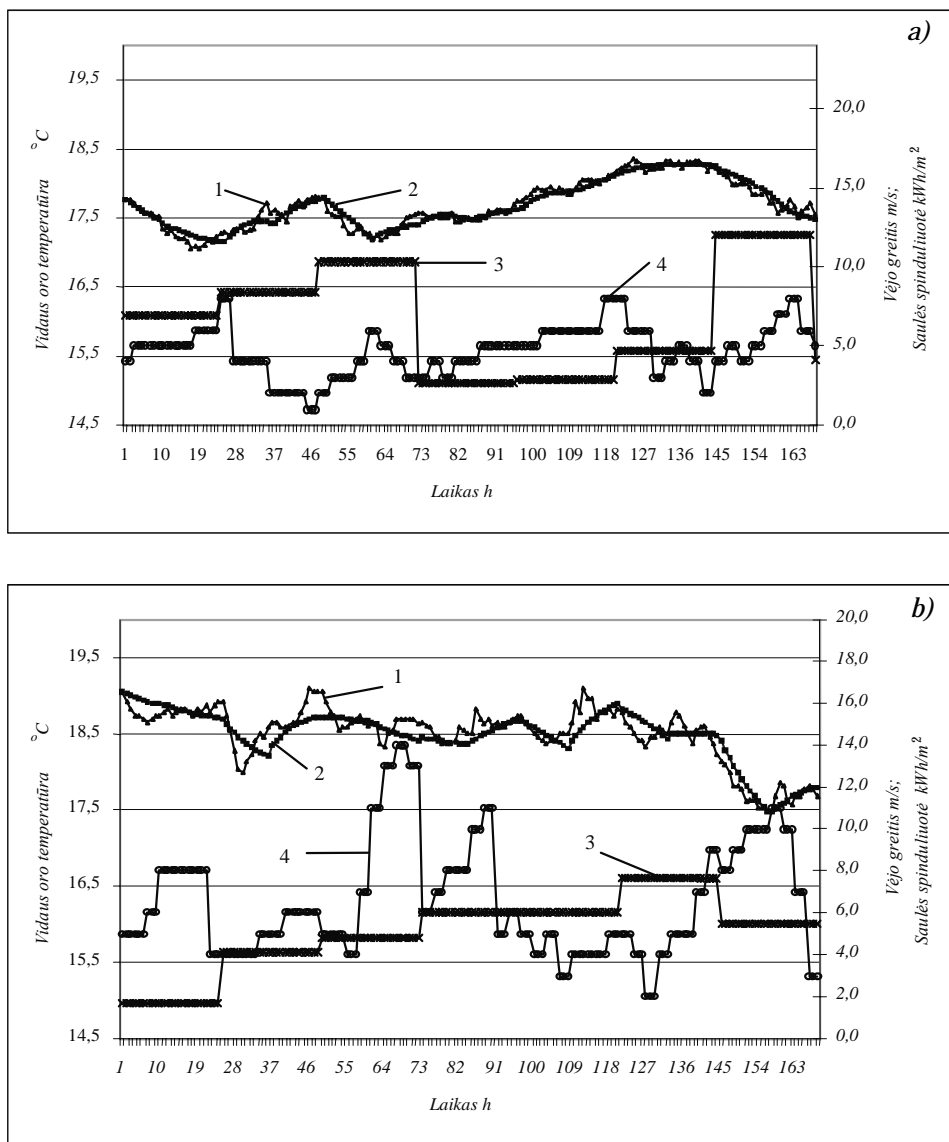
Siekiant tiksliai įvertinti vėjo ar saulės spinduliuotės įtaką vidaus oro temperatūrai, reikėtų nagrinėti atskirus butus arba atskiras patalpas, priklausomai nuo jų padėties pastate, nes, kaip parodė natūriniai tyrimai, pvz., pastate Nr. 1, didžiausi nesandrumai ir pažeidimai temperatūroje matyti šilumnešio vietose, ypač kampinėse bei galiniuose sienų siūlėse.

Šilumos šaltinio temperatūros kitimas, kai reguliuojama pagal išorės oro temperatūrą, pateikiamas 3 pav., o apskaičiuotą šilumos sąnaudą per tirtą laikotarpį palyginimas su faktinėmis – 2 lentelėje.

