KONTROLA PRENOSA ENERGIJE ZRAČENJA KROZ PROZORE – NOVI SISTEM ZASTAKLJENJA ZA POVEĆANJE ENERGETSKE EFIKASNOSTI OBJEKATA

CONTROL OF SOLAR RADIATION THROUGH THE WINDOWS – THE NOVEL GLAZING SYSTEMS FOR HIGHER ENERGY EFFICIENCY

Miloš Stojković, dipl. inž., „EnPlus", Beograd, i prof. dr Marija Todorović, dipl. inž., Laboratorija za termodinamiku i termotehniku Poljoprivrednog fakulteta, Beograd

Sistemi zastakljenja objekata, stakla i niz novih specifičnih tehnologija i apsorpciono selektivnih slojeva za spektralnu kontrolu prolaza kratkotalasnog i dugotalsnog zračenja, koji se dramatičnom brzinom razvijaju, predstavljaju danas jednu od najmoćnijih tehnika za povećanje energetske efikasnosti objekata. Efekti njihove primene su posebno veliki kada postoji jednoznačna dominantnost toplotnog opterećenja objekta – potreba grejanja ili potreba hlađenja. U slučaju dvojnosti toplotnog opterećenja – potreba grejanja zimi i hlađenja leti, još uvek nije jednostavno doći do optimalnih rešenja ugodnosti vizuelne sredine – dovoljne raspoloživosti dnevnog osvetljenja i nivoa opterećenja grejanja i hlađenja dovoljno malih da se obezbede uslovi za ostvarenje energetski efikasnog objekta. U radu je pregled najnovijih tehnologija i odgovarajućih osobina zastakljenja merodavnih za primenu u klimatskim područjima sa četiri godišnja doba. Pored toga, izložen je model opisa dinamičkog ponašanja sistema zastakljenja i pokazano je kako se putem dinamičkih simulacija vrši parametarska analiza u prilazu optimizaciji sistema zastakljenja objekata određene namene.

Glazing systems, window panes and numerous types of specific absorptive and selective coatings for longwave and shortwave radiation transmission control, together with technology for their production, are one of the most powerful methods for increasing the building energy efficiency. The advantage of their application is even greater for heating or cooling buildings. In the climates where both heating during winter and cooling during summer months are demanded, it is still difficult to satisfy the requirements of the human comfort sufficient daylight and heating and cooling capacity sufficiently low for reduced energy consumption. The paper provides a review of the latest technologies and glazing characteristics relevant for application in the climatic areas with four seasons. A dynamic hourly simulation is performed in order to find the most appropriate solution for the glazing system.

Ključne reči: sunčevo zračenje; zastakljenje; toplotni dobitak; spektralna selektivnost propustljivosti sunčevog zračenja
Key words: solar radiation; glazing; heat grain; spectral selectivity of solar radiation permeability

1. Uvod

U zgradama civilne infrastrukture u našoj zemlji troši se oko 50% ukupne potrošnje energije. U poslovnim zgradama na Mediteranu najveći deo električne energije troši se na veštacko osvetljenje i sistem za klimatizaciju, a najveći deo goriva (prirodni gas, mazut, lož ulje) na grejanje. Od svih konstrukcionih elemenata zgrade najveći pojedinačni efekat na toplotno i rashladno opterećenje zgrade kao i na prirodno dnevno i veštačko osvetljenje imaju zastakljene površine odnosno zastakljenje. Upravo iz tih razloga ogroman napredak u tehnologiji izrade stakala i staklenih konstrukcija, ostvaren u poslednjoj deceniji, doveo je do toga da se pri projektovanju i rekonstrukciji zgrade velika pažnja mora posvetiti odbiru tipa zastakljenja na osnovu detaljnih analiza njihovog uticaja na termički i vizuelni komfor u prostorijama kao i na ukupnu potrošnju energije zgrade.

2. Prenos energije zračenja kroz zastakljenje

Prenos energije zračenja kroz zastakljenje predstavlja spregu fizičkih pojava refleksije, apsorpcije i propustljivosti zračenja u širokom spektru visokotemperaturnog–kratkotalasnog i dugotalsnog zračenja kao i emisije niskotemperaturnog zračenja. Dobro je poznato da su osnovne merodavne osobine za praćenje prenosa energije sunčevog zračenja kroz polupropustljive materijale, u koje ubrajamo i zastakljenje: koeficijent refleksije stakla (ρ), koeficijent propustljivosti zračenja (τ), koeficijent apsorpcije stakla (α) i koeficijent emisije stakla (ε).

Spektralno selektivna stakla su ona čija je zavisnost propustljivosti zračenja od talasne dužine zračenja promenljiva, i to na specifično kontrolisan način, omogućujući da se upravlja kvantitativno i kvalitativno na specifičan prenos energije zračenja kroz njih. Osobine spektralne selektivnosti ostvaruju se upotrebom specijalnih prevlaka i boja.

Sunčevo zračenje nailazeći na površinu stakla delom se apsorbuje, uslovljavajući porast unutrašnje energije stakla i povišenje njegove temperature, zbog čega zavisno od temperature okolne sredine i okolnih zidova potom dolazi do odavanja toplote konvekcijom i zračenjem. Intenzitet prostiranja toplote, pri tom ka unutrašnjem i spoljnom prostoru, odnosno naspramnim zidovima, zavisi od temperatura i brzina strujanja vazduha sa spoljne i unutrašnje strane stakla kao i temperatura okolnih zidova.

Toplotni dobitak – rezultat prolaza sunčevog zračenja kroz prozor izražava se kao:

$$q = I\,(\tau + n\alpha),\ (\mathrm{W/m^2}) \qquad (1)$$

gde je:

n – odnos toplotnog fluksa koji konvektivno i dugotalasnim zračenjem prelazi sa unutrašnje površine stakla u unutrašnjost prostorije prema toplotnom fluksu solarnog zračenja koji se apsorbuje u staklu, a I je intenzitet upadnog sunčevog zračenja na prozor [W/m^2].

KSTD – **koeficijent sunčanog toplotnog dobitka** stakla prema ASHRAE-u SHGC – solar heat gain coefficient, izražava se kao deo jednačine u zagradama odnosno udeo ukupnog intenziteta sunčevog zračenja na zastakljenje koji sačinjava toplotni dobitak prostorije:

$$KSTD = \tau + n\alpha \tag{2}$$

Ovaj izraz važi za jedan sloj stakla. Pošto je najčešće slučaj da su zastakljenja sa dva sloja stakala, a u izuzetnim slučajevima i sa tri, opšti izraz za KSTD bi bio:

$$KSTD = \tau_u + \sum_{j=1}^{m} n_j \alpha_j \tag{3}$$

KZ ili **koeficijent zasenčenja – propustljivosti** stakla je množitelj kojim se sunčani toplotni dobitak za bezbojno staklo pretvara u opterećenje za obojeno staklo (ASHRAE: SC – shading coefficient). Metodologija koeficijenta zasenčenja je dobra za obojena (zasenčena) jednostruka stakla kod kojih je ugaona i spektralna selektivnost slična kao kod jednostrukih običnih bezbojnih stakala, dok je za različite prevlake i višeslojna zastakljenja nezadovoljavajući i mora se sprovesti na spektralnoj osnovi analiza. KZ se izračunava pomoću izraza:

$$KZ = KSTD / 0{,}87 \tag{4}$$

Kontrola vidljivog dela spektra sunčevog zračenja (talasne dužine 0,4 – 0,7 μm) kvalitativno se određuje preko **koeficijenta svetlosne propustljivosti KSP** (ASHRAE: TV – visible transmittance) na osnovu koga se određuje koliko dnevnog prirodnog svetla prolazi u prostoriju kroz zastakljenje.

Vodeći proizvođači stakala i zastakljenja u poslednjih 5 godina najveći akcenat stavljaju na razvoj spektralno selektivnog stakla. Spektralna selektivnost se postiže nanošenjem mikroskopski tankog sloja na bazi srebra sa osobinom niske emisivnosti (low-E) na staklo ili film. Spektralna selektivnost stakala se najbolje ilustruje indeksom **SSD** odnosno koeficijentom **svetlosnog** u odnosu na **sunčani dobitak** (ASHRAE: LSG-light-to-solar-gain ratio) koji se izražava izrazom:

$$SSD = KSP / KSTD \tag{5}$$

Spektralno selektivna stakla čine posebnu kategoriju i poseduju SSD > 1,25 (može da dostigne izuzetno i vrednost 2), dok veličina KSP treba da bude veća od 0,4 da bi staklo moglo da se svrsta u tu kategoriju. Pored energetske uštede koja se postiže upotrebom ovakvog zastakljenja, ono pruža i: 1) ograničenje prekomernog zračenja unutrašnjeg prozora koje stvara nelagodnost čak i kada je temperatura u prostoriji optimalna (20–26°C), 2) bolji estetski izgled prostorije u kojoj su boje pod uticajem dnevnog prirodnog osvetljenja mnogo realnije i prijatnije, 3) osećaj povezivanja prostorije sa eksterijerom i 4) lepši noćni pogled kroz prozor.

3. Matematički model zastakljenja

Matematički model zastakljenja predstavlja toplotni bilans energetsko-toplotnih protoka, određen odgovarajućim jednačinama za zastakljenje. On nam omogućava određivanje nepoznatnih vrednosti temperatura krakterističnih površina, a na osnovu njihovih vrednosti u odnosu na okolinu i okolne zidne površine, može se zatim sagledati tok toplotnih protoka i eventualno i dalje određenih tokova zračenja kroz zastakljenje. U toplotnom bilansu zastakljenja nepoznate veličine su temperature površina stakala koje čine zastakljenje. Za n slojeva stakala u zastakljenju postoji 2 n površina i isto toliko jednačina je potrebno za rešenje svih vrednosti temperatura. Kao primer biće analizirano dvostruko zastakljenje koje je inače i najčešći slučaj zastakljenja. Za rešavanje problema potrebno je uvesti nekoliko pretpostavki:

– staklene ploče su veoma tanke tako da ne postoje efekti akumulacije kao ni članovi u jednačinama koji ih izražavaju,

– prolaz toplote kroz zastakljenje je jednodimenzionalan, što znači da su normale izotermi takođe i normale ploča zastakljenja,

– staklene površine su nepropustljive za dugotalasno infracrveno zračenje,

– površine stakala su izotermske odnosno temperatura je ista po čitavoj površini svake površine stakla zasebno (jednodimenzioni problem beskonačnog ravnog zida),

– kratkotalasno zračenje apsorbovano u staklu jednako se raspoređuje na obe površine stakla.

Jednačine toplotnog bilansa dvostrukog zastakljenja kojima se dolazi do vrednosti temperatura površina stakala su prema [5]:

$$E_0\varepsilon_1 - \varepsilon_1\sigma\theta^4 + k_1(\theta_2 - \theta_1) + h_0(T_0 - \theta_1) + S_1 = 0 \tag{6}$$

$$k_1(\theta_1 - \theta_2) + h_1(\theta_3 - \theta_2) + \sigma\frac{\varepsilon_2\varepsilon_3}{1-(1-\varepsilon_2)(1-\varepsilon_3)}(\theta_3^4 - \theta_2^4) + S_2 = 0 \tag{7}$$

$$h_1(\theta_2 - \theta_3) + k_2[\theta_4 - \theta_3] + \sigma\frac{\varepsilon_2\varepsilon_3}{1-(1-\varepsilon_2)(1-\varepsilon_3)}(\theta_2^4 - \theta_3^4) + S_3 = 0 \tag{8}$$

$$E_i\varepsilon_4 - \varepsilon_4\sigma\theta_4^4 + k_2(\theta_3 - \theta_4) + h_i(T_i - \theta_4) + S_4 = 0 \tag{9}$$

gde su:

E_o i E_i – spoljašnji i unutrašnji intenzitet dugotalsnog zračenja [W/m^2],
T_o i T_i – spoljašnja i unutrašnja temperatura vazduha [K],
ε_i – koeficijent emisije površine i,
σ – Stefan-Boltzmannova konstanta,
k_i – koeficiejnt toplotne provodljivost sloja stakla i [W/mK]
h_o i h_i – spoljašnji i unutrašnji koeficijenti prelaza toplote [W/m^{2}K]
S_i – intenzitet zračenja koji apsorbuje površina i,
θ_i – temperatura površine i [K].

Rešenje jednačina toplotnog bilansa

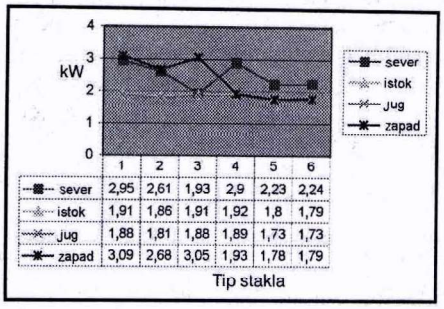
Linearizujući sistem jednačina, jednačina (6) postaje:

$$E_o\varepsilon_1 - h_{r,1}\theta_1 + k_1(\theta_2 - \theta_1) + h_o(T_o - \theta_1) + S_1 = 0 \quad (10)$$

gde je:

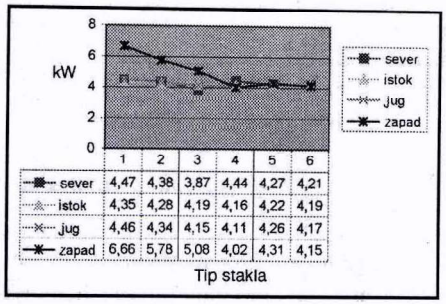
$$h_{r,i} = \varepsilon_i \sigma \theta_i^3. \quad (11)$$

Iterativnim postupkom pretpostavljanja i korišćenja prethodno izračunatih vrednosti temperatura θ_i i na osnovu te vrednosti izračunavanja $h_{r,i}$ dolazi se do rešenja svih vrednosti temperatura površina stakala θ_i.



	1	2	3	4	5	6
sever	2,95	2,61	1,93	2,9	2,23	2,24
istok	1,91	1,86	1,91	1,92	1,8	1,79
jug	1,88	1,81	1,88	1,89	1,73	1,73
zapad	3,09	2,68	3,05	1,93	1,78	1,79

Slika 1. Maksimalna toplotna opterećenja prostorije u toku godine



	1	2	3	4	5	6
sever	4,47	4,38	3,87	4,44	4,27	4,21
istok	4,35	4,28	4,19	4,16	4,22	4,19
jug	4,46	4,34	4,15	4,11	4,26	4,17
zapad	6,66	5,78	5,08	4,02	4,31	4,15

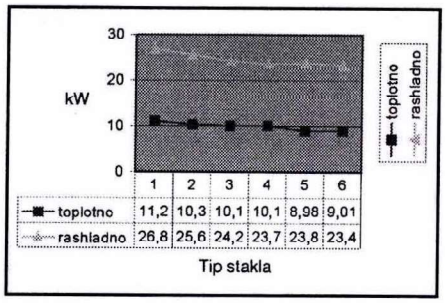
Slika 2. Maksimalna rashladna opterećenja prostorije u toku godine

4. Parametri kontrole sunčevog zračenja merodavni za analizu zastakljenja različitog tipa

Kvalitativno upoređivanje zastakljenja podrazumeva specifikaciju sunčano-optičkih i termičkih karakteristika stakala koje će predstavljati parametre upoređivanja. Analizirajući mediteranski uticaj dnevnih temperatura i broja sunčanih sati na toplotno opterećenje prostorije i mogućnost iskorišćenja dnevnog prirodnog osvetljenja kao najbolje rešenje zastakljenja nameće se spektralno selektivno zastakljenje koje u najvećoj meri propušta spektar vidljivog zračenja reflektuje UV i IC zračenje.

Tabela 1. Sunčano optičke karakteristike analiziranih zastakljenja

Tip stakla	Konstrukcija zastakljenja	KSTD	KSP	SSD	k (W/m^{2}K)
1. Obično čisto staklo	3 + 12 vaz. sloj + 3	0,75	0,81	1,08	2,9
2. Nisko emisiono staklo	3 + nis-e pr. +12 v.s. + 3	0,6	0,75	1,25	1,95
3. Reflektujuće 1	6 + Ti pr. + 12 v.sl. + 6	0,21	0,18	0,85	2,7
4. Reflektujuće 2	6 + čel.pr + 12 v.s. + 6	0,13	0,07	0,54	2,7
5. Spekt. selekt. 1	6 + 16 Ar + 6	0,53	0,73	1,38	1,1
6. Spekt. selekt. 2	6 + 16 Ar +6	0,34	0,66	1,94	1,1



Slika 3. Maksimalna rashladna opterećenja zgrade u toku godine

Analiza podrazumeva primenu navedenih zastakljenja na objektima lociranim u mediteranskoj klimatskoj zoni i sprovođenje dinamičkih časovnih simulacija na objektima i određivanje toplotnog i rashladnog opterećenja programom **DOE 2.1E**. Posmatran je jednospratni objekat sa fasadama orijentisanim ka četri strane sveta na kojima je postavljeno zastakljenje ukupno 40% od površine fasade radi egzaktne analize uticaja poboljšanog žastakljenja na različito termički opterećene fasade.

5. Uporedna analiza različitih tipova zastakljenja

Za različite tipove zastakljenja nabrojanih u tački 3 izvršene su simulacije i upoređenja merodavnih parametara zastakljenja analizirajući:

1. maksimalno toplotno i rashladno opterećenje zgrade u godini,
2. maksimalno toplotno opterećenje u godini prostorija sa fasadama i zastakljenjima orijentisanim ka sve četiri strane sveta,
3. maksimalno rashladno opterećenje u godini prostorija sa fasadama i zastakljenjima orijentisanim ka sve četiri strane sveta.

Adekvatna analiza toplotnog i rashladnog opterećenja zgrade i prostorija moguća je isključivo izvođenjem dinamičkih časovnih simulacija putem odgovarajuće programske podrške. Maksimalna toplotna i rashladna opterećenja predstavljaju maksimume opterećenja izdvojenih iz rezultata izračunatih za svih 8760 časova u godini. Proračuni su sprovedeni prema pojednostavljenoj metodi toplotnog bilansa prostorije odnosno metodi transfer funkcije koja je standardna metoda ASHRAE i koja uključuje efekte akumulacije toplote dobijene od spoljašnjeg i unutrašnjeg zračenja u spoljašnjim i unutrašnjim elementima prostorije i njeno kasnije oslobađanje pomerajući maksimume opterećenja kasnije u toku dana. Objekat na kome su simulirana opterećenja prostorija ima osnovu dimenzija 20 x 20 m. Spoljašnje prostorije imaju površinu 64 m^2 i dubinu od fasade od 5 m dok je površina unutrašnje prostorije 144 m^2.

Izračunate vrednosti opterećenja prikazane su na dijagramima (slika 1–3) i tabelarno.

6. Zaključak

U radu su prikazani fizički principi prenosa energije zračenja kroz staklo i zastakljenje i njegov uticaj na zagrevanje prostorija prirodnim efektom staklene bašte. Kontrola solarnog zračenja svodi se na omogućavanje prolazu i dobitku onog dela spektra zračenja koje nam je potrebno u zavisnosti od klimatske zone i zaustavljanju onog dela spektra koji nam je nepoželjan. U radu je analizirana mediteranska klimatska zona crnogorskog primorja sa velikim brojem sunčanih sati i način najbolje kontrole solarnog zračenja koja znači propuštanje vidljivog dela spektra i zaustavljanje dugotalasnog IR zračenja koje u prostorijama stvara gubitke. Dobijeni rezultati toplotnih i rashladnih opterećenja prostorija prikazani su za svaki tip zastakljenja, tako da se lako dolazi do informacija o kvalitativnoj koristi upotrebe poboljšanog sistema

zastakljenja. Maksimalna toplotna i rashladna opterećenja nisu računata prema projektnoj temperaturi, već su urađene časovne simulacije za svih 8760 časova, što znači za realne uslove temperatura i zračenja u godini, pa su izvučeni maksimumi za tačno određen čas.

Literatura

[1] ***: *ASHRAE Fundamentals,* ASHRAE, Atlanta, SAD, 1997.

[2] ***: *Energy and buildings,* Vol. 28, Number 3, Elsevier Science, November 1998.

[3] **Carmody, J., S. Selkowitz, L. Heschong:** *Residential Windows,* W. W. Norton & Company, New York, USA, 1996.

[4] ***: The U.S. Department of Energy, „Federal Technology Alerts", Spectrally Selective Glazing, USA, 2001.