

OSNOVI TEHNIKE KLIMATIZACIJE

1. UVOD

Klimatizacija je grana tehnike i naučna disciplina koja se bavi ostvarivanjem i održavanjem pogodnih uslova za boravak čoveka u zatvorenom prostoru. Strogo uzevši, navedena definicija odnosi se na komfornu klimatizaciju gde se uslovi ugodnosti prilagođavaju prvenstveno ljudima koji tu borave. Za razliku od komforne klimatizacije, osnovni zadatak industrijske klimatizacije je stvaranje pogodnih uslova za optimalno odvijanje tehnološkog procesa. Naravno, ti uslovi sredine moraju biti prihvatljivi i za čoveka. Na primer, u pojedinim pogonima tekstilne industrije i pojedinim fazama prerade duvana potrebno je održavati visoku relativnu vlažnost vazduha (i do 90%) što čovek može da podnese, mada je za njega idealna vrednost oko 50%.

Za razliku od sistema grejanja koji ostvaruju funkciju zagrevanja prostora i delimičnog provetravanja, sistemi klimatizacije ostvaruju daleko veći broj funkcija u cilju postizanja uslova ugodnosti tokom cele godine. Osnovne funkcije klimatizacionih postrojenja su:

- zagrevanje prostora u zimskom periodu;
- hlađenje prostora u letnjem periodu;
- ventilacija;
- održavanje relativne vlažnosti vazduha: vlaženje vazduha u zimskom periodu i sušenje (odvlaživanje) u letnjem;
- održavanje čistoće vazduha;
- održavanje pritiska u cilju kontrolisanog strujanja vazduha između prostorija.

RAZVOJ TEHNIKE KLIMATIZACIJE

Početak klimatizacije vezuje se za 20-te godine prošlog veka u Americi. Vremenom su razvijeni različiti sistemi klimatizacije tako da se željeni uslovi ugodnosti praktično mogu postići u svim slučajevima.

Energetska kriza 70-tih godina prošlog veka uticala je na celokupan život čoveka, pa i na klimatizaciju. Međutim, primena klimatizacije u skoro svim sferama života nije zaustavljena, ali je došlo do modifikacije i razvoja novih tehničkih rešenja klimatizacionih postrojenja. Osnovni cilj je da se projektuju i izvede energetske efikasne sisteme klimatizacije.

U cilju štednje energije u klimatizacionim sistemima smanjen je broj izmena svežeg vazduha na sat, ali se tada javio problem lošeg kvaliteta vazduha u klimatizovanim prostorijama (IAQ – Indoor Air Quality). Snižena je unutrašnja temperatura u zimskom, a povišena u letnjem periodu. Povećane su tolerancije dozvoljene vrednosti relativne vlažnosti vazduha u klimatizovanim prostorima. Niža dozvoljena vlažnost vazduha u zimskom, a viša u letnjem periodu dovode do znatnih ušteda energije u procesu pripreme vazduha. Korišćenje otpadne toplote iz klimatizacionih sistema postalo je standardno tehničko rešenje. Sve ove mere su uticale da se smanji jedinična potrošnja energije u klimatizacionim postrojenjima uz zadovoljavanje termičkih uslova ugodnosti.

Savremeni način gradnje, sve gušća naseljenost u gradovima, sve veće zagađenje okoline i sve izraženiji zahtevi za komforom i kvalitetom vazduha u zatvorenom prostoru, uslovili su sve više zahteva za uvođenjem klimatizacije u objektima različite namene. Perspektive primene

klimatizacije su sve veće. Sve je više oblasti gde se ne može zamisliti boravak bez adekvatne klimatizacije:

- veliki poslovni objekti i tzv. “blokirane” prostorije;
- luksuzni objekti (hoteli visoke kategorije, poslovni apartmani,...);
- proizvodni pogoni (farmaceutske, hemijske, prehrambene, elektronske industrije);
- objekti opšte i javne namene (kongresni centri, pozorišta, bolnice, trgovinsko-poslovni centri, itd.);
- život pod morem, pod zemljom, u svemiru.

2. ODAVANJE TOPLOTE ČOVEKA

U čovekovom telu se neprekidno odvijaju fizičko-hemijski procesi koji se nazivaju metabolizam. Pri tim procesima razvija se toplota koju čovek neprekidno mora da odaje okolini da bi ostvario stanje termičke ravnoteže, odnosno da bi održao stalnu temperaturu tela. Količina proizvedene i odate toplote zavisi od: fizičke aktivnosti, odevenosti, temperature okoline, pola, uzrasta, mase tela, psihičko-zdravstvenog stanja, aklimatizovanosti na podneblje, ishrane, individualnosti, itd.

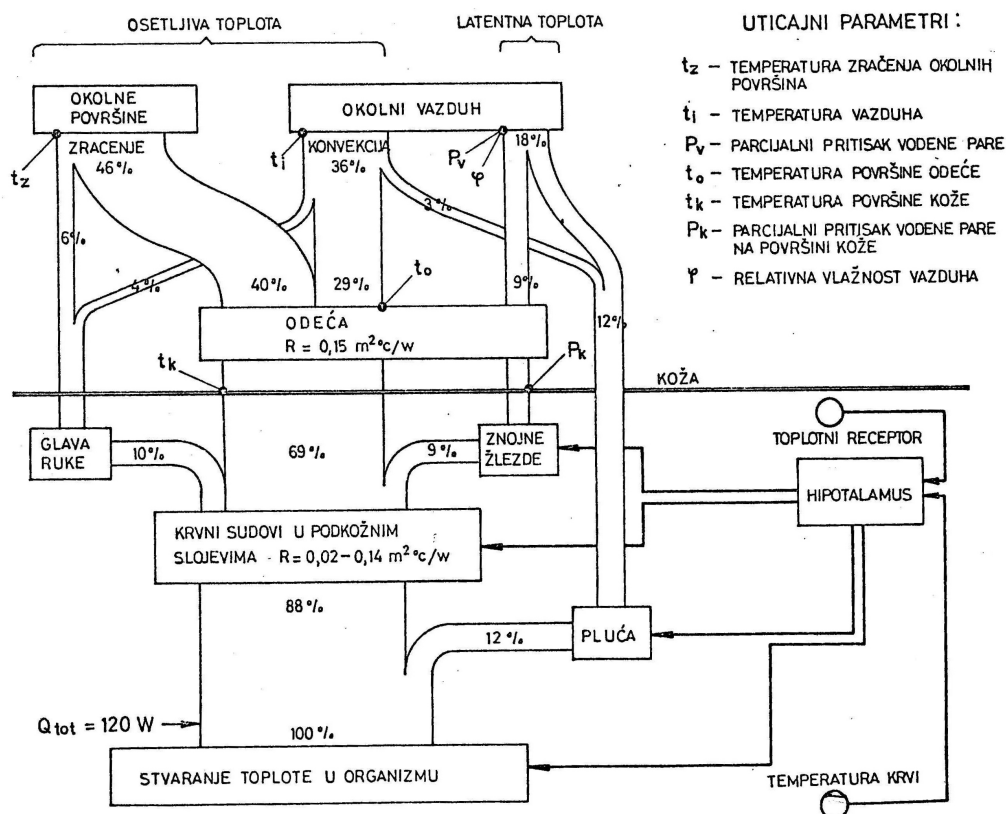
Kao mera fizičke aktivnosti čoveka uvedena je jedinica *met* i ona odgovara odavanju toplote čoveka od $58,2 \text{ W/m}^2$ površine tela. Prosečna površina kože odraslog čoveka iznosi $1,8 \text{ m}^2$. U tabeli 2.1 prikazane su prosečne vrednosti odavanja toplote odraslog čoveka pri različitim aktivnostima.

Tabela 2.1 Odavanje toplote čoveka

| Aktivnost | Odavanje toplote | |
|---------------------------|------------------|-----------|
| | met | W |
| spavanje | 0,7 | 75 |
| sedenje | 1,0 | 105 |
| hodanje brzinom 3,2 km/h | 2,0 | 210 |
| hodanje brzinom 6,4 km/h | 3,8 | 400 |
| kancelarijski rad | 1,0 – 1,4 | 105 – 150 |
| spremanje kuće | 2,0 – 3,4 | 210 – 355 |
| plesanje | 2,4 – 4,4 | 250 – 460 |
| košarka | 5,0 – 7,6 | 580 – 800 |
| maksimalna (kratkotrajna) | 11,5 | 1200 |

Toplotu stvorenu metabolizmom čovek odaje okolini koristeći više osnovnih mehanizama prenosa toplote. Suva (osetljiva) toplota predaje se uglavnom preko kože i odeće konvekcijom i zračenjem, a manjim delom kondukcijom i zagrevanjem vazduha u plućima. Latentna (vlažna) toplota predaje se u plućima i preko kože. Pri tome treba razlikovati da li je koža suva ili okvašena (oznojana).

Šema odavanja toplote čoveka različitim mehanizmima prenosa toplote prikazana je na slici 2.1. Navedene procentualne vrednosti važe samo za određene uslove (fizička aktivnost, odevenost, termički parametri okoline). Za druge uslove, procentualne vrednosti odavanja toplote pojedinim mehanizmima prenosa toplote mogu biti sasvim različite.



Slika 2.1 Odavanje toplote čoveka

2.2 Uslovi ugodnosti

Na intenzitet odavanja toplote čoveka i osećaj ugodnosti utiče mnogo faktora koji se mogu podeliti u dve osnovne grupe:

- termički uslovi okoline;
- lični uticaji.

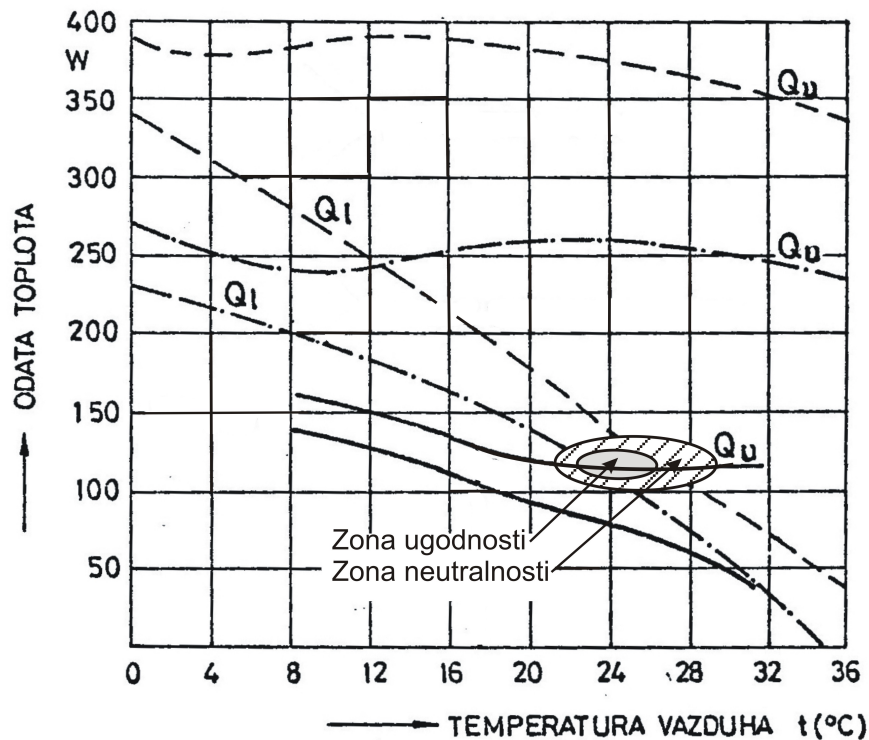
Termički uslovi sredine su:

- temperatura vazduha;
- srednja temperatura okolnih površina;
- relativna vlažnost vazduha;
- brzina strujanja vazduha.

Najznačajniji lični uticaji su stepen fizičke aktivnosti i odevenost.

TEMPERATURA VAZDUHA t_v

Temperatura vazduha utiče na odavanje toplote konvekcijom. Prenos toplote konvekcijom proporcionalan je razlici temperature tela (koja je približno stalna) i temperature okolnog vazduha. Na slici 2.2 prikazan je dijagram odavanja toplote ljudi u funkciji temperature vazduha za različite fizičke aktivnosti.



Slika 2.2 Odavanje toplote čoveka u zavisnosti od temperature vazduha

Odavanje toplote čoveka (i ukupno, a posebno suve toplote) opada sa porastom temperature vazduha. U jednom intervalu temperatura okoline, ukupno odavanje toplote čoveka se ne menja i ta oblast se naziva **zona neutralnosti**. Unutar zone neutralnosti, i to pomerenom ka oblasti nižih temperatura okoline gde je odavanje suve toplote veće a latentne umereno, nalazi se **zona ugodnosti**. To je oblast koju pokušavamo da ostvarimo radom klimatizacionih uređaja.

TEMPERATURA OKOLNIH POVRŠINA t_o

Temperatura okolnih površina (unutrašnje površine zidova, prozora, poda i tavanice) utiče na razmenu toplote zračenjem. Toplota razmenjena zračenjem proporcionalna je razlici četvrtih stepena apsolutne temperature tela i srednje vrednosti temperature okolnih površina. S aspekta uslova ugodnosti čoveka, najbolje je kada je zračenje što ravnomernije u svim pravcima, tj. kada temperatura svih okolnih površina malo odstupa od srednje vrednosti. Međutim, u praksi je čest slučaj da su pojedine površine u prostoriji različitih temperatura, pa se može dogoditi da čovek jednim delom tela prima toplotu zračenjem, a drugim odaje (tzv. asimetrično zračenje). Ukoliko se čovek ne kreće, asimetrično zračenje je vrlo neugodno. Na primer, kada čovek sedi jednom stranom okrenut peći na unutrašnjem zidu, a drugom stranom ka termički loše izolovanom prozoru.

Mada temperatura vazduha i temperatura okolnih površina utiču na različite mehanizme odavanja toplote čoveka, s obzirom da se radi o istim fizičkim veličinama, uvedena je **rezultujuća temperatura** koja objedinjuje obe ove karakteristične temperature.

$$t_{rez} = A * t_v + B * t_o$$

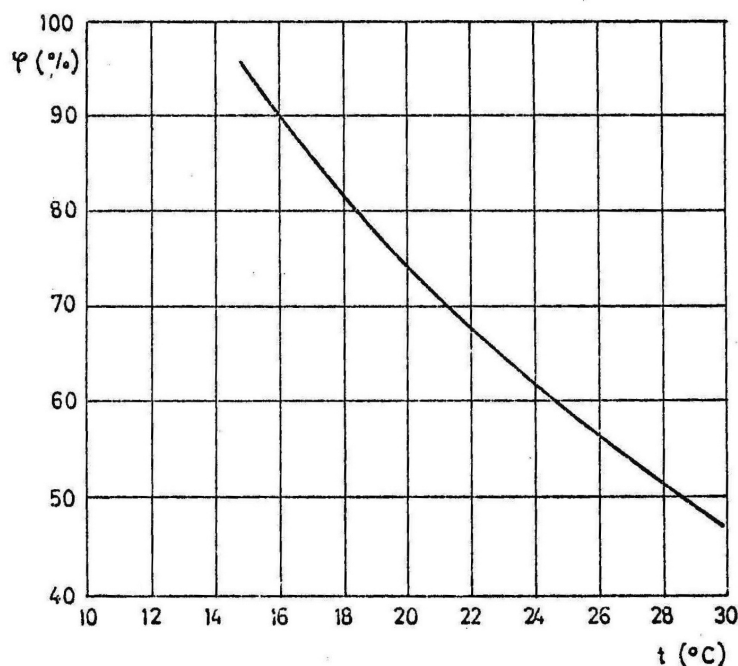
Različiti autori navode različite vrednosti konstanti A i B. Najčešće se smatra da su sličnog uticaja pa se usvaja $A=B=1/2$. Generalni je stav da što je niža srednja temperatura okolnih površina, potrebna je viša temperatura vazduha (i obrnuto) za isti osećaj ugodnosti. Najbolje je kada su obe karakteristične temperature približno jednake.

RELATIVNA VLAŽNOST VAZDUHA φ

Relativna vlažnost vazduha utiče, pre svega, na odavanje latentne toplote. Odavanje latentne toplote čoveka proporcionalno je razlici parcijalnog pritiska zasićenja za temperaturu površine tela i parcijalnog pritiska vodene pare u okolnom vazduhu. Naime, uobičajeno se smatra da je vazduh u neposrednom dodiru sa površinom kože, usled znojenja čoveka, primio maksimalno moguću količinu vodene pare, tj. da je zasićen.

Uticaj relativne vlažnosti na osećaj ugodnosti čoveka treba posmatrati u “sadejstvu” sa temperaturom vazduha. Pri visokim temperaturama visoka relativna vlažnost nije dobra jer onemogućava odavanje latentne toplote (znojenjem) što je najvažniji način hlađenja tela pri visokom temperaturama okoline (slika 2.3).

Visoka relativna vlažnost vazduha nije dobra ni pri niskim temperaturama, jer izaziva vlaženje odeće čime se smanjuje otpor provođenju toplote i povećava odavanje toplote čoveka što nije ugodno pri niskim temperaturama okoline. Zbog toga se ograničava maksimalno dozvoljena vrednost relativne vlažnosti u funkciji temperature okolnog vazduha (slika 2.3). Sa dijagrama se može uočiti da je mnogo značajniji uticaj relativne vlažnosti pri višim temperaturama okoline, pa su tada dozvoljene niže vrednosti φ .



Slika 2.3 Maksimalno dozvoljene vrednosti relativne vlažnosti vazduha

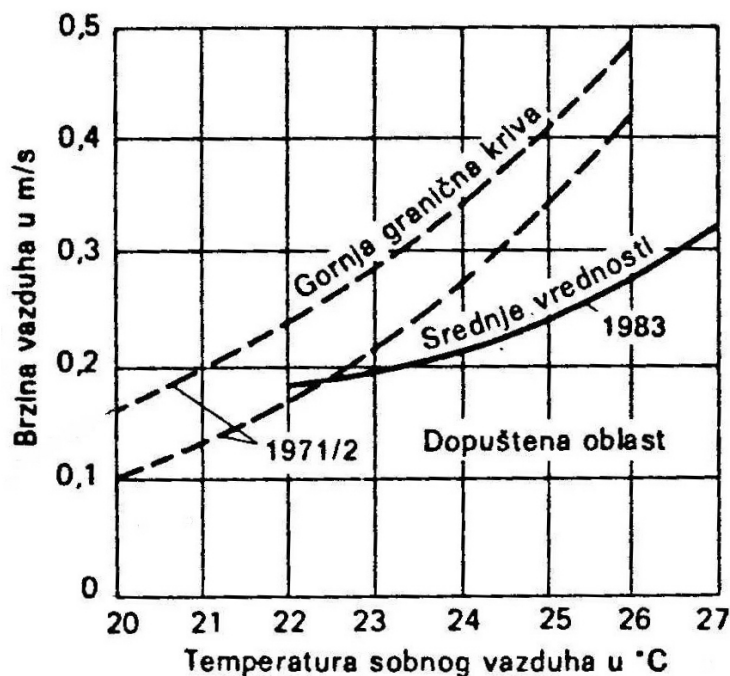
Ni preniska vlažnost vazduha nije ugodna za čoveka jer može izazvati preterano sušenje (isušivanje) kože i naročito sluzokože (očiju i disajnih puteva). Zato se propisuje i minimalna

dozvoljena vlažnost vazduha (30%, a u poslednje vreme, zbog štednje energije, i 20%). Smatra se da je u opsegu uobičajenih temperatura vazduha, optimalna vlažnost vazduha za čoveka 50%.

BRZINA STRUJANJA VAZDUHA w

Brzina strujanja vazduha utiče na prenos toplote konvekcijom i odavanje latentne toplote. Povećanjem brzine kretanja vazduha raste koeficijent prelaza toplote, pa se time povećava i količina toplote predata konvekcijom. Takođe, intenzivira se i odavanje latentne toplote jer se pri većoj brzini vazduha pospešuje isparavanje sa kože time što se zasićen vazduh koji je u dodiru s površinom kože brže odvodi a na njegovo mesto dolazi okolni suvlji vazduh.

Veće brzine vazduha mogu izazvati neprijatan osećaj naročito kada se radi o struji hladnog vazduha. Zbog toga se propisuju maksimalne brzine strujanja vazduha u zoni boravka ljudi (slika 2.4). Na dijagramu na slici 4 može se uočiti da su dozvoljene brzine vrlo male, ali treba napomenuti da se radi o brzinama strujanja vazduha neposredno pored ljudi (u zoni njihovog boravka). Preporučuje se da u komfornoj klimatizaciji ta brzina ne prelazi 0,25 m/s, dok se u industrijskoj klimatizaciji i brzina vazduha od 0,35 m/s smatra prihvatljivom. Dalje od zone boravka ljudi (na primer na mestima ubacivanja vazduha u klimatizovani prostor) brzine strujanja vazduha mogu imati znatno veće vrednosti.



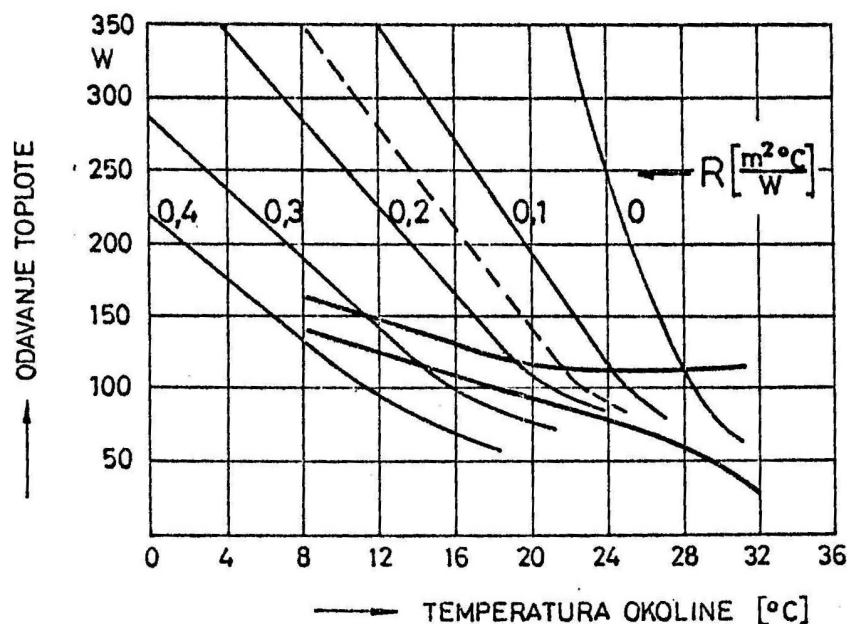
Slika 2.4 Maksimalne dozvoljene brzine strujanja vazduha u zoni boravka ljudi

UTICAJ ODEĆE

Odeća utiče na smanjenje odavanja toplote čoveka time što povećava otpor provođenju toplote od tela ka okolini. Temperatura površine odeće je niža od temperature tela, ali je površina razmene toplote (konvekcijom i zračenjem) nešto veća.

Vrlo je teško tačno odrediti vrednost otpora provođenja toplote odeće, jer on zavisi od mnogo nedovoljno definisanih elemenata (vrsta materijala, gustina tkanja, kroj, itd.). Da bi se lakše odredio uticaj vrste odeće na odavanje toplote čoveka i uslove ugodnosti, uvedena je mera za odevenost koja se označava sa “clo”. Odevenost označena sa 1 clo odgovara načinu odevanja tipičnog poslovnog čoveka, odnosno odeći čiji je otpor prolazu toplote $0,155 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Na slici 2.5 prikazan je uticaj odevenosti na odavanje toplote čoveka i postizanje termičke ravnoteže. Očito je da se pri određenoj fizičkoj aktivnosti čoveka, stanje termičke ravnoteže uspostavlja pri nižim temperaturama okoline ukoliko je čovek više odeven.