Pasinaudojus modeliavimo rezultatais, gautais tam atvejui, kai patalpose palaikoma pastovi temperatūra, ir apskaičiuavus realų šilumos suvartojimą per numatytą laikotarpį, matyti, kad apskaičiuotą šilumos



1 pav. Vidaus oro temperatūros kitimas priklausomai nuo vidutinės šilumnešio ir išorės oro temperatūros: a – pastatas Nr. 1, b – pastatas Nr. 2. 1 – vidutinė šilumnešio temperatūra, 2 – apibendrinta vidaus oro temperatūra, gauta modeliavimą, 3 – faktinė vidaus oro temperatūra, 4 – išorės oro temperatūra



2 pav. Vidaus oro temperatūros kitimas vėjo greičio ir saulės spinduliuotės atžvilgiu: *a* – pastatas Nr. 1, *b* – pastatas Nr. 2. 1 – faktinė vidaus oro temperatūra, 2 – sumodeliuota vidaus oro temperatūra, 3 – saulės spinduliuotės kitimas, 4 – vėjo greičio kitimas

sanaudos beveik sutampa su faktinėmis, kai nustatyta vidaus oro temperatūra yra 18 °C. Taip pat modeliuojant išskirtos šilumos sąnaudos vėdinimui, pagal (7), priėmus oro apykaitą (pagal faktinius duomenis) $n = 1/h$; jos sudaro atitinkamai pastatui Nr. 1 – 49%, pastatui Nr. 2 – 30% visos suvartotos šilumos.

2 lentelė. Šilumos sąnaudos kWh

Pastatas	Faktinės	Sumodeliuotos	
		bendrosios	vėdinimui
Nr. 1	19903,74	19933,45	9741,19
Nr. 2	17359,57	17346,82	5279,44

Šilumos dalinio temperatūros kitimas (3 pav.) taip pat gautas tam atvejui, kai patalpose palai-

koma pastovi, t. y. 18 °C, temperatūra. Ėia matyti didesnis skirtumas tarp sumodeliuotos ir faktinės šilumnešio temperatūros, nei tarp atitinkamų vidaus oro temperatūrų. Šiuos skirtumus galima paaiškinti tuo, kad, pvz., pastate Nr. 1 kartais, o būtent tais momentais, kai tarp sumodeliuotos ir faktinės temperatūros yra didžiausi skirtumai, labai padidėja tiekiamas šilumnešio kiekis; pastate Nr. 2 priešpastis gali būti papildomas naktinis temperatūros paėmimas. Kita priešpastis tai, kad 3 pav. 1 kreivė yra natūrinio tyrimo metu išmatuotą tiekiamą ir grąžtamo šilumnešio temperatūrų vidutinę reikšmę, o 2 kreivė, gauta modeliuojant, vaizduoja vidutinės visos šildymo sistemos temperatūros kitimą, Sumodeliuotos šilumos dalinio temperatūros kitimo tendencija yra priešinga išorės oro temperatūros kitimo tendencijai: kai išorės

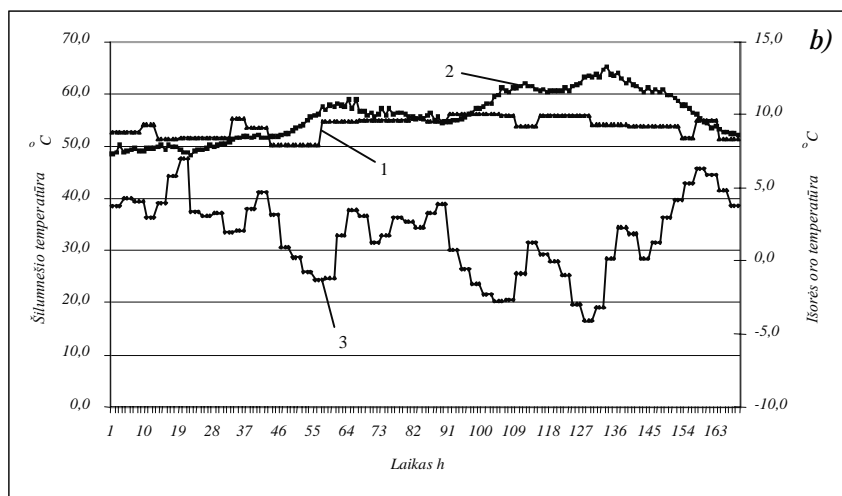
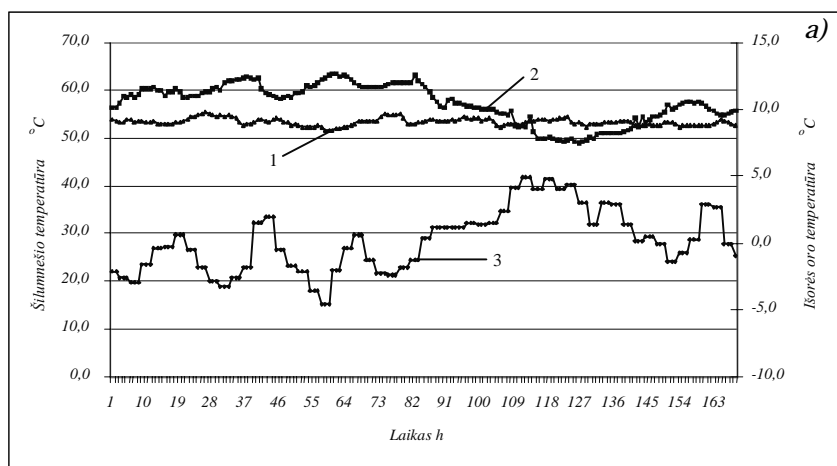
temperatūra krinta, šilumnešio temperatūra didėja, ir atvirkščiai, kai išorės temperatūra kyla, šilumnešio – mažėja.

