

**naučimo
podsetimo se**

Toplotno opterećenje klimatizovanog prostora

Branislav Todorović *

U ovom broju objavljujemo prvi deo teorije o dobicima toplote, odnosno toplotnim opterećenjima prostorija. Ovaj tekst je baziran na saopštenju koje je dr Branislav Todorović izložio na I seminaru o KGH, 1971. godine. To saopštenje je nakon seminara štampano posebno, ali je celo izdanje vrlo brzo rasprodato.

Zbog stalnih zahteva, naročito mladih kolega, za tim i drugim radovima sa ranijih seminara o KGH, redakcija je zamolila autora da rad ponovo pripremi za štampu.

S obzirom na temu, rada objavljenog u ovoj rubrici u prošlom broju, koja se odnosila na uticaj klime na postrojenja grejanja, i činjenicu da se od prošlog broja (u tri nastavka) objavljuje članak o ekvivalentnim temperaturnim razlikama (G. Takova), redakcija je smatrala da rad B. Todorovića treba štampati baš u ovom broju.

Da bi se u klimatizovanom prostoru održavala neka temperatura koja je niža od spoljne temperature, klimatizovana prostorija, ili cela zgrada, mora se rashlađivati. To praktično znači da iz klimatizovanog prostora treba odvoditi onu količinu toplote, zbog koje bi se prostorija zagrejala iznad željene temperature.

Količina toplote koju treba eliminisati iz prostorije u toku jednog časa, predstavlja toplotno opterećenje prostorije. Toplotno opterećenje, koje se u stranoj literaturi naziva i rashladno opterećenje prostorije (nemački *der Kühllast*, engleski *cooling loads*) nije identično sa tzv. dobicima toplote posmatrane prostorije. Naime, dobici predstavljaju količinu toplote koja zagreva čitav sistem prostorije koji obuhvata sobni vazduh, nameštaj, pripadajući deo zidova, poda i tavanice. Za razliku od dobitaka toplote, pod toplotnim opterećenjem se podrazumeva samo ona količina toplote koja zagreva isključivo sobni vazduh, pa prema tome ima direktnog uticaja na temperaturu prostorije i kapacitet rashladnog postrojenja.

Na osnovu toplotnog opterećenja prostorije, određuju se neophodne količine vazduha za klimatizaciju, koje direktno proporcionalno utiču na dimenzije kanala za vazduh, veličinu klimatizacione komore i druge karakteristične elemente postrojenja. Iz te zavisnosti proističe važnost što tačnijeg ocenjivanja veličine toplotnog opterećenja,

a posledice lošeg proračuna se odražavaju kako na kvalitet postizanja uslova sredine klimatizovanog prostora, tako i na visinu investicionih i eksploatacionih troškova klimatizacionog postrojenja.

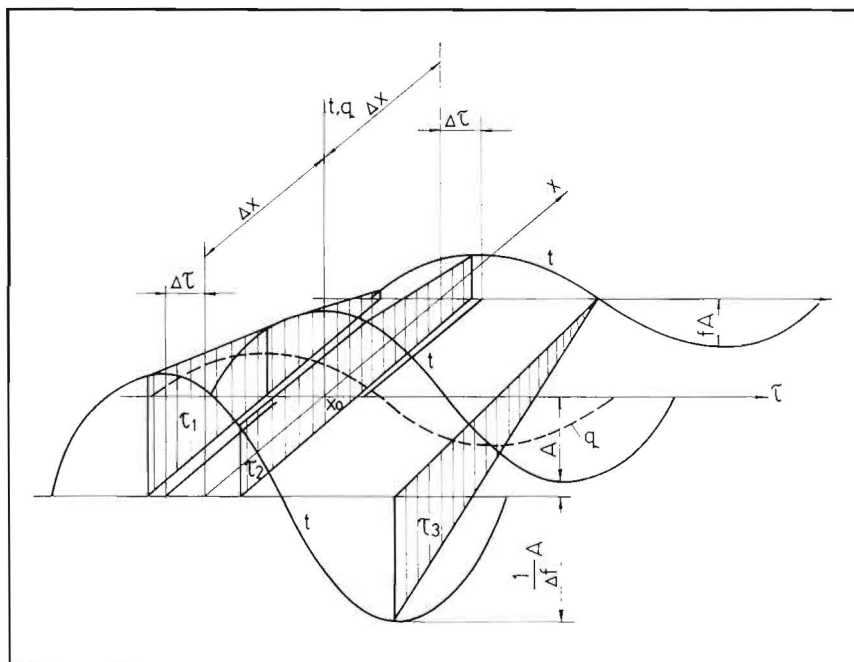
Da bi se proračun toplotnog opterećenja mogao izvesti korektno, neophodno je da projektant poznaje suštinu svih uticaja na dobicima toplote, odnosno na toplotno opterećenje, pa će u daljem tekstu biti analizirani svi klimatski, građevinski i fizički uticaji.

IZVORI DOBITAKA TOPLOTE

Dobici toplote koji su odraz geografskih i klimatskih uslova mesta, odnosno temperature spoljnog vazduha, intenziteta i trajanja sunčevog zračenja, predstavljaju spoljne dobicima toplote jer proističu od spoljnih izvora toplote. Izračunavanje toplotnog opterećenja od ovih izvora vrši se posebno za deo toplote koji prodire kroz zidove a posebno za deo koji se prenosi kroz prozore, zbog različitih fizičkih uslova transporta toplote kroz zidove i staklo.

Toplotni dobici koji potiču od tzv. unutrašnjih izvora toplote, dakle od izvora koji su prvenstveno posledica namene i opremljenosti pojedinih prostorija (vrsta i jačina osvetljenja, električni uređaji i aparati, broj i vrsta aktivnosti ljudi, temperatura u susednim prostorijama) su tzv. unutrašnji dobicima toplote. Toplotna opterećenja od ovih izvora se izračunavaju za svaki izvor posebno.

Sl. 1. — Šematski prikaz transporta toplote kroz spoljni zid



* Dr Branislav Todorović, dipl. ing., vanr. profesor Mašinskog fakulteta u Beogradu, 27. marta 80

Spoljni dobici toplote

U zimskom periodu, tokom karakterističnih hladnih dana, razlika između minimalne i maksimalne temperature je relativno mala, a uticaj niskih spoljnih temperatura ublažen je efektom akumulacije toplote u zidovima zagrevanog objekta. S druge strane, zimi je uticaj sunčevog zračenja mali jer su dani kratki a oblačnost znatno većeg stepena nego ljeti, pa se zimi uticaj sunčevog zračenja skoro isključuje. Zato se gubici toplote i potrebna količina toplote za grejanje prostorija računaju samo prema nekoj srednjoj spoljnoj temperaturi, prema zimskoj spoljnoj projektnoj temperaturi.

U toku letnjeg perioda uticaj promene spoljne temperature je značajniji nego zimi. Varijacija dnevnog toka temperature je izraženija pa je i razlika dnevnih ekstremnih temperatura znatna. Isto tako je i intenzitet sunčevog zračenja veliki, vedri dani učestali a dnevni period trajanja zračenja vrlo dug, pa je ne samo uticaj spoljne temperature, nego i sunčevog zračenja promenljiv u toku dana u najširim granicama. Zato se dobici toplote moraju računati tako da proračun odgovara procesu i zakonima nestacionarnog prenosa toplote.

Dobici toplote kroz zidove

Transport toplote kroz zidove je komplikovan za analizu, jer odavanje toplote spoljnih izvora varira u toku dana, pa je i količina toplote kroz zid promenljiva veličina. Usled akumulacije toplote u zidu javlja se fazno zakašnjenje toka količine toplote, koja se sa unutrašnje strane zida prenosi konvekcijom na sobni vazduh, prema toku količine toplote koju prima spoljna strana zida. Iz istog razloga su i temperature unutrašnje strane zida niže od temperatura spoljne površine zida, te je amplituda oscilacije na unutrašnjoj strani zida manja od amplitude temperaturne oscilacije na spoljnoj strani zida.

Na slici 1. šematski je prikazan transport toplote kroz zid, sa označenim faznim zakašnjenjem temperaturnih oscilacija.

U odnosu na uočeni srednji sloj posmatranog zida, prikazani su tokovi periodično promenljive temperature u slojevima udaljenim za Δx ispred i iza. Sprovođenje toplote je u pravcu normale na zid, predstavljene osom x . Vremensko zakašnjenje $\Delta \tau$ dato je za maksimalne temperature u pojedinim slojevima zida, dok je smanjenje amplitude označeno koeficijentom Δf_i .

Za tri različita trenutka vremena obeleženi su tokovi temperaturnih promena, a vrednosti temperatura po dubini zida u istim trenucima su spojene i šrafirane, kako bi se videla promena temperaturnog gra-

dijenta $\partial t / \partial x$. U prvom slučaju (vreme τ_1) ova promena je velika, u trenutku τ_2 promena je skoro jednaka nuli, a u trećem (τ_3) temperatura opada prema spoljnoj strani zida, tako da toplotna struja ima smer ka spoljnoj strani zida.

U svakoj tački zida x_0 struji maksimalna količina toplote u vremenskom periodu pre nego što je dostignuta maksimalna temperatura na spoljnoj strani zida. Tada je temperaturni gradijent najveći, što znači da je u ravni $x_0 + \Delta x$ temperatura приметно niža, a u ravni $x_0 - \Delta x$ znatno viša od temperature u srednjoj ravni x_0 .

Ako bi se uporedile temperaturne krive na spoljnoj i unutrašnjoj strani zida, dobio bi se odnos amplituda A_2/A_1 , koji se naziva faktor prigušenja. Isto tako, na osnovu koeficijenta temperaturne sprovodljivosti materijala i debljine zida, može se izračunati i vremensko zakašnjenje temperaturne oscilacije na unutrašnjoj strani u odnosu na spoljašnju stranu zida (τ_i).

Količina toplote koja kroz zid prodire u prostoriju predstavlja, dakle, nestacionarni ali periodično promenljivi slučaj transporta toplote i toplotno opterećenje prostorije može se predstaviti izrazom:

$$q = \alpha_i (t_i - t_i) = \alpha_i [(t_i - t_m) + (t_m - i)] \quad (1)$$

gde su:

- α_i — koeficijent prelaza toplote sa unutrašnje strane
- t_i — trenutna temperatura unutrašnje strane zida
- t_m — srednja dnevna temperatura unutrašnje strane zida
- t_i — temperatura prostorije.

Da bi se od izraza (1) dobilo rešenje koje bi imalo najpovoljniji oblik za praktičnu primenu, neophodno je da se iz gornjeg izraza eliminišu temperature zidova, koje su nepoznate količine, a da se zadrže temperature spoljnog vazduha i prostorije, kao poznate i zadate vrednosti.

U vezi s tim, temperaturne oscilacije spoljnog vazduha će se predstaviti sinusnom funkcijom u odnosu na srednju dnevnu temperaturu, a oscilacije na unutrašnjoj strani zida, prema srednjoj temperaturi zida tokom 24 časa.

Dalje će se, radi uprošćenja rešenja, čitav ovaj nestacionarni slučaj, s obzirom na periodičnost promena, posmatrati kao kombinacija stacionarnog i nestacionarnog transporta toplote. Stacionarno prenetom toplotom smatraće se deo koji se može matematički izraziti, kao posledica razlike srednjih temperatura spoljnog vazduha i unutrašnje strane zida.

U matematičkom postupku temperaturna oscilacija spoljnog vazduha se predstavlja sinusnom funkcijom:

$$(t_i - t_m) = T_0 \cos [\omega (\tau - \tau_0)] \quad (2)$$

a temperatura na unutrašnjoj strani zida:

$$(t_i - t_m) = T_0 f_i \cos [\omega (\tau - \tau_0) - \tau_i] \quad (3)$$

gde su:

- t_i — spoljna temperatura u određenom trenutku vremena
- t_m — srednja dnevna spoljna temperatura
- τ — vreme za koje se računa toplotno opterećenje
- τ_0 — vreme javljanja spoljne maksimalne temperature
- τ_i — vremensko zakašnjenje temperature na unutrašnjoj strani zida
- ω — ugaone brzine temperaturnih oscilacija.

Uzročna spoljna temperatura i njena posledica — temperatura na unutrašnjoj strani zida — javljaju se u različitim vremenskim trenucima i imaju uzajamnu vezu preko faktora umanjenja amplitude f_i , što sledi iz (2) i (3):

$$(t_i \tau - t_m) = f_i (t_e \tau - \tau_i - t_m) \quad (4)$$

Na osnovu jednačine (1) i jednačnosti (4) toplotni fluks za vreme τ imaće vrednost:

$$q_\tau = \alpha_i [f_i (t_e - t_m) + t_m - t_i] \quad (5)$$

sa napomenom da spoljna temperatura t_e odgovara vremenu $\tau - \tau_i$.

Da bi u izrazu (5) figurisale samo spoljna i unutrašnja temperatura, a ne i nepoznata srednja temperatura unutrašnjeg zida t_m ,

$$q_{\text{stac.}} = \alpha_i (t_m - t_i) = K (t_m - t_i) \quad (6)$$

Sada se dobija:

$$q_\tau = \alpha_i f_i (t_e - t_m) + K (t_m - t_i) \quad (7)$$

Ako se uvede konigovani koeficijent

$$f = \frac{\alpha_i}{K} f_i,$$

onda je konačan izraz za nestacionaran prolaz toplote:

$$q_\tau = K [f (t_e \tau - \tau_i - t_m) + (t_m - t_i)] \quad (8)$$

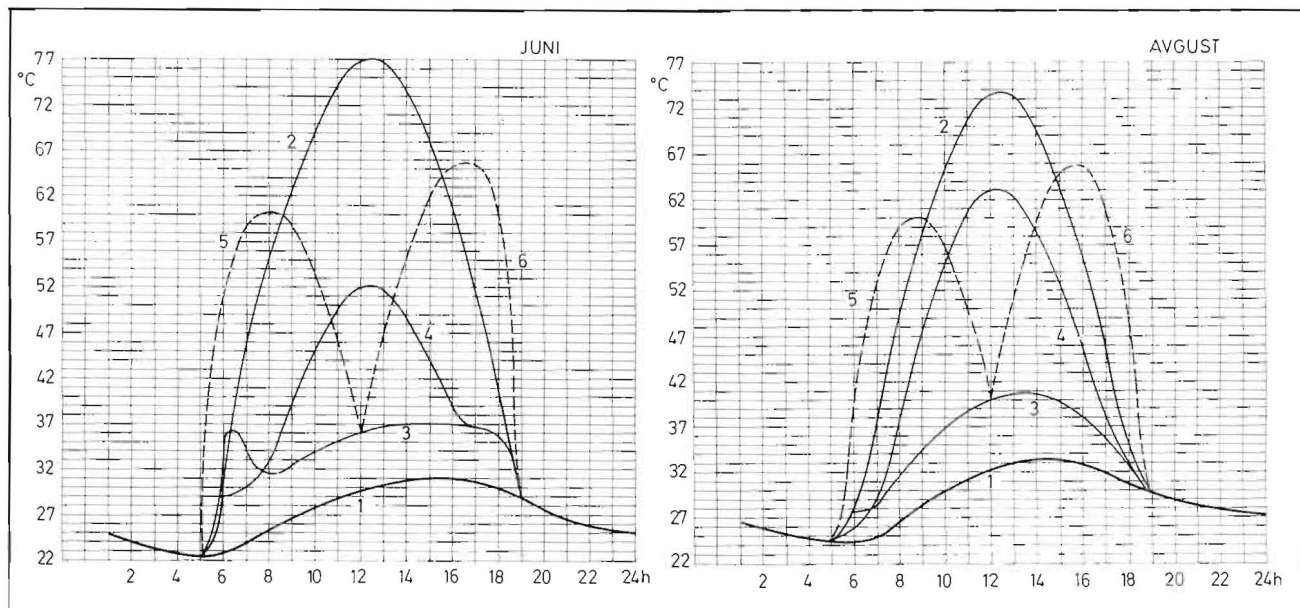
Izraz u zagradi je ekvivalentna temperaturna razlika, a

$$t = f (t_e \tau - \tau_i - t_m) + t_m \quad (9)$$

je fiktivna spoljna temperatura koja omogućava da se izračuna nestacionarno transportovana toplota q za vreme τ množenjem koeficijenta K kao u stacionarnom slučaju. Na taj način se omogućava sprovođenje proračuna analogno onom za stacionarni transport toplote.

Ovde je do sada iznet samo uticaj spoljne temperature. Međutim, u ova razmatranja treba uvesti i uticaj sunčevog zračenja. Da bi izvedeni obrasci (8) i (9) obuhvatili

Sl. 2. 1 — spoljna temperatura vazduha t_s ; t_c za horizontalnu površinu — ravan krov; 3 — t_c — južni zid; 5 — t_c — istočni zid; 6 — t_c — zapadni zid



i sunčevo zračenje, koristi se pojam sunčane vazdušne temperature, koji su prvi uveli Amerikanci Mackey (Meki) i Wright (Rajt).

Sunčano-vazдушna temperatura

Sunčano-vazдушna temperatura, kako su je definisali Meki i Rajt, predstavlja onu fiktivnu temperaturu, koju bi trebalo da ima spoljni vazduh, a koja bi uzrokovala isti toplotni fluks kroz određeni zid, kao i kombinovani stvarni uticaj trenutnog sunčevog zračenja i spoljne temperature. Drugim rečima, ako bi temperatura spoljnog vazduha imala vrednost sunčano-vazdušne temperature, onda bi se spoljna strana zida zagrejala na istu temperaturu kao i u stvarnim uslovima spoljne temperature ali i dejstva sunčevog zračenja.

Na osnovu gornje definicije, postavljena je jednačina toplotnog bilansa za spoljnu površinu zida:

$$\alpha_c (t_s - t_c) = \alpha_c (t_c - t_e) + aI$$

pa je sunčano-vazдушna temperatura definisana izrazom:

$$t_s = t_c + \frac{aI}{\alpha_c}$$

U gornjim jednačinama je:

- α_c — koeficijent prelaza toplote na spoljnoj strani zida
- a — koeficijent apsorpcije sunčevog zračenja spoljne strane zida
- t_s — sunčano-vazдушna temperatura
- t_c — temperatura spoljnog vazduha
- t_e — temperatura spoljne strane zida
- I — intenzitet sunčevog zračenja.

Sunčano-vazдушna temperatura se za naše uslove računa sa:

$$\alpha_c = 15 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$$

a koeficijenti apsorpcije zidova zavise od fizičkih osobina spoljne površine. Poželjno je da se razlikuju sasvim svetli zidovi ($a = 0,4$), izrazito tamni ($a = 1,0$) i površine srednjeg tona, koje su najčešće u praksi ($a = 0,7$). Za krov se obično usvaja vrednost $a = 0,9$.

Maksimalne vrednosti sunčevog zračenja i spoljne temperature se ne javljaju istovremeno, pa se zato dnevne temperature, merodavne za izračunavanje sunčano-vazdušne temperature, izračunavaju prema kriterijumu da to treba da budu one časovne vrednosti koje mogu biti prevaziđene samo u 5% slučajeva. Tako su ove temperature za Beograd određene za mesec june i avgust, statističkom obradom časovnih temperatura za ove mesece, a prema podacima za period 1957—1963. god., što znači da je za svaki sat u toku dana obuhvaćeno ukupno 210 temperaturnih podataka. Tok sunčano-vazdušnih temperatura dat je na slici 2.

Toplotno opterećenje kroz zidove

U obrascu (8) nije uzet u obzir uticaj sunčevog zračenja. Međutim, uvodeći sunčano-vazдушnu temperaturu u taj izraz, a umesto spoljne temperature, konačan obrazac za proračun nestacionarnog prolaza toplote kroz zid je:

$$q_{(\tau)} = k [t_{s\tau - \tau_1} - t_{sm}] + t_{sm} - t_i \quad (12)$$

pa je sada fiktivna spoljna temperatura, kojom je omogućeno da se

nestacionaran prolaz toplote računa u sličnom obliku kao i stacionaran, data izrazom:

$$t_{i\tau} = f(t_{s\tau - \tau_1} - t_{sm}) + t_{sm} \quad (13)$$

Razlika fiktivne spoljne temperature i temperature u prostoru, naziva se ekvivalentna temperaturna razlika:

$$f(t_{s\tau - \tau_1} - t_{sm}) + t_{sm} - t_i = \Delta t_{ekv.\tau}$$

i to je podatak koji se u projektovanju koristi. Ekvivalentna temperaturna razlika svodi proračun na direktno određivanje vrednosti toplotnog opterećenja prostorija, koje potiče od spoljnih izvora toplote.

Prema tome, ekvivalentna temperaturna razlika je fiktivna razlika spoljne temperature, koja obuhvata fizička svojstva zidova, sve posledice osobina zidova (akumulaciju toplote, vremensko zakašnjenje transporta toplote i dr.) i spoljne izvore toplote, a račun svodi na pogodan oblik za projektantsku praksu.