Slika 2.5 Odavanje toplote čoveka u zavisnosti od odevenosti i temperature vazduha

MERA TERMIČKE UGODNOSTI

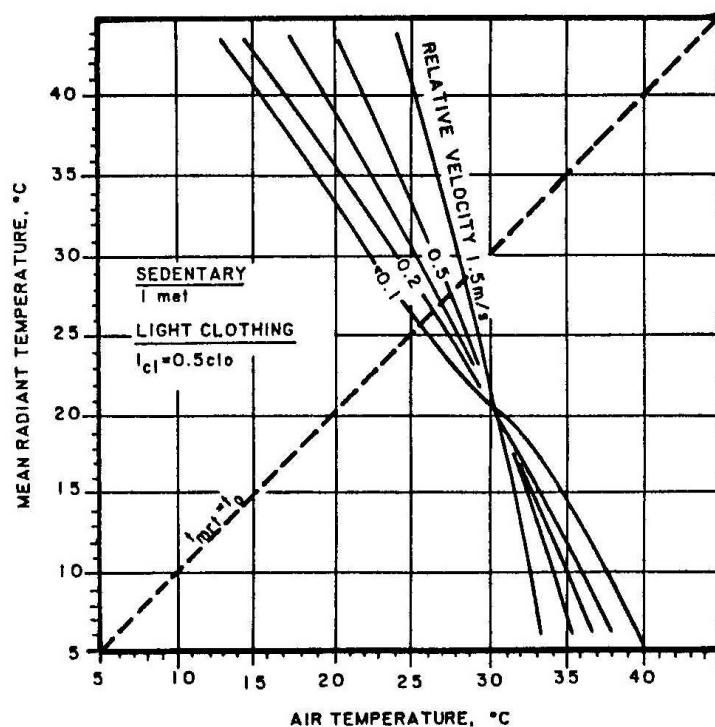
Kada se govori o termičkoj ugodnosti ljudi ne postoji adekvatan način da se ona deterministički odredi, već se obično procenjuje na osnovu osećaja većeg broja ljudi. Istraživanja se odvijaju tako što se grupa ljudi izloži dejstvu nekih termičkih uslova, i posle određenog perioda aklimatizacije beleži se njihova reakcija i ocena ugodnosti boravka u tim uslovima. Kasnije se vrši statistička obrada tih podataka i zaključuje pri kojim uslovima sredine najveći broj ljudi se ugodno oseća. Ovaj metod daje dobre rezultate kada se varira jedan uticajni parametar (na primer promena temperature: 18, 20, 22, 24°C). Međutim, problem je mnogo složeniji, jer na osećaj ugodnosti deluje više parametara pri čemu je njihovo dejstvo interaktivno (međuzavisno).

Bilo je mnogo pokušaja da se uvede jedna veličina kao pokazatelj termičkih uslova sredine:

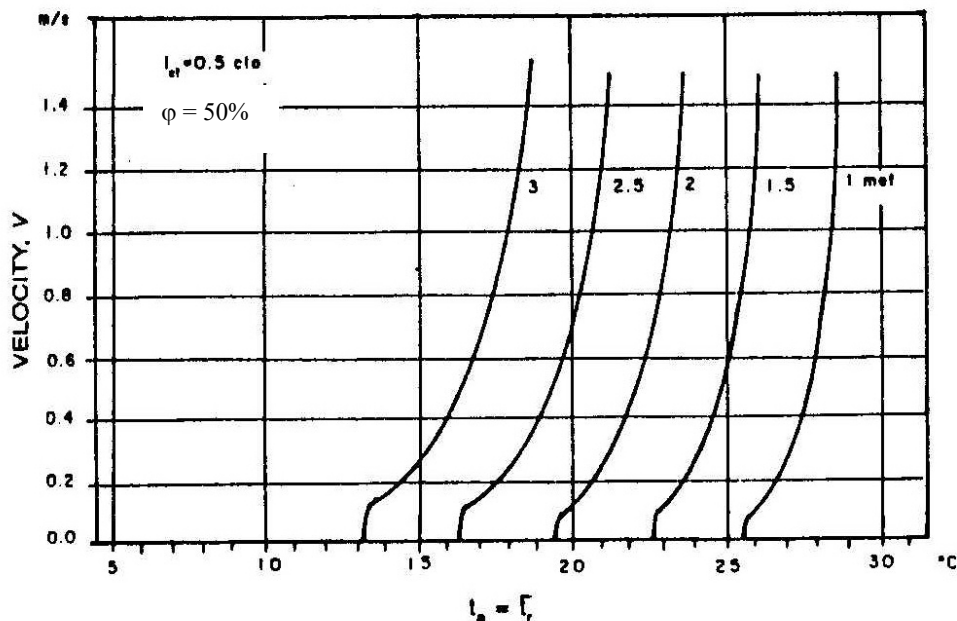
- kata broj;
- efektivna temperatura “ET”;
- standardna efektivna temperatura “SET”;
- operativna temperatura po vlažnom termometru “ t_{oh} ”;
- indeks okvašenosti kože, itd.,

međutim bez mnogo uspeha, jer makakva bila relacija između pojedinih relevantnih parametara (temperature vazduha, srednje temperature okolnih površina, vlažnosti i brzine strujanja vazduha, fizičke aktivnosti i odevenosti): linearna, eksponencijalna, stepena, logaritamska,... uvek se kombinacijom ekstremnih vrednosti pojedinih parametara može dobiti idealan (umeren) opšti pokazatelj uslova termičke ugodnosti.

S obzirom da je teško odrediti jedan pokazatelj nivoa termičke ugodnosti, u cilju boljeg sagledavanja kombinovanog uticaja više parametara, sprovedena su mnogobrojna istraživanja koja proučavaju uslove termičkog komfora pri promeni (variranju) više uticajnih parametara. Iz tih istraživanja proistekli su mnogobrojni nomogrami, od kojih su dva prikazana na slikama 2.6 i 2.7.



Slika 2.6 Termički uslovi ugodnosti u zavisnosti od brzine strujanja vazduha



Slika 2.7 Termički uslovi ugodnosti u zavisnosti od fizičke aktivnosti

Nomogram na slici 2.6 pokazuje međuzavisnost temperature vazduha, srednje temperature okolnih površina i brzine strujanja vazduha na uslove ugodnosti u klimatizovanom prostoru. Ovo istraživanje se odnosi na lako odevene ljude (0,5 clo) u sedećem položaju (aktivnost 1 met) pri relativnoj vlažnosti vazduha 50%.

Na slici 2.7 prikazani su uslovi ugodnosti u zavisnosti od temperature i brzine strujanja vazduha za različite stepene fizičke aktivnosti. Pri ovim eksperimentima ljudi su bili lako odeveni (odevenost 0,5 clo), relativna vlažnost vazduha je bila 50%, a srednja temperatura okolnih površina bila je jednaka trenutnoj temperaturi vazduha.

Generalni je stav da pri određivanju prihvatljivih termičkih uslova sredine treba težiti da svaki parametar bude u “razumnim” granicama za datu namenu objekta (određena aktivnost ljudi i uobičajena odevenost). Pri tome se treba pridržavati nekoliko osnovnih principa:

- što je viša temperatura vazduha, relativna vlažnost vazduha treba da je niža;
- što je niža temperatura vazduha, brzina strujanja vazduha treba da je manja;
- što je srednja temperatura okolnih površina viša u zimskom periodu, temperatura vazduha treba (može) da bude niža.

Osnovni zadatak postrojenja za klimatizaciju je da, bez obzira na poremećaje (spoljašnje i unutrašnje), postigne i održava u zatvorenom prostoru zadate vrednosti termičkih parametara sredine. To se može postići različitim sistemima za klimatizaciju, a zadatak projektanta je da odabere ono tehničko rešenje koje najbolje odgovara zahtevima i mogućnostima investitora.

I čovek ima sopstveni mehanizam termoregulacije kojim reaguje na promene termičkih parametara okoline (širenje/skupljanje perifernih krvnih sudova, intenziviranje metabolizma, pojačano znojenje, drhtanje i dr.), ali su mogućnosti samoregulacije relativno ograničene. Tada u “pomoć” stupa tehnika (u ovom slučaju klimatizacija) koja u potpunosti ili delimično neutrališe te poremećaje i smanjuje opseg variranja termičkih parametara sredine, tako da termoregulacija čoveka može da ih savlada u skladu sa individualnim potrebama.

3. DOBICI TOPLOTE I TOPLOTNO OPTEREĆENJE

UVODNA RAZMATRANJA

Analiza prenosa toplote kroz građevinski omotač zgrade ima za cilj da se što realnije izračunaju potrebe za grejanjem i hlađenjem unutrašnjeg prostora i da se prema tim potrebama odrede merodavni grejni i rashladni kapaciteti elemenata opreme termotehničkih instalacija.

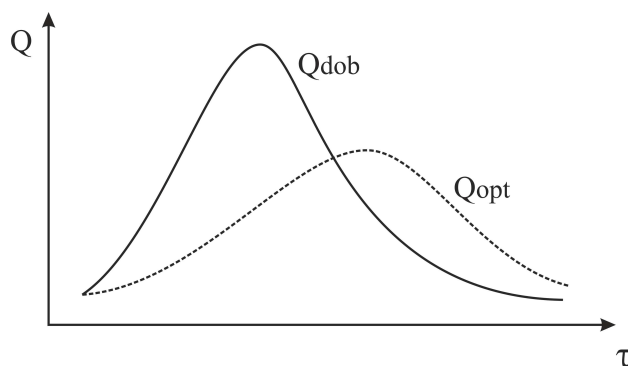
U zimskom periodu se u prostorijama u kojima borave ljudi održava temperatura vazduha koja je viša od spoljne, pa zgrada „gubi“ toplotu. U cilju održavanja konstantne temperature vazduha u prostoriji na nivou koji odgovara uslovima ugodnosti, potrebno je nadoknaditi toplotu koja se odaje okolini, tj. nadoknaditi gubitke toplote. Gubici toplote, prema tome, predstavljaju količinu toplote u jedinici vremena koju prostorija *odaje* okolini.

Kada je u pitanju letnji period, temperatura spoljnog vazduha je visoka, dani su pretežno dugi i vedri sa velikim uticajem Sunčevog zračenja. U zgradu dospeva značajna količina toplote, koju je potrebno eliminisati, kako bi se u prostorijama održavala niža temperatura vazduha od spoljne. **Dobici toplote** predstavljaju količinu toplote u jedinici vremena koju prostorija *prima* (bilo od spoljnih ili unutrašnjih izvora toplote).

Klimatizacija se obično vezuje za letnji period, odnosno za hlađenje vazduha, međutim sistem za klimatizaciju radi tokom cele godine, što znači da se u našim klimatskim uslovima vrši i zagrevanje vazduha zimi i hlađenje vazduha tokom leta.

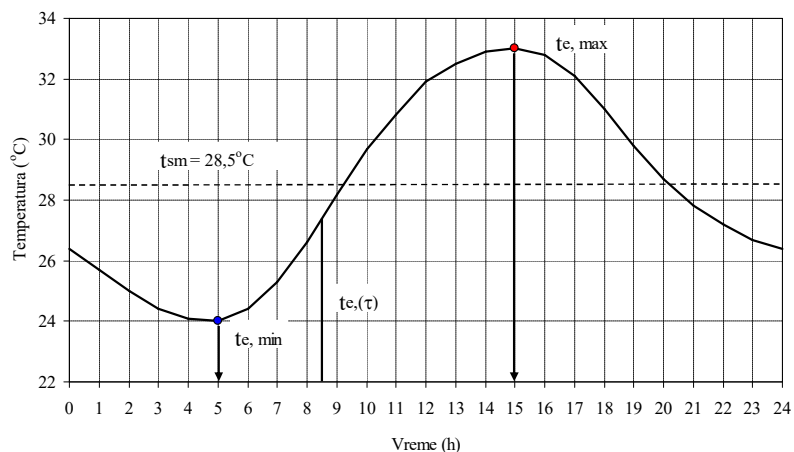
U zimskim uslovima izračunata količina toplote koju prostorija gubi pri projektnim uslovima (gubici toplote) odgovara količini toplote koju treba da nadoknadi sistem za grejanje. Proračun se vrši za stacionarne uslove razmene toplote prostorije sa okolinom, jer je razlika između maksimalne i minimalne temperature spoljnog vazduha tokom dana mala, a taj uticaj variranja spoljne temperature ublažen je efektom akumulacije toplote u omotaču prostorije. I uticaj Sunčevog zračenja je jako mali - dani su kratki i često sa povećanom oblačnošću.

Za letnji period se takođe definišu projektni uslovi, ali se proračun potrebne količine toplote koju je potrebno eliminisati ne može vršiti za stacionarne uslove, pre svega jer je: razlika ekstremnih dnevnih temperatura znatna i intenzitet Sunčevog zračenja je veliki i promenljiv tokom dana u veoma širokim granicama. Osim toga, zbog izražene nestacionarnosti tokom leta, pojave različitih izvora toplote i akumulacione sposobnosti zidova prostorije, dobitak toplote ne odgovara količini toplote koju treba eliminisati iz prostorije. Količina toplote u jedinici vremena, koju je tokom leta potrebno odvesti iz prostorije naziva se toplotno opterećenje. **Toplotno opterećenje** obuhvata količinu toplote koja zagreva isključivo sobni vazduh, pa na taj način ima direktnog uticaja na temperaturu vazduha u prostoriji i na kapacitet rashladnog postrojenja.



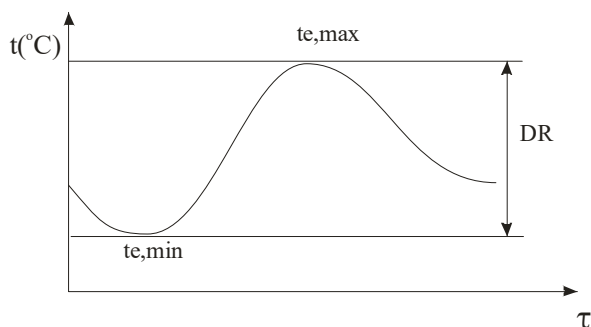
Slika 3.1 Razlika između toplotnog opterećenja i dobitaka toplote

Promenljivosti spoljne temperature vazduha može se pratiti tokom letnjeg perioda. Postavlja se pitanje kako definisati projektne uslove za leto. Za zimski period se usvaja spoljna projektna temperatura, dok se za letnje definiše **letnji projektni dan**. Letnji projektni dan sačinjavaju časovne vrednosti temperatura spoljnog vazduha tokom 24 časa (slika 3.2). Spoljna projektna temperatura za leto je maksimalna temperatura koja se javlja u toku letnjeg projektnog dana. Za Beograd letnja projektna temperatura iznosi 33°C.

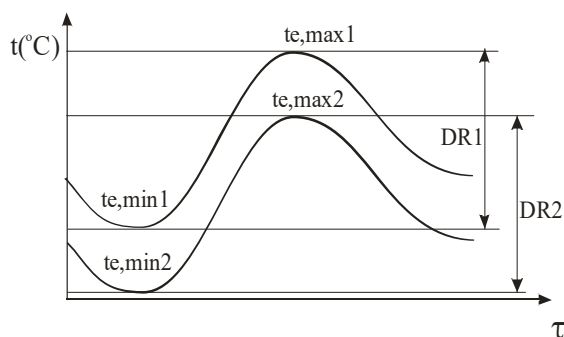


Slika 3.2 Letnji projektni dan za Beograd

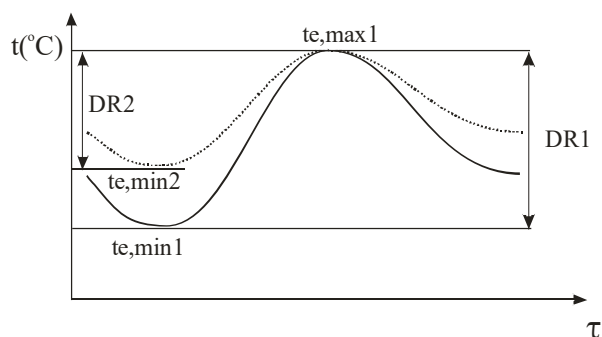
U Americi se letnji projektni dan definiše preko spoljne projektne temperature za leto $t_{e,max}$ i razlike između ekstremnih temperatura tokom dana, koja se naziva *Daily Range* ($DR = t_{e,max} - t_{e,min}$), što je prikazano na slici 3.3.



a) Način određivanja DR



b) Letnji projektni dan za dva mesta sa istim DR i različitim $t_{e,max}$



c) Letnji projektni dan za dva mesta sa različitim DR i istim $t_{e,max}$

Slika 3.3 Letnji projektni dan, spoljna projektna temperatura i Daily Range

Definiše se funkcija raspodele spoljne temperature u toku jednog dana $P(\tau)$, koja zapravo predstavlja procentualno odstupanje trenutne spoljne temperature od maksimalne vrednosti. Funkcija raspodele temperature je univerzalna funkcija koja se koristi za određivanje letnjeg projektnog dana za sve gradove u Americi:

$$t_e(\tau) = t_{e,\max} - \frac{P(\tau)}{100} \cdot DR \quad (3.1)$$

Potrebno je poznavati spoljnu projektну temperaturu za neko mesto i DR i na osnovu toga je moguće odrediti tok temperature za letnji projektni dan.

Kada je u pitanju određivanje spoljne projektne temperature za leto ($t_{e,\max}$), postoji nekoliko kriterijuma:

Stari kriterijum je obuhvatao samo letnje mesece - od juna do septembra, ukupno 2928 h i spoljna projektна temperatura je određivana kao temperatura koja se određeni broj časova dostigne ili prebaci:

1. Kriterijum 1% - $t_e \geq t_{e,\text{proj}} - 29 \text{ h/god}$,
2. Kriterijum 2,5% - $t_e \geq t_{e,\text{proj}} - 73 \text{ h/god}$,
3. Kriterijum 5% - $t_e \geq t_{e,\text{proj}} - 146 \text{ h/god}$.

Novi kriterijum se zasniva na bazi godišnjih časovnih vrednosti temperatura spoljnog vazduha i obuhvata 8760 h/god:

1. Kriterijum 0,4% - $t_e \geq t_{e,\text{proj}} - 35 \text{ h/god}$,
2. Kriterijum 1% - $t_e \geq t_{e,\text{proj}} - 88 \text{ h/god}$,
3. Kriterijum 2% - $t_e \geq t_{e,\text{proj}} - 175 \text{ h/god}$.

Dakle, prilikom proračuna toplotnog opterećenja, promenljivost temperature spoljnog vazduha se uzima u obzir preko časovnih vrednosti za letnji projektni dan, ali se ne sme zaboraviti intenzitet Sunčevog zračenja koji dospeva na površinu fasadnog zida, koji je takođe promenljiv tokom dana i koji utiče na temperatursko polje u zidu, a samim tim i na transmisiju toplote kroz zid. Taj problem se rešava uvođenjem sunčano-vazdušne temperature. Sunčano-vazdušna temperatura predstavlja fiktivnu temperaturu koju bi trebalo da ima spoljni vazduh da bi prouzrokovao toplotni fluks kroz površinu zida jednak onom toplotnom fluksu koji potiče od zbirnog uticaja Sunčevog zračenja i spoljne temperature vazduha. Zatim se uvodi pojam ekvivalentne temperaturske razlike, pomoću koje se izračunava toplotni fluks prilikom prolaza toplote kroz spoljni zid prostorije. Drugi, opštiji model koji služi za proračun toplotnog opterećenja kroz spoljne zidove (prolaz toplote kroz zid pri nestacionarnim uslovima) je Metod prenosnih funkcija (*Transfer Function Method*). On polazi od trouglastog delovanja impulsa temperature na spoljnoj površini i reakcije (odziva) na unutrašnjoj površini. Koriste se Laplasove transformacije i veoma složen matematički aparat. Kada se primenjuju Laplasove transformacije gubi se fizikalnost problema, pa je prilikom njegove primene potrebno dobro poznavanje fizikalnosti procesa razmene toplote. Prema nemačkim normativima koristi se metod proračuna preko ekvivalentnih temperaturskih razlika.

Osim što Sunčevo zračenje zagreva spoljnu površinu fasadnih zidova i krova objekta, ono prodire u prostoriju kroz transparentne površine (stakla prozora i vrata). Predata toplota od Sunčevog zračenja zagreva masu zidova i poda prostorije i kada temperatura unutrašnjih površina omotača prostorije poraste iznad temperature vazduha u prostoriji, zidovi i pod predaju određenu količinu toplote vazduhu u prostoriji, i na taj način povećavaju vrednost toplotnog

opterećenja. Da bismo mogli da proračunamo toplotno opterećenje neophodno je da znamo koliki se udeo toplote koji u prostoriju prodire Sunčevim zračenjem predaje vazduhu u prostoriji, a koliki udeo se akumulira u masi zidova i poda prostorije. Iz navedenog razloga, u proračun toplotnog opterećenja se uvode koeficijenti akumulacije toplote.

Toplotno opterećenje, kao i dobici toplote mogu se podeliti prema izvorima toplote i to na:

- spoljne:
 - kroz spoljne zidove (krov) prostorije,
 - kroz prozore (transmisijom i od Sunčevog zračenja),
 - infiltracijom spoljnog vazduha kroz procepe.
- unutrašnje:
 - od osvetljenja u prostoriji,
 - od električnih uređaja, mašina i aparata (disipacije)
 - od ljudi koji borave u prostoriji,
 - od susednih neklimatizovanih prostorija,
 - od tehnoloških procesa koji se odvijaju u prostoriji.

4. PRORAČUN TOPLOTNOG OPTEREĆENJA

4.1 Toplotno opterećenje transmisijom kroz zidove

Količina toplote koja prolazi kroz spoljni zid prostorije je promenljiva veličina, jer odavanje toplote spoljašnjih izvora varira u toku dana. Spoljna temperatura je stohastička veličina, ali se za letnji projektni dan ona može predstaviti odgovarajućom trigonometrijskom funkcijom. Posmatrajmo njen uticaj na prolaz toplote kroz spoljni zid debljine δ (slika 4.1):

1. Usled akumulacije toplote u zidu javlja se:

- fazno zakašnjenje toka količine toplote,
- smanjenje amplitude oscilacije temperature na unutrašnjoj površini zida u odnosu na spoljnu površinu zida.

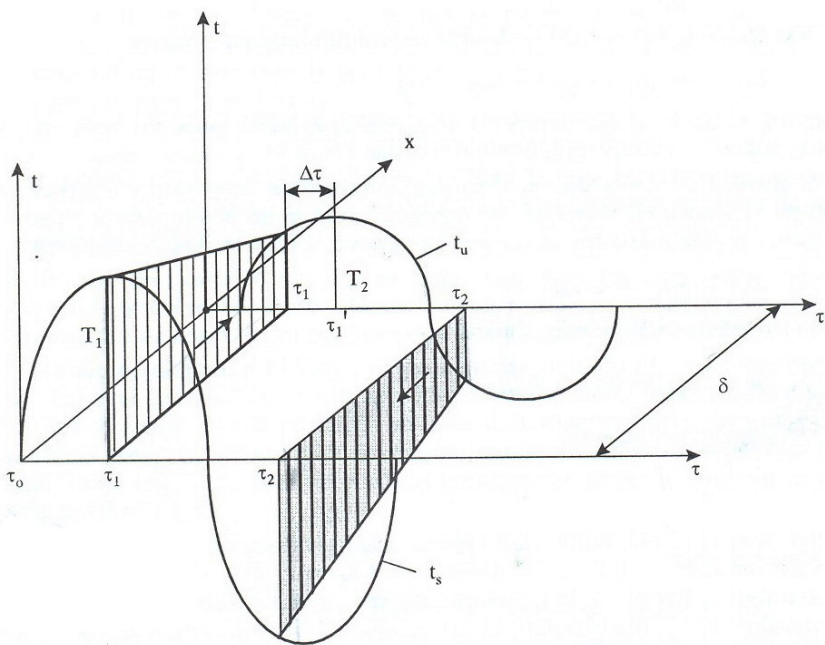
Vremensko kašnjenje $\Delta\tau$ javlja se na unutrašnjoj strani zida u odnosu na spoljnu stranu. Faktor smanjenja amplitude oscilacije temperature je Δf . U dva vremenska trenutka obeleženi su tokovi temperaturskih promena (šrafirane površine) kako bi se videla promena temperaturskog gradijenta $\frac{\partial t}{\partial x}$:

τ_1 - toplotni fluks sa spoljne strane je usmeren ka unutrašnjoj i

τ_2 - toplotni fluks sa unutrašnje strane je usmeren ka spoljašnjoj strani.