4. IŠVADOS

1. Iš pateiktų rezultatų galima daryti išvadą, kad modelis gerai išreiškia pastato konstrukcinių sprendimų ir išorinių veiksnių įtaką jo šiluminei būsenai, todėl yra tinkamas modeliuoti ir prognozuoti pastato šiluminius procesus.

2. Siūloma metodika leidžia atlikti visapusišką pastato energetinių charakteristikų analizę esant kintamam šilumos mainų režimui be brangiai kainuojančių eksperimentų.

3. Daug šilumos sunaudojama orui šildyti. Esant vienkartiniam oro pasikeitimui, energijos sąnaudos



3 pav. Ėilumos ėaltinio temperatūros kitimas, kai reguliuojama pagal ėdorės oro temperatūrą: *a* – pastatas Nr. 1, *b* – pastatas Nr. 2. 1 – faktinė vidutinė ėilumnešio temperatūra, 2 – sumodeliuota ėilumos ėaltinio temperatūra, 3 – ėdorės oro temperatūra

vėdinimui kartais prilygsta ėilumos nuostoliams per atitvaras. Nagrinėtuose pastatuose ėilumos sąnaudos vėdinimui sudaro 30–50% visø energijos sąnaudø.

4. Sudėtinga kompleksišškai ėvertinti saulės spinduliuotės ir vėjo greiėio ėtakà viso pastato temperatūros kitimui ir energijos sąnaudoms.

Gauta 2004 11 12

Literatūra

1. Kossecka E., Kosny J. Influence of insulation configuration on heating and cooling loads in a continuously used buildings // *Energy and Buildings*. 2002. Vol. 34. P. 321–331.
2. Andersen K. K., Madsen H., Hansen L. H. Modelling the heat dynamics of a building using stochastic differential equations // *Energy and Buildings*. 2000. Vol. 31. P. 13–24.
3. Becker R., Paciuk M. Inter-related effects of cooling strategies and building features on energy performance of office buildings // *Energy and Buildings*. 2002. Vol. 34. P. 25–31.
4. Karbauskaitė J., Bistrickas S. Pastato detalus ėiluminis auditas (ėilumos suvartojimo patikrinimas) // *Statyba ir architektūra*. 2001. Nr. 4. Pp. 6–7; Nr. 7, 8. P. 16–18.

5. Stankeviėius V., Karbauskaitė J., Bliūdėpius R. Ėilumos suvartojimo pastatuose analizė // *Energetika*. 2002. Nr. 2. P. 57–61.

6. Juodvalkis J. Nestacionarinio ėilumos mainø pastatuose skaiėiavimo metodika ir eksperimentinis patikrinimas. Technikos mokslø kandidato disertacija. Kaunas, 1992. 67 p.

7. Agnikotri G., Singh K. K. System design through MATLAB, Control Toolbox and SIMULINK. Springer-Veslag London Limited, 2001. P. 487.

Jonas Pajojus

MODELLING OF NONSTATIONARY HEAT EXCHANGE IN BUILDINGS

Summary

There are various modelling methods and models to study heat dynamics in buildings, which is very important both for evaluating heating energy consumption and for achieving conditions of environmental comfort. This paper describes the mathematical model allowing to simulate the thermal transients in buildings depending on the geometrical characteristics and thermophysical properties of all building components (exterior walls, internal partitions, ceilings and floors), external temperature variations and supplied heat flow. The model has been verified with real houses. The results for two residential houses are shown. The variations of the indoor temperature, temperature of heating system were simulated; heat consumption for a specified period was calculated. A comparison between the experimental data and the computer simulation results for thermal unsteady state conditions showed a good agreement and proved the reliability of the model.

Key words: building, heat transfer, dynamic model, indoor temperature, heating, computer simulation

Йонас Пароюс

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛООБМЕНА В ЗДАНИЯХ

Резюме

С использованием математической модели нестационарного теплообмена в зданиях, выраженной системой дифференциальных уравнений, конструктивных решений зданий, наружных условий, работы отопительной системы. Цель настоящей работы – проверить, насколько точно указанная модель отражает реальные условия. Адекватность модели проверена результатами

натурных исследований: температуры теплоносителя, наружного и внутреннего воздуха, расхода тепловой энергии. Объектом исследования стали два многоэтажных жилых здания. Рассчитаны температуры теплоносителя и внутреннего воздуха, а также расход тепловой энергии за определенный период. Установлено, что модель хорошо отражает

влияние всех воздействий на тепловой режим здания и с ее помощью можно анализировать и прогнозировать нестационарный теплообмен в зданиях.

Ключевые слова: здание, теплообмен, динамическая модель, температура воздуха, отопление, компьютерное моделирование