

Ventilacija i nužnost snabdevanja prostorije svežim vazduhom

Aleksandar Janković *

1. POTREBA ZA VENTILACIJOM

Minimalna količina svežeg vazduha potrebna za disanje je stvarno mala: oko 0,2 l/s po osobi. Za održavanje ugodnih uslova u jednoj sredini, nije dovoljno dovoditi samo ovako male količine svežeg vazduha. Količine vazduha veće od minimalnih moraju se dovoditi da bi se postiglo:

- zadovoljenje potreba u kiseoniku za ljude u prostoriji,
- razblaživanje prisutnih mirisa do određenog prihvatljivog nivoa,
- razblaživanje koncentracije CO₂ do zadovoljavajućeg nivoa.

Razblaživanje mirisa postiže se dovođenjem svežeg spoljnog vazduha, ili se mirisi mogu odstraniti upotrebom filtera sa aktivnim ugljem. Količina vazduha koja se dovodi u prostoriju zavisi pre svega od količine proizvedenih mirisa, kao i namene same prostorije.

CO₂ je prisutan u svežem vazduhu do 0,03%, dok su koncentracije do 0,1% sasvim prihvatljive u klimatizovanim i ventilisanim prostorijama, koje su zaposednute ljudima. Iz ovoga proizilazi da je dovođenje svežeg vazduha ubedljiv način za smanjenje koncentracije CO₂ u prostoriji. Koncentracija CO₂ se naravno ne može smanjiti ispod 0,03% i efikasnost izabranog broja izmena vazduha, kao faktora razblaženja CO₂, nešto se menja, pošto ljudi u prostoriji prilikom disanja kontinualno proizvode CO₂. U stvari, količina CO₂ koju proizvodi jedan čovek iznosi $4,72 \times 10^{-3}$ l/s. Količina svežeg vazduha koja je neophodna da odgovori gornjim zahtevima zavisi od gustine zaposednutosti prostora i njegove namene. Ova količina je izražena u tri različita oblika:

- kao broj izmena vazduha (n — izmena zapremine prostora u jednom času),
- kao količina vazduha koja se dovodi u l/s po čoveku, i
- kao količina vazduha koja se dovodi u l/s po m² poda.

Može biti neekonomično koristiti broj izmena vazduha za prostorije sa vrlo velikim visinama i zato se za velike sale koriste druga dva metoda. Korišćenje metoda l/s po čoveku ima prednosti kada je gustina zaposednutosti velika, kao što je u salama za igranke, bankete i sl., gde

se gustina zaposednutosti penje do 1 m² poda po čoveku.

S druge strane, upotreba l/s po m² poda zadovoljava u kancelarijama, gde je tipična gustina zaposednutosti već unapred poznata i varira od 6 do 12 m²/čovek, sa 10 m² po čoveku prosečno.

Sledeće vrednosti obroka svežeg vazduha su zadovoljavajuće:

PRIMENA	l/s po čoveku	l/s m ²
Stanovi	8 — 12	—
Pansioni — sobe	18 — 25	—
Koktel-barovi	12 — 18	—
Robne kuće	5 — 8	—
Fabrike	—	0,8
Garaže	—	8,0
Operacione sale	—	16
Bojnička očeđenja	8 — 12	—
Kancelarije	5 — 8	1,3—2,0
Restorani	12 — 18	—
Pozonišne i bioskopske sale	5 — 8	—

Sanitarni čvorovi, posebno oni bez spoljnih prozora, su izuzetni slučajevi. Ovde se mora predvideti mehanička ventilacija koja će dati 15 izmena vazduha na čas, ili 80 l/s po sanitarnoj šolji, ili 16 l/s m².

2. JEDNAČINA RAZBLAŽENJA KONCENTRACIJE

Jednačina je izvedena u funkciji veličine pri kojoj se kontaminant u ventilisanom prostoru razblažuje (pod uticajem svežeg vazduha, koji se dovodi u tu svrhu). Kontaminant u ovom slučaju je CO₂.

Posmatrajmo prostoriju koja ima zapreminu V (m³) u kojoj je koncentracija CO₂ veličine C , izražena kao frakcija (delova CO₂ u milion delova vazduha).

Ako, na primer, za vreme Δt , mala količina vazduha Δq potpuno čista (bez CO₂) ulazi u prostoriju, mala količina Δq kontaminiranog vazduha se istiskuje iz prostorije. Kontaminacija u prostoriji je sada smanjena za veličinu $\Delta q/V \cdot C$.