Odnos amplituda temperatura krivih na spoljnoj i unutrašnjoj strani zida A_s/A_u zove se faktor prigušenja amplitude:

$$\frac{A_s}{A_u} = \frac{1}{\Delta f}$$



Slika 4.1 Transport toplote kroz spoljni zid

Na osnovu toplotne provodljivosti i debljine zida može se izračunati vremensko kašnjenje temperaturske oscilacije na unutrašnjoj strani zida u odnosu na spoljnu. Prolaz toplote je nestacionaran, ali periodično promenljiv proces. Može se napisati izraz za toplotni fluks kroz zid jedinične površine (specifični toplotni fluks):

$$q(\tau) = \alpha_i (t_{zi}(\tau) - t_i) = \alpha_i [(t_{zi}(\tau) - t_{zm}) + (t_{zm} - t_i)] \quad [\text{W/m}^2] \quad (4.1)$$

gde je:

α_i - koeficijent prelaza toplote sa unutrašnje strane zida,

t_{zi} - trenutna temperatura unutrašnje strane zida,

t_{zm} - srednja temperatura unutrašnje površine zida,

t_i - temperatura vazduha u prostoriji.

S obzirom na periodičnost promene temperature, ceo nestacionaran slučaj posmatra se kao kombinacija stacionarnog i nestacionarnog prenosa toplote. Stacionaran prenos je posledica razlike srednje temperature spoljnog vazduha i unutrašnje strane zida. Temperaturske oscilacije spoljnog vazduha u odnosu na srednju dnevnu temperaturu predstavljaju se trigonometrijskom funkcijom:

$$(t_e(\tau) - t_{em}) = T_0 \cdot \cos[\omega(\tau - \tau_0)] \quad (4.2)$$

gde je:

$t_e(\tau)$ - trenutna spoljna temperatura,

t_{em} - srednja dnevna spoljna temperatura,

T_0 - amplituda spoljne temperature,

τ - vreme za koje se računa toplotno opterećenje,

τ_0 - vreme javljanja maksimuma spoljne temperaute,

ω - ugaona brzina temperaturskih oscilacija.

Oscilacije temperature na unutrašnjoj strani zida prema srednjoj temperaturi zida tokom 24h:

$$(t_{zi}(\tau) - t_{zm}) = T_0 \cdot f_i \cdot \cos[\omega(\tau - \tau_0) - \omega\tau_i] \quad (4.3)$$

gde je:

f_i - faktor smanjenja amplitude usled akumulacione sposobnosti zida,

τ_i - vremensko kašnjenje na unutrašnjoj strani zida.

Iz jednačina (2) i (3) dobija se veza između spoljne temperature i temperature unutrašnje strane zida:

$$(t_{zi}(\tau) - t_{zm}) = f_i \cdot (t_e(\tau - \tau_i) - t_{em}) \quad (4.4)$$

Iz jednačina (1) i (4) dobija se toplotni fluks u trenutku τ :

$$q(\tau) = \alpha_i [f_i (t_e(\tau - \tau_i) - t_{em}) + (t_{zm} - t_i)] \quad (4.5)$$

Da bi se eliminisala nepoznata temperatura t_{zm} posmatra se stacionaran prenos toplote:

$$q_{stac} = \alpha_i (t_{zm} - t_i) = k \cdot (t_{em} - t_i) \quad (4.6)$$

gde je:

k - koeficijent prolaza topline kroz zid.

Iz jednačina (5) i (6) eliminiše se nepoznata t_{zm} :

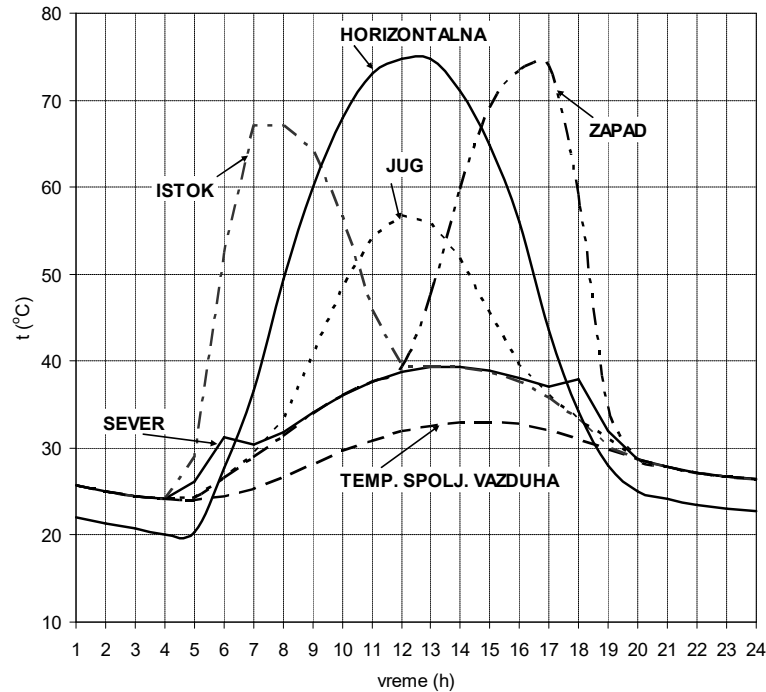
$$q(\tau) = \alpha_i f_i (t_e(\tau - \tau_i) - t_{em}) + k \cdot (t_{em} - t_i) \quad (4.7)$$

Ako se uvede korigovani koeficijent $f = \frac{\alpha_i \cdot f_i}{k}$, onda je konačan izraz za nestacionaran prenos toplote:

$$q(\tau) = k \cdot [f \cdot (t_e(\tau - \tau_i) - t_{em}) + (t_{em} - t_i)] \quad (4.8)$$

4.2 Sunčano-vazдушna temperatura

Već je ranije bilo reči o sunčano-vazdušnoj temperaturi. Po definiciji, sunčano-vazдушna temperatura predstavlja fiktivnu temperaturu koju bi trebalo da ima spoljni vazduh da bi se prouzrokovao toplotni fluks kroz površinu zida jednak toplotnom fluksu koji potiče od zbirnog uticaja Sunčevog zračenja i spoljne temperature vazduha (slika 4.2).



Slika 4.2 Tok sunčano- vazdušnih temperatura za juli mesec i 45° SGŠ

Jednačina toplotnog bilansa za spoljnu površinu zida glasi:

$$\alpha_e \cdot (t_s - t_{ze}) = \alpha_e \cdot (t_e - t_{ze}) + a \cdot I \quad (4.9)$$

gde je:

$$t_s = t_e + \frac{a \cdot I}{\alpha_e} + \frac{e \cdot \Delta R}{\alpha_e} \text{ - sunčano-vazдушna temperatura,}$$

α_e - koeficijent prelaza toplote sa spoljnog vazduha na spoljnu površinu zida,

t_e - temperatura spoljnog vazduha,

t_{ze} - temperatura spoljne površine zida,

a - apsorptivnost Sunčevog zračenja sa spoljne strane zida,

I - intenzitet Sunčevog zračenja,

e - emisivnost površine,

ΔR - razlika između dozračenog dugotalasnog zračenja na površinu i emitovanog zračenja apsolutno crnog tela na temperaturi površine zida.

Maksimalne vrednosti intenziteta Sunčevog zračenja i spoljne temperature ne javljaju se istovremeno. Sunčano-vazдушna temperatura nije maksimalno zabeležena temperatura (kao što ni spoljna projektna nije maksimalna temperatura spoljnog vazduha), već su to one časovne vrednosti koje mogu biti prevaziđene samo u određenom procentu slučajeva, u periodu od više godina za koje je vrešeno posmatranje i proračun. Na slici 4.2 prikazan je tok sunčano-vazdušnih temperatura za juli mesec, 45° SGŠ i različite orijentacije zidova.

4.3 Ekvivalentna temperaturska razlika

Kada u jednačinu (8) uvedemo umesto trenutne spoljne temperature sunčano-vazdušnu temperaturu, dobija se izraz:

$$q(\tau) = k \cdot [f \cdot (t_s(\tau - \tau_i) - t_{sm}) + (t_{sm} - t_i)] \quad (4.10)$$

Kako bi bilo moguće da se nestacionaran prolaz toplote računa kao stacionaran, uvodi se fiktivna temperatura:

$$t_{f\tau} = f(t_s(\tau - \tau_i) - t_{sm}) + t_{sm} \quad (4.11)$$

Sada se može definisati ekvivalentna temperaturska razlika, koja se koristi pri proračunu toplotnog opterećenja kroz zidove i krovove:

$$\Delta t_{ekv}(\tau) = f(t_s(\tau - \tau_i) - t_{sm}) + t_{sm} - t_i \quad (4.12)$$

Ekvivalentna temperaturska razlika je fiktivna razlika temperatura koja obuhvata:

- fizička svojstva zidova ($\delta, \lambda, \rho, c_p, \varepsilon \dots$)
- sve posledice osobina zidova (akumulaciju toplote, vremensko kašnjenje transporta toplote, smanjenje amplitude temperaturske oscilacije)
- spoljne izvore toplote (spoljnu temperaturu i Sunčevo zračenje, koje zavisi od orijentacije zida),
- unutrašnje uslove (željenu temperaturu vazduha u prostoriji).

Toplotno opterećenje koje nastaje prilikom nestacionarnog prolaza toplote kroz zid računa se za svaki sat preko časovnih vrednosti ekvivalentne temperaturske razlike:

$$Q_z(\tau) = A \cdot k \cdot \Delta t_{ekv}(\tau) \quad (4.13)$$

Časovne vrednosti ekvivalentnih temperaturskih razlika daju se tabelarno za različite vrste i različite orijentacije zidova.

Ukoliko se tablične vrednosti koriste pri drugačijim uslovima (različita temperatura vazduha u prostoriji, drugačija zamućenost atmosfere, različita srednja dnevna temperatura spoljnog vazduha ili neki drugi mesec u godini), neophodna je korekcija tabličnih vrednosti:

$$\Delta t_{ekv} = [\Delta t_{ekv,T} + (t_{em} - 28,5) + (26 - t_i) + a_T] \cdot \frac{I_{\max}}{I_{\max, juli}} \quad (4.14)$$

5 SUNČEVO ZRAČENJE

Sa aspekta klimatizacije prostorija, Sunčevo zračenje u letnjem periodu je štetno, zato što prouzrokuje prekomerno zagrevanje prostorija, tako da je potreban utrošak energije za hlađenje kako bi se eliminisala toplota koja potiče od Sunčevog zračenja. Svako korišćenje energije, osim troškova koji su neizbežni, izaziva i određene ekološke probleme.

Sunce je zvezda patuljak - velika užarena gasovita lopta prečnika približno 1,4 miliona km. Zemlja se obrće oko Sunca po eliptičnoj putanji sa vrlo malim ekscentricitetom ($e = 0,017$) tako da se udaljenost Zemlje i Sunca menja vrlo malo tokom godine. Srednja udaljenost Zemlje i Sunca je oko 150 miliona km. U perihelu (tačka eliptične putanje najbliža fokusu), početkom januara, Zemlja je 1,67% bliža, a u afelu (tačka eliptičke putanje najudaljenija od fokusa), početkom jula, Zemlja je 1,67 % udaljenija od Sunca od prosečne vrednosti. Međutim, na intenzitet Sunčevog zračenja na Zemljinoj površini utiču i deklinacija Zemlje (nagnutost ose Zemlje u odnosu na putanju), kao i stanje u atmosferi.

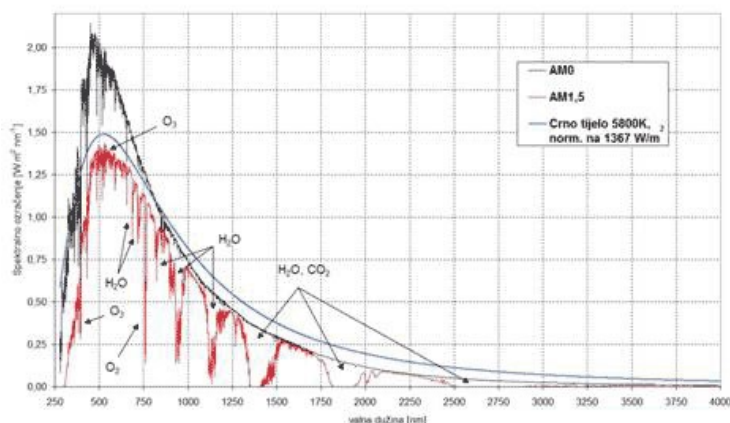
Sunce se sastoji se uglavnom od vodonika (80%) i helijuma (19%). U unutrašnjosti Sunca vodonik se nuklearnim reakcijama fuzije pretvara u helijum, što rezultira oslobađanjem velikih količina energije. Usled tih reakcija temperatura u unutrašnjosti Sunca premašuje 20 miliona K. Međutim, to nije temperatura koja određuje elektromagnetska svojstva Sunčevog zračenja, jer zračenje iz unutrašnjosti u velikom delu apsorbuje sloj negativnih vodonikovih jona blizu površine. Opšte je prihvaćena teorija po kojoj je temperatura površine Sunca oko 6000°C , a spektar Sunčevog zračenja približno odgovara spektru crnog tela na temperaturi od 5760 K. Prema tome, temperatura od 5760 K se može uzeti kao efektivna temperatura Sunčeve površine, a primenom Plankovog zakona moguće je odrediti energijski spektar Sunčevog zračenja. Snaga kojom Sunce zrači sa svoje površine iznosi oko $95 \cdot 10^{24}$ W i to zračenje sastoji se od različitih talasnih dužina. Većina Sunčevog zračenja (99%) nalazi se u spektru od 0,275 do 4,6 μm . Maksimum Sunčevog zračenja je na talasnoj dužini od 0,48 μm . Spektar Sunčevog zračenja deli se na 3 karakteristična dela: ultraljubičasto zračenje (0,12 – 0,38 μm), vidljivo (0,38 – 0,76 μm) i infracrveno ($> 0,76 \mu\text{m}$). Ultraljubičasti deo iznosi oko 9%, vidljivi oko 41,5% i infracrveni oko 49,5% ukupne energije Sunčevog zračenja (slika 5.1).

Sunčevo zračenje na ulazu u Zemljinu atmosferu nazivamo ekstraterestrijskim zračenjem. Kako se udaljenost Zemlje od Sunca menja tokom godine i ekstraterestrijsko zračenje (iradijansa) se menja od najmanje vrijednosti 1321 W/m^2 do najveće 1412 W/m^2 .

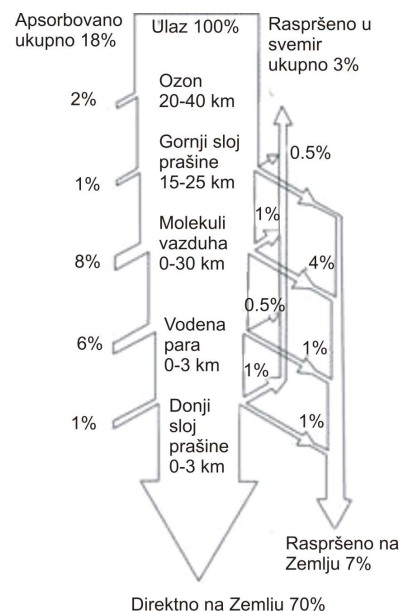
Zračenje na granici Zemljine atmosfere upravno na Sunčeve zrake za srednju udaljenost Zemlje od Sunca naziva se Solarna konstanta. Na osnovu satelitskih merenja, utvrđeno je da *Solarna konstanta* nije konstanta, već se menja kako se i Sunčeva aktivnost menja. Sunčeva aktivnost ima u proseku 11-godišnji ciklus (tzv. Schwabe-ov ciklus), a na zračenje utiču i drugi fenomeni, kao što je 27-dnevna rotacija Sunca oko svoje ose, Sunčeve pege i erupcije. Svetska meteorološka organizacija je 1981. godine standardizovala Solarnu konstantu čija vrednost iznosi $I_0 = 1367 \text{ W/m}^2$.

Pri prolasku kroz Zemljinu atmosferu Sunčevo zračenje slabi u zavisnosti od dužine puta zraka do površine Zemlje (što je funkcija geografske širine, doba godine, doba dana, nadmorske visine i zamućenosti atmosfere). Intenzitet Sunčevog zračenja na površini Zemlje kreće se u granicama od $100 - 1000 \text{ W/m}^2$. Na slici 7 prikazano je slabljenje Sunčevog zračenja pri prolasku kroz atmosferu.

Najveći intenzitet Sunčevog zračenja javlja se u delu talasne dužine zračenja koja odgovara vidljivom zračenju u oblasti zelene boje - 0,48 μm .



Slika 5.1 Spektar Sunčevog zračenja



Slika 7 Slabljenje Sunčevog zračenja pri prolasku kroz atmosferu

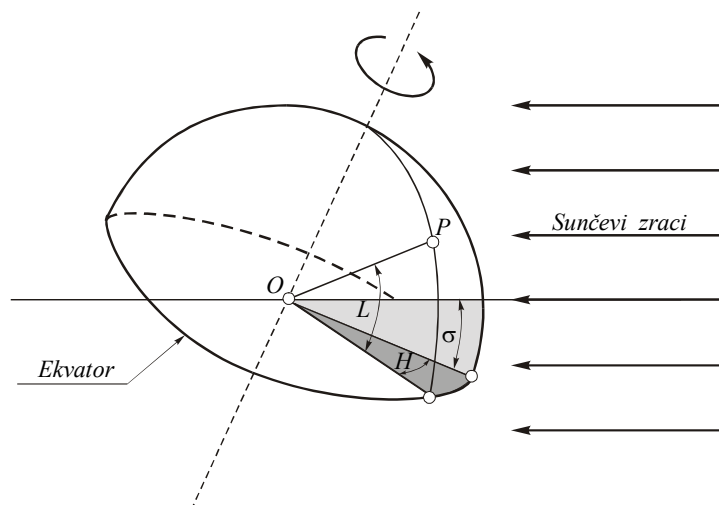
SOLARNA GEOMETRIJA

Intenzitet Sunčevog zračenja koji dospeva na površinu Zemlje zavisi od mesta, odnosno položaja posmatrane lokacije. Osa oko koje Zemlja rotira nagnuta je prema ravni njene ekliptike (putanje oko Sunca) za $23,5^\circ$. Zbog nagiba ose rotacije, Zemlja ima 5 klimatskih pojaseva. Položaj nekog mesta na Zemljinoj površini određen je geografskom širinom, časovnim uglom i deklinacijom (slika 5.2). Deklinacija Zemlje σ predstavlja ugao između linije koja povezuje centar Sunca i Zemlje i njene projekcije na ekvatorijalnu ravan. Časovni ugao H predstavlja ugao koji se meri u ekvatorijalnoj ravni između projekcije linije koja spaja centar Zemlje sa tačkom P (posmatrane lokacije) na ekvatorijalnu ravan i projekcije na ekvatorijalnu ravan linije koja povezuje centar Sunca i Zemlje. Geografska širina L je ugao između linije koja povezuje centar Zemlje i tačku P i njene projekcije na ekvatorijalnu ravan.

U tabeli 5.1 prikazana je deklinacija Zemlje tokom godine.

Tabela 5.1 Deklinacija Zemlje u pojedinim mesecima tokom godine.

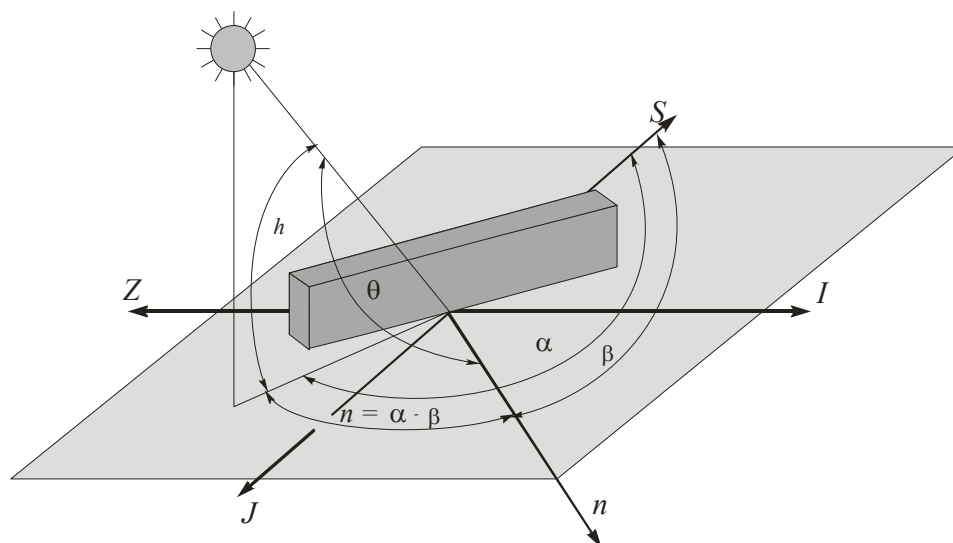
| mesec | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|--------------|-------|-------|-----|------|------|------|------|------|-----|-------|-------|-------|
| σ [°] | -20.0 | -10.8 | 0.0 | 11.6 | 20.0 | 23.4 | 20.6 | 12.3 | 0.0 | -10.5 | -19.8 | -23.4 |



Slika 5.2 Deklinacija Sunca, časovni ugao i geografska širina

UGLOVI POLOŽAJA SUNCA

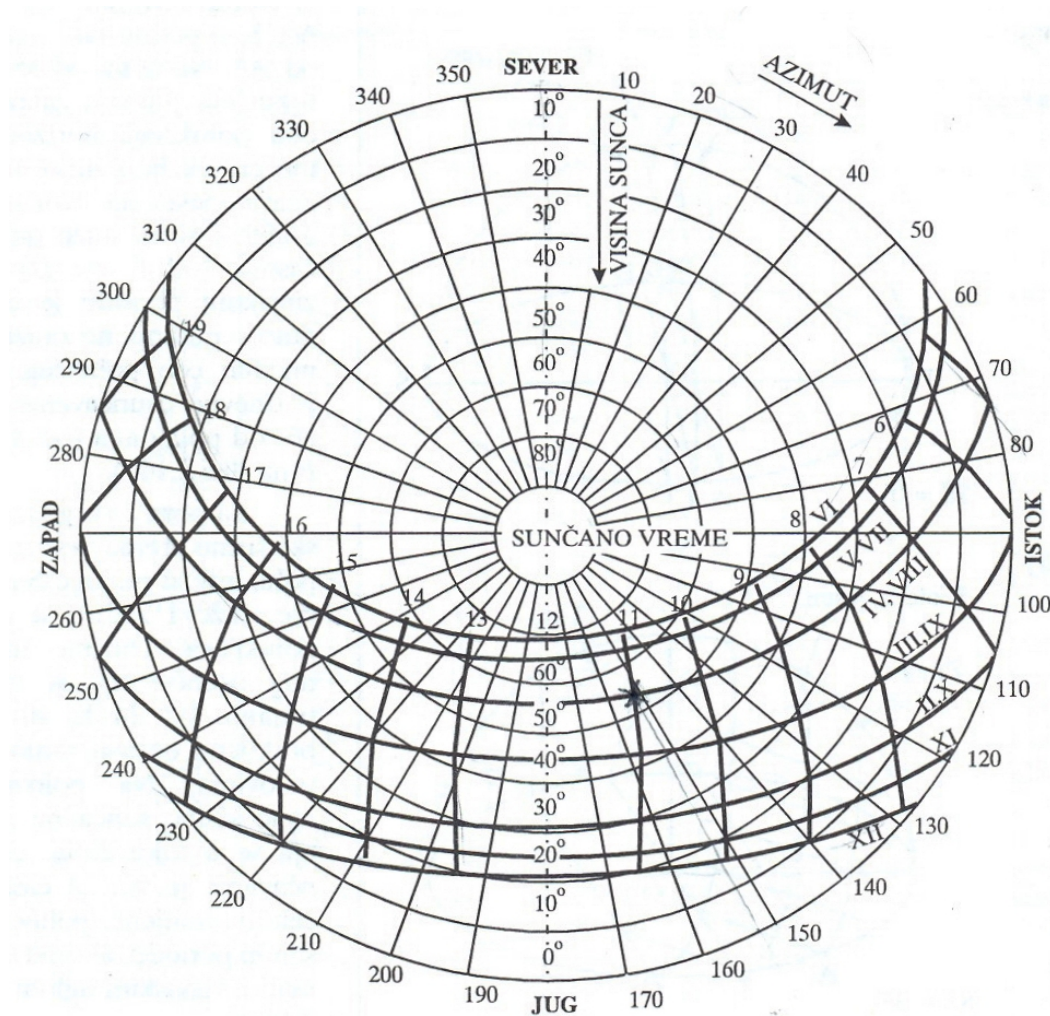
Trenutni položaj Sunca prema nekoj tački na Zemlji određuje se pomoću dva ugla: ugla visine Sunca h i azimuta Sunca α (slika 5.3).



Slika 5.3 Uglovi položaja Sunca : upadni ugao θ , azimut Sunca α , ugao visine Sunca h i azimut površine β

Ugao visine Sunca je ugao između direktnog Sunčevog zraka i njegove horizontalne projekcije. Meri se u vertikalnoj ravni. Azimut Sunca je ugao između pravca severa i horizontalne projekcije Sunčevog zraka i meri se u horizontalnoj ravni. Upadni gao je ugao koji direktan Sunčev zrak zaklapa sa normalom na posmatranu vertikalnu površinu. Azimut površine je ugao između pravca severa i normale na posmatranu vetikalnu površinu - meri se u horizontalnoj ravni, kao i azimut Sunca.

Za različite proračune, kao i za proračun toplotnog opterećenja koje potiče od prodora direktnog Sunčevog zračenja kroz staklo, koristi se dijagram putanje Sunca, koji se konstruiše za određenu geografsku širinu. Na slici 5.4 prikazan je dijagram putanje Sunca (na kome se mogu očitati uglovi položaja Sunca) se severnu geografsku širinu od 45° .



Slika 5.4 Dijagram putanje Sunca za 45° SGŠ

SUNČEVO ZRAČENJE I FIZIČKA SVOJSTVA ATMOSFERE

Propustljivost atmosfere za Sunčevo zračenje zavisi od njene zamućenosti, usled čega dolazi do gubitka u energiji **direktnog** Sunčevog zračenja. Gubici nastaju usled:

- sudara Sunčevih zraka sa molekulima O_2 , N_2 , vodene pare i česticama prašine (kada najviše oslabe zraci manjih talasnih dužina - ultraljubičasto zračenje),
- selektivne apsorpcije Sunčevih zraka od strane troatomnih gasova (najviše CO_2 i vodene pare H_2O) kada slabe ili se potpuno gube zraci iz crvenog dela spektra vidljivog zračenja i infracrvenog dela spektra.

Ovi gubici su utoliko veći ukoliko zraci prolaze duži put kroz atmosferu (npr. kada je Sunce bliže horizontu). Deo energije Sunca koji je apsorbovan u atmosferi dolazi opet do Zemlje u vidu difuznog zračenja neba. Difuzno zračenje varira u toku dana i zavisi od:

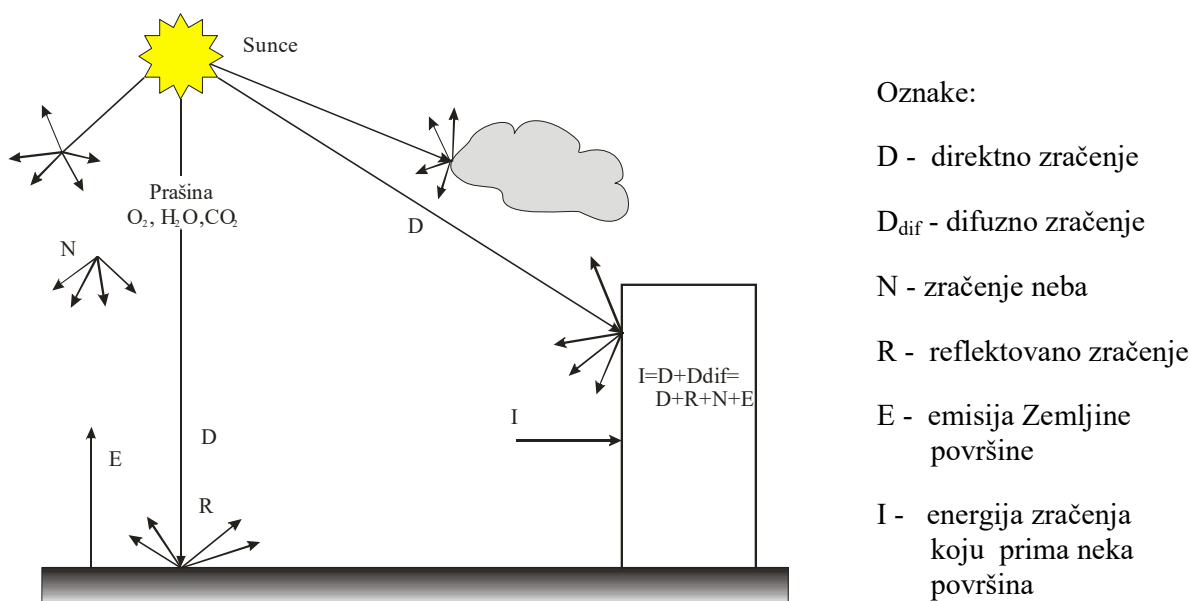
- visine Sunca,
- vremenskih prilika,

- intenziteta oblačnosti,
- zagađenosti vazduha česticama nečistoća.

Globalnim zračenjem se naziva zbir direktnog i difuznog Sunčevog zračenja koje dospeva na Zemljinu površinu na horizontalnu ravan.

Šematski prikaz prolaza Sunčevog zračenja kroz atmosferu prikazan je na slici 5.5.

Refleksija Sunčevih zraka na površini Zemlje nastaje od ukupnog zračenja koje dospe na Zemljinu površinu. Jedan deo se apsorbuje, a jedan deo se reflektuje. Odnos zračenja koji se reflektuje i energije koja dospeva na zemlju naziva se albedo. Najveće vrednosti albeda imaju površina snega i mirna vodena površina.



Slika 5.5 Šematski prikaz prolaza Sunčevog zračenja kroz atmosferu

Linkeu uvodi faktor zamućenosti atmosfere i koristi pojam vazdušne mase. Pod jedinicom vazdušene mase podrazumeva se debljina vazdušnog sloja koja odgovara zenitalnom položaju Sunca u mestu na nivou morske površine. Određena vrednost vazdušne mase označava dužinu puta koji treba da pređu Sunčevi zraci kroz atmosferu, u odnosu na jediničnu masu, koja odgovara najkraćem mogućem putu. Vrednost vazdušne mase na nivou morske površine zavisi od:

- ugla visine Sunca,
- geografske širine i
- doba dana.

Međutim, vrednost vazdušne mase zavisi i od nadmorske visine mesta, pa tako planinski predeli imaju manje vrednosti vazdušne mase.

Po Linkeu, faktor zamućenosti atmosfere pokazuje koliko puta treba uvećati dužinu puta koju Sunčevi zraci treba da pređu kroz sasvim čistu i suhu atmosferu, da bi oslabili onoliko koliko oslabe pri prolasku kroz stvarnu, zamućenu atmosferu. Zamućenost atmosfere se menja tokom godine. Leti je najveća, jer je veće isparavanje vode sa Zemljine površine, ima više prašine u vazduhu i izraženija su verzikalna strujanja vazduha, koja prašinu podižu u više slojeve

atmosfera. Faktor zamućenosti daje se po mesecima u godini za neko mesto. Za Beograd se vrednosti kreću od 4,5 u julu mesecu do 3 u decembru (srednje mesečne vrednosti).

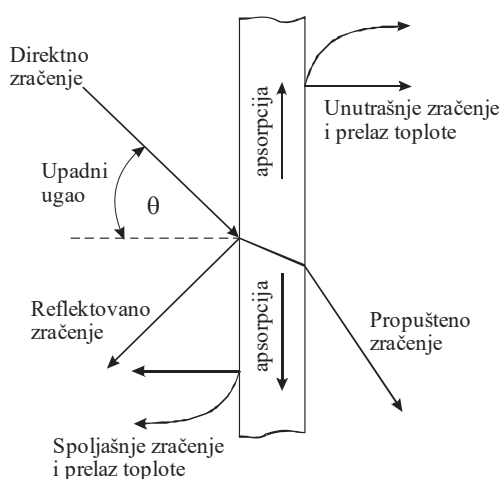
PRODOR SUNČEVIH ZRAKA KROZ STAKLO

Sunčev zrak koji dospeva na spoljnu površinu stakla delimično se reflektuje, apsorbuje i propušta:

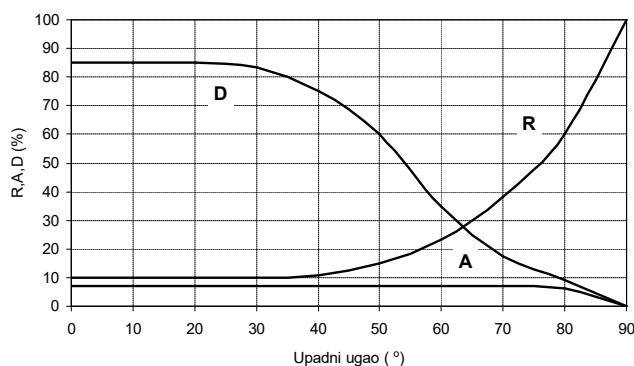
$$r + a + d = 1 \quad (5.1)$$

Odnos energija zračenja koje se reflektuje, apsorbuje i propusti zavisi od:

1. Upadnog ugla Sunčevih zraka i
2. Vrste stakla.



Slika 5.6 Bilans toplote Sunčevog zračenja za prozorsko staklo



Slika 5.7 Odnos propustljivosti D, apsorpcije A i refleksije R direktnog Sunčevog zračenja za obično staklo debljine 3 mm

Upadni ugao se menja za određenu geografsku širinu i zavisi od:

- doba godine,
- doba dana i
- orijentacije prozora.

Za upadne uglova koji su manji od 40°, propustljivost D je skoro konstantna i iznosi 87%. apsorbovani deo energije skoro i da ne zavisi od upadnog ugla i iznosi oko 6%. U unutrašnjost prostorije se konvekcijom i zračenjem prenosi približno 1/3 apsorbovane energije.

Za difuzno zračenje propustljivost, apsorpcija i refleksija su konstantne veličine koje ne zavise od upadnog ugla (difuzno zračenje je raspršeno zračenje i prostire se u svim pravcima) i iznose: $D = 0,79$, $A = 0,06$ i $R = 0,15$.

Za specijalna ostakljenja (apsorpciono, refleksiono staklo) oblik krivih na slici 5.7 može biti potpuno drugačiji. Poznatiji proizvođači stakla imaju ove dijagrame za svoja stakla.

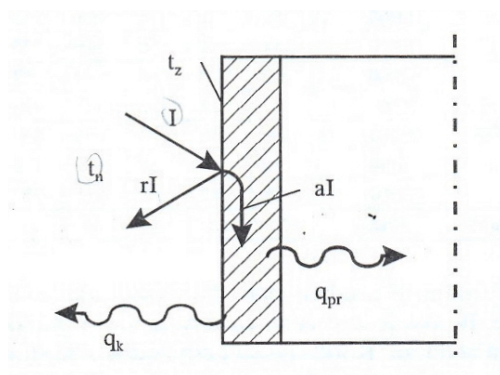
6 AKUMULACIJA TOPLOTE U ZIDOVIMA

Sunčevi zraci koji prodru u prostoriju kroz staklo prozora i dospeju na zidove se delimično apsorbuju (aI) a delimično reflektuju (rI). Apsorbovani deo energije zagreva površinu zida, tako da dolazi do:

- konvektivnog prelaza toplote na sobni vazduh
- provođenje toplote u unutrašnjost zida.

Deo energije Sunčevog zračenja koji se provodi ka unutrašnjosti zida nazivamo **akumulisanom toplotom**, dok deo koji se preda vazduhu prostorije usled konvekcije predstavlja **toplotno opterećenje** od Sunčevog zračenja koje je potrebno eliminisati iz prostorije.

Na slici 6.1 prikazana je raspodela Sunčevog zračenja koja dospe kroz prozor na unutrašnje zidove prostorije.



Slika 6.1 Raspodela Sunčevog zračenja koja dospe kroz prozor na unutrašnje zidove prostorije

Ako bi se u obzir uzeo dobitak od Sunčevog zračenja kroz prozor, a ne toplotno opterećenje, onda bi hladnjak u klimatizacionom postrojenju bio predimenzionisan.

Matematički model prenosa toplote od Sunčevog zračenja kroz prozor uvodi sledeće pretpostavke:

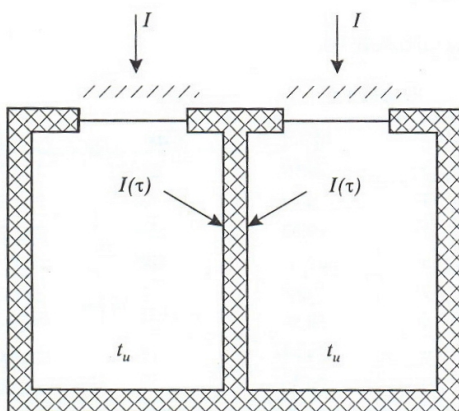
1. Klimatizovane prostorije koje razdvaja unutrašnji zid imaju jednaku i konstantnu temperaturu;
2. Obe strane zida apsorbuju jednake količine Sunčevog zračenja;
3. Unutrašnji zid je homogen;
4. Sunčevo zračenje koje apsorbuje svaka strana zida dato je trigonometrijskom funkcijom:

$$F(\tau) = f[I_d \sin \omega_d (\tau - \tau_d) + I_D \sin \omega_D (\tau - \tau_D)] \quad (6.1)$$

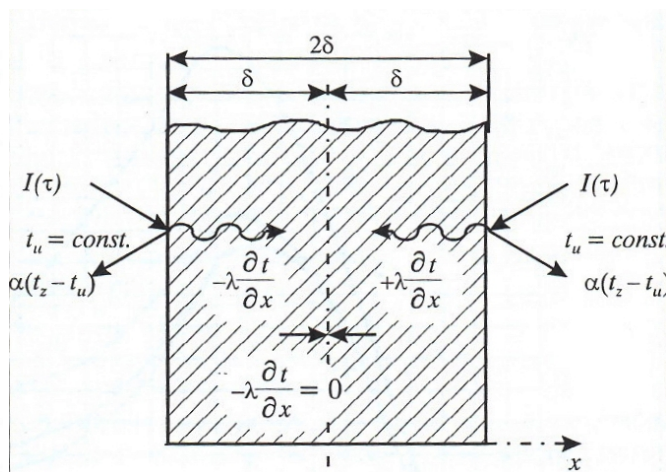
gde su:

I_d, I_D - maksimalno difuzno, odnosno direktno zračenje Sunca,
 τ - vreme u toku dana,
 τ_d, τ_D - vreme početka difuznog, odnosno direktnog zračenja,
 f - deo ukupnog zračenja koji apsorbuje jedinica površine posmatranog zida.

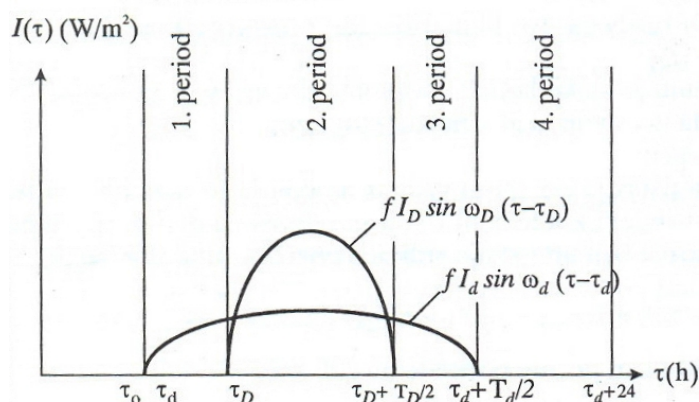
5. Provođenje toplote se odvija u pravcu normale na zid;
6. Debljina zida je $2 \cdot \delta$.



Slika 6.2 Susedne klimatizovane prostorije



Slika 6.3 Bilans na površinama unutrašnjeg zida



Slika 6.4 Raspodela Sunčevog zračenja koje dospeva na obe površine unutrašnjeg zida

Polazi se od Furijeove jednačine prostiranja toplote:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \cdot \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \quad (6.2)$$

Granični uslovi se dobijaju iz toplotnog bilansa i uslova simetričnosti:

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial x} + \alpha \cdot (t - t_i) \Big|_{x=0} = F(\tau) \quad (6.3)$$

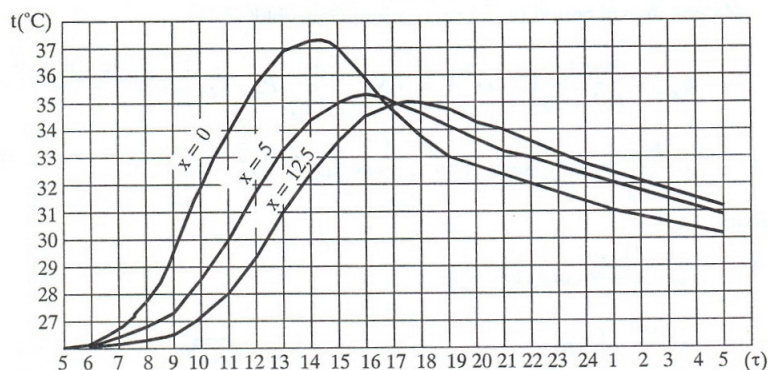
$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=\delta} = 0 \quad (6.4)$$

Početni uslov je: temperatura unutrašnjeg zida pre početka Sunčevog zračenja jednaka je temperaturi unutrašnjeg vazduha klimatizovanih prostorija:

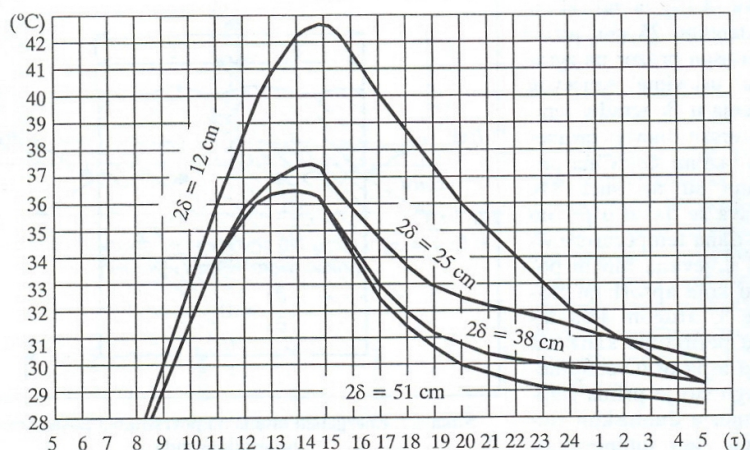
$$t(x, \tau_d) = t_i = \text{const} \quad (6.5)$$

Rešenje jednačine (6.2) dobija se u vidu beskonačnog reda. Rešenje se traži za svaku stranu sveta posebno i za svaki period Sunčevog zračenja (od prvog do četvrtog perioda).

Na slici 6.5 prikazana je temperatura zida na površini ($x=0$) i u unutrašnjim slojevima, a na slici 6.6 temperatura površina zidova različitih debljina.



Slika 6.5 Temperatura zida na površini ($x=0$) i u unutrašnjim slojevima



Slika 6.6 Temperatura površina zidova različitih debljina

Za unutrašnje slojeve zida je karakteristično:

1. Maksimalna temperatura se javlja kasnije - fazni pomeraj i
2. Maksimum temperature u unutrašnjosti je manji - smanjenje amplitude.

Što je unutrašnji zid deblji temperatura na površini zida je niža jer je izraženija akumulacija toplote, odnosno više se toplote provodi ka unutrašnjosti zida. S obzirom da toplotno opterećenje obuhvata samo onu količinu toplote koja zagreva sobni vazduh, potrebno je rešenja Furijeove jednačine naći na površini zida, pa je onda toplotno opterećenje prostorije od propuštenog Sunčevog zračenja:

$$q(\tau) = \alpha \cdot (t_{x=0} - t_i) \quad (6.6)$$

Rešenje Furijeove jednačine daje tačne vrednosti temperatura zida u toku dana, ali je potrebno znati:

1. Količinu Sunčeve energije koja dospeva na zid
2. Tačno određen koeficijent apsorpcije zida
3. Termo-fizičke karakteristike zida.

6.1 KOEFICIJENTI AKUMULACIJE TOPLOTE

Kada su u pitanju dobici toplote, njih je relativno lako odrediti (izračunati), ali je mnogo teže odrediti toplotno opterećenje prema kome se dimenzioniše postrojenje za klimatizaciju. Dobici toplote, koji predstavljaju polazni podatak za računanje toplotnog opterećenja, zavise od mnogo veličina u samoj prostoriji (mase zidova i poda, materijala zidova, geometrije prostorije, itd.) S obzirom da je preračunavanje dobitaka toplote u toplotno opterećenje prilično matematički složeno i obimno, nije pogodno da se vrši za svaki konkretan slučaj proračuna. Zato se problem rešava uvođenjem koeficijenata akumulacije toplote.

Po definiciji koeficijent akumulacije toplote je odnos između trenutnog toplotnog opterećenja i maksimalne vrednosti dobitaka toplote:

$$s(\tau) = \frac{Q_{opt}(\tau)}{Q_{dob,max}} \quad (6.7)$$

Za određene, *karakteristične* tipove prostorija određene su složenim detaljnim matematičkim modelom krive toplotnog opterećenja za zadatu krivu dobitaka toplote i na osnovu tih proračuna su određeni koeficijenti akumulacije toplote za određene tipične slučajeve.

Strogo uzevši, naziv *koeficijent akumulacije toplote* je potpuno pogrešan, jer on ne pokazuje akumulisanu toplotu, već sasvim suprotno - deo toplotnog dobitka koji predstavlja trenutno *toplotno opterećenje*. Naziv potiče od striktnog prevoda sa nemačkog i engleskog jezika (*wärmespeicher*, *heat storage factor*), mada se u novijoj američkoj literaturi koristi naziv *faktor toplotnog opterećenja* (*cooling load factor*) što i jeste njegova fizikalna suština.

Domen promene koeficijenta akumulacije toplote za referentni slučaj najviše zavisi od tipa gradnje; tako se vrednosti koeficijenta akumulacije uzimaju iz tablica za najpribližniji slučaj i računa se toplotno opterećenje:

$$Q_{opt}(\tau) = Q_{dob,max} \cdot s(\tau)$$

Ovaj koncept koriste skoro sve u svetu poznate metode proračuna toplotnog opterećenja klimatizovanih prostorija, izuzev TFM (*Transfer Function Method*), ali ga koriste čak i metode koje su izvedene iz TFM, kao i najnovije metode bazirane na bilansu toplote za svaku površinu u prostoriji.

6.2 TOPLOTNO OPTEREĆENJE OD SUNČEVOG ZRAČENJA KROZ PROZOR
računa se prema jednačini:

$$Q(\tau) = Q_{dob,max} \cdot s(\tau) = \left[F_{os} \cdot I_{max} \cdot a + (F - F_{os}) \cdot I_{dif,max} \right] \cdot b \cdot s(\tau) \quad (6.8)$$

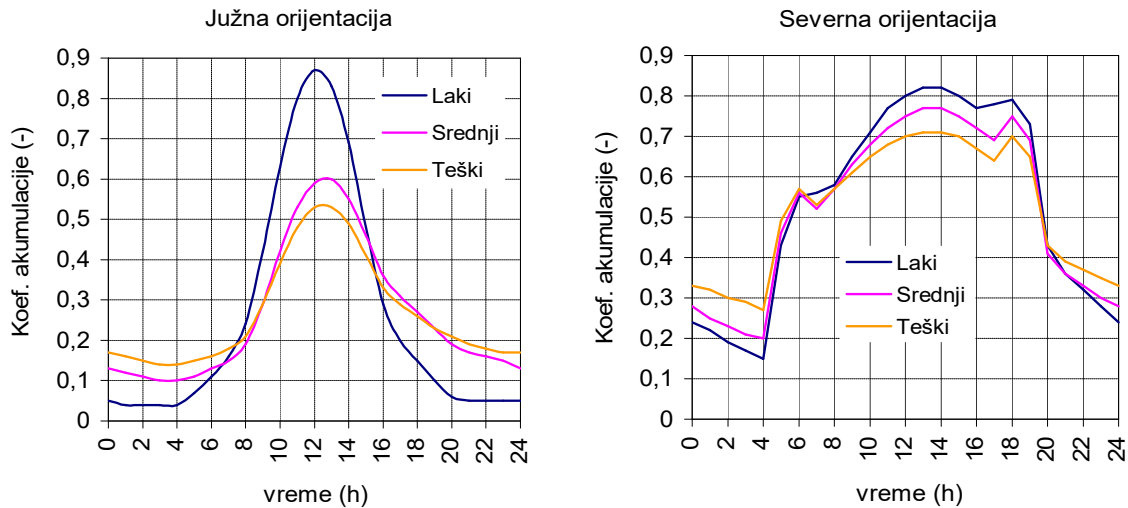
gde je:

- F_{os} - osunčana površina stakla prozora,
- F - ukupna površina stakla prozora,
- I_{max} - ukupni intenzitet Sunčevog zračenja za posmatranu orijentaciju propušten kroz jednostruko obično staklo debljine 3 mm,
- $I_{dif,max}$ - intenzitet difuznog Sunčevog zračenja propušten kroz jednostruko obično staklo debljine 3 mm,
- a - korekcija za zamućenost atmosfere,
- b - koeficijent propustljivosti stakla prozora i zastora za Sunčevo zračenje u odnosu na jednostruko obično staklo,
- $s(\tau)$ - koeficijent akumulacije toplote od Sunčevog zračenja.

Koeficijent akumulacije toplote od Sunčevog zračenja bira se u zavisnosti od:

- vrste gradnje (akumulacione sposobnosti građevinskog omotača prostorije),
- orijentacije prozora,
- doba godine i
- doba dana.

Na slici 6.7 prikazani su koeficijenti akumulacije toplote od Sunčevog zračenja za različite tipove gradnje i dve orijentacije prostorije.



Slika 6.7 Uticaj tipa gradnje na koeficijente akumulacije toplote od Sunčevog zračenja

Tip gradnje određuje se prema masi građevinskog omotača prostorije koja se računa prema jednačini:

$$G = \frac{\sum G_s + \frac{1}{2} \sum G_i}{A} \quad (6.9)$$

gde je:

- G_s - masa spoljnih zidova, poda i tavanice (za prostorije na poslednjem spratu)
- G_i - masa unutrašnjih zidova i međuspratnih konstrukcija,
- A - površina poda prostorije.

Ako je akumulaciona masa zidova prostorije veoma mala, gotovo zanemarljiva (izuzetno laka konstrukcija, npr. staklena bašta, montažna hala...) onda **trenutni dobici toplote** predstavljaju toplotno opterećenje:

$$Q(\tau) = Q_{dob}(\tau) = [F_{os}(\tau) \cdot I_{uk}(\tau) \cdot a + (F - F_{os}(\tau)) \cdot I_{dif}(\tau)] \cdot b \quad (6.10)$$

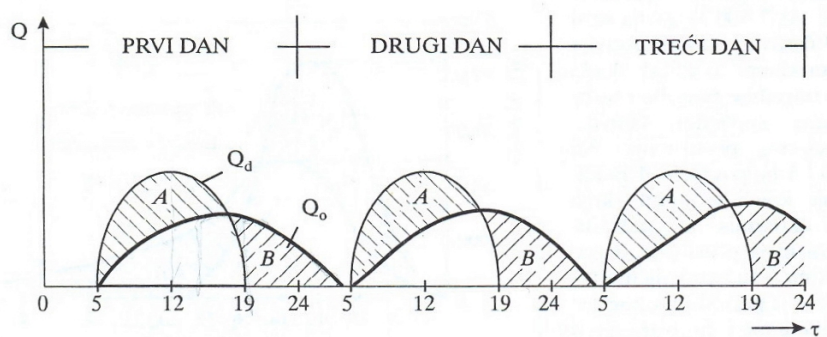
6.3 TOPLOTNO OPTEREĆENJE SA PRODUŽENIM EFEKTOM AKUMULACIJE

Za analizu produženog efekta akumulacije toplote posmatraćemo neki prosečan dan iz dužeg perioda rada klimatizacionog postrojenja. Razlikujemo dva slučaja:

- a) Masa zidova prostorije je mala, pa se akumulisana toplota brzo oslobađa i nema uticaja na toplotno opterećenje narednog dana (slika 6.8).

A - akumulisana količina toplote

B - oslobođena količina toplote



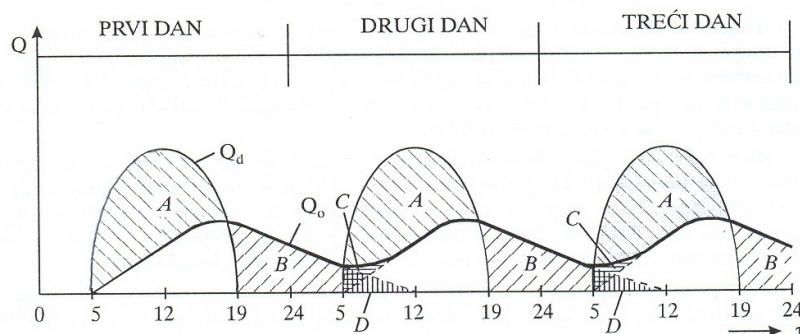
Slika 6.8 Tok dnevnih toplotnih opterećenja pri malom efektu akumulacije

- b) Masa zidova prostorije ima veći stepen akumulacije, pa akumulisana toplota ostaje duži period vremena u zidovima prostorije i utiče na povećanje toplotnog opterećenja narednog dana (slika 6.9).

A - akumulisana količina toplote

B - oslobođena količina toplote

C, D - ostaci akumulisane toplote od prethodnog dana



Slika 6.9 Tok dnevnih toplotnih opterećenja pri većem efektu akumulacije

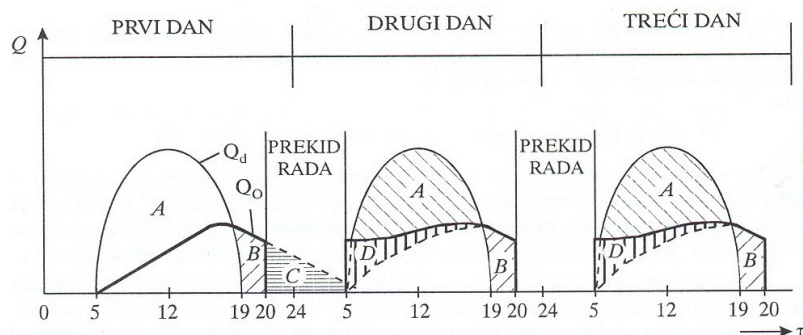
Još izraženiji uticaj akumulacije javlja se u prostorijama gde klimatizacija radi sa dnevnim prekidima (kao što su poslovne prostorije - npr. uključuje se ujutro u 6 h a isključuje u 20 h) što je prikazano na slici 6.10.

A - akumulisana količina toplote

B - oslobođena količina toplote

C - toplota koja ostaje akumulisana u toku prekida rada postrojenja

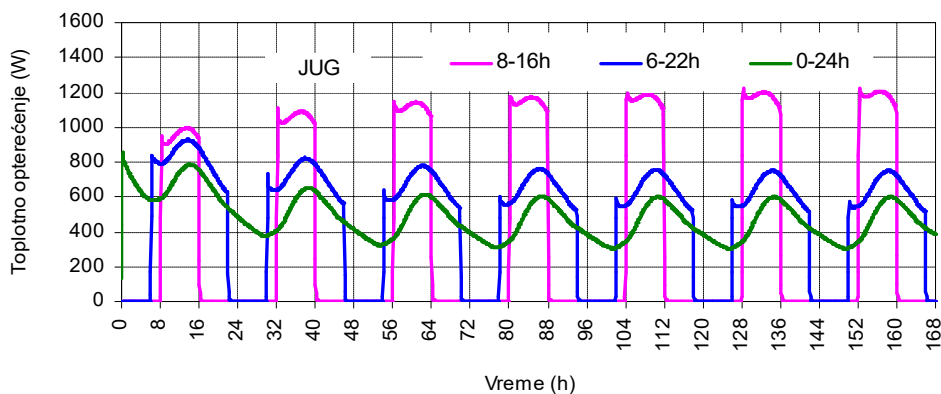
D - prethodno akumulisana toplota koja se oslobađa narednog dana



Slika 6.10 Tok dnevnih tolotnih opterećenja pri radu klimatizacionog postrojenja sa prekidom

Kada se postrojenje isključi, temperatura vazduha u prostoriji brzo poraste, pa više ne postoje uslovi za razmenu toplote pri konvekciji, tako da akumulisana toplota u zidovima tu ostaje sve do ponovnog uključenja postrojenja narednog dana, kada se snižava temperatura vazduha u prostoriji i ponovo uspostavljaju uslovi za prelaz toplote sa površine zidova na vazduh u prostoriji. Narednog dana, prilikom uključenja postrojenja za klimatizaciju, osim zaostale akumulisane toplote javljaju se novi dobici i novo toplotno opterećenje. Sve to rezultuje povećanim toplotnim opterećenjem u trenutku uključivanja klimatizacionog postrojenja narednog dana.

Na slici 6.11. prikazan je tok toplotnog opterećenja prostorije orijentisane ka jugu za različite režime rada klimatizacije - bez prekida i sa različitom dužinom prekida.



Slika 6.11 Tok dnevnih tolotnih opterećenja pri različitim režimima rada klimatizacionog postrojenja

6.4 TOPLOTNO OPTEREĆENJE TRANSMISIJOM TOPLOTE KROZ PROZOR

S obzirom da su prozori sačinjeni pretežno od tankih staklenih površina i da imaju mali otpor provođenju toplote, smatra se da ne postoji akumulacija toplote u prozorima i da je prolaz toplote kroz prozore takoreći trenutni. Zbog toga se toplotno opterećenje transmisijom toplote kroz prozor računa za posmatrani vremenski trenutak sa trenutnom razlikom temperatura spoljnog i unutrašnjeg vazduha:

$$Q(\tau) = k_p \cdot F \cdot (t_e(\tau) - t_i) \quad (6.11)$$

gde je:

- k_p - koeficijent prolaza toplote kroz prozor,
- F - površina prozora (građevinskog otvora),
- $t_e(\tau)$ - temperatura spoljnog vazduha,
- t_i - temperatura vazduha u prostoriji.

6.5 INFILTRACIJA SPOLJNJEG VAZDUHA

Infiltracija spoljnog vazduha u klimatizovanim prostorijama je, po pravilu, znatno manja nego u prostorijama koje imaju neki od uobičajenih sistema grejanja. Čest je slučaj klimatizovanih zgrada u kojima su prozori fiksni i ne otvaraju se - tada je propustljivost procepa zanemarljiva.

U slučaju kada dolazi do infiltracije spoljnog vazduha, posebno se računa latentno i suvo toplotno opterećenje usled infiltracije:

$$Q_{INF,s} = \dot{V} \cdot \rho \cdot c_p \cdot (t_e(\tau) - t_i) \quad (6.12)$$

$$Q_{INF,lat} = \dot{V} \cdot \rho \cdot r \cdot (x_e(\tau) - x_i) \quad (6.13)$$

6.6 TOPLOTNO OPTEREĆENJE OD UNUTRAŠNJIH IZVORA

Toplotno opterećenje koje potiče od unutrašnjih izvora toplote često nadmašuje toplotno opterećenje od spoljnih izvora. Unutrašnji izvori toplote su:

- ljudi,
- osvetljenje,
- mašine i aparati,
- susedne neklimatizovane prostorije,
- tehnološki procesi (u industriji).

TOPLOTA KOJU ODAJU LJUDI

Toplotno opterećenje od ljudi je uvek prisutno, s obzirom da se komforna klimatizacija uvek uvodi zbog prisustva ljudi u prostorijama, da bi se obezbedili uslovi ugodnosti. Toplota koju odaju ljudi može biti veoma značajna kada se radi o prostorijama u kojima boravi veliki broj ljudi, kao što su: bioskopi, pozorišta, sportske dvorane, itd.

$$Q_{lj} = \sum_1^n q_{lj,n} \quad (6.14)$$

ali se razdvaja osetna (suva) i latentna toplota koju ljudi odaju:

$$Q_{lj,s} = n \cdot q_{lj,s} \quad (6.15)$$

$$Q_{lj,lat} = n \cdot q_{lj,lat} \quad (6.16)$$

gde je:

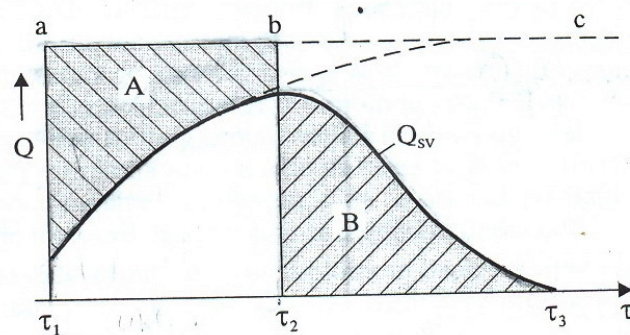
- n - broj ljudi koji boravi u prostoriji
 q_{lj} - količina toplote koju odaje jedan čovek pri datim uslovima.

Prema većini metoda za proračun toplotnog opterećenja klimatizovanih prostorija ne uzima se koeficijent akumulacije toplote od ljudi, već se toplota koju odaje čovek smatra trenutnim toplotnim opterećenjem, odnosno smatra se da se celokupno odata suva toplota predaje vazduhu prostorije. Po novom ASHRAE standardu usvaja se koeficijent toplotnog opterećenja od ljudi CLF (*Cooling Load Factor*), što ima smisla kada u prostoriji boravi mali broj ljudi koji predaju toplotu zračenjem prema okolnim površinama u prostoriji. Međutim, kada u prostoriji boravi veći broj ljudi, onda bi trebalo uzeti u obzir međusobno razmenjenu toplotu zračenjem između ljudi.

TOPLOTNO OPTERECENJE OD OSVETLJENJA

Svetiljke odaju toplotu zračenjem i prelazom toplote na vazduh u prostoriji. Usled predaje toplote zračenjem javlja se efekat akumulacije toplote u podu i zidovima prostorije, slično kao kod Sunčevog zračenja.

Na slici 6.12 prikazan je tok toplotnog opterećenja od osvetljenja za neprekidan rad klimatizacionog postrojenja.

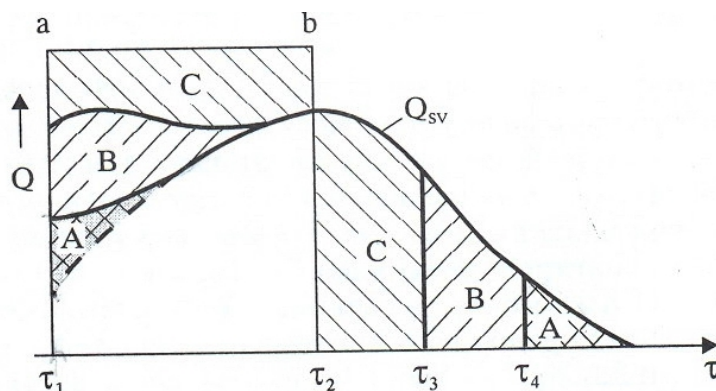


Slika 6.12 Tok toplotnog opterećenja od osvetljenja za neprekidan rad klimatizacionog postrojenja

Dobici toplote od osvetljenja su konstantni sve vreme rada osvetljenja, od trenutka uključenja τ_1 do trenutka isključenja τ_2 . Površina A na dijagramu predstavlja akumulisanu toplotu u zidovima i podu prostorije, a površina B je naknadno odata toplota, koja se odaje od trenutka isključenja osvetljenja τ_2 pa sve do nekog trenutka τ_3 . Ukoliko prethodno akumulisana toplota (površina A) uspe da se u potpunosti oslobodi pre ponovnog uključenja osvetljenja, onda je naknadno oslobođena toplota (površina B) koja predstavlja toplotno opterećenje po isključenju osvetljenja jednaka prethodno akumulisanoj toploti ($A = B$, iz bilansa toplote).

Ako je osvetljenje neprekidno uključeno, dobici toplote i toplotno opterećenje se izjednačavaju pa je i toplotno opterećenje konstantno, i tada efekat akumulacije toplote ne dolazi do izražaja.

Kada klimatizaciono postrojenje radi sa prekidom, onda se sva akumulisana toplota ne prenosi na sobni vazduh, već deo akumulisane toplote ostaje u zidovima i oslobađa se narednog dana, kada se toplotno opterećenje povećava (slika 6.13).



Slika 6.13 Tok toplotnog opterećenja od osvetljenja u slučaju rada klimatizacionog postrojenja sa prekidom

Ako se klimatizacija isključi u trenutku τ_4 , onda se akumulisani deo toplote A ne može preneti na sobni vazduh, pa dolazi do produženog efekta akumulacije toplote i povećanja toplotnog opterećenja sledećeg dana, kada se klimatizaciono postrojenje ponovo uključuje.

Ako se klimatizacija ranije isključi, npr. u trenutku τ_3 , onda veća količina toplote (A+B) podleže efektu produžene akumulacije toplote.

Praktično računanje toplotnog opterećenja od osvetljenja vrši se pomoću koeficijenata akumulacije:

$$Q_B(\tau) = Q_{dob, max} \cdot s_B(\tau) \quad (6.17)$$

odnosno kada se zameni izraz za dobitke toplote od osvetljenja

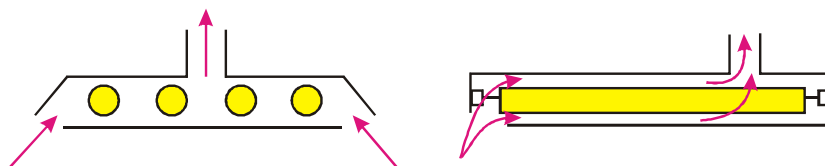
$$Q_B(\tau) = P \cdot l_1 \cdot l_2 \cdot s_B(\tau) \quad (6.18)$$

gde je:

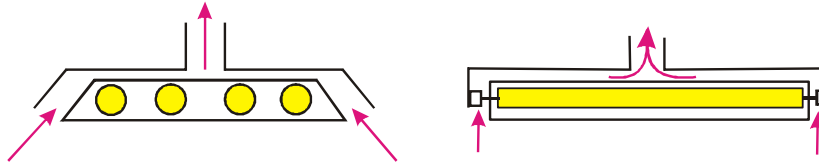
- P - ukupna instalisana snaga svetiljki u prostoriji,
- l_1 - koeficijent jednovremenosti uključivanja osvetljenja (određuje se u saradnji sa projektantom električnih instalacija)
- l_2 - koeficijent ostatka toplote kod provetranih svetiljki
- $s_B(\tau)$ - koeficijent akumulacije toplote od osvetljenja.

Koeficijent l_2 pokazuje koji deo instalisane snage svetiljke opterećuje vazduh prostorije pri stalnom uključivanju osvetljenja. Prema VDI normama, razlikuju se tri osnovna načina provetravanja svetiljki:

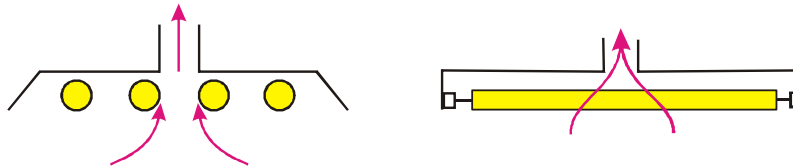
1. Provetravanje kroz svetiljku – vazduh opstrujava svetiljku po celoj dužini;



2. Provetravanje cirkulacijom vazduha oko svetiljke – vazduh opstrujava zatvoreno telo svetiljke. Cev svetiljke se ne hladi direktno vazduhom za provetravanje;



3. Delimično provetravanje kroz svetiljku – na gornjoj strani svetiljke se nalazi otvor za izvlačenje vazduha. Samo deo cevi svetiljke koji se nalazi u blizini otvora biće prinudno opstrujavan vazduhom za provetravanje.



Osim od načina provetravanja svetiljki, koeficijent l_2 zavisi i od:

- protoka vazduha za provetravanje (m^3/h)
- načina odvođenja vazduha iz prostorije (kroz plenum, neizolovane ili izolovane kanale).

Koeficijent akumulacije toplote od osvetljenja uzima u obzir da svetiljke nisu uključene 24 h tokom dana. Što je vreme uključenosti svetla kraće efekat akumulacije toplote je izraženiji.

Koeficijenti akumulacije toplote zavise od:

- mase zidova i poda prostorije;
- položaja svetiljki, koji utiče na količinu toplote koja se preda pri konvekciji – svodi se na dva slučaja: slobodno obešene svetiljke i svetiljke u tavanici ili ugrađene na samoj tavanici;
- vremenskog perioda uključenosti osvetljenja; sa porastom dužine trajanja uključenosti, vrednosti koeficijenata akumulacije toplote od osvetljenja se približavaju jedinici. Usvaja se $s_B = 1$ kada je osvetljenje uključeno 20 ili više sati u toku dana.

TOPLOTNO OPTEREĆENJE OD MAŠINA U PROSTORIJI

Obično se u praksi smatra da je disipacija toplote od rada električne mašine jednaka instalisanoj snazi mašine i da se predaje vazduhu prostorije, tako da čini toplotno opterećenje:

$$Q_M = P_{el} \quad (6.19)$$

Ako se u prostoriji nalazi više mašina, onda se toplotno opterećenje opterećenje računa kao:

$$Q_M = \sum \left(\frac{N_i}{\eta \cdot a_1} \right) \cdot a_2 \quad (6.20)$$

gde je:

- N_i - instalisana snaga i -te mašine,
- η - srednji stepen iskorišćenja motora,
- a_1 - koeficijent opterećenja i -te mašine u posmatrano vreme,
- a_2 - koeficijent jednovremenosti uključenosti mašina.

TOPLOTNO OPTEREĆENJE OD SUSEDNIH PROSTORIJA

Toplota koja se transmisijom prenese u prostoriju od susednih neklimatizovanih prostorija (kroz pod, zidove, tavanicu, vrata...) predstavlja toplotno opterećenje od susednih prostorija:

$$Q_R = \sum k_i \cdot F_i \cdot \Delta t_i \quad (6.21)$$

gde je:

- k_i - koeficijent prolaza toplote kroz i -tu pregradu,
- F_i - površina posmatrane pregrade,
- Δt_i - razlika temperatura vazduha neklimatizovane prostorije i vazduha klimatizovane prostorije.

Ukupno toplotno opterećenje prostorije je zbir trenutnih toplotnih opterećenja od svi izvora toplote:

$$Q_{ukup} = Q_e + Q_i = Q_Z + Q_S + Q_T + Q_{LJ} + Q_B + Q_M + Q_R + Q_G \quad (6.22)$$

7 ODREĐIVANJE KOLIČINE VAZDUHA ZA KLIMATIZACIJU

U vazдушnim sistemima klimatizacije, u kojima je vazduh jedini radni fluid, količina vazduha koja se koristi za klimatizaciju prostorija određuje se na osnovu tri kriterijuma:

- gubitaka toplote u zimskom periodu;
- toplotnog opterećenja u letnjem periodu;
- potrebne količine vazduha za provetravanje (ventilaciju).

Provetravanje (ventilacija) obavlja se svežim (spoljnim) vazduhom. Potrebna količina svežeg vazduha diktirana je uslovima obezbeđivanja kvaliteta vazduha u zatvorenim prostorijama. U komfornoj klimatizaciji zadatak klimatizacionog postrojenja je da ostvari povoljne uslove za disanje i eliminiše stvorene mirise i nečistoće. Količina svežeg vazduha može da se odredi jednim od sledećih načina:

- preko “obroka” po čoveku;
- preko dozvoljene koncentracije zagađivača;
- preko broja izmena vazduha na sat.

OBROK SVEŽEG VAZDUHA PO ČOVEKU

Ovaj metod primenjuje se u komfornoj klimatizaciji gde su ljudi osnovni, a često i jedini zagađivači. Zadatak ventilacije je da se obezbede odgovarajući uslovi za disanje, odnosno, u širem smislu, povoljni uslovi za ugodan boravak ljudi u zatvorenom prostoru. Preporučene vrednosti svežeg vazduha po čoveku iznose:

- 20 do 30 m³/h ako se u prostoriji ne puši;
- 30 do 40 m³/h ako je u prostoriji dozvoljeno pušenje.

Navedene vrednosti obroka svežeg vazduha po čoveku su minimalne. Ako se ima u vidu da je osnovni zadatak klimatizacije da stvori povoljne klimatske uslove u kojima će se ljudi ugodno osećati, razumljivo je da su prethodno navedene količine svežeg vazduha često bile uvećavane. Treba imati na umu da količina svežeg vazduha direktno utiče i na investicione i na eksploatacione troškove. Posle energetske kriza 70-ih godina prošlog veka, kao jedna od efikasnih mera za smanjenje potrošnje energije u klimatizacionim postrojenjima bila je smanjenje količine svežeg vazduha. U traganju za minimalno potrebnom količinom svežeg vazduha, ponekad se išlo u drugu krajnost, pa je u praksi bilo klimatizovanih objekata sa vrlo lošim kvalitetom vazduha. Nedovoljan kvalitet vazduha izazivao je niz zdravstvenih problema (glavobolja, mučnina, alergija, osećaj suvoće u disajnim putevima, crvenilo očiju i dr.). Čak je uveden i poseban termin za stanje ovih zgrada - “sindrom bolesnih zgrada” (Sick Building Syndrom). Urađen je i veliki broj istraživačkih projekata na temu kvaliteta unutrašnjeg vazduha (Indoor Air Quality) tako da se može konstatovati da je ovaj problem rešen.

U izvesnim slučajevima može dosta da se odstupa od prethodno navedenih preporučenih vrednosti za obrok svežeg vazduha po čoveku:

- u skloništima se računa sa količinom svežeg vazduha 6 m³/h po čoveku u normalnom režimu korišćenja, a 2,5 m³/h po čoveku u zaštitnom režimu rada;
- kancelarije modernih poslovnih zgrada obično se rade sa 50 m³/h svežeg vazduha po čoveku;
- u hotelima visoke kategorije radi se sa 100 i više m³/h svežeg vazduha po čoveku.

MAKSIMALNA DOZVOLJENA KONCETRACIJA ZAGAĐIVAČA – MDK

Ovaj kriterijum za određivanje količine svežeg vazduha za ventilaciju obično se primenjuje u industrijskim objektima u kojima su definisani izvori zagađenja (po vrsti zagađivača i intenzitetu zagađivanja). Ventilacijom treba obezbediti onu koncentraciju štetnih materija u vazduhu koja neće štetno delovati na čoveka, tj. neće izazvati trovanje, eksploziju ili požar. Otpadnim vazduhom izvlače se zagađivači iz prostora, a ubacivanjem svežeg vazduha koncentracija zagađivača u vazduhu se smanjuje dok ne bude manja od maksimalno dozvoljene – MDK.

Potrebna količina vazduha za ventilaciju određuje se iz bilansa zagađivača:

$$V \cdot k_s + K = V \cdot k_{\max} \quad (7.1)$$

gde je:

V [m^3/h] – potrebna količina svežeg vazduha za ventilaciju

k_s [m^3/m^3] – koncentracija određenog zagađivača (zbog koga se vrši ventilacija) u svežem vazduhu

k_{\max} [m^3/m^3] – maksimalna dozvoljena koncentracija (MDK) određenog zagađivača u ventilisanoj (klimatizovanoj) prostoriji

K [m^3/h] – časovno zagađenje od izvora u prostoriji

Minimalan časovni protok svežeg vazduha za ventilaciju iznosi:

$$V = \frac{K}{k_{\max} - k_s} \quad (7.2)$$

Jedinice za merenje i izražavanje koncentracije zagađivača su mg/m^3 ili ppm (parts per million = cm^3/m^3). Maksimalne dozvoljene koncentracije zagađivača (MDK) usvajaju se prema preporukama Instituta za zaštitu zdravlja (tabela 7.1). Navedene vrednosti su podložne promenama, i pri svakoj promeni, po pravilu, Zakonodavac ih pooštrava u cilju bolje zaštite zdravlja radnika.

Tabela 7.1 MDK vrednosti

| Zagađivač | ppm | mg/m^3 |
|----------------|------|------------------------|
| aceton | 1000 | 2400 |
| amonijak | 50 | 35 |
| fluor | 0,1 | 0,2 |
| hlor | 0,5 | 1,5 |
| naftalin | 10 | 50 |
| nikotin | 0,07 | 0,5 |
| ozon | 0,1 | 0,2 |
| sumpordioksid | 2 | 5 |
| ugljendioksid | 5000 | |
| ugljenmonoksid | 50 | |

Vrednosti navedene u tabeli 7.1 predstavljaju tzv. maksimalno dozvoljene trajne koncentracije kojima radnici mogu biti izloženi tokom celokupnog radnog vremena. Postoje i kratkotrajne dozvoljene koncentracije zagađivača na radnom mestu, ali je njihovo vreme trajanja ograničeno.

BROJ IZMENA VAZDUHA NA SAT

Broj časovnih izmena vazduha u prostoriji predstavlja odnos količine svežeg vazduha koja se uvodi u prostoriju u toku jednog sata i zapremine prostorije:

$$n = \frac{V_{vazd}}{V_{prost}} \quad [1/h] \quad (7.3)$$

Preporučeni broj izmena vazduha na sat zavisi od:

- namene prostorije;
- vrste zagađivača;
- veličine (zapremine) prostorije.

Određivanje količine svežeg vazduha za klimatizaciju (ventilaciju) prema broju izmena vazduha na sat koristi se kadgod izvori zagađenja nisu dovoljni definisani. Takođe, koristi se i kao kontrolni metod kada se količina svežeg vazduha za ventilaciju određuje nekim drugim metodom. Preporučene vrednosti broja izmena vazduha za tipične namene prostorija date su u tabeli 7.2.

Tabela 7.2 Broj izmena vazduha na sat

| Namena objekta | n [1/h] |
|--|-------------|
| toaleti (u stanovima, ustanovama, javni) | 4 – 6 – 15 |
| kupatila | 4 – 6 |
| biblioteke | 3 – 5 |
| kancelarije | 3 – 6 |
| farbare | 5 – 15 |
| lakirnice (prostorije za prskanje bojom) | 20 – 50 |
| garaže | 4 – 5 |
| robne kuće | 4 – 6 |
| bolnice (zavisno od odeljenja) | 3 – 20 |
| laboratorije | 8 – 15 (25) |
| komercijalne kuhinje | 15 – 20 |
| zatvoreni bazeni | 3 – 6 |

Treba napomenuti da se broj izmena vazduha na sat često navodi ne prema količini svežeg vazduha, nego prema ukupnoj količini vazduha koja se izvlači ili ubacuje u prostoriju (svež + recirkulacioni). Broj izmena vazduha u prostoriji definisan na ovaj način ukazuje na kvalitet ispiranja prostorije pripremljenim vazduhom. Broj izmena vazduha na sat određen prema ukupnoj količini vazduha koji se dovodi klimatizovanoj prostoriji može biti višestruko veći od broja izmena svežeg vazduha. Na primer, u prostorijama sa laminarnom ventilacijom, ukupan broj izmena vazduha može biti i do 600 1/h.

ODREĐIVANJE KOLIČINE VAZDUHA PREMA ZIMSKOM REŽIMU

Potrebna količina vazduha za zimske projektne uslove:

$$V_z = \frac{3600 \cdot Q_g}{C_p \cdot \rho \cdot (t_{ub} - t_{un})} = \frac{3600 \cdot Q_g}{C_p \cdot \rho \cdot \Delta t_z} \quad (7.4)$$

gde je:

- V_z [m³/h] – količina vazduha za klimatizaciju
- Q_g [W] – toplotni gubici prostorije
- C_p [J/kgK] – specifični toplotni kapacitet vazduha
- ρ [kg/m³] – gustina vazduha

t_{ub} [°C] – temperatura vazduha koji se ubacuje u klimatizovani prostor
 t_{un} [°C] – temperatura u prostoriji
 Δt_z [°C] – razlika temperature ubacnog i vazduha u prostoriji

Temperatura vazduha koji se u zimskom periodu ubacuje u klimatizovani prostor zavisi od:

- namene prostorije;
- visine prostorije;
- predviđenog sistema klimatizacije.

U komfornoj klimatizaciji obično se usvaja temperatura vazduha 30 do 40°C, dok u industrijskoj može da bude i viša (do 50°C).

ODREĐIVANJE KOLIČINE VAZDUHA PREMA LETNJEM REŽIMU

Potrebna količina vazduha za letnje projektne uslove:

$$V_L = \frac{3600 \cdot Q_{t,opt.}}{C_p \cdot \rho \cdot (t_{un} - t_{ub})} = \frac{3600 \cdot Q_{t,opt.}}{C_p \cdot \rho \cdot \Delta t_L} \quad (7.5)$$

gde je:

V_L [m³/h] – količina vazduha za klimatizaciju
 $Q_{t,opt}$ [W] – toplotno opterećenje prostorije
 C_p [J/kgK] – specifični toplotni kapacitet vazduha
 ρ [kg/m³] – gustina vazduha
 t_{ub} [°C] – temperatura vazduha koji se ubacuje u klimatizovani prostor
 t_{un} [°C] – temperatura u prostoriji
 Δt_L [°C] – razlika temperature vazduha u prostoriji i ubacnog vazduha

Temperatura klimatizovanih prostorija leti obično se usvaja 22 do 28°C, pri čemu u našim klimatskim uslovima najčešće se projektuje na 26°C. Radi postizanja odgovarajućih uslova ugodnosti, uobičajeno se usvaja da je $\Delta t_L = 4$ do 12°C. Na izbor projektne temperature ubacnog vazduha leti najviše utiče izabrani sistem klimatizacije. Što je manja temperaturska razlika između temperature u prostoriji i temperature vazduha koji se ubacuje u klimatizovani prostor, termički uslovi ugodnosti biće bolji, ali se povećava količina vazduha koja mora da se dovodi u prostoriju.

USVAJANJE UKUPNE KOLIČINE VAZDUHA

Merodavna količina vazduha za klimatizaciju u vazдушnim sistemima je najveća vrednost količine vazduha određena prema zimskim i letnjim projektним uslovima, kao i za potrebe ventilacije:

$$V_{uk} = \max\{V_z, V_L, V_{sv}\}$$

Ukoliko je od ove tri količine vazduha najveća količina svežeg vazduha, onda se usvaja da je ukupna količina vazduha za klimatizaciju prostorije jednaka količini (protoku) svežeg vazduha. U tom slučaju sistem radi sa 100% svežim vazduhom. Takođe, potrebno je izvršiti korekciju temperature ubacivanja vazduha u letnjem i zimskom režimu rada jer je povećana količina vazduha u odnosu na minimalno potrebnu da bi se eliminisalo toplotno opterećenje leti, odnosno nadoknadili gubici toplote zimi (i Δt_z i Δt_L će se smanjiti u odnosu na prvobitno usvojene veličine).

Ukoliko je najveća količina vazduha određena prema letnjem periodu, onda se usvaja da je $V_{uk} = V_L$. U ovom slučaju sistem klimatizacije će raditi sa količinom svežeg vazduha V_{sv} dok će ostatak činiti recirkulacioni vazduh jer se tako postiže ušteda energije tokom eksploatacije postrojenja, a niži su i investicioni troškovi. Količina recirkulacionog vazduha jednaka je:

$$V_{rec} = V_{uk} - V_{sv} \quad (7.6)$$

Naravno, i u ovom slučaju potrebno je korigovati temperaturu ubacnog vazduha u zimskom periodu jer je povećana količina vazduha, pa će Δt_z biti manje od prvobitno usvojenog.

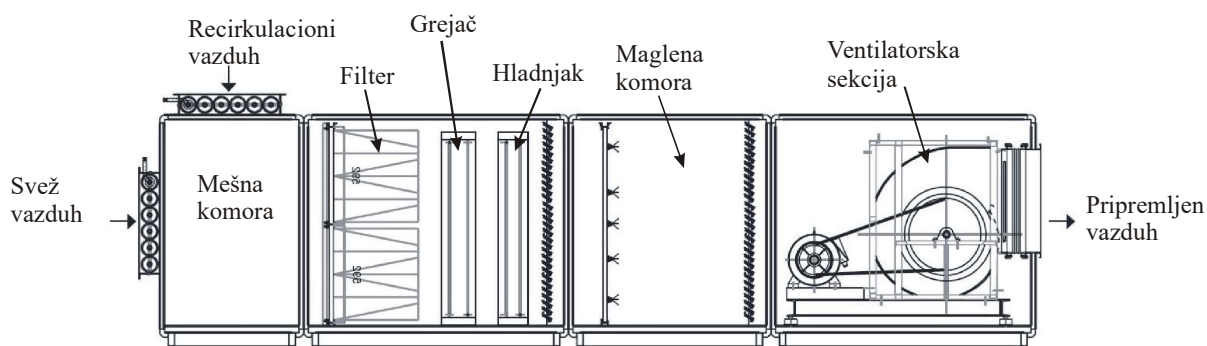
Analogan postupak sprovodi se i u slučaju kada je najveća količina vazduha određena prema zimskim projektnim uslovima.

8 ELEMENTI KLIMA KOMORE

Na slici 8.1 dat je šematski prikaz jedne horizontalne klima komore, koja radi sa mešavinom svežeg i recirkulacionog vazduha. Konstrukcija klima komore i broj i vrsta elemenata koje komora sadrži zavise od namene samog sistema za klimatizaciju (npr. da li se želi rad samo sa svežim vazduhom, da li se želi samo hlađenje tokom letnjeg perioda, da li je potrebno vlaženje vazduha, da li se želi korišćenje otpadne toplote, da li je potrebno prigušivanje buke i vibracija, itd.).

Osnovni elementi klima komore su:

- **filterska sekcija** (za prečišćavanje vazduha koji se uvodi u sistem),
- **grejač** (koji može biti podeljen na predgrejač i dogrejač – što je čest slučaj kada se vrši vlaženje vodom);
- **hladnjak** (koji najčešće u klimatizaciji koristi hladnu vodu kao radni fluid);
- **maglena komora** za vlaženje vazduha vodom;
- **ventilatorska sekcija** (najčešće su u pitanju centrifugalni ventilatori).



Slika 8.1 Šematski prikaz klima komore

GREJAČ

Grejač služi za zagrevanje vazduha u zimskom i prelaznim periodima (mada se nekad koriste i tokom leta). Zagrevanje vazduha se kreće u granicama od -20°C do $+50^{\circ}\text{C}$ maksimalno. U sistemu klimatizacije može postojati jedan ili više grejača, što zavisi od izbora samog sistema klimatizacije. Mesto ugradnje grejača može biti:

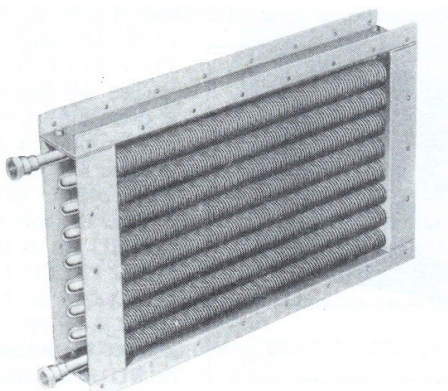
- klima komora (jedan grejač ili predgrejač i dogrejač),
- kanal pripremljenog vazduha (kanalski grejač, koji je najčešće dogrejač kod zonskih sistema),
- uređaj u prostoriji (najčešće dogrejač kod vodenih ili vazdušno-vodenih sistema; tada se u prostoriji nalaze aparati kao što je ventilator-konvektor (*fan-coil*) ili indukcioni aparat).

Kao radni fluid najčešće se koristi topla voda. Mogu se koristiti različiti temperaturni režimi ($90/70^{\circ}\text{C}$, $80/60^{\circ}\text{C}$, $60/45^{\circ}\text{C}$ u kanalskim dogrejačima...). Grejni fluidi takođe može biti i vodena para niskog pritiska.

Zahtevi koje treba da ispuni grejač su:

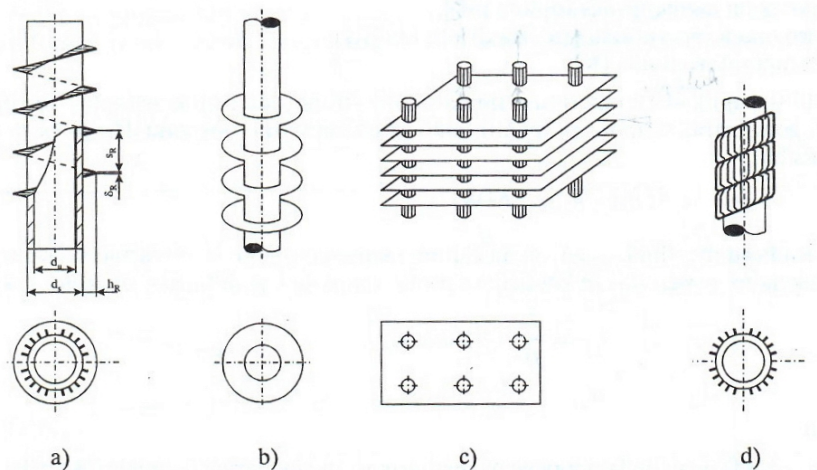
- da bude kompaktan (što veće odavanje toplote po jedinici zapremine grejača),
- da ima što manji pad pritiska sa vazdušne strane (brzina vazduha po fasadnom preseku se kreće u granicama $w = 2 \div 4$ m/s),
- da ima što manji pad pritiska sa vodene strane (brzina vode u cevima se kreće u granicama $w = 0,5 \div 1$ m/s).

Na slici 8.2 prikazan je izgled grejača klima komore.



Slika 8.2 Spoljni izgled grejača sa spiralnim rebrima koji se postavlja u klima komoru

Kada je u pitanju konstrukcija grejača, oni se najčešće izrađuju od orebrenih cevi, kako bi se povećala razmena toplote pri konvekciji sa strane vazduha. Koeficijent prelaza toplote sa vodene strane – sa tople vode na zid cevi je reda veličine 100 puta veći u odnosu na koeficijent prelaza toplote sa zida cevi na vazduh ($\alpha_{un} \sim 10^3$ W/m²K, $\alpha_{sp} \sim 10$ W/m²K). Zbog toga je neophodno povećanje površine za razmenu toplote sa strane vazduha. Na slici 8.3 prikazane su konstrukcije grejača za vazduh i različita orebrenja cevi.



Slika 8.3 Vrste orebrenja cevi grejača za vazduh – a) spiralno orebrenje, b) kružne lamele, c) lamelasta rebra sa koridornim rasporedom cevi, d) orebrenje od žice

Određivanje grejne površine grejača:

$$Q = k \cdot F_s \cdot \Delta t_m \quad (8.1)$$

gde je:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_s} + \left[\frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_u} \right] \cdot \frac{F_s}{F_u} - \text{otpor prolazu toplote sa grejnog fluida na vazduh}$$

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_{ul} - \Delta t_{iz}}{\ln \frac{\Delta t_{ul}}{\Delta t_{iz}}} - \text{srednja temperaturska razlika grejnog i grejanog fluida.}$$

Srednja temperaturska razlika zavisi od tipa strujanja koji može biti:

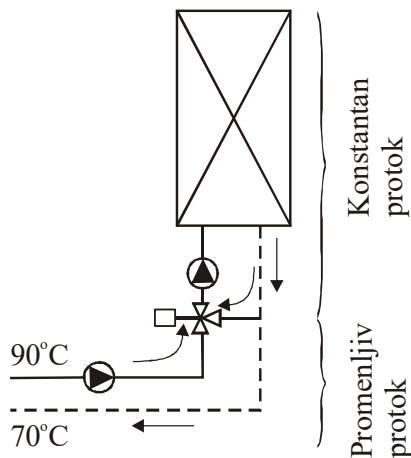
1. Istosmerni tok,
2. Suprotnosmerni tok i
3. Unakrsni tok.

Kod grejača se javlja kombinacija suprotnosmerno-unakrsnog toka grejnog i grejanog fluida, Tačna vrednost koeficijenta prolaza toplote može se odrediti samo eksperimentalno. Zbog navedenih razloga projektanti ne vrše proračun površine grejača, već taj podatak daje proizvođač na osnovu sledećih podataka:

- protoka vazduha kroz grejač,
- temperature vazduha na ulazu i izlazu iz grejača
- temperaturskog režima grejnog fluida.

Na bazi datih podataka, odnosno uslova u kojima grejač mora da radi, proizvođač određuje:

- površinu grejača,
- maseni protok grejnog fluida,
- pad pritiska sa vodene i vazdušne strane
- brzinu strujanja vazduha kroz grejač.

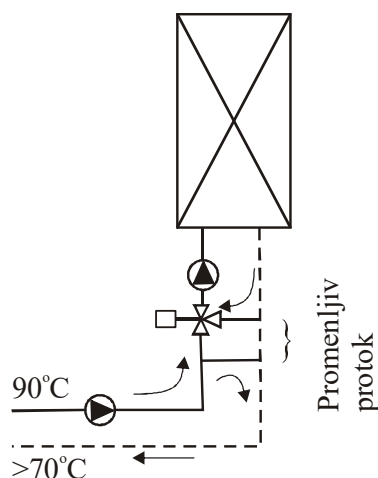


Slika 8.4a Regulacija pomoću trokrakog mešnog ventila

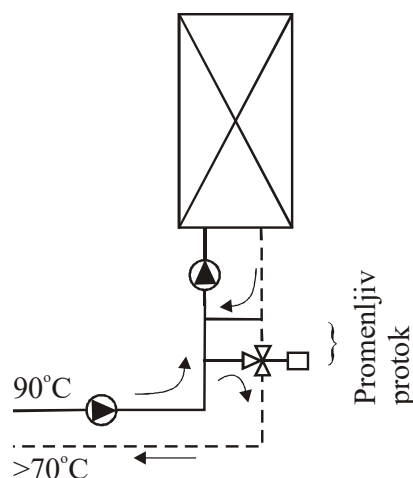
Regulacija odavanja toplote grejača je **kvalitativna** – maseni protok grejnog fluida ostaje konstantan, dok se menja temperatura tople vode na ulazu u grejač:

$$\dot{m}_w = const, t_{w,ul} \neq const$$

Regulacija se vrši pomoću trokrakog ventila koji je smešten u razvodnom vodu grejača i koji radi kao mešni – u potrebnom odnosu meša razvodnu i povratnu toplu vodu i na taj način se dobija željena temperatura vode na ulazu u grejač (slika 8.4a). Trokraki ventil može biti postavljen i u povratnom vodu, spojen kratkom vezom sa razvodnim (slika 8.4c).



Slika 8.4b Regulacija pomoću mešnog trokrakog ventila i kratkom vezom



Slika 8.4c Regulacija pomoću trokrakog ventila u povratnom vodu (tzv. "ajnspric" sistem)

HLADNJAK

Hladnjak služi za hlađenje i sušenje vazduha u letnjem i prelaznim periodima. Konstruktivno se ne razlikuje od grejača. I hladnjaci su, kao i grejači, izrađeni od orebrenih cevi. Mogu se izrađivati od bakarnih cevi, što je dobro zbog otpornosti na koroziju. Rebra bakarnih cevi se izrađuju od aluminijuma ili bakra. Takođe se mogu izrađivati od čeličnih cevi sa čeličnim orebrenjem. Oblik rebara može biti pravougaoni, kružni ili spiralni.

Kod hladnjaka se, u odnosu na grejač, razlikuju uslovi razmene toplote:

- manja je temperaturska razlika između vazduha i površine hladnjaka

$$\Delta t_{HL} = (t_{V,sr} - t_{W,sr})_{HL} < (t_{W,sr} - t_{V,sr})_{GR} = \Delta t_{GR}$$

$$\sim 16 \quad \sim 25 \quad - \quad \sim 9 \quad < \quad \sim 80 \quad \sim 10 \quad - \quad \sim 70$$

što ima za posledicu: $F_{HL} > F_{GR}$, tj. površina hladnjaka je veća od površine grejača za slična toplotna opterećenja leti i zimi;

- uz hlađenje se obično vrši i sušenje vazduha, tj. dolazi do izdvajanja vlage iz vazduha koji se hladi i stvaranja kondenzata na površini hladnjaka. To ustvari znači da se u hladnjaku odvodi i **suva** i **latentna** toplota.

Da li će doći do izdvajanja vlage prilikom hlađenja vazduha zavisi od:

- stanja vazduha koji struji preko površine hladnjaka (temperature tačke rose t_{TR})
- temperatre površine hladnjaka t_{PH} .

Kada je : $t_{TR} > t_{PH}$ doći će do izdvajanja vlage iz vazduha prilikom hlađenja.

Prema vrsti rashladnog fluida hladnjaci se mogu podeliti na:

- Hladnjake sa direktnim isparavanjem**, kada je radni fluid neki od rashladnih fluida (freon, amonijak, CO₂...) Tada je isparivač rashladne mašine hladnjak u

klima komori i tada je površina hladnjaka na konstantnoj temperaturi koja odgovara temperaturi isparavanja;

- b) **Protočne hladnjake**, kada je radni fluid hladna voda (ili vođeni rastvor antifrizu ako su potrebne niže temperature radnog fluida). U ovom slučaju temperatura površine hladnjaka nije konstantna, već se menja kako se voda zagreva od temperature na ulazu u hladnjak do temperature na izlazu iz hladnjaka. Danas se u klima komorama pretežno koristi ovaj tip hladnjaka (sa sekundarnim rashladnim fluidom). Voda potrebna za hlađenje celog objekta se priprema u rashladnoj mašini. Na ovaj način se izbegava opasnost od curenja freona u klima komori i obezbeđuje centralna priprema hladne vode, čime je smanjena količina primarnog rashladnog fluida u sistemu. Međutim, rad sa sekundarnim rashladnim fluidom je termodinamički nepovoljniji zbog dodatnog posrednika u predaji toplote.

Prema mestu ugradnje hladnjaci se mogu podeliti na:

- a) **Hladnjake u klima komori**, kada je hladnjak jedna od sekcija klima komore
- b) **Hladnjake u elementima** za doradu ili ubacivanje vazduha u prostoriju; tada se obično u hladnjacima vrši samo odvođenje suve toplote bez izdvajanja vlage.

HLADNJACI KOJI RADE SA VODOM kao rashladnim fluidom obavezno koriste suprotnosmerno-unakrsno strujanje rashladnog i hlađenog fluida jer je tada veći efekat razmenjene količine toplote.

Uobičajene temperature koje se javljaju prilikom procesa hlađenja su:

$$\text{VAZDUH :} \quad t_{V,ul} = 26 \div 35^{\circ} C, \quad t_{V,iz} = 10 \div 15^{\circ} C$$

$$\text{VODA :} \quad t_{W,ul} = 5 \div 6^{\circ} C, \quad t_{W,iz} = 11 \div 12^{\circ} C$$

što daje uobičajenu vrednost $\Delta t_W = 5 \div 6^{\circ} C$.

Efekat hlađenja nekog hladnjaka može tačno da se odredi jedino eksperimentalnim putem. Ipak postoje izrazi za približan, krajnje uprošćen proračun, koji pokazuje uticaj pojedinih parametara na razmenjenu količinu toplote.

Ukupno odvedena toplota u hladnjaku jednaka je zbiru suve i latentne:

$$Q = Q_s + Q_l \quad (8.2)$$

$$Q_s = \alpha_s \cdot F \cdot \Delta t_m \quad (8.3)$$

$$Q_l = \sigma \cdot F \cdot r \cdot \Delta x_m \quad (8.4)$$

gde su:

- α_s - koeficijent prelaza suve toplote sa vazduha na površinu hladnjaka,
 F - površina hladnjaka,

Δt_m - srednja temperaturska razlika rashladnog i hlađenog fluida,

$\sigma = \frac{\alpha_s}{c_p}$ - Luisov broj,

r - toplota promene faze (kondenzacije vlage)

Δx_m - razlika apsolutnih vlažnosti vazduha koji se hladi i zasićenog vazduha na t_{PH} ,

Korišćenjem Luisovog zakona dobija se izraz:

$$Q = \alpha_s \cdot F \cdot \left(\Delta t_m + \frac{r \cdot \Delta x_m}{c_p} \right) = \frac{\alpha_s \cdot F \cdot \Delta h_m}{c_p}, \quad (8.5)$$

gde je:

Δh_m - srednja razlika entalpija vazduha koji se hladi i zasićenog vazduha na t_{PH} .

Ako se uvede neki fiktivni, korigovani koeficijent prelaza toplote α_k , koji obuhvata prelaz i suve i latentne toplote, onda se može napisati:

$$\alpha_k \cdot F \cdot \Delta t_m = \frac{\alpha_s \cdot F \cdot \Delta h_m}{c_p} \quad (8.6)$$

odakle sledi:

$$\alpha_k = \alpha_s \cdot \frac{\Delta h_m}{c_p \cdot \Delta t_m} \quad (8.7)$$

odnosno da je $\alpha_k > \alpha_s$.

U projektantskoj praksi potrebnu veličinu hladnjaka određuje proizvođač na osnovu sledećih podataka koje dostavlja projektant:

- protoka vazduha kroz hladnjak,
- stanja vazduha na ulazu i izlazu iz hladnjaka (temperature i vlažnosti)
- temperaturskog režima hladne vode.

Na bazi datih podataka, odnosno uslova u kojima hladnjak radi, proizvođač određuje:

- površinu hladnjaka,
- maseni protok rashladnog fluida (vode),
- pad pritiska sa vodene i vazdušne strane i
- brzinu strujanja vazduha kroz hladnjak.

HLADNJACI SA DIREKTNIM ISPARAVANJEM rade sa primarnim rashladnim fluidom. Toplota potrebna za isparavanje rashladnog fluida oduzima se od vazduha koji struji kroz hladnjak. Smer strujanja nije bitan kao kod vodenih hladnjaka, jer je temperatura površine hladnjaka konstantna. Temperatura isparavanja rashladnog fluida (a samim tim i pritisak isparavanja) određuje se iz uslova hlađenja vazduha. Analizom potrebnog hlađenja vazduha u "h-x" dijagramu određuje se i usvaja temperatura površine hladnjaka, dok se za temperaturu isparavanja usvaja vrednost koja je za oko 3°C niža.

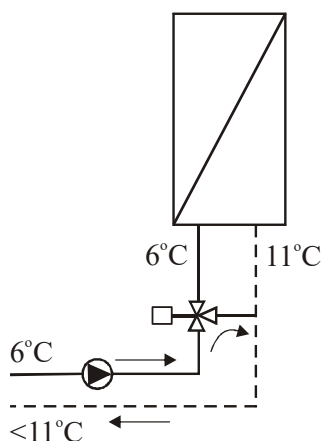
Temperatura isparavanja mora biti iznad 0°C, inače bi došlo do smrzavanja izdvojene vlage iz vazduha, što prouzrokuje:

- smanjenje poprečnog preseka za strujanje vazduha kroz hladnjak,
- smanjenje kapaciteta hladnjaka, jer se povećava otpor provođenju toplote zbog naslage leda,
- prekid rada postrojenja zbog otapanja leda.

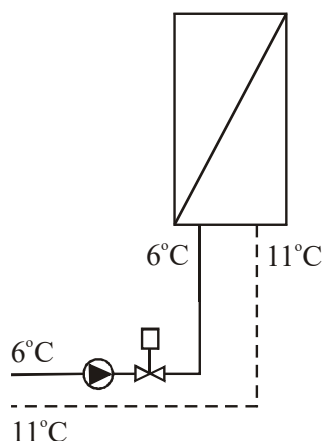
Regulacija rashladnog učinka hladnjaka vrši se **kvantitativno**, promenom protoka rashladnog fluida, dok temperatura na ulazu u hladnjak ostaje nepromenjena:

$$\dot{m}_w \neq \text{const}, t_{w,ul} = \text{const}.$$

Zbog malih razlika temperatura vode na ulazu i izlazu iz hladnjaka kvalitativna regulacija nije dobra - bila bi jako gruba - povišenjem temperature vode u razvodu za samo 1°C rezultovalo bi smanjenjem rashladnog učinka hladnjaka za 17%. Na slici 8.5 prikazani su načini kvantitativne regulacije hladnjaka.



Slika 8.5a Regulacija pomoću trokutavog ventila koji radi kao razdelni

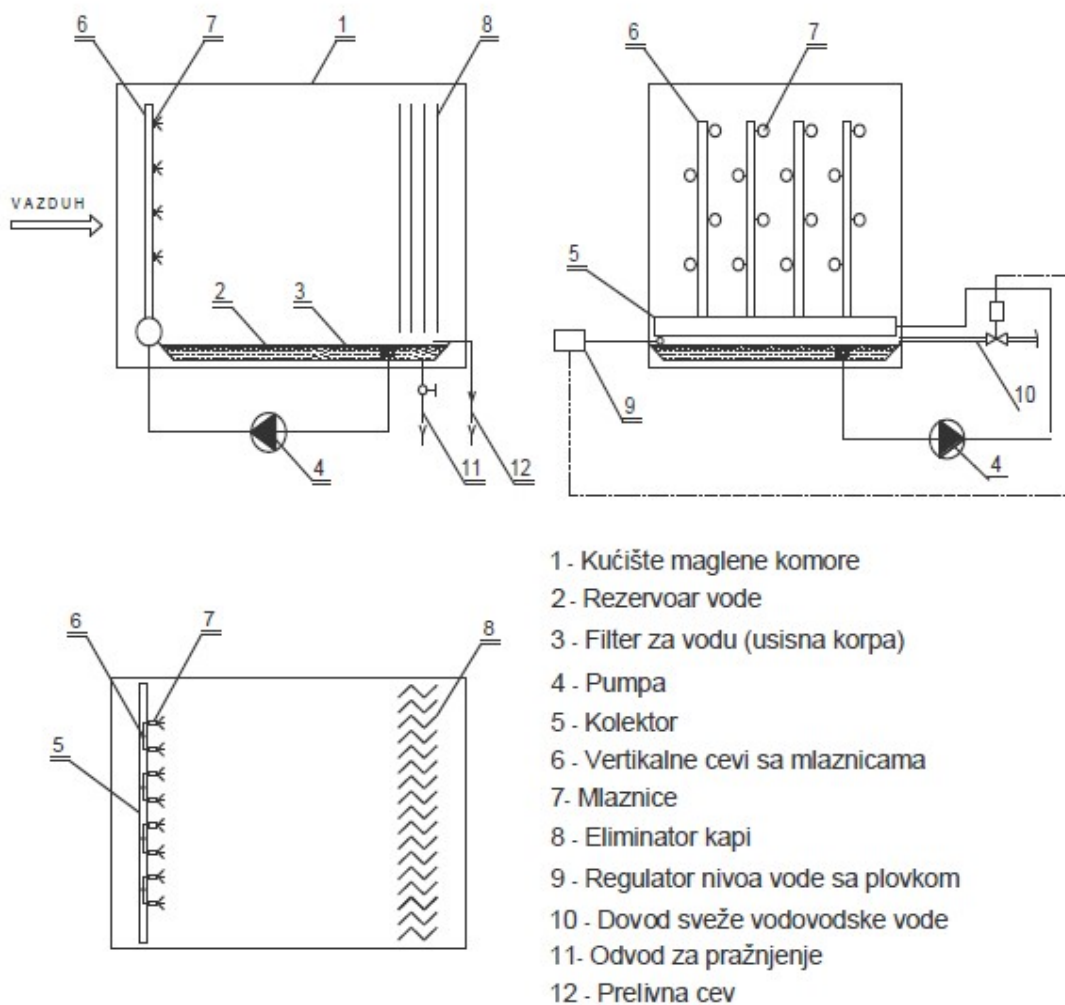


Slika 8.5b Regulacija pomoću prigušnog ventila - povećanje prigušenja smanjuje protok

9 ELEMENTI ZA VLAŽENJE VAZDUHA

MAGLENA KOMORA

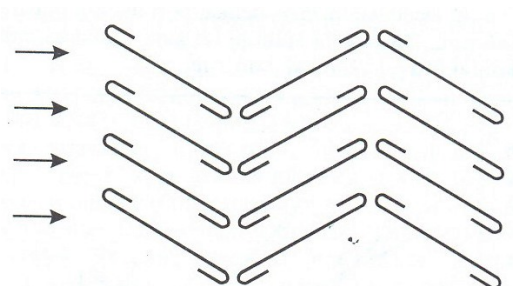
Maglena komora je deo klima komore u kojoj se vrši vlaženje vazduha vodom. Maglena komora se sastoji od kućišta od pocinkovanog lima, nerđajućeg čelika ili nekog veštačkog materijala (plastike). Donji deo maglene komore je kada za skupljanje i dopunu vode. Na jednoj strani maglene komore nalaze se mlaznice čija je uloga raspršivanje vode u što sitnije kapi. Da bi se intenzivirao proces razmene materije (ostvarilo bolje vlaženje), potrebno je da raspršene kapi vode budu jako sitne, u cilju povećanja površine kontakta između vode i vazduha. Šematski prikaz maglene komore u 3 projekcije (sa strane, frontalno i odozgo) prikazan je na slici 9.1.



Slika 9.1 Maglena komora za vlaženje vazduha vodom

Većina mlaznica za raspršivanje vode je sa unutrašnje strane obrađena u obliku spirale, pa struja vode dobija rotaciju i postiže se bolje raspršivanje. Mlaznica je vezana za cevni registar (verikalne cevi koje su povezane sa horizontalnim razdelnikom). Često se stavlja zaštitna mrežica kako bi se sprečio prodor nečistoća koje mogu da zapuše mlaznicu. Mlaznice se izrađuju od mesinga, bronz, čelika, porcelana, plastičnih materijala, otvora $1\div 5$ mm. Veličina raspršenih kapi vode kreće se od $0,01\div 1$ mm u prečniku.

Kadica ima priključak za dolivanje vode, sa ventilom koji je povezan sa plovkom za regulisanje nivo vode u kadi. Kada nivo vode u kadi opadne, otvara se ventil na priključku za dovod sveže vode. Na kadi se nalazi i prelivna cev, kao i cev za pražnjenje, koja je vezana za dno kade. U kadi je potopljen usisni deo cevovoda koji je zaštićen mrežom za sprečavanje prodora nečistoća. Cirkulaciona pumpa usisava vodu iz kade i šalje je u cevni registar.



Slika 9.2 Eliminators kapi

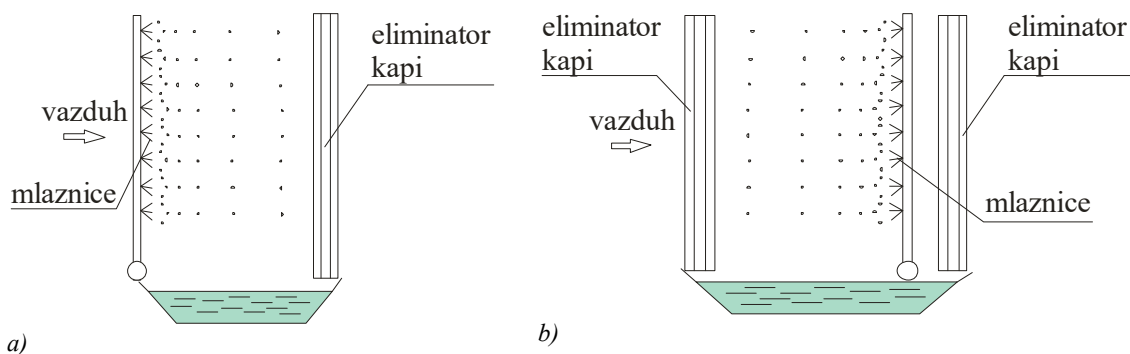
Izlazni presek (a nekada i ulazni) snabdeven je eliminatorsom kapi, čija je uloga da izdvoji iz struje vazduha kapi vode koje nisu isparile. Eliminators kapi je sačinjen od paralelnih ploča u koje udaraju kapljice vode i slivaju se u kadi, dok struja vazduha prolazi kroz eliminators (slika 9.2). Ploče eliminatorsa mogu biti izrađene od pocinkovanog lima ili od nekog veštačkog materijala. Važno je da je materijal eliminatorsa kapi otporan na koroziju.

Dužina maglene komore je 1÷2 m, a brzina strujanja vazduha je 2÷3 m/s, tako da je vreme kontakta između vode i vazduha nešto ispod 1s. Voda u maglenoj komori se, po pravilu, termički ne obrađuje – niti se zagreva, niti se hladi.

Regulacija vlaženja se može vršiti na dva načina:

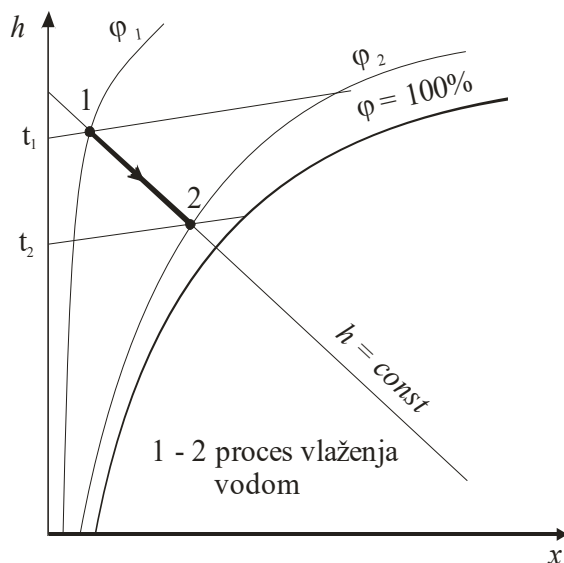
1. Uključivanjem i isključivanjem pumpe (ON/OFF sistem)
2. Delovanjem na ventil na dovodnoj cevi – prigušivanjem (pritvaranjem ventila) smanjuje se protok vode koji dolazi do mlaznica.

Smer strujanja vazduha kroz maglenu komoru može biti istosmeran ili suprotnosmeran (slika 9.3). Pri suprotnosmernom strujanju vazduha, u odnosu na pravac raspršivanja vode, ostvaruje se bolji efekat vlaženja.



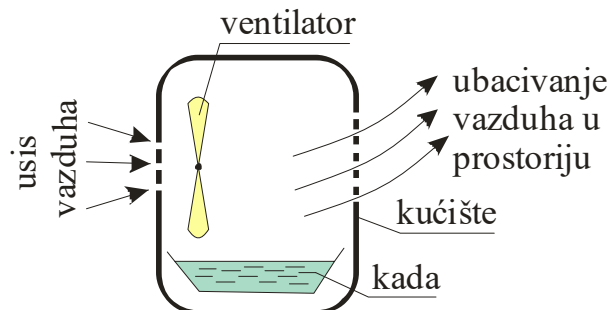
Slika 9.3 Smerovi strujanja vazduha kroz maglenu komoru: a) istosmerni, b) suprotnosmerni

Proces vlaženja vodom u maglenoj komori smatra se izentalpskim procesom ($h = \text{const}$) jer je entalpija vode zanemarljivo mala ($h_w = c_w \cdot t_w = 4,19 \cdot 10 \approx 40 \text{ kJ/kg}$) i ne utiče bitno na pravac promene stanja prilikom vlaženja (slika 9.4).



Slika 9.4 Proces vlaženja u h - x dijagramu

Pored maglene komore postoje i lokalni ovlaživači vazduha sa vodom, koji se postavljaju u prostoriji. Oni su veoma jednostavne konstrukcije: u kućištu, koje je uglavnom lepo oblikovano, nalazi se posuda sa vodom (rezervoar) i mali aksijalni ventilator kojim se ostvaruje strujanje vazduha kroz aparat (sl. 9.5).



Slika 9.5 Lokalni ovlaživač vazduha

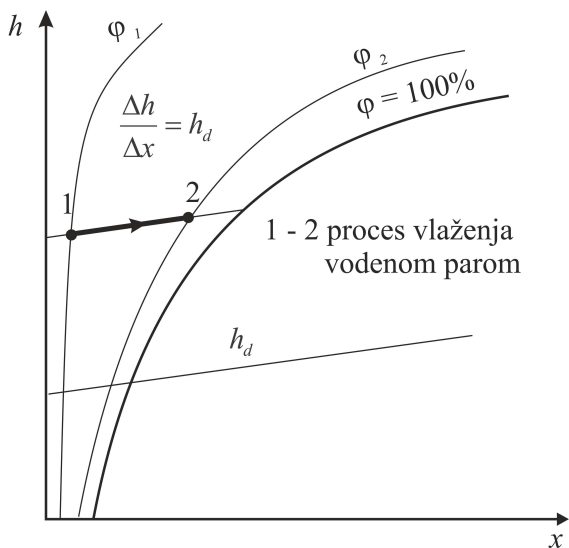
S obzirom da se pri procesu vlaženja vodom vazduh hladi (što se vidi sa dijagrama na slici 9.4), često se dešava da proizvođači lokalnih ovlaživača reklamiraju svoje uređaje kao ekološke uređaje za hlađenje leti, koji troše jako malo energije (potrebne za rad ventilatora, koji je obično jako male instalisane snage), bez kompresora i freona! Njihov efekat i efikasnost su za diskusiju - tačno je da hlade vazduh, ali i povećavaju vlažnost; nekada je mnogo ugodnije imati nižu relativnu vlažnost pri višoj temperaturi, nego obrnuto.

Često se može naći u literaturi ili čuti u praksi za pojam **adijabatsko hlađenje**, što nije ništa drugo nego izentalpsko vlaženje vodom.

VLAŽENJE VAZDUHA VODENOM PAROM

Uporeba vode za vlaženje vazduha povlači zauzimanje znatnog prostora u klima komori, kao i cirkulisanje veće količine vode od one koja ispari. Pri tome dolazi do snižavanja temperature vazduha u procesu vlaženja, pa je porebno imati ukupno veću površinu grejača (ili dva stupnja zagrevanja vazduha - predgrejač i dogrejač). Ako se tome dodaju i problemi higijenske prirode - povoljni uslovi za razvoj bakterija i mikroorganizama u toploj i vlažnoj atmosferi maglene komore, onda ima dovoljno razloga da se ovakav način vlaženja izbegava.

Uvođenje vodene pare direktno u struju vazduha znatno je jeftiniji i jednostavniji način vlaženja vazduha, koji pruža znatno bolje mogućnosti za regulaciju. Zbog toga se u praksi mnogo češće koriste parni ovlaživači, pogotovo kada su u pitanju objekti u kojima su strogi zahtevi po pitanju održavanja relativne vlažnosti u određenim granicama, npr. elektronska industrija, računski centri, farmacija, bolnice, muzeji, itd.



Slika 9.6 Proces vlaženja u h-x dijagramu

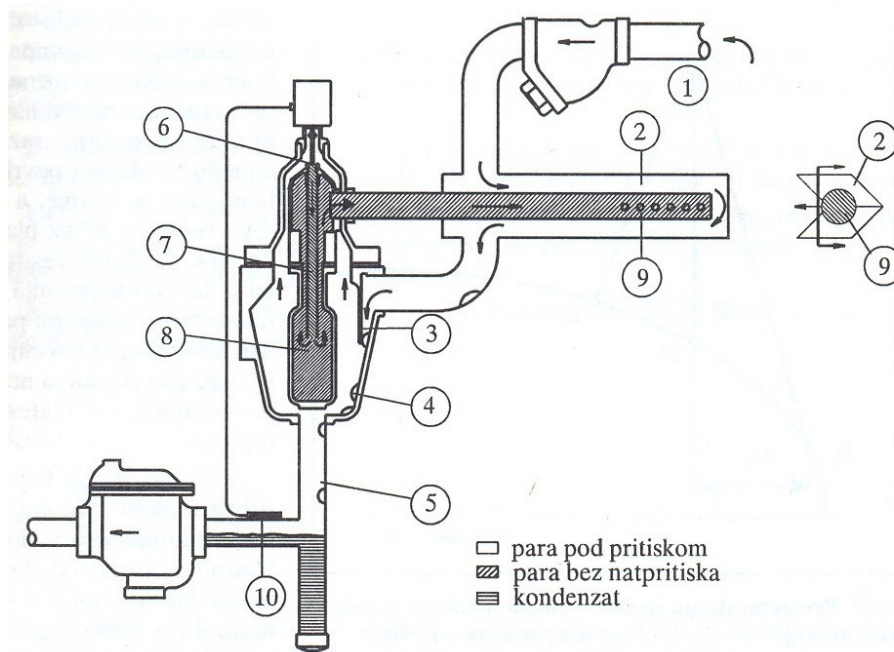
Neophodno je da se proces vlaženja obavlja suvom parom, pošto vlažna para i kondenzat mogu dovesti do pojave neprijatnih mirisa, kao i do mogućnosti razvoja algi i bakterija u kondenzatu. Uvođenjem suve pare u struju vazduha dolazi do mešanja vlažnog vazduha i pare, pa se iz bilansa mešanja dolazi do izraza:

$$\frac{h_2 - h_1}{x_2 - x_1} = \frac{\Delta h}{\Delta x} = h_d,$$

koji određuje pravac procesa vlaženja parom. Pravac promene stanja prilikom vlaženja parom određen je entalpijom pare kojom se vrši vlaženje, što je prikazano na dijagramu na slici 9.6. U zavisnosti od entalpije vodene pare h_d , temperatura vazduha nakon vlaženja može da poraste.

Postoji više proizvođača uređaja za vlaženje parom. Jedan od njih je Armstrong, čiji je uređaj prikazan na slici 9.7. Uređaj se najčešće postavlja iza klima komore u kanal dovodnog vazduha koji služi za distribuciju vazduha do klimatizovane prostorije. Ovaj uređaj koristi paru proizvedenu u centralnom izvoru i povezan je sa cevovodom za dovod pare (1) na kome se nalazi odvajač nečistoća. Para se uvodi u dvostruku cev (2) kroz omotač glavne perforirane cevi, koja je postavljena u kanal kroz koji struji vazduh koji se vlaži. Iz cevi-omotača para ulazi u sud veće zapremine (4) u kome se izdvaja kondenzat koji se formirao u toku strujanja pare kroz cevni omotač perforirane cevi (9). Da bi izdvajanje kondenzata bilo efikasno, na ulazu u sud nalazi se ploča u vidu brane (3). Kondenzat zajedno sa nečistoćama odvodi se kroz odvajač kondenzata na dnu uređaja. Nečistoće odlaze sa kondenzatom ili se talože u delu cevovoda koji služi za pražnjenje. Iz suda (4) para prolazi kroz regulacioni ventil (6) i kroz cev (7) ulazi u komoru za naknadno isparavanje (8) u kojoj praktično vlada atmosferski pritisak. U komori dolazi do sniženja pritiska i eventualnog naknadnog isparavanja, dok u sudu oko komore vlada viši pritisak i viša temperatura pare. Na taj način je obezbeđeno da suva para ulazi u perforiranu cev (9) odakle ističe u struju vazduha. Kondenzacija u perforiranoj cevi je takođe sprečena, pošto se ona zagreva parom višeg pritiska koja se uvodi u aparat kroz omotač (2).

Regulisanje količine pare koja se ubrizgava u struju vazduha (regulacija relativne vlažnosti vazduha koji se vlaži) vrši se preko regulacionog ventila (6), koji može imati pneumatski ili električni pogon. Higrostat koji upravlja radom regulacionog ventila može biti postavljen u prostoriju ili u kanal dovodnog vazduha. Za početni period rada, kada su cevovodi i sam aparat još hladni, sigurnosni termostatski (10) drži regulacioni ventil (6) u zatvorenom položaju.



Slika 9.7 Parni ovlaživač za vazduh

Postoje i uređaji za vlaženje parom koji imaju električni grejač za proizvodnju vodene pare (ne koriste paru iz centralnog izvora). Jedan od tih uređaja je i HYGROMATIC, koji se sastoji od:

- parnog cilindra, u kome se pomoću električnog grejača proizvodi vodena para; cilindar je rastavljiv, tako da može lako da se čisti;
- električnog grejača koji se nalazi u cilindru; ima elektrode od nerđajućeg čelika velike površine;
- pumpe za odmuljivanje cilindra, s obzirom da se isparavanjem vode u cilindru povećava koncentracija soli i nečistoća u preostaloj vodi, pa se povremeno izbacuje jedan deo vode, kako bi se sprečilo taloženje kamenca;
- solenoidnog ventila na cevovodu za dovod vode, radi dopunjavanja cilindra.

Ovaj uređaj ima potpuno automatizovan i fleksibilan rad. Izrađuju se u više nivoa automatske regulacije:

1. "L" regulator, koji se obično koristi kod manjih aparata i koji radi na principu ON/OFF;
2. "EM" regulator, koji ima proporcionalnu regulaciju proizvodnje pare, tj. vlaženja vazduha;
3. "MP" regulator, koji u sebi sadrži mikroprocesor, standardni interfejs i može se povezati sa centralnim sistemom za nadzor i upravljanje.

10 FILTRIRANJE VAZDUHA

Pored održavanja termičkih uslova sredine, zadatak klimatizacionih postrojenja je i održavanje čistoće vazduha. Ovo je posebno značajno u današnje vreme sve veće zagađenosti okoline i sve strožih zahteva za čistoćom vazduha u mnogim oblastima i granama industrije.

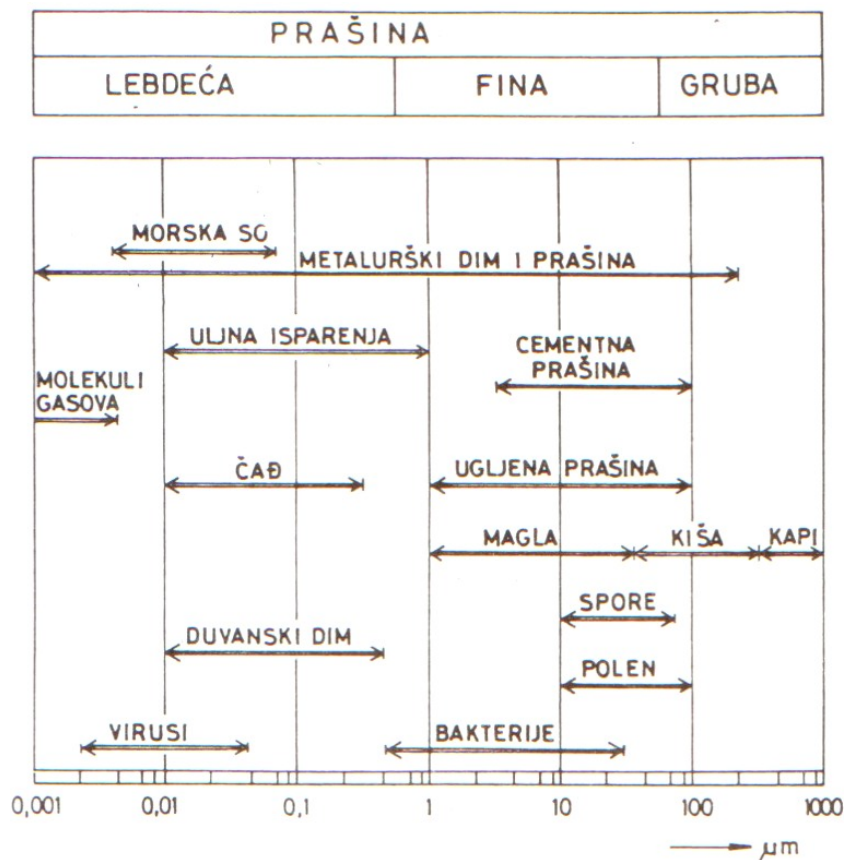
Prečišćavanje vazduha (eliminisanje čvrstih, tečnih i gasovitih nečistoća) može se ostvariti na više načina:

- filtriranjem;
- apsorpcijom;
- otprašivanjem.

Filtriranjem se iz vazduha odstranjuju čvrste (i tečne) čestice, i to je proces prečišćavanja koji se obavezno primenjuje u klimatizacionim postrojenjima. Izdvajanje gasovitih primesa apsorpcijom vrši se u skruberima. Pod otprašivanjem se podrazumeva izdvajanje prašine veće koncentracije. Poslednja dva navedena načina prečišćavanja vazduha primenjuju se u industrijskoj klimatizaciji.

Zagađenost vazduha izazivaju čestice različitog porekla, materijala i veličine (biljnog, životinjskog i mineralnog). Na slici 10.1 prikazane su prosečne veličine najčešćih zagađivača vazduha. Podela prašine prema veličini:

- gruba prašina 50 do 500 μm – lako se taloži;
- fina prašina 0,5 do 50 μm – lagano se talože;
- lebdeća prašina manja od 0,5 μm – ne taloži se već lebdi u vazduhu.



Slika 10.1 Zagađivači vazduha

Ne postoji univerzalni filter koji efikasno izdvaja čestice prašine svih dimenzija. Filteri se proizvode za odstranjivanje čestica određene veličine, pa je u skladu sa dimenzijama prašine i osnovna podela filtera:

- filter za grubu prašinu;
- filter za finu prašinu;
- filter visokog učinka za finu prašinu;
- apsolutni filter.

Da bi se kvalitet pojedinih filtera mogao realno porediti, bilo je potrebno razviti i standardizovati metodologiju za ispitivanje efikasnosti tih filtera. Metod ispitivanja filtera zavisi od veličine čestica prašine za koju je namenjen.

Filteri za grubu i finu prašinu ispituju se pomoću veštačke probne prašine koja se sastoji od 72% kamenog brašna, 25% čađi i 3% pamuka. Meri se gravimetrijski stepen izdvajanja (efikasnosti) definisan na sledeći način:

$$\eta = \left(1 - \frac{c_{iza}}{c_{ispred}}\right) \cdot 100\% \quad (10.1)$$

gde je:

c_{iza} – koncentracija prašine iza filtera (posle filtriranja)

c_{ispred} – koncentracija prašine ispred filtera (pre filtriranja)

Za ispitivanje visokoučinskih filtera za finu prašinu koristi se prirodno zagađeni vazduh. U struji vazduha, ispred i iza filtera koji se ispituje, postavi se visokokvalitetni filter papir i meri se vreme za koje se svaki papir zaprlja (dostigne određenu zacrtnjenost). Upoređivanjem ovih vremena dobija se stepen korisnosti filtera E_m .

Klasifikacija filtera i osnovne karakteristike prikazane su u tabeli 10.1.

Tabela 10.1 Klasifikacija filtera za vazduh – prema različitim standardima

| Vrsta filtera | Efikasnost filtera η | Stara oznaka | EN 779:2012 | EN 1822-1:2019 |
|-------------------------------|--------------------------------|--------------|-------------|----------------|
| Za grubu prašinu | $\eta < 90$ | EU1-EU2 | G1-G2 | - |
| Za finu prašinu | $90 \leq \eta < 95$ | EU3-EU4 | G3-G4 | - |
| Visokoučinski za finu prašinu | $95 \leq \eta < 99,5$ | EU5-EU12 | M5-M6 | EPA |
| Apsolutni za lebdeću prašinu | $99,5 \leq \eta < 99,995$ | EU13-EU14 | F7-F8 | HEPA |
| | $99,995 \leq \eta < 99,999995$ | EU15-EU18 | F9 | ULPA |

Apsolutni filteri ispituju se DOP testom. Naziv metode ispitivanja potiče od hemijske supstance koja se koristi – di-okti-ftalat. Pri stvaranju aerosola ove supstance dobijaju se čestice približno istog prečnika (0,3 μm).

EFEKTI FILTRIRANJA VAZDUHA

U zavisnosti od veličine čestica prašine, u tehnici klimatizacije primenjuju se različiti efekti za odstranjivanje zagađivača iz vazduha:

- prosejavanje;
- taloženje;
- inercija;
- difuzija;
- intercepcija.

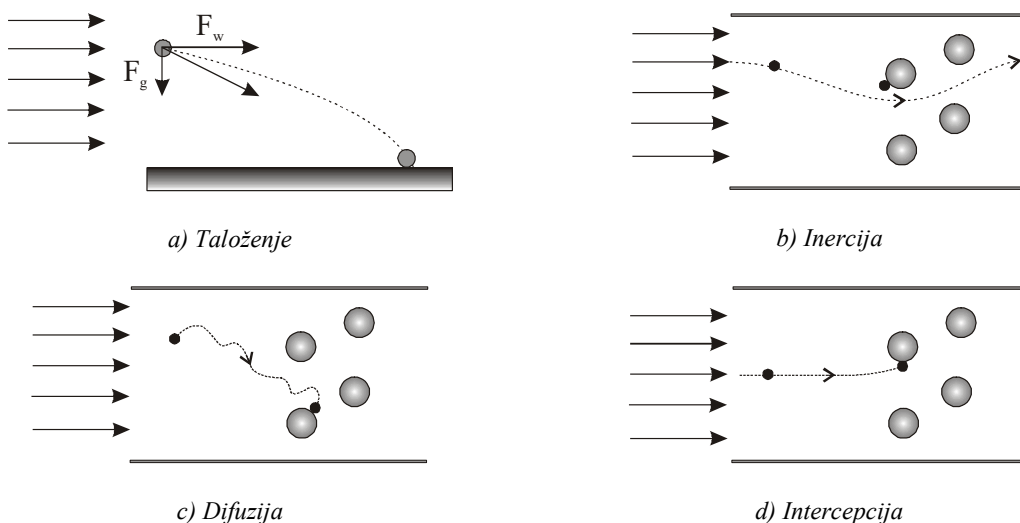
Efekat prosejavanja se koristi za izdvajanje najkrupnijih čestica prašine. Kada je prečnik čestice nečistoće veći od otvora filtera, ta čestica ne može da prođe i zadržava se na filteru.

Efekat taloženja je takođe karakterističan za čestice prašine veće mase. Na svaku česticu koja se kreće deluju dve sile. Pored sile koja izaziva kretanje čestice u struji vazduha, na česticu deluje i sila zemljine teže koja uslovljava taloženje pre svega krupnijih čestica (slika 10.2a).

Efekat inercije je takođe karakterističan za čestice prašine veće mase, ali manje nego u prethodna dva slučaja. Pri strujanju kroz filtersku masu, zbog prirode materijala od kog je filter izrađen, vazduh mora često da menja pravac strujanja. Čestice prašine zbog inercije teško mogu da prate ove česte promene pravca strujanja, pa se sudaraju s vlaknima filtera, “lepe se” i ostaju na njima (slika 10.2b).

Efekat difuzije je karakterističan za čestice prašine vrlo male mase (prečnika manjeg od $0,1 \mu\text{m}$). Nastaje usled Braunovog kretanja molekula. Usled neravnomernog sudara molekula i submikronskih čestica dolazi do haotičnog kretanja, nezavisno od smera strujanja vazduha (slika 10.2c). Kada čestica prašine dospe blizu filterskog vlakna, ona “trpi” veći broj udara sa suprotne strane, pa se usmerava ka vlaknu, sudara s njim i ostaje na njemu.

Efekat intercepcije nastaje kada čestica prašine prolazi pored filterskog vlakna na rastojanju manjem od poluprečnika čestice. Usled dejstva elektrostatičkih sila, čestica se “lepi” za vlakno (slika 10.2d). Efekat intercepcije naziva se i efekat kačenja.

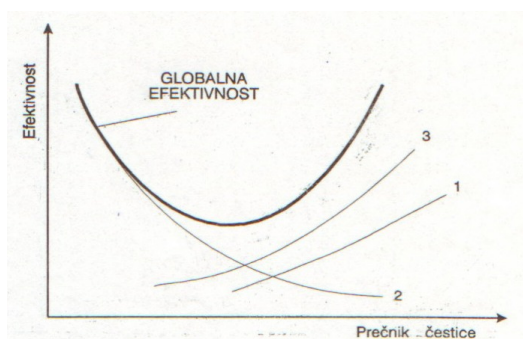


Slika 10.2 Efekti filtiranja

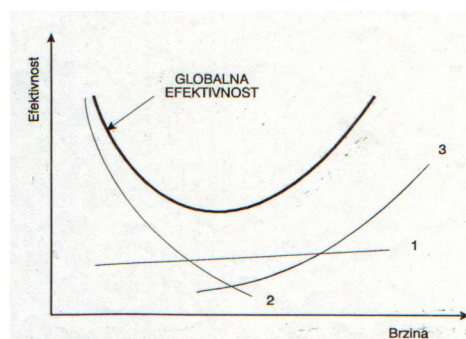
Ne koristi svaki filter za vazduh sve navedene efekte izdvajanja čestica prašine, ali se često istovremeno koristi više efekata filtriranja. Efikasnost filtera zavisi od:

- vrste filterske mase;
- veličine čestica;
- brzine strujanja vazduha kroz filter.

Na slici 10.3a prikazana je efikasnost pojedinih mehanizama izdvajanja prašine u zavisnosti od prečnika čestice. Što je veći ekvivalentni prečnik čestica prašine, efikasnost izdvajanja efektom inercije i intercepcije raste, a difuzijom opada. Pri povećanju brzine strujanja vazduha (a time i čestica prašine koje se nalaze u vazduhu) efikasnost odstranjivanja nečistoća efektom inercije raste, difuzijom opada, a efekat intercepcije praktično ne zavisi od brzine strujanja kroz filtersku masu (slika 10.3b).



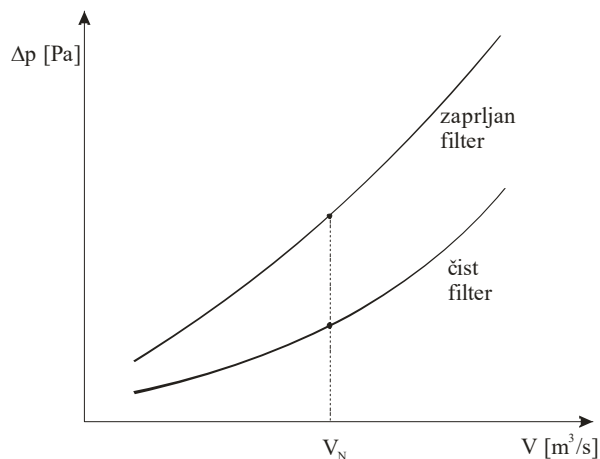
a) Zavisnost stepena izdvajanja od prečnika čestica



b) Zavisnost stepena izdvajanja od brzine

Slika 10.3 Stepen izdvajanja filtera (1 – efekat intercepcije, 2 – efekat difuzije, 3 – efekat inercije)

Pri strujanju vazduha kroz filter dolazi do pada pritiska. Vrednost pada pritiska na filteru u klimatizacionim postrojenjima može da se kreće u vrlo širokom opsegu: od 20 Pa za grube filtere do 500 Pa za apsolutne. Tokom rada filter se prlja. Čestice prašine koje se lepe na filterska vlakna smanjuju svetli presek za strujanje vazduha, pa se pad pritiska u filteru povećava. Na slici 10.4 prikazane su krive pada pritiska u funkciji protoka (odnosno brzine strujanja vazduha za filter date geometrije) za čist i zaprljan filter. Za nominalni (projektni) protok vazduha kroz čist filter, pad pritiska je $\Delta p_{N\phi}$. Tokom rada, usled izdvajanja čestica prašine na filterskim vlaknima, pad pritiska se povećava i kada se dostigne granična vrednost koja odgovara maksimalno zaprljanom filteru, na kontrolnoj tabli uključuje se alarm koji upozorava rukovaoca postrojenja da je potrebno da zameni ili opere filter.



Slika 10.4 Pad pritiska pri stujanju vazduha kroz filter

MATERIJALI ZA FILTERE

Materijali za izradu filtera treba da ispune sledeće zahteve:

- velika sposobnost akumulacije čestica prašine u filterskoj masi;
- dobra propustljivost vazduha (što manji pad pritiska pri strujanju)
- dobra fizička svojstva (mehanička čvrstoća, otpornost na habanje, savitljivost, postojanost na visokim temperaturama, itd.);
- da nije higroskopan;
- da zadržava svoje osobine pri obradi.

Materijali od kojih se izrađuju filteri:

- prirodni (pamuk, vuna, celuloza,...)
- veštački (poliamid, poliestar, polipropilen, polietilen, fiber vlakna, teflon,...)

Postoje različite vrste i konstrukcije filtera koji se koriste u tehnici ventilacije i klimatizacije:

- Žičani filter – izrađuje se od isprepletane žice. Broj otvora po cm^2 može biti različit zavisno od veličine čestica koje treba da izdvoji. Ovo su vrlo grubi filteri i uglavnom imaju zaštitnu funkciju.
- Kasetni filter – u metalni ram postavlja se filterski materijal (slika 10.5). Često se koriste u klimatizaciji. Zauzimaju malo prostora u klima komori.
- Vrećasti filter – izrađuje se od istog materijala kao i kasetni. Za isti poprečni presek ima znatno veću površinu od kasetnog filtera, tako da može da izdvoji mnogo više prašine (duži period između zamene filtera), ali zauzima više mesta u klima komori (slika 10.5). Ovo je danas najčešće korišćeni tip filtera u klima komorama.
- Filter sa pokretnom trakom, tzv. rol filter – koristi se uglavnom u industriji. Filterska masa može biti i nauljena.
- Elektrofilteri – imaju vrlo visok stepen izdvajanja prašine. Izrađuju se u širokom opsegu veličina: od najmanjih za primenu u kućnim klima uređajima do najvećih za prečišćavanje dimnih gasova u termoelektranama.

- Filer s aktivnim ugljem – koristi se za izdvajanje gasovitih zagađivača iz vazduha (slika 10.5).



Vrećasti filteri



Vrećasti filter sa 4 ćelije



Kasetni filteri



Filteri sa aktivnim ugljem

Slika 10.5 Vrste filtera