

Uticaj relevantnih parametara u prenosu toplote kod spoljašnjih zidova građevinskih objekata

Mr Dimitrije Lilić, dipl.inž.¹⁾

Toplotno opterećenje prostorije jednim delom zavisi od količine toplote koja prode kroz zidove prostorije. Uslovi koji vladaju sa spoljašnje i unutrašnje strane zida objekta deluju na zid, što se odražava na temperaturno polje zida, odnosno pravac, smer i intenzitet toplotnih tokova u zidu i razmenu toplote u sistemu objekta. Spoljašnji zid predstavlja deo omotača objekta izloženog uticajima koji pored određene pravilnosti imaju i stohastički karakter. Pritom se prenos toplote vrši najčešće istovremeno zračenjem, provođenjem i konvekcijom. Formiranim matematičkim modelom obuhvaćena je kompleksna interakcija uticaja relevantnih parametara na toplotne tokove kod spoljašnjeg zida objekta i prikazano eksperimentalnim putem praćeno ponašanje spoljašnjeg zida, istočne orijentacije, na jednom objektu u Beogradu, u letnjem periodu. Upoređene su vrednosti dobijene merenjem sa odgovarajućim vrednostima i preporukama iz literature.

Ključne reči: Provođenje toplote, spoljašnji zid, zračenje, konvekcija, nestacionarni toplotni tok.

Uvod

U tehničari grejanja, klimatizacije i hlađenja, kao i u slučaju korišćenja sunčeve energije, jedan od osnovnih problema je poznavanje termičkih karakteristika i ponašanja omotača objekta.

Toplotno opterećenje prostorije jednim delom zavisi od količine toplote koja se prenosi kroz zidove prostorije. Ova količina toplote se menja tokom vremena i uglavnom je posledica uslova koji vladaju s obe strane zidova. Toplotni kapacitet zidova odražava se na prigušenje intenziteta i fazni pomeraj određenog toplotnog fluksa.

U razmatranju objekta kao toplotnog sistema, spoljašnji zid predstavlja deo njegovog omotača, koji je izložen uticajima koji, i pored određene pravilnosti, imaju i stohastički karakter (npr. unutrašnji izvori toplote, intenzitet sunčevog zračenja, temperatura spoljašnjeg vazduha, brzina vetra).

Pored konvekcije i kondukcije, zračenje je jedan od osnovnih mehanizama za prenos energije između regiona različitih temperatura. Emitovana energija zračenja može imati širok opseg talasnih dužina. Relevantna podela energije zračenja za ovakva razmatranja je na: tzv. kratkotalasno zračenje, (sunčevo zračenje koje obično staklo propušta u opsegu talasnih dužina do $\lambda \approx 2.7\text{mm}$ i obuhvata $\approx 97\%$ energije sunčevog zračenja) i dugotalasno niskotemperaturno zračenje ($\lambda > 2.7\text{mm}$) koje emituju zagrejane površine i koje stakleni elementi ne propuštaju.

Spoljašnja površina spoljašnjeg zida prima energiju sunčevim zračenjem i razmenjuje je sa okolinom (nebo - zemlja i objekti na njoj) dugotalasnim - temperaturnim zračenjem i konvekcijom sa spoljašnjim vazduhom. Apsorbovano sunčevo zračenje u najvećoj meri utiče na temperaturu spoljašnje površine zida koja može značajno da odstupa od temperature spoljašnjeg vazduha i da uzrokuje

dotadne tokove toplote u unutrašnjost objekta.

Uslovi koji vladaju sa spoljašnje i unutrašnje strane zida interaktivno deluju sa zidom, što se odražava na temperaturno polje zida, odnosno pravac, smer i intenzitet toplotnih tokova u zidu i razmenu toplote u sistemu objekta.

Toplota dovedena unutrašnjoj površini spoljašnjeg zida kondukcijom i od unutrašnje površine apsorbovanim kratkotalasnim (sunčevim) zračenjem, koje kroz zastakljenu površinu dospeva u prostoriju, razmenjuje se unutar prostorije dugotalasnim zračenjem s unutrašnjim površinama i konvekcijom s vazduhom u prostoriji. Izvori zračenja u prostoriji, koje mogu apsorbovati unutrašnje površine zidova, mogu biti i ljudi, svetiljke, nameštaj i razni uređaji.

Formiranim matematičkim modelom je obuhvaćena kompleksna interakcija uticaja relevantnih parametara na toplotne tokove kod spoljašnjeg zida objekta i prikazano, eksperimentalnim putem praćeno ponašanje spoljašnjeg zida, istočne orijentacije, na jednom objektu u Beogradu u letnjem periodu. Takođe, u analizi rezultata merenja vršeno je upoređenje vrednosti dobijenih merenjem sa odgovarajućim vrednostima i preporukama iz literature.

Analitički model

Prostiranje toplote u spoljašnjem zidu

Ako se posmatra jednoslojan zid u obliku tanke ravne ploče, debljine δ , izrađen od homogenog, izotropnog materijala, s konstantnim termofizičkim osobinama materijala, prema modelu na slici 1, onda se njegovo temperaturno polje u nestacionarnom režimu prostiranja toplote može da definiše parcijalnom diferencijalnom jednačinom:

¹⁾ Vojnotehnički institut VJ, 11000 Beograd, Katanićeva 15

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \quad (1)$$

gde su:

- $a = \lambda / C_p \rho$ - koeficijent temperaturne provodljivosti materijala, (m^2/h),
 λ - koeficijent provođenja toplote, (W/mK),
 C_p - specifična toplota, (J/kgK),
 ρ - gustina, (kg/m^3)
 t - temperatura, (K) i
 τ - vreme, (h)

Pri tome, prema fizičkom modelu (sl.1), početni uslov određen rasporedom temperature duž x-ose u početnom trenutku iznosi:

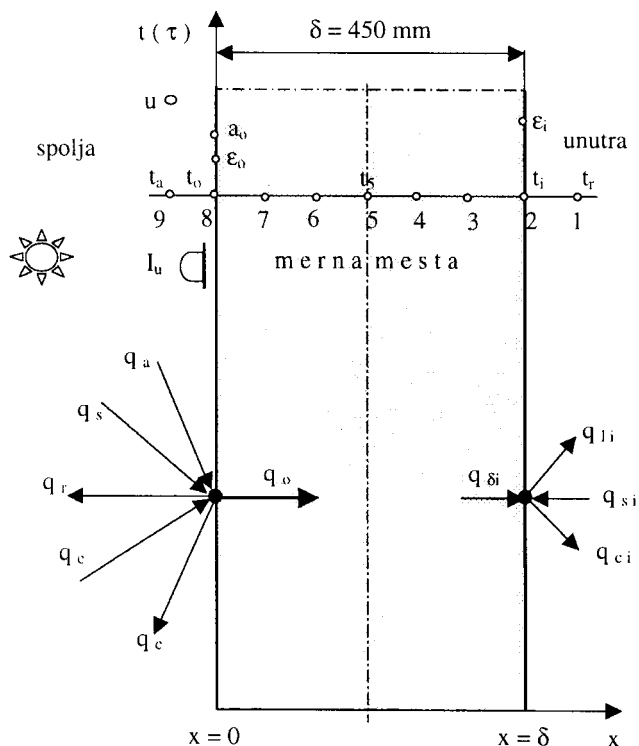
$$t = t(x), \text{ za } \tau = 0 \quad (2)$$

a granični uslovi za $\tau > 0$, toplotnim protocima na graničnim površinama zida, spoljašnjoj površini $x=0$ i unutrašnjoj $x=\delta$:

$$q_0 = -\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial x} \right)_{x=0} \quad \text{i} \quad q_{\delta i} = -\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial x} \right)_{x=\delta} \quad (3)$$

pri čemu su toplotni protoci q_0 i q_{δ} u interakciji s odgovarajućim toplotnim protocima u bilansima za spoljašnju, odnosno unutrašnju površinu zida.

Toplotni bilans na spoljašnjoj površini spoljašnjeg zida objekta



Slika 1. Fizički model spoljašnjeg zida: šematski prikaz toplotnih tokova i rasporeda mernih mesta (oznake opisane u tekstu)

Na spoljašnjoj površini spoljašnjeg zida objekta istovremeno se odvijaju procesi dovođenja i odvođenja toplote. Jednačina ravnoteže toplotnih protoka za spoljašnju površinu zida ($x=0$) može da se izrazi, prema sl.1:

$$q_s + q_a + q_e = q_c + q_r + q_o \quad (4)$$

gde su:

- q_s - protok sunčevog zračenja apsorbovanog od površine, (W/m^2)
 q_a - protok atmosferskog zračenja apsorbovanog od površine, (W/m^2)
 q_e - protok zračenja zemlje apsorbovanog od površine, (W/m^2)
 q_c - toplotni protok konvekcijom od površine na okolni vazduh, (W/m^2)
 q_r - protok zračenja emitovanog od površine, (W/m^2)
 q_o - toplotni protok provođenja od spoljašnje površine prema unutrašnjoj (W/m^2).

Leva strana jednačine (1) predstavlja toplotne protoke koje površina zida prima, a desna strana toplotne protoke koji odlaze od površine. Pojedinačno dati toplotni protoci su određeni izrazima (5-12), kao što sledi:

$$q_s = a_{sD} I_{sD} + a_{sd} I_{sd} + \sum_{i=1}^n a_{sRi} I_{sRi} \quad (5)$$

gde su:

- I_{sD} ; I_{sd} i I_{sRi} - direktna; difuzna i reflektovana komponenta sunčevog zračenja na spoljašnju površinu,
 a_{sD} ; a_{sd} i a_{sRi} - koeficijenti apsorpcije površine zida za I_{sD} ; I_{sd} i I_{sRi} .

$$q_a = \varepsilon_o F_a [(1 - a_c K_c) \sigma T_a^4 Br + a_c K_c \sigma T_a^4] \quad (6)$$

gde su:

- ε_o - koeficijent emisije spoljašnje površine zida,
 F_a - faktor oblika vidljivog neba sa spoljašnje površine zida [2]

$$F_a = \frac{1 + \cos \varphi}{2} = \cos^2 \left(\frac{\varphi}{2} \right) \quad (7)$$

- φ - ugao nagnute površine u odnosu na horizontalnu površinu; za vertikalnu površinu $F_a = 0.5$
 a_c - veličina prekrivenosti neba oblacima, ($a_c=1$ za nebo potpuno prekriveno oblacima; $a_c=0$ za čisto nebo)
 K_c - faktor redukcije oblačnosti (tabela 1),
 σ - Stefan-Bolcmanova konstanta, $\sigma=5.67 \times 10^{-8}$ ($W/m^2 K^4$)
 Br - Bruntova emisivnost atmosfere prema [1]

$$Br = a + b \sqrt{e} \quad (8)$$

- a ; b - konstante: $a=0.51$; $b=0.066$
 e - pritisak vodene pare (mb),
 $T_a(K)$ - temperatura spoljašnjeg vazduha.

Tabela 1. Vrednosti faktora K_c

| Visina oblaka (km) | 2 | 5 | 8 |
|--------------------|------|------|------|
| K_c | 0.83 | 0.62 | 0.45 |

$$q_e = \varepsilon_o \varepsilon_e F_e \sigma T_e^4 \quad (9)$$

gde su:

- ε_e - koeficijent emisije zemlje
 F_e - faktor oblika za površinu zemlje vidljivu sa spoljašnje površine zida, pa je analogno izrazu (7)

$$F_e = \frac{1 - \cos \varphi}{2} \quad (10)$$

odnosno, za vertikalnu površinu $F_e=0.5$

T_e - temperatura površine zemlje, (K)

$$q_r = \varepsilon_o \sigma T_o^4 \quad (11)$$

$$q_c = \alpha_c (T_o - T_a) \quad (12)$$

gde su:

T_o - temperatura spoljašnje površine zida, (K)

α_c - koeficijent prelaza toplote konvekcijom, (W/m²K)

Vrednost koeficijenta prelaza toplote konvekcijom zavisi od mnogih faktora, kao što su: konfiguracija, geometrija površine zida, brzina opstrujavanja fluida, temperaturna razlika između površine i fluida, i fizičkih osobina fluida: toplotne provodnosti, kinematske viskoznosti, gustine, specifične toplote, viskoznosti i zapreminskog koeficijenta ekspanzije. Najuticajniji faktori na veličinu njegove vrednosti za spoljašnju površinu zida, predstavljaju intenzitet i pravac vetra u odnosu na geometriju površine.

Zbog kompleksnosti mehanizma razmene toplote konvekcijom, Ito, Oka i Kimura [1] su eksperimentalnim putem, za spoljašnju površinu zida, odredili odnose između brzine vetra, njegovog pravca, položaja zida i brzine vazduha blizu spoljašnje površine zida i koeficijenta prelaza toplote konvekcijom.

Za površinu izloženu vetru, za izračunavanje koeficijenta prelaza toplote konvekcijom (α_c) određen je izraz:

$$\alpha_c = 3.5 + 5.6u \quad (13)$$

gde je:

u - brzina vazduha blizu spoljašnje površine (10 cm do 30 cm od površine), (m/s)

Razmena toplote zračenjem i konvekcijom u prostoriji

Unutar neke prostorije, bila ona klimatizovana ili ne, razmena toplote vrši se uvek zračenjem i konvekcijom, istovremeno. Razmena toplote zračenjem vrši se između unutrašnjih površina prostorije, dok se razmena konvekcijom vrši između vazduha i unutrašnjih površina u prostoriji.

Vrednosti koeficijenta prelaza toplote za unutrašnje površine koji se preporučuju za proračune dati su u tabeli 2, a u zavisnosti od pravca i smeru toplotnog toka: gore, dole ili horizontalno, uključujući efekte i zračenja i konvekcije.

Vrednosti α_i iz tabele 2 mogu da se koriste samo za unutrašnje površine spoljašnjih zidova, tavanice i poda koje su izložene spoljašnjim uslovima. Za tačnija razmatranja, ove vrednosti mogu biti primenjene jedino u slučajevima gde sve unutrašnje površine koje obrazuju prostoriju, osim unutrašnje površine spoljašnjeg zida, imaju temperaturu sobnog vazduha, jer u takvom slučaju važi [1]:

$$\alpha_i = \alpha_{ci} + \alpha_{ri} \quad (14)$$

gde su:

α_i - ukupni efektivni koeficijent prelaza toplote konvekcijom i zračenjem, (W/m²K)

α_{ci} - koeficijent prelaza toplote konvekcijom, (W/m²K)

α_{ri} - koeficijent prelaza toplote zračenjem (W/m²K).

$$\alpha_{ri} = \frac{\varepsilon_i \varepsilon_w \sigma (T_i^4 - T_w^4)}{T_i - T_w} = \frac{\varepsilon_i \varepsilon_w \sigma (T_i^4 - T_r^4)}{T_i - T_r} \quad (15)$$

gde su:

T_i - temperatura unutrašnje površine spoljašnjeg zida, (K)

T_w - temperatura unutrašnje površine unutrašnjih

zidova, (K)

T_r - temperatura sobnog vazduha, (K)

ε_i - koeficijent emisije unutrašnje površine spoljašnjeg zida,

ε_i - koeficijent emisije površine unutrašnjih zidova.

Tabela 2. Koeficijent prelaza toplote za unutrašnje površine, α_i (W/m²K) [1]

| | | Konvektivna komponenta α_{ci} | Komponenta zračenjem α_{ri} | Kombinovano α_i |
|---------------------------|--|---|---------------------------------------|---------------------------|
| vertikalni zid ili prozor | kada ima otvor za klimatizaciju | 7 | leto 6 zima 4.5 | 13 11.5 |
| | kada nema otvor za klimatizaciju duž prozorske površine i kada je isključena klimatizacija | 3.5 | leto 6 zima 4.5 | 9.5 8 |
| tavanica | | | leto 6 zima 4.5 | 7 8.5 |
| pod | | | leto 6 zima 4.5 | 10 5.5 |

U opštem slučaju, temperature površina unutrašnjih zidova i pregrada različite su od temperature sobnog vazduha. Temperature površina mogu da budu određene konvektivnom razmenom toplote sa sobnim vazduhom i razmenom toplote zračenjem među površinama. Da bi se ove temperature odredile, neophodno je simultano rešavanje jednačina prikazanih u nastavku rada.

Površina zida može da se smatra beskonačno tankim slojem, bez mase, koja ne može da akumulira toplotu, pa je zbir svih toplotnih flukseva prema površini i od površine jednak nuli. Toplotni bilans na i -toj površini, prema sl.1 je:

$$q_{ci} + q_{li} = q_{\delta i} + q_{si} \quad (16)$$

gde je:

q_{ci} - toplotni fluks za konvekciju od površine na vazduh, (W/m²)

q_{li} - toplotni fluks apsorbovanog dugotalasnog zračenja, (W/m²)

q_{si} - toplotni fluks apsorbovanog sunčevog zračenja površine, (W/m²)

$q_{\delta i}$ - toplotni fluks odveden od površine provođenjem, (W/m²).

Izvori dugotalasnog zračenja u prostoriji mogu da budu, pored zidova, i druge površine: svetiljke, ljudi, uređaji i sl. pa onda možemo napisati:

$$q_{li} = \sum_{j=1}^k q_{l,j-i} + q_{l,s-i} + q_{l,u-i} \quad (17)$$

gde su:

$q_{l,j-i}$ - toplotni fluks razmenjen dugotalasnim zračenjem između površine j i i , (W/m²)

$q_{l,s-i}$ - toplotni fluks razmenjen između osvetljenja i površine, (W/m²)

$q_{l,u-i}$ - toplotni fluks razmenjen između ljudi, uređaja i sl. i površine, (W/m²)

Za slučaj bez uključenog osvetljenja i uticaja ljudi, uređaja i sl., kada je $e_i \approx e_j \approx (0.9 \text{ do } 1)$, što je slučaj kod dugotalasnog zračenja u prostorijama, dalje može da se napiše [1]:

$$\alpha_{ci} (T_i - T_r) + \sum_{i=1}^k F_{i-k} \varepsilon_i \varepsilon_k \sigma (T_i^4 - T_k^4) = q_{si} + q_{\delta i} \quad (18)$$

ili,

$$\alpha_{ci}(T_i - T_r) + \alpha_{r,i-k}(T_i - T_k) = q_{si} + q_{\delta i} \quad (19)$$

Toplotni bilans za sobni vazduh je:

$$\sum_{i=1}^k \alpha_{ci}(T_i - T_r) A_i = H_{ex} \quad (20)$$

gde su:

- A_i - i -ta površina, (m^2)
 H_{ex} - osetna toplota koju je potrebno odvoditi iz prostorije aktivnim hlađenjem ili klimatizacijom (ekstrakcija osetne toplote), (W)
 F_{i-k} - geometrijski faktor oblika između površina [4],
 $\varepsilon_i, \varepsilon_k$ - koeficijenti emisije površina,
 T_i, T_k - temperature površina, (K)
 T_r - temperatura sobnog vazduha, (K)
 α_{ci} - unutrašnji koeficijent prelaza toplote konvekcijom, (W/m^2K)
 α_{ri} - unutrašnji koeficijent prelaza toplote zračenjem, (W/m^2K)

Ove simultane jednačine mogu da se izraze u matričnom obliku:

$$\begin{bmatrix} \alpha_{c1} + \alpha_{r1} & -\alpha_{r12} & -\alpha_{r13} & \dots & -\alpha_{r1k} & -\alpha_{c1} \\ -\alpha_{r21} & \alpha_{c2} + \alpha_{r2} & -\alpha_{r23} & \dots & -\alpha_{r2k} & -\alpha_{c2} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot \\ -\alpha_{rk1} & -\alpha_{rk2} & -\alpha_{rk3} & \dots & \alpha_{ck} + \alpha_{rk} & -\alpha_{ck} \\ \alpha_{c1} A_1 & \alpha_{c2} A_2 & \alpha_{c3} A_3 & \dots & \alpha_{ck} A_k & -\sum_{i=1}^k \alpha_{ci} A_i \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ T_k \\ T_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_{s1} + q_{\delta 1} \\ q_{s2} + q_{\delta 2} \\ \cdot \\ \cdot \\ q_{sk} + q_{\delta k} \\ H_{ex} \end{bmatrix} \quad (21)$$

Kako su razlike između temperatura površina zidova relativno male, uz određene prihvatljive aproksimacije, članovi u (21) mogu da se napišu u obliku [1]:

$$\alpha_{ri} = \sum_{i=1}^k \alpha_{r,i-k} \quad (22)$$

$$\alpha_{r,i-k} = F_{i-k} \varepsilon_i \varepsilon_k \sigma (T_i + T_k)^3 / 2$$

Toplotni fluks $q_{\delta i}$ je u funkciji termofizičkih osobina zida i uslova koji vladaju sa obe strane zida tako, da druga grupa jednačina mora da bude kombinovana s (22) ili da temperatura površine zida na drugoj (spoljašnjoj) strani prostora bude pretpostavljena što realnije.

Toplotni fluks apsorbiranog sunčevog zračenja od unutrašnje površine prostorije, q_{si} , zavisi od niza faktora, kao što su: intenzitet direktnog i difuznog sunčevog zračenja na spoljašnju površinu prozora, trenutni položaj Sunca na nebu, geografski položaj lokacije prostorije, propustljivost stakla za direktno i difuzno sunčevo zračenje, veličina i položaj prozora u odnosu na druge individualne površine prostorije, osenčenost prozora, veličina i oblik

prostorije, orijentacija prostorije i prozora, refleksija (apsorpcija) sunčevog zračenja od unutrašnjih površina prostorije, enterijer i dr.

Kombinovana spoljna temperatura

Za izračunavanje dela toplotnog opterećenja klimatizovanog prostora, koje je posledica transporta toplote kroz zidove, može da se primeni koncept tzv. "kombinovane spoljašnje temperature" (t_{KST}).

Kombinovana spoljašnja temperatura je fiktivna temperatura, koju bi trebalo da ima spoljašnji vazduh, da bi konvekcijom uzrokovao isti toplotni protok na određeni zid (krov), kao i kombinovani stvarni uticaj trenutnog sunčanog zračenja spoljašnjeg vazduha određene temperature i razmena toplote niskotemperaturnim zračenjem okoline i posmatranog zida (krova).

Ako se upotrebi formalni način pisanja za uvođenje sunčano - vazdušne temperature i uvede pojam "kombinovana spoljašnja temperatura" (t_{KST}), koja za razliku od sunčano--vazdušne temperature (t_{SV}) obuhvata i razmenu toplote zida (krova) sa okolinom, odnosno:

$$q_o = \alpha_o (t_{KST} - t_o) \quad (23)$$

i iz jednačine ravnoteže toplotnih protoka za spoljašnju površinu spoljašnjeg zida (1) dobija se izraz za t_{KST} :

$$t_{KST} = t_a + \frac{a_o I}{\alpha_o} - \frac{\varepsilon_o \Delta q_z}{\alpha_o} \quad (24)$$

$$t_{KST} = t_{SV} - \frac{\varepsilon_o \Delta q_z}{\alpha_o} \quad (25)$$

gde je Δq_z (W/m^2) razlika između dugotalasnog zračenja atmosfere i terestrijske površine i zračenja emitovanog od hipotetične crne hemisfere na temperaturi spoljašnjeg vazduha.

$$\Delta q_z = \sigma T_a^4 \{1 - F_a [(1 - a_c K_c) Br + a_c K_c]\} - \varepsilon_e F_e \sigma T_e^4 \quad (26)$$

Opis sistema merenja

Merenje relevantnih parametara prema fizičkom modelu prikazanom na sl.1, vršeno je neprekidno u vremenskom intervalu od 48 časova, u julu mesecu, na spoljašnjem zidu istočne orijentacije objekta u Beogradu [5].

U prostoriji nije bilo klimatizacije tj. temperatura vazduha u prostoriji bila je slobodno uspostavljena i približno jednaka temperaturama površina unutrašnjih zidova prostorije.

Usvojena je pretpostavka da je temperatura površine zemlje vidljive sa spoljašnje strane zida približno jednaka temperaturi spoljašnjeg vazduha. Zračenja od svetiljki, mašina i ljudi nije bilo.

Termofizičke karakteristike ispitivanog zida su:

- zid od pune opeke, jednoslojan, homogen,
- $\delta = 450$ - debljina zida, (mm)
- $\rho = 1800$ - gustina zida, (kg/m^3)
- $\lambda = 0.8$ - koeficijent provođenja toplote, (W/mK)
- $c = 1000$ - specifična toplota zida, (J/kgK)
- $a_o = 0.45$ - koeficijent apsorpcije spoljašnje površine za kratkotalasno zračenje,
- $\varepsilon_o = \varepsilon_i = 0.95$ - koeficijent emisije spoljašnje i unutrašnje površine zida za dugotalasno zračenje

Termofizičke karakteristike ispitivanog zida su, za ova razmatranja, smatrane konstantnim veličinama.

Za merenje, registrovanje i obradu rezultata merenja, korišćen je merno-akvizicioni sistem Hewlett-Packard (tip 82162A).

Izmerene vrednosti su registrovane i memorisane u mernim ciklusima s vremenskim razmakom od trideset minuta. Intenzitet sunčevog zračenja meren je u razmacima od jednog minuta.

Krive refleksije spoljašnje površine zida, za spektralno područje $0.2 \mu\text{m}$ do $2.5 \mu\text{m}$, merene su spektrofotometrom Perkin-Elmer (LAMBDA 9).

Koeficijent apsorpcije sunčevog zračenja a_o , zavisi uglavnom od optičkih osobina površine, odnosno od njene spektralne refleksije, a u manjoj meri zavisi od spektralne distribucije globalnog zračenja. Veličina koeficijenta refleksije sunčevog zračenja od prirodnih površina, menja se u toku dana i godine.

Usled praktične nemogućnosti poznavanja spektralne raspodele sunčevog zračenja na posmatrane površine, nepoznavanja profila refleksije sunčevog zračenja, neuniformnosti reflektovanog sunčevog zračenja od okolnih površina, kao i anizotropnosti difuznog sunčevog zračenja, aproksimacija, koja se čini u ovim slučajevima, jeste da se ovi koeficijenti uzimaju kao konstantne veličine, i da se površine smatraju "sivim".

Koeficijenti emisije površina mereni su uređajem za beskontaktno merenje temperature, RAYNGER II, Raytek Inc. SAD.

Za merenje ukupnog sunčevog zračenja na spoljašnju površinu zida objekta korišćen je solarimetar, Kipp & Zonnen, Holandija, tip TCA 15/10/2, sa spektralnim opsegom $0.3 \mu\text{m}$ do $2.5 \mu\text{m}$.

Za merenje brzine vazduha korišćen je merač brzine vazduha, tip 1650, TSI, SAD.

Analiza rezultata merenja

Radi mogućeg upoređenja merenja sunčevog zračenja na različitim lokacijama, konvencija *Svetske meteorološke organizacije (WMO)* preporučuje da se sva meteorološka merenja vrše prema *TLT* (True Local Time). Takođe, koriste se i termini *LSoT* (lokalno sunčano vreme), solarno vreme i sl. Tada sva razmatranja zračenja imaju prirodnu simetriju u odnosu na stvarno podne. Za $TLT=12\text{h}$, stvarno lokalno podne, Sunce kulminira na jugu.

Civilni život zahteva upotrebu uniformne vremenske skale za određen region, tzv. standardno vreme (ST) ili lokalno standardno vreme ($LSiT$).

Veza između sunčevog vremena (TLT) i standardnog vremena (ST) data je izrazom:

$$TLT = ST(\lambda_s) + (\lambda - \lambda_s) \cdot 4 \text{ min}/1^\circ + Z \quad (27)$$

gde su:

λ - geografska dužina posmatrane tačke locirane na meridijanu λ , (za Beograd iznosi 20° i $28'$)

λ_s - izabrani standardni meridijan,

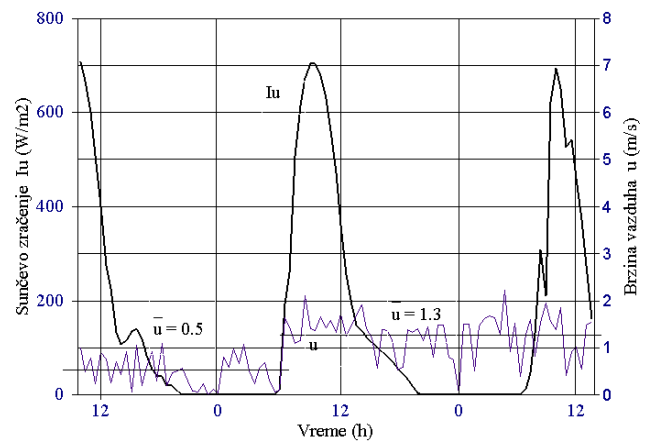
Z - jednačina vremena, (mm)

U obzir treba uzeti i letnje pomeranje merenja vremena za određene regione, odnosno ST_{leto} je uvećano za 1h za područje SRJ, pa je tada:

$$ST = ST_{zima} = ST_{leto} - 1h \quad (28)$$

Za Beograd u periodu od 8. do 10. jula, za letnje merenje vremena Sunce kulminira na jugu (zaokruženo na minute) za $ST=12\text{h}$ i 43 min. Na dijagramima je prikazano standardno vreme za lokaciju Beograda, za posmatrani period.

Na sl.2 je prikazan vremenski tok izmerenog ukupnog sunčevog zračenja (I_u) na spoljašnju površinu istočno orijentisanog zida, kao i vremenski tok izmerene promene brzine vazduha (u) u blizini zida u posmatranom periodu.



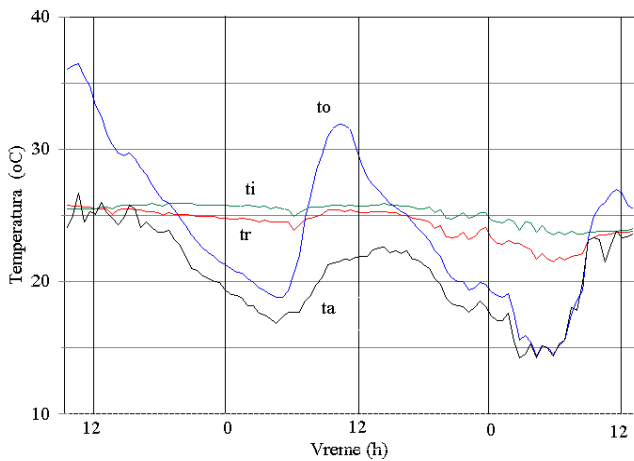
Slika 2. Dijagram promena izmerene brzine vazduha (u) i ukupnog sunčevog zračenja (I_u) na spoljašnju površinu zida istočne orijentacije

Postavljanjem solarimetra u ravan sa spoljašnjom površinom zida, krivom izmerenog protoka ukupnog sunčevog zračenja (I_u) na spoljašnjoj površini zida, obuhvaćen je uticaj položaja Sunca, zamućenost atmosfere, oblačnost i refleksija (albedo) okoline u oblasti kratkotalnog zračenja.

U posmatranom periodu promene brzine vazduha (u) u blizini zida, uočena su dva perioda. Prvi period, od početka merenja do izlaska Sunca drugog dana, karakteriše kretanje brzine vazduha u granicama od 0 m/s do 1 m/s, odnosno prosečna brzina vazduha 0.5 m/s. Drugi period, od izlaska Sunca drugog dana do kraja merenja, karakteriše kretanje brzine vazduha u granicama od 0 m/s do 2.2 m/s, odnosno prosečna brzina vazduha 1.3 m/s.

Odgovarajući koeficijenti prelaza toplote konvekcijom izračunati za prosečne brzine vazduha iznose: za prvi period $\alpha_{col} = 6.3 \text{ W/m}^2\text{K}$; odnosno, za drugi period $\alpha_{col} = 10.78 \text{ W/m}^2\text{K}$.

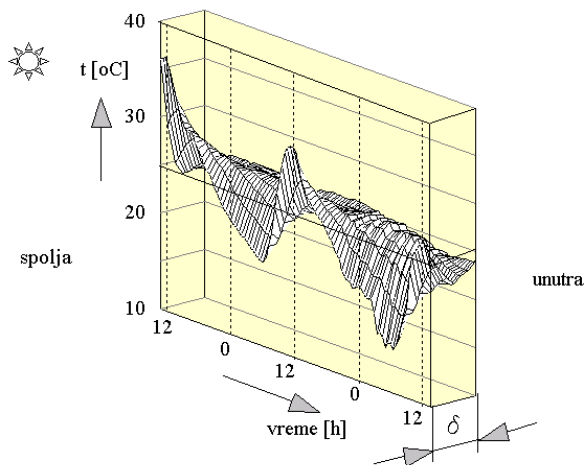
Na dijagramu, sl.3, prikazani su tokovi izmerenih temperatura sa spoljašnje i unutrašnje strane zida u posmatranom periodu: temperatura spoljašnjeg vazduha (t_a), temperatura spoljašnje površine zida (t_o), temperatura unutrašnje površine zida (t_i) i temperatura vazduha u prostoriji (t_r).



Slika 3. Tokovi izmerenih temperatura: spoljašnjeg vazduha (t_a), spoljašnje površine zida (t_o), unutrašnje površine zida (t_i) i vazduha u prostoriji (t_r)

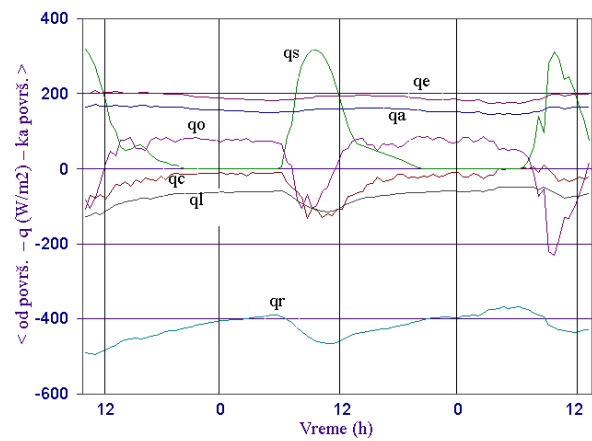
Temperature unutrašnjih površina prostorija (dugotalasnim zračenjem), kratkotalasno zračenje u prostoriji i temperatura vazduha u prostoriji (t_r) (konvekcijom), utiču na temperaturu unutrašnje površine spoljašnjeg zida (t_i), koja kao poremećaj deluje na odziv zida na spoljašnjoj površini (q_o) što se manifestuje odgovarajućom promenom temperature t_o . Uslovi sa spoljašnje i unutrašnje strane zida interaktivno deluju sa zidom, što se odražava na temperaturno polje zida, odnosno razmenu toplote u objektu.

Na sl.4 je prikazana dinamika promene izmerenog temperaturnog polja istočno orijentisanog spoljašnjeg zida u posmatranom vremenskom periodu.



Slika 4. Dinamika promene izmerenog temperaturnog polja istočno orijentisanog spoljašnjeg zida u posmatranom vremenskom periodu

Na sl.5 je prikazan dijagram toplotnih protoka u posmatranom periodu za spoljašnju površinu zida. Krivom q_1 predstavljen je bilans dugotalasnog zračenja za spoljašnju površinu zida u posmatranom periodu ($q_1 = q_r - (q_a + q_e)$).



Slika 5. Toplotni protoci za spoljašnju površinu zida

Najveće promene u razmeni toplote na spoljašnjoj površini zida odvijaju se u vremenu od izlaska do zalaska Sunca. U toku noći q_a , q_e , q_c , q_r i q_o imaju uglavnom ustaljene vrednosti dok je $q_s = 0$.

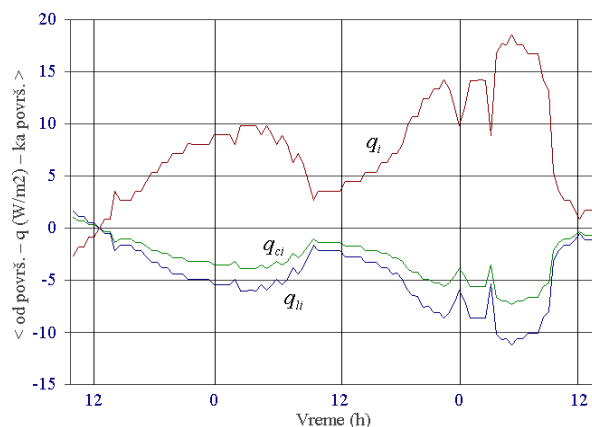
U posmatranom periodu, q_o (provođenje) pored intenziteta menja i smer, dok ostale veličine iz toplotnog bilansa zadržavaju isti smer uz promenu intenziteta (osim q_c u juturnjim časovima trećeg dana).

Najveće vrednosti q_o , sa smerom ka unutrašnjosti objekta, iznosile su: 104 W/m² prvog dana; 107 W/m² drugog dana i 230 W/m² trećeg dana. Noću su vrednosti za q_o , sa smerom ka spoljašnjosti objekta, iznosile ≈ 80 W/m².

Na promenu smera q_o najveći uticaj ima apsorbirano sunčevo zračenje q_s odnosno komponenta nastala direktnim sunčevim zračenjem na površinu zida (I_{SD}). Povećanjem ukupnog sunčevog zračenja na spoljašnju površinu zida, raste temperatura spoljašnje površine zida (t_o) i počinje provođenje toplote ka dubini zida, odnosno prema prostoriji, kada se odvija i najintenzivniji proces akumulacije toplote u spoljašnjem zidu.

U ovom slučaju, akumulisanu toplotu zid odaje sa obe strane: sa spoljašnje strane konvekcijom sa spoljašnjim vazduhom i razmenom dugotalasnim zračenjem sa okolinom, a sa unutrašnje strane konvekcijom sa unutrašnjim vazduhom i dugotalasnim zračenjem sa unutrašnjim površinama prostorije.

Na slici 6 je prikazan dijagram toplotnih protoka za unutrašnju površinu spoljašnjeg zida.



Slika 6. Toplotni protoci za unutrašnju površinu spoljašnjeg zida

Prema modelu prikazanom na sl.1, unutrašnja površina zida nije izložena uticaju direktnog sunčevog zračenja, već

je samo u toku dana primala difuzno i reflektovano kratkotalasno zračenje što proizvodi izvestan porast temperature unutrašnje površine zida (t_i), pri čemu se bilans toplotnih protoka na površini zida iskazuje jednačinom (16).

Sunčevi zraci, koji su prošli kroz prozor, posle višestruke refleksije na površinama prostorije, dospevaju i na unutrašnju površinu spoljašnjeg zida, na kome se delom apsorbuju. Deo energije sunčevog zračenja apsorbovane od unutrašnje površine spoljašnjeg zida označen je sa q_{si} , a u zbiru sa toplotom dovedenom unutrašnjoj površini zida provođenjem (q_{si}), označen je sa q_i .

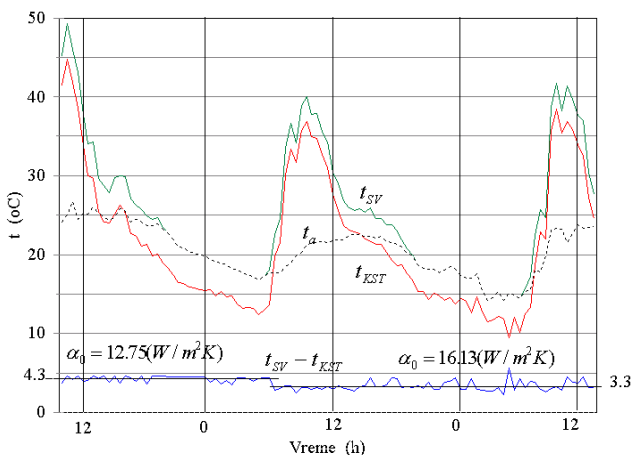
Merenjem temperature unutrašnje površine spoljašnjeg zida (t_i) obuhvaćen je i uticaj kratkotalasnog zračenja na istu referencu.

Na osnovu izmerenih vrednosti, koeficijent prelaza toplote zračenjem za unutrašnju površinu zida (α_{ri}), prema (15), kretao se u granicama od $5.3 \text{ W/m}^2\text{K}$ do $5.5 \text{ W/m}^2\text{K}$ što je nešto niže u odnosu na preporučenu vrednost za proračune u tabeli 2, koja za letnji period za vertikalni zid iznosi $6 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Za proračun q_{ci} korišćena je preporučena vrednost koeficijenta prelaza toplote konvekcijom za unutrašnju površinu (α_{ci}) iz tabele 2 koja iznosi $3.5 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Na sl.7 je prikazan dijagram toka sunčano-vazdušne temperature (t_{SV}) i kombinovane spoljašnje temperature (t_{KST}), za posmatrani period, kao i njihova razlika ($t_{SV}-t_{KST}$). Takođe, radi poređenja, prikazana je i kriva promene temperature spoljašnjeg vazduha (t_a).

U slučaju vertikalnih površina teško je odrediti tačnu vrednost Δq_z , jer pri jakom sunčevom zračenju temperature površina okolnih objekata su više od temperature vazduha. Smatra se da njihova emisija do izvesnog stepena kompenzuje umanjeno emitovanje toplote vertikalnih površina prema nebu, pa se za vertikalne površine pretpostavlja da je $\Delta q_z = 0$ [3].



Slika 7. Dijagram toka: sunčano-vazdušne temperature (t_{sv}), kombinovane spoljne temperature (t_{KST}), razlike ($t_{SV} - t_{KST}$) i temperature spoljašnjeg vazduha (t_a)

Za zid istočne orijentacije, površine tla i objekata vidljive sa spoljašnje strane površine zida imaju zapadnu orijentaciju, tj. nalaze se u senci u prepodnevnom časovima kada je površina zida istočne orijentacije osunčana, pa je usvojena pretpostavka da je $t_e = t_a$ (temperatura zemlje, u ovom slučaju obrasle vegetacijom, jednaka temperaturi spoljašnjeg vazduha).

U noćnom periodu ($I_u=0$) sunčano - vazdušna temperatura (t_{SV}) i temperatura spoljašnjeg vazduha (t_a) su

jednake. Kombinovana spoljašnja temperatura (t_{KST}) je niža od t_{SV} i u (25) se vidi da najuticajniji faktor na razliku ($t_{SV} - t_{KST}$) predstavlja koeficijent prelaza toplote (α_o), odnosno brzina vazduha duž zida (u). Porastom brzine vazduha smanjuje se razlika $t_{SV} - t_{KST}$, i za određenu vrednost α_o ima približno konstantnu vrednost.

Korekcija za dugotalasno zračenje iznosi ($t_{SV} - t_{KST}$) $_{f} = -4.3^\circ\text{C}$, odnosno $\Delta q_{zlf} = -57.7 \text{ W/m}^2$, za period od početka merenja pa do izlaska Sunca drugog dana, odnosno, kada je prosečna brzina vazduha iznosila $u_f = 0.5 \text{ m/s}$ ($\alpha_{of} = 12.75 \text{ W/m}^2\text{K}$, $\epsilon_o = 0.95$, $a_o = 0.45$)

Za drugi period, od izlaska Sunca drugog dana do kraja merenja, tj. kada je prosečna brzina vazduha iznosila $u_{II} = 1.3 \text{ m/s}$ ($\alpha_{oII} = 16.13 \text{ W/m}^2\text{K}$) korekcija za dugotalasno zračenje iznosi -3.3°C , odnosno $\Delta q_{zII} = -56 \text{ W/m}^2$.

Ako se ne uzmu u obzir korekcije za razmenu energije zida sa okolinom dugotalasnim zračenjem, može da dođe do izvesnog preuveličavanja dobitka od sunčevog zračenja.

Zaključak

Formiranim matematičkim modelom obuhvaćena je kompleksna interakcija uticaja relevantnih parametara na toplotne tokove kroz spoljašnji zid objekta. Prikazano je eksperimentalnim putem praćeno ponašanje zida istočne orijentacije, na jednom objektu u Beogradu u letnjem periodu, odnosno interakcija zračenja, konvekcije i kondukcije merenjem promene relevantnih parametara tokom vremena.

Toplotno opterećenje prostorije jednim delom zavisi od količine toplote koja prođe kroz zidove prostorije. Ova količina toplote se menja tokom vremena i uglavnom je posledica uslova s obe strane zidova. Toplotni kapacitet zidova odražava se na prigušenje intenziteta i fazni pomeraj dejstva određenog toplotnog fluksa.

U razmatranju objekta kao toplotnog sistema, spoljašnji zid predstavlja deo njegovog omotača čije je ponašanje uslovljeno njegovim karakteristikama i poremećajima koji deluju na njega. Njegovo ponašanje, tj. njegov "odziv" na poremećaje, predstavlja neophodnu informaciju u procesu dimenzionisanja postrojenja za grejanje i klimatizaciju, energetsku analizu celog sistema objekta, optimizaciju rada postrojenja za grejanje i klimatizaciju i dr.

Razmena energije u ovom slučaju predstavlja dinamičan interaktivni proces dejstva više faktora, čiji uticaji i pored određene pravilnosti imaju i stohastički karakter (npr. unutrašnji izvori toplote, intenzitet sunčevog zračenja, temperatura spoljašnjeg vazduha, brzina vetra).

Prikazanim matematičkim modelom i eksperimentalnim prilazom omogućena je analiza uticaja relevantnih parametara na toplotne tokove spoljašnjeg zida objekta u određenom vremenskom periodu i bolje razumevanje i sagledavanje kompleksnog karaktera pojava u ponašanju spoljašnjeg zida.

Takođe, ovakav teorijsko - eksperimentalni pristup i analiza rezultata merenja pokazuje da vrednosti dobijene merenjem konvergiraju sa odgovarajućim vrednostima i preporukama iz literature .

Literatura

- [1] KIMURA, KEN-ICHI: *Scientific Basis of Air Conditioning*, Applied Science Publishers LTD, London, 1977.
- [2] TODOROVIĆ, B. *Klimatizacija*, SMEITS, Beograd, 1998.
- [3] ***. *Fundamentals Handbook*, ASHRAE, New York, 1985.
- [4] LILIĆ, D. Izračunavanje geometrijskih faktora oblika površine

- prostorije. *Klimatizacija, grejanje, hlađenje*, 1999, no.2-3, p.61-66.
- [5] LILIĆ, D. *Interakcija zračenja, kondukcije i prirodne konvekcije pri prenosu toplote kroz spoljašnje zidove*. magistarski rad, Mašinski fakultet u Beogradu, 1995.

Rad primljen: 6.4.2001.god.