Ovo smanjenje koncentracije može se označiti sa ΔC .

$$\Delta C = - \frac{\Delta q}{V} \cdot C$$

Negativan znak je zbog smanjenja koncentracije.

* Aleksandar Janković, dipl. ing., *Energoprojekt — OOUR za urbanizam i arhitekturu, Biro za instalacije*, 11000 Beograd, Njegoševa 84.

Sledi da je veličina promene koncentracije data izrazom $\Delta C/\Delta t$.

$$\frac{\Delta C}{\Delta t} = -\frac{C}{V} \cdot \frac{\Delta q}{\Delta t}$$

Ali $\Delta q/\Delta t$ predstavlja protok svežeg vazduha, konstantan je i jednak Q .

Tada se promena koncentracije u odnosu na vreme može napisati:

$$\frac{dc}{dt} = -C \frac{Q}{V}$$

Fizički problem je sada napisan u obliku jednostavne diferencijalne jednačine. Integracijom

$$\int \frac{dc}{C} = -\frac{Q}{V} \int dt$$

$$\log_e C = -\frac{Qt}{V} + \log_e A$$

$\log_e A$ je konstanta integracije.

$$\log_e C - \log_e A = -\frac{Qt}{V}$$

$$C = A \cdot e^{-\left(\frac{Qt}{V}\right)}$$

Veličina konstante A je određena razmatranjem graničnih uslova $C = C_0$ (početna koncentracija u prostoriji) pri vremenu $t = 0$ (trenutak kada ventilacija počinje).

Rešenje jednačine je na kraju:

$$C = C_0 e^{-n}$$

gde je $n = Qt/V$, n broj puta koliko se promeni zapremina sale. Grafik jednačine je eksponencijalna kriva.

Nakon jedne izmene vazduha/h koncentracija pada na 36,8% od svoje početne vrednosti, a posle 3 izmene na čas pada na svega 5%. Svež vazduh koji služi za ventilaciju takođe sadrži nešto CO_2 .

Pretpostavimo dalje da ljudi koji borave u prostoriji kontinualno povećavaju nivo koncentracije CO_2 respiratornom aktivnošću. Simboli:

- C = koncentracija CO_2 u prostoriji u bilo kom trenutku, izražena kao deo u odnosu na milion delova vazduha;
- Q' = količina svežeg vazduha u m^3/s po osobi;
- V' = zapremina prostora u $m^3/\text{čovjek}$;
- t = vreme u sekundama od početka zaposedanja i rada ventilacije;
- Ca = koncentracija CO_2 u vazduhu koji se dovodi za ventilaciju (ppm);
- Vc = zapremina CO_2 proizvedena disanjem (m^3/s po čoveku).

Zapremina vazduha koja ulazi u prostoriju za vreme Δt je $Q' \cdot \Delta t$ izražena u $m^3/\text{čovjek}$. Porast CO_2 za vreme Δt zbog kontaminacije ventilacionog vazduha iznosi $(Q' \Delta t) \cdot (Ca/10^6)$ u $m^3/\text{čovjek}$.

Zapremina vazduha koji se izbacuje pod pritiskom vazduha koji se ubacuje u prostoriju, takođe iznosi $Q' \Delta t$ i slično količini CO_2 koja napušta prostoriju iznosi:

$$(Q' \Delta t) \cdot \frac{C}{10^6} \text{ [u } m^3/\text{čovjek]}$$

Ukupna promena $CO_2 = Vc \cdot \Delta t + \left(Q' \Delta t \cdot \frac{Ca}{10^6} \right) - \left(Q' \Delta t \cdot \frac{C}{10^6} \right)$ za vreme Δt . U ovoj jednačini $Vc \cdot \Delta t$ je količina CO_2 koju za vreme Δt jedna osoba proizvede disanjem; izražena je u $m^3/\text{čovjek}$.

Kako koncentracija predstavlja zapreminu CO_2 podeljenu sa zapreminom prostorije — može se pisati da promena u koncentraciji po osobi iznosi:

$$\frac{\text{ukupna promena } CO_2 \text{ (} m^3/\text{čovjek)}}{\text{zapremina prostorije (} m^3/\text{čovjek)}}$$

i ovo može biti definisano kao:

$$C = \frac{Vc \Delta t + \left(Q' \Delta t \frac{Ca}{10^6} \right) - \left(Q' \Delta t \frac{C}{10^6} \right)}{V}$$

$$\text{odnosno } \frac{\Delta C}{\Delta t} = \frac{Vc + Q' \frac{Ca}{10^6} - Q' \frac{C}{10^6}}{V'} \quad \text{a)}$$

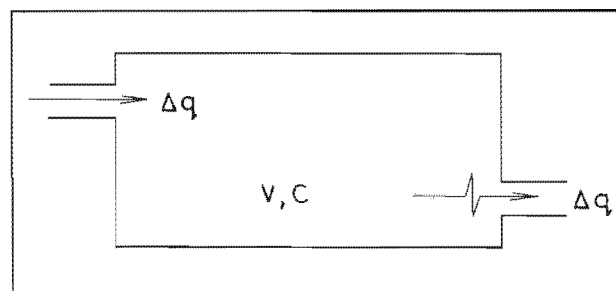
izraženo kao frakciona promena u koncentraciji, u jedinici vremena.

Jednačina a) može se preurediti i dovesti na oblik:

$$\frac{dc}{dt} + \frac{Q' C}{V'} = \frac{10^6 Vc + Q' Ca}{V'} \quad \text{b)}$$

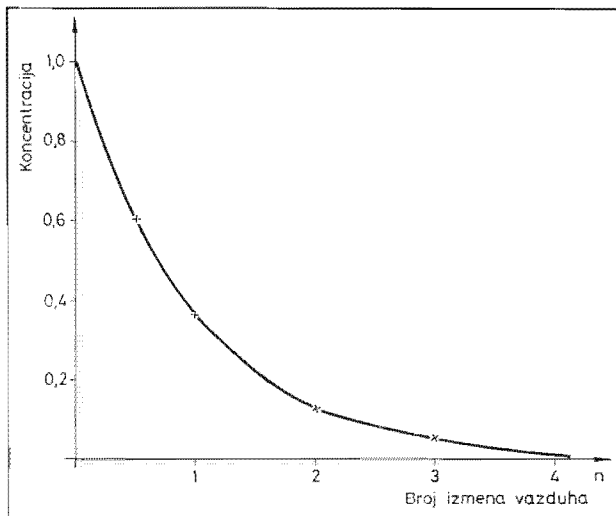
Ovo je diferencijalna jednačina koja izražava fizički problem matematičkim terminima.

Sl. 1.



Jednačina b) je dobijena množenjem jednačine a) sa 10^6 , što daje veličinu promene koncentracije u delovima CO_2 na 10^6 delova vazduha u jedinačnom vremenu.

Sl. 2.



Rešenje jednačine b) se može dobiti množenjem jednačine integracionim faktorom $e^{\left(\frac{Q't}{V'}\right)}$

$$\text{Dakle } \frac{dc}{dt} \cdot e^{\left(\frac{Q't}{V'}\right)} + \frac{Q'C}{V'} e^{\left(\frac{Q't}{V'}\right)} = \frac{10^6 Vc + Q' Ca}{V'} \cdot e^{\left(\frac{Q't}{V'}\right)}$$

Leva strana jednačine je prvi izvod proizvoda; integracijom se dobija:

$$A + C \cdot e^{\left(\frac{Q't}{V'}\right)} = \frac{10^6 Vc + Q' Ca}{V'} \cdot \left(\frac{V'}{Q'}\right) \cdot e^{\left(\frac{Q't}{V'}\right)}$$

gde je A konstanta integracije.

Ako pišemo $B = AQ'$, tada je:

$$B e^{-\left(\frac{Q't}{V'}\right)} = 10^6 Vc + Q' Ca - Q' C$$

Granični uslovi su: $C = C_0$, za $t = 0$

$$B = 10^6 Vc + Q' Ca - Q' C$$

Rešenje jednačine b) je tada:

$$C = \left[\frac{10^6 Vc}{Q'} + Ca \right] (1 - e^{-n}) + C_0 e^{-n} \quad \text{c)}$$

gde je n broj izmena posle vremena t; $n = \frac{Q' t}{V'}$

Slika 2. pokazuje grafičko značenje ovog rešenja:

$$1. C = C_0 e^{-n}$$

$$2. C = Ca (1 - e^{-n})$$

$$3. C = \left(\frac{10^6 Vc}{Q'} + Ca \right) (1 - e^{-n})$$

$$4. C = \left(\frac{10^6 Vc}{Q'} + Ca \right) (1 - e^{-n}) + C_0 e^{-n}$$

Ako u prostoriji u početku ventilacije nije bilo CO_2 , tada će se promena koncentracije u prostoriji menjati po krivoj 2, po funkciji $C = Ca (1 - e^{-n})$, dostižući gornju vrednost od Ca.

Ako su ljudi prisutni, a početna koncentracija CO_2 u prostoriji je jednaka nuli, tada funkcija glasi:

$$C = \left(\frac{10^6 Vc}{Q'} + Ca \right) (1 - e^{-n}) \quad \text{(kriva 3)}$$

Ako je početna koncentracija u prostoriji C_0 , u prisustvu ljudi, a ventilacioni vazduh sadrži koncentraciju Ca, tada će se promena odvijati po krivoj (4) prema jednačini (C). Koncentracija CO_2 u prostoriji će se približavati vrednosti:

$$\frac{Vc}{10^6} + Ca$$

Čitava ova analiza sprovedena je za CO_2 , gas koji nije opasan po život ukoliko se dovede dovoljna količina svežeg vazduha. Međutim, isti ovaj račun može se sprovesti i za ma koji drugi gas, koji se može pojaviti u čovekovoj okolini, radnoj sredini i industriji, kao što su pre svega životno opasni CO_2 i gasovi i pare raznih hemijskih jedinjenja u laboratorijama.

Najznačajnija primena i neophodnost izračunavanja koncentracije pojedinih gasova u prostorijama javlja se pri projektovanju sistema za ventilaciju velikih podzemnih garaža.

Sledeći primer pokazuje neke probleme koji se javljaju pri ventilaciji garaža.

Primer

Garaža dimenzija 60 x 30 m, h = 3 m sadrži određeni broj motornih vozila koja proizvode totalno 0,0024 m^3/s CO.

a) Ako je maksimalna dozvoljena koncentracija CO 0,01%, koji broj izmena vazduha na čas je potreban ako se garaža neprekidno koristi?

b) Ako se garaža koristi 8 časova i ako je u početku tog perioda rada koncentracija CO jednaka nuli, koliki broj izmena vazduha je potreban da bi koncentracija CO

- na kraju rada iznosila 0,01% (100 ppm)?
- c) Kolika je koncentracija CO posle prvih 20 minuta osmočasovnog perioda rada?
- d) Ako na kraju osmočasovnog perioda rada koncentracija iznosi 0,01%, koliko bi trebalo da traje provetranje da bi se koncentracija CO smanjila na 0,001?

Rešenje

- a) $C_{max} = 100$ ppm.
Pošto se garaža neprekidno koristi, C_0 je takođe 100 ppm. Broj prisutnih ljudi je nevažan, ali za lakše razumevanje može se usvojiti zaposednutost od 1 osobe.

$$Q' = \frac{V' \cdot n}{3600}, \text{ pošto je } t = 1 \text{ čas}$$

$$V = 5400 \text{ m}^3, \quad C_a = 0, \quad V_c = 0,0024 \text{ m}^3/\text{s}$$

Iz jednačine c)

$$100 = \left(\frac{10^6 \cdot 0,0024 \cdot 3600}{5400 \cdot n} + 0 \right)$$

$$(1 - e^{-n}) + 100 \cdot e^{-n}$$

$$1 = \frac{16}{n} (1 - e^{-n}) + e^{-n}$$

$$(1 - e^{-n}) = \frac{16}{n} (1 - e^{-n})$$

$$n = 16$$

b) Iz jednačine c)

$$100 = \left(\frac{10^6 \cdot 0,0024 \cdot 3600}{5400 \cdot n} + 0 \right)$$

$$(1 - e^{-n}) + 0 \cdot e^{-n}$$

n je broj izmena vazduha koji se dobije za 1 čas ako su svi drugi činiooci u jednačini uzeti za 1 čas. Sledi da se brojilac s desne strane mora pomnožiti sa 8.

$$1 = \left(\frac{10^6 \cdot 0,0024 \cdot 3600 \cdot 8}{5400 \cdot n} \right) (1 - e^{-n})$$

gde je sada n — ukupan broj izmena vazduha za 8 časova rada.

$$1 = \frac{128}{n} (1 - e^{-n}) \quad \frac{n}{128} = 1 - e^{-n}$$

$$n = 128 \text{ tj. } n = 16 \text{ izmena/čas}$$

8^h

c)

$$C = \left(\frac{10^6 \cdot 0,0008 \cdot 3600}{5400 \cdot n} \right) (1 - e^{-5,33}) + 0 \cdot e^{-5,33}$$

$$C = 99 \text{ ppm}$$

(U gornjoj jednačini 0,0008 je proizvodnja CO u m³ u toku 20 minuta.)

d) Jednačina:

$$C = C_0 \cdot e^{-\frac{Q \cdot t}{V}}$$

se koristi zato što posle 8 časova rada nema više proizvodnje CO i svež vazduh koji se koristi za ventilaciju ne sadrži nikakve kontaminante. Ako je 0,001% koncentracija od 10 ppm, možemo pisati:

$$10 = 100 \cdot e^{-n}, \quad \text{a odavde } n = 2,3$$

Ako posle 8 sati rada sistem ventilacije sa 16 izmena na čas nastavi rad, ovaj uslov će biti zadovoljen posle 8,6 minuta.

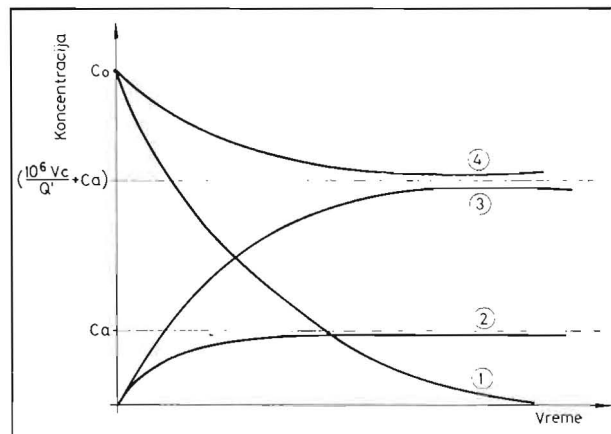
3. PRIMENA JEDNAČINE KONCENTRACIJE KONTAMINENTA c) NA PROMENU ENTALPIJE

U sistemima klimatizacije vazduh se obično dovodi u prostoriju sa nižom temperaturom od projektne temperature vazduha u prostoriji i na taj način se eliminišu dobici osetne toplote u prostoriji. Pod ovim uslovima rashladni kapacitet vazdušne struje potpuno se podudara sa dobicima osetne toplote u prostoriji i ako dobici toplote (izvori) ostaju nepromenjeni, tada i temperatura vazduha koji se dovodi u prostoriju ostaje nepromenjena.

Međutim, slika se menja kada se postrojenje za klimatizaciju pusti u pogon.

Pretpostavimo da su pri isključenom postrojenju, uslovi u prostoriji jednaki sa spoljnim uslovima i da nema nikakvih dobitaka toplote. Ka-

Sl. 3.



da se uključi sistem klimatizacije, vazduh se ubacuje u prostoriju sa znatno nižom temperaturom od temperature vazduha u prostoriji u tom trenutku. Dakle, rashladni kapacitet vazdušne struje je dosta veliki i temperatura vazduha u prostoriji se rapidno snižava. Pošto se ova temperatura ustali, temperaturna razlika između dovodnog vazduha i vazduha u prostoriji se smanjuje i tako je smanjen i rashladni kapacitet dovodne vazdušne struje.

Ovo je samo uprošćena slika onoga šta se dešava. Na primer, dobici toplote ne potiču samo od transmisije, nego i sunčevo zračenje, električno osvetljenje i ljudi proizvode dodatne osetne dobite toplote, pored, naravno latentnih dobitaka toplote. Dakle, događa se komplikovana promena toplotnog opterećenja.

Sličnim procesom, kojim je izvedena jednačina c), moguće je izvesti diferencijalnu jednačinu koja predstavlja fizičku situaciju i dobiti rešenje za entalpiju vazduha u prostoriji u ma kom trenutku I , u funkciji promene dobitka entalpije, početne entalpije i mase vazduha:

Rešenje je:

$$I = m \{ [i_a + I(t)] \cdot (1 - e^{-n}) \} + I_0 \cdot e^{-n}$$

gde je:

m — masa vazduha koji se klimatizuje u prostoriji [kg],

I_0 — početna entalpija vazduha u prostoriji [KJ],

i_a — specifična entalpija vazduha koji se dovodi u prostoriju [KJ/kg]

$I(t)$ — dobitak entalpije u prostoriji — u [KJ/s] po kg/s tj. KJ/kg vazduha koji se dovodi u bilo kom momentu t .

Uopšte, $I(t)$ je funkcija vremena i lakoća kojom se jednačina može iskoristiti zavisi od komplikovanosti same funkcije.

Ova jednačina se može koristiti za rešavanje veoma različitih problema, ne samo onih koji su vezani za promene temperature ili sadržaja vlage u klimatizovanom vazduhu. Na primer, može se iskoristiti za određivanje količine rezerve hladne vode potrebne da spreči vrlo često uključivanje rashladnog kompresora u toku jednog sata.

LITERATURA

- [1] BEDFORD, T. E.: *Basic Principles of Ventilation*, