

Termička analiza dvostrukih fasada

Prof. Dr. Branislav Todorović,
dipl. inž. i Nataša Jovanović, dipl.
Inž. , mašinski Fakultet Beograd

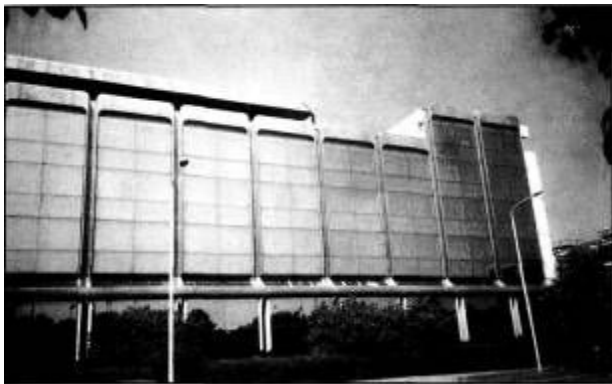
Dvostruke fasade štite zgradu ne samo od spoljne buke i infiltracije spoljašnjeg vazduha, nego utiču i na instalisani kapacitet grejnih i klimatizacionih sistema, a time i na uštedu energije. U radu se proučava toplotni efekat dvostruke fasade za zimske i letnje klimatske uslove južne Evrope (Beograd, 45° severne geografske širine). Zaključeno je da toplotni gubici zimi i toplotni dobiti leti mogu da se smanje u zavisnosti od propustljivosti sunčevog zračenja kroz staklo spoljne fasade. Ipak, određivanje toplotnog efekta svakog omotača dvostruke fasade zahteva detaljnu analizu zasnovanu na njenim specifičnim karakteristikama koje obuhvataju vrstu konstrukcije i korišćeni materijal.

Ključne reči: zgrada; fasada; dvostruka fasada; sunčevo zračenje; potrošnja energije; grejanje; klimatizacija
Key words: double building envelope; solar radiation; energy consumption; air conditioning

Uvod

U modernoj arhitekturi često se nailazi na zgrade sa dvostrukim fasadama. Obično se radi o administrativnim zgradama u gradskim centrima, koje se grade na skupom gradskom zemljištu i na relativno maloj osnovi, ali sa velikim brojem spratova. Osnovni omotač zgrade se prekriva spoljnim omotačem koji je od stakla različitih tonova sa malim koeficijentom propuštanja sunčevog zračenja. Takva spoljna fasada štiti unutrašnjost zgrade, pre svega od spoljne buke, ali i od uticaja vetrova koji je naročito naglašen na višim etažama i usled čega se javlja infiltracija spoljnog vazduha, uzrokujući povećane zahteve, kako zimi za grejanjem, tako leti za hlađenjem unutrašnjeg prostora.

S obzirom da spoljna fasada sa unutrašnjom obrazuje međuprostor u kome miruje ili struji vazduh, javljaju se i efekti koji su od uticaja na gubitke toplote unutrašnjeg prostora zimi i dobitke toplote leti. Ove efekte treba proučiti i tako podesiti da se odraze na smanjenje potrošnje energije grejnih i klimatizacionih sistema.



Slika 1. Dvostruka fasada na jednoj zgradi u Zemunu

U ovom radu se izlažu rezultati efekta dvostruke fasade, zavisno od rastojanja između fasada, vrste konstrukcije spoljnog omotača, a za klimatske prilike južne Evrope, odnosno temperature i intenzitete sunčevog zračenja za Beograd (45° SGŠ).

Konstrukcije spoljne fasade (sl. 1) obično su izvedene sa vertikalnim omotačem od stakla na odstojanju 20-60 cm od unutrašnje fasade, što je u vezi sa praktičnim rešavanjem pranja unutrašnje strane fasade. Takva vertikalna fasada može biti neprekidna po visini, ili sa prekidima na nivoima svakog sprata. Kod prvih treba da je obavezna klimatizacija zgrade sa prozorima osnovne fasade koji nisu predviđeni za otvaranje. U slučaju prekinutih spoljnih fasada, prozori se mogu otvarati. Prozorska ventilacija je čak i predviđena, posebno leti u toku noćnih prekida rada klimatizacionih sistema. Na taj način se rashlađuje unutrašnja građevinska masa spoljnim vazduhom pri njegovim najnižim dnevnim temperaturama, dakle bez troškova u potrošnji energije i smanjuju potrebu u hlađenju u toku sledećeg uključivanja klimatizacije.

U slučaju kada je otvaranje prozora predviđeno, treba konstrukciju spoljne fasade izvršiti tako da se ostvare putevi za strujanje vazduha koji će se odvesti u atmosferu, da masa vazduha koja je jednom iskorišćena za provetranje unutrašnjosti zgrade ne bude ponovo uvučena u isti proces na sledećem višem spratu.

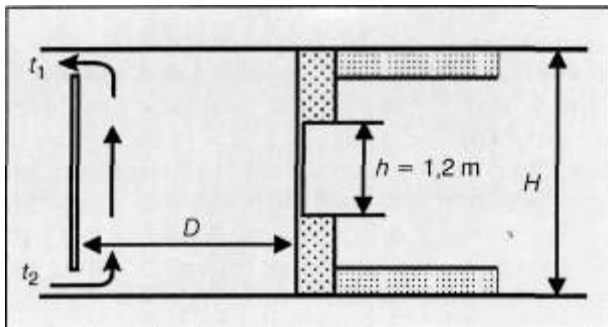
Spoljni omotač se izvodi i sa nagibima kao i sa raznim nepravilnim oblicima. U takvim slučajevima moraju se pažljivo analizirati njihovi termički efekti, jer oni mogu biti i u smislu povećanja energetske potrebe ako se ne izvedu tako da pozitivni efekti dođu do izražaja.

Dvostruka fasada u zimskim uslovima klimatizacije

Računski je tretirana fasada koja je izvedena kao staklena vertikalna površina. Posmatran je modul visine jednog sprata, tako da se rezultati analize mogu koristiti i za neprekinu-

tu fasadu, povećavajući modulu visinu do potrebne vrednosti, koja može da odgovara i rastojanju donje ivice spoljne fasade, koja je obično na nivou tavanice prve etaže, do nivoa krova. Širina modula obično nije od uticaja na temperaturno polje u međuprostoru dve fasade, pa je analiziran modul širine jedne prostorije sa prozorom koji se proteže po celoj širini.

Na slici 2 je šematski prikazan presek modula dvostruke fasade koji predstavlja specifičan razmenjivač toplote kroz koji struji vazduh i koji u njemu prima ili odaje toplotu. Od njegove temperature će zavisiti i toplotni efekti koji se odražavaju na energetske zahteve zgrade. Da bi se oni utvrdili, izvršen je proračun temperature vazduha na izlazu iz modula, u zimskim spoljnim projektnim uslovima.



Slika 2. Šematski prikaz modula dvostruke fasade sa graničnim površinama

Polaznu jednačinu predstavlja toplotni bilans modula pri čijem definisanju je zanemarena razmena toplote dugotalasnim zračenjem spoljne fasade prema okolini:

$$Q_v = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (1)$$

u kojoj Q_v označava količinu toplote koju vazduh primi ili preda u toku strujanja kroz međuprostor dve fasade:

$$Q_v = \rho \cdot c_p \cdot V (t_2 - t_1) \quad (2)$$

Količine toplote koje vazduh u kanalu razmenjuje kroz spoljni omotač (Q_1), prozor (Q_2) i zid osnovne fasade (Q_3), su određeni za stacionarne uslove prenosa toplote s obzirom na male varijacije dnevnih temperatura u toku zimskih najhladnijih dana. Kao merodavna temperatura u međuprostoru usvojena je srednja temperatura $t_m = 1/2 (t_2 + t_1)$:

$$Q_1 = k_s \cdot F_s (t_1 - t_m) \quad (3)$$

$$Q_2 = k_p \cdot F_p (t_L - t_m) \quad (4)$$

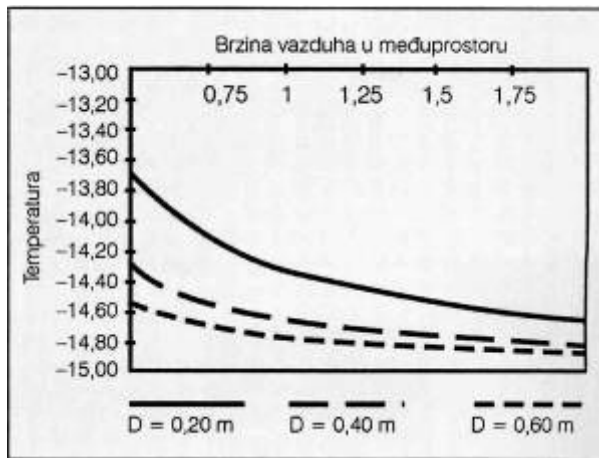
$$Q_3 = k_z \cdot F_z (t_L - t_m) \quad (5)$$

Zanemarujući zavisnost specifične toplote i gustine vazduha od temperature vazduha u modulu, čije su promene temperatura u malim opsezima, temperature vazduha na kraju modula su:

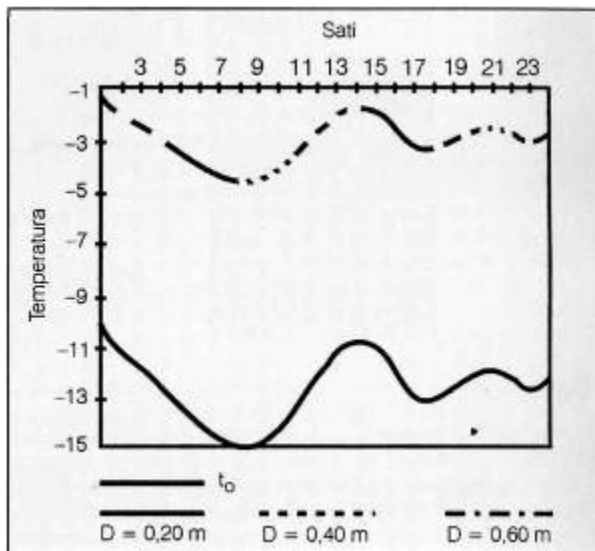
$$t_2 = \frac{(2 \cdot \rho \cdot c_p \cdot D \cdot L \cdot w \cdot k_s \cdot F_s - k_z \cdot F_z - k_p \cdot F_p) \cdot t_1 + 2 \cdot k_p \cdot F_p \cdot t_i + 2 \cdot k_z \cdot F_z \cdot t_i}{2 \cdot \rho \cdot c_p \cdot D \cdot L \cdot w - k_s \cdot F_s + k_z \cdot F_z + k_p \cdot F_p} \quad (6)$$

Na slici 3 prikazana je promena temperature vazduha u međuprostoru (t_m) tokom dana, pri temperaturi spoljnog vazduha od -15°C , za tri rastojanja između fasada (0,2; 0,4; 0,6 m) i pri brzinama strujanja od 0,5 do 2,0 m/s.

Rezultat pokazuje da je najveće zagrevanje vazduha u međuprostoru pri najmanjoj brzini strujanja vazduha i najkraćem rastojanju fasada. Kako više temperature u međuprostoru rezultiraju manjim toplotnim gubicima, zaključak je da bi najveći porast temperature bio pri odsustvu strujanja vazduha, što bi se odrazilo na najmanju potrošnju energije



Slika 3. Promena temperature u međuprostoru zavisno od brzine strujanja vazduha i rastojanja fasada



Slika 4. Dnevni tok spoljne temperature i temperatura vazduha u međuprostoru za različita rastojanja fasada

za grejanje. To se može postići zatvaranjem međuprostora za cirkulaciju vazduha iz modula.

Proračun promene temperature za takav zatvoren međuprostor sproveden je za spoljne temperature u toku projektnog dana za Beograd, a prema toplotnom bilansu opisanom jednačinom (7):

$$\begin{aligned} \rho \cdot c_p \cdot D \cdot L \cdot H \cdot (t_m - t_0^*) &= \\ &= [k_s \cdot F_s \cdot (t_0 - t_m) + k_p \cdot F_p \cdot (t_i - t_m) - \\ &+ k_z \cdot F_z \cdot (t_i - t_m)] \cdot 3600 \end{aligned} \quad (7)$$

Za visinu modula $H = 3,2$ m, i dužinu $L = 5$ m, sa prozorom koji se proteže celom dužinom modula, na slici 4 je prikazana dnevna promena spoljne temperature f_0 , kao i izračunate temperature vazduha u međuprostoru zavisno od razmaka fasada.

Temperatura f_0^* u prvom satu uzima vrednost spoljne temperature, dok u svakom sledećem satu ima vrednost srednje temperature vazduha u međuprostoru iz prethodnog sata.

Kao što se vidi na slici 4, promena temperature vazduha u međuprostoru prati promenu spoljne temperature i gotovo je nezavisna od rastojanja dveju fasada. Srednja temperatura vazduha u međuprostoru je za oko 8°C iznad srednje dnevne temperature. To ukazuje da se transmisijoni gubici toplote u projektnim uslovima umanjuju (prema odnosu razlika temperatura u zgradi i spoljnoj okolini) za oko 20%, što ostaje nepromenjeno za ceo projektni dan. Ako se uzme u obzir i umanjena infiltracija, projektni toplotni kapacitet grejne instalacije se, u zgradama sa duplim fasadama, umanjuje za preko 30%.

Dvostruka fasada u letnjim uslovima klimatizacije

U letnjim uslovima visokih spoljnih temperatura i velikog uticaja sunčevog zračenja, efekat dvostruke fasade treba da ostvari temperaturu međuprostora što bližu spoljnoj, a propušteno zračenje sunca da bude maksimalno umanjeno.

Za procenu temperatura vazduha u međuprostoru, tretiran je isti modul fasade kao i u zimskom režimu, prethodno analizirajući toplotne bilanse sve tri granične površine pojedinačno: spoljna fasada, zid i prozor unutrašnje fasade.

Na slici 5 prikazan je prenos toplote kroz staklenu spoljnu fasadu: sunčevo zračenje intenziteta I apsorbira se i propušta kroz staklo površine F_s , apsorbovana toplota Q_{a1} se sa obe strane spoljne fasade prenosi dugotalasnim zračenjem (Q_1 i Q_3) i konvekcijom (Q_2 i Q_4). Primljene i odate količine toplote su:

$$Q_{a1} = \alpha_s \cdot F_s \cdot I \quad (8)$$

$$Q_1 = \varepsilon_{s1} \cdot \beta_{s1} \cdot F_s \cdot C_c \cdot (t_s - t_0) \quad (9)$$

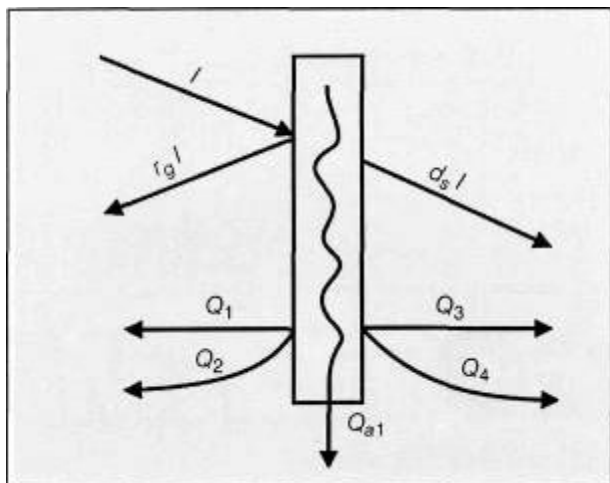
$$Q_2 = \alpha_{s1} \cdot F_s \cdot (t_s - t_0) \quad (10)$$

$$Q_3 = \varepsilon_{s2} \cdot \beta_{s2} \cdot F_s \cdot C_c \cdot (t_s - t_m) \quad (11)$$

$$Q_4 = \alpha_{s2} \cdot F_s \cdot (t_s - t_m) \quad (12)$$

tako da postoji jednakost:

$$Q_{a1} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 \quad (13)$$



Slika 5. Bilans toplote spoljne fasade

Intenzitet sunčevog zračenja kao i temperatura spoljnog vazduha su veličine koje zavise od doba dana. Propušteno sunčevo zračenje kroz spoljnu fasadu intenziteta $d_s \cdot I$, dopjeva na zid i prozor osnovne fasade. Primljene i odate količine toplote vazduha u međuprostoru (sl. 7) su određene za prozorski deo fasade jednačinama:

$$Q_{a2} = \alpha_p \cdot F_p \cdot d_s \cdot I \quad (14)$$

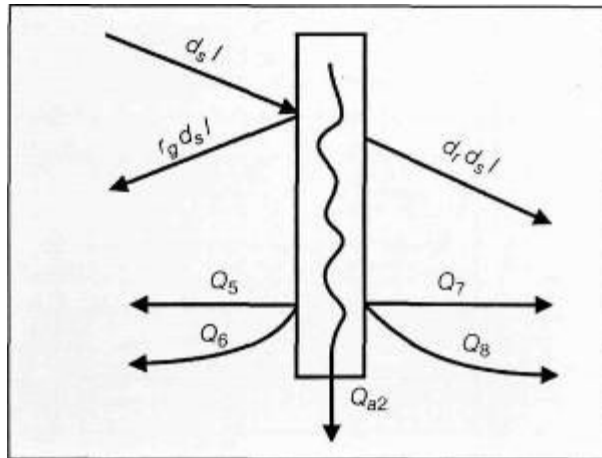
$$Q_5 = \varepsilon_{p1} \cdot \beta_{p1} \cdot F_p \cdot C_c \cdot (t_p - t_m) \quad (15)$$

$$Q_6 = \alpha_{p1} \cdot F_p \cdot (t_p - t_m) \quad (16)$$

$$Q_7 = \varepsilon_{p2} \cdot \beta_{p2} \cdot F_p \cdot C_c \cdot (t_p - t_i) \quad (17)$$

$$Q_8 = \alpha_{p2} \cdot F_p \cdot (t_p - t_i) \quad (18)$$

$$Q_{a2} = Q_5 + Q_6 + Q_7 + Q_8 \quad (19)$$



Slika 6. Bilans toplote prozora unutrašnje fasade

Zidna površina unutrašnje fasade apsorbira najveći deo toplote sunčevog zračenja propuštene kroz spoljnu fasadu, a manji deo reflektuje. Smatrajući da je zid već akumulirao određenu količinu toplote, bilans će se postaviti za pretpostavljene stacionarne uslove zida (sl. 8), pa je:

$$Q_{a3} = \alpha_z \cdot F_z \cdot d_s \cdot I \quad (20)$$

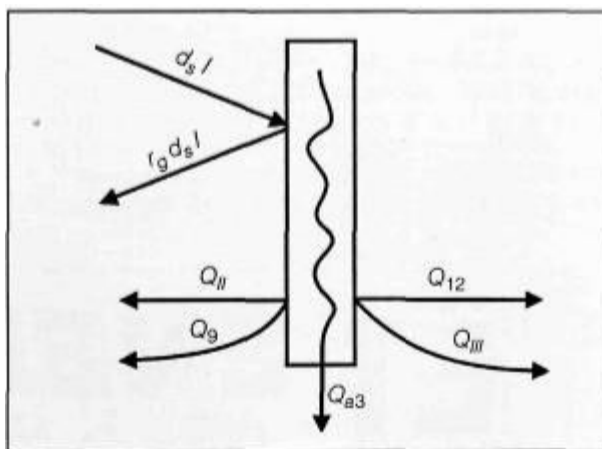
$$Q_9 = \alpha_{z2} \cdot F_z \cdot (t_z - t_m) \quad (21)$$

$$Q_{10} = F_z \cdot (t_z - t_i) / (\delta / \lambda + 1 / \alpha_{z2}) \quad (22)$$

$$Q_{11} = \varepsilon_{z1} \cdot \beta_{z1} \cdot F_z \cdot C_c \cdot (t_z - t_m) \quad (23)$$

$$Q_{12} = \varepsilon_{z2} \cdot \beta_{z2} \cdot F_z \cdot C_c \cdot (t_z - t_i) \quad (24)$$

$$Q_{a3} = Q_9 + Q_{10} + Q_{11} + Q_{12} \quad (25)$$



Slika 7. Bilans toplote zida unutrašnje fasade

U toplotnom bilansu zida zbog vrlo malih vrednosti količine toplote Q_{11} i Q_{12} mogu se zanemariti.

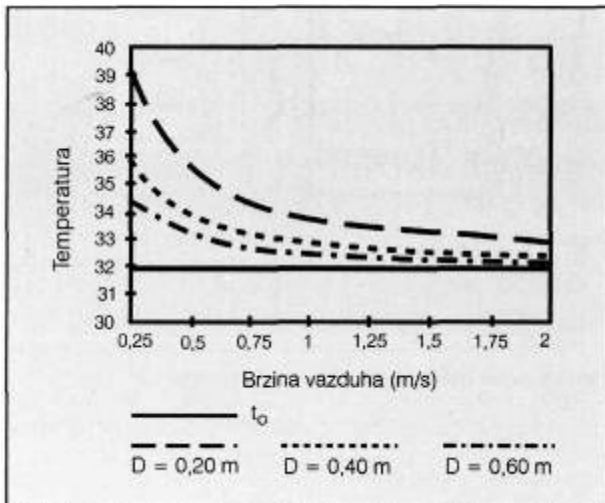
Na osnovu gornjih pojedinačnih identifikacija toplotnih tokova na graničnim površinama, može se definisati zagrevanje vazduha koji struji kroz modul, zavisno od rastojanja između fasada i brzine strujanja.

Za izračunavanje temperatura međuprostora koristi se jednačina:

$$Q_v = Q_4 + Q_6 + Q_9 + k_s F_s (t_0 - t_m) + k_z F_z (t_i - t_m) + k_p F_p (t_i - t_m) = 2 \cdot \rho \cdot C_p \cdot D \cdot L \cdot w \cdot (t_m - t_1) \quad (26)$$

Rešavanjem sistema jednačina (26, 25, 19 i 13), za podatke naznačene u dodatku rada, za južnu orijentaciju fasade, dobijaju se temperature za različite brzine vazduha i već usvojena tri rastojanja fasada.

U 12 časova (slika 8) izračunate temperature vazduha u međuprostoru su pri brzinama od 1,5 do 2,00 m/s samo za oko 1°C iznad trenutne spoljne temperature.



Slika 8. Promena temperature međuprostora u 12 časova

Kako je u ovoj analizi računat porast temperature vazduha po visini modula, za neprekinutu spoljnu fasadu od preko 10 spratova, može se zaključiti porast i za 8-10°C pri najvećim brzinama strujanja vazduha, što znatno povećava dobitke toplote transmisijom.

Sve rečeno ukazuje na potrebu osmišljenog konstruisanja dvostruke fasade, na korišćenje prinudne cirkulacije vazduha i takvo odvođenje vazduha da se za svaki sprat koristi spoljni vazduh, a već korišćeni vazduh izbacuje iz modula u spoljnu okolinu.

Dobitak toplote od sunčevog zračenja na zid i prozor unutrašnje fasade svakako se umanjuje zavisno od propustljivosti stakla spoljne fasade za sunčevo zračenje. Ono mora biti znatno umanjeno, i to najmanje na vrednost koja će učiniti da ukupno toplotno opterećenje bude jednako opterećenju koje bi zgrada imala bez dvostruke fasade.

Zaključak

Za fasadu južne orijentacije, pod letnjim projektnim uslovima za Beograd, ne uzimajući u obzir infiltraciju spoljašnjeg vazduha, toplotni dobici kroz zid su smanjeni oko 40-50%, transmisioni toplotni dobici kroz prozore su povećani za oko 15%, dok su toplotni dobici od sunčevog zračenja smanjeni za oko 20-80%, u zavisnosti od propustljivosti stakla spoljne fasade.

Oznake

- ε - redukovani koeficijent emisije,
- β - temperaturski koeficijent,
- C_c - konstanta zračenja apsolutno crnog tela,
- α - koeficijent prelaza toplote,
- a - koeficijent apsorpcije,
- t_0 - temperatura okoline (spoljnog vazduha),
- t_1 - temperatura vazduha na ulazu u modul,
- t_2 - temperatura vazduha na kraju modula,
- t_i - projektna temperatura prostorije,
- t_m - srednja temperatura vazduha u modulu,
- k - koeficijent prolaza toplote,
- c_p - specifična toplota,
- δ - debljina zida,
- F - površina,
- r - koeficijent refleksije,
- d - koeficijent propustljivosti,
- λ - koeficijent provođenja toplote,
- D - rastojanje između dveju fasada,
- L - dužina fasade,
- w - brzina strujanja vazduha u modulu,
- ρ - gustina vazduha,
- Q_{a1} - količina apsorbovane toplote u masi fasadnog stakla,
- Q_{a2} - količina apsorbovane toplote u masi prozora,
- Q_{a3} - količina apsorbovane toplote u masi zida,
- $/$ - intenzitet sunčevog zračenja umanjeno za koeficijent zamućenosti atmosfere.

Indeksi

- P - prozor
- s - spoljne fasadno staklo
- z - zid
- s_1 - spoljna površ fasadnog stakla
- s_2 - unutrašnja površ fasadnog stakla
- p_1 - spoljna površ prozora
- p_2 - unutrašnja površ prozora
- z_1 - spoljna površ zida
- z_2 - unutrašnja površ zida

Vrednosti

- $\varepsilon_{p1} = \varepsilon_{p2} = \varepsilon_{s2} = \varepsilon_{z1} = 0,06;$
- $d_a = 0,80;$

$C_c = 5,67 \text{ W/m}^2\text{K}^4$;
 $t_i = 26^\circ\text{C}$ (u letnim uslovima);
 $t_i = 20^\circ\text{C}$ (u zimskim uslovima);
 $\lambda = 0,81 \text{ W/mK}$;
 $\delta = 15 \text{ cm}$;
 $r_v = 0,09$;
 $r_z = 0,30$;
 $L = 5\text{m}$;
 $k_s = 4,0 \text{ W/m}^2\text{K}$;
 $k_p = 3,5 \text{ W/m}^2\text{K}$;
 $k_z = 0,64 \text{ W/m}^2\text{K}$

Litenatura

[1] **Kozić, Đ., B. Vasiljević, V. Bekavac:** *Priručnik za termodinamiku*, Mašinski fakultet, Beograd, 1997.

- [2] **Malić, D.:** *Termodinamika i termotehnika*, Građevinska knjiga, Beograd, 1963.
- [3] **Oesterle, E., C. Fischer, R. D. Lieb:** *Die Dopplete Haut unter der Lupe*, CCI, Promoter Verlag (3, 4), Germanv, 1997.
- [4] **Recknagel, Sprenger:** *Grejanje i klimatizacija*, Građevinska knjiga, Beograd, 1984.
- [5] **Todorović, B.:** *Klimatizacija*, SMEITS, Beograd, 1998.
- [6] **Todorović, B.:** *Projektovanje postrojenja za centralno grejanje*, Mašinski fakultet, Beograd, 1997.
- [7] **Ziller, C, G. Sedlacek:** *Naturliche Beluftung eines Hochhauses mit Doppelfassade*, Luft und Kaltetchnik, No. 8, C. F. Muller Verlag, Germanv, 1996.

THE DOUBLE FACADE THERMAL ANALYSIS

Summary

The double facade protects the building not only from outside noise and infiltration of outside air, but it also the installed heating and air-conditioning systems capacity and therefore the energy savings. The paper deals with the thermal effects of the double facade in the winter and summer conditions in South Europe (Belgrade, 45°). The conclusion is made that the winter thermal losses and summer thermal gains could be reduced in dependence on the solar radiation permeability through the outside facade glass. Nevertheless, the determination of every double facade envelope thermal effect requests the detailed analysis, based on its specific characteristics which include the type of structure and used construction materials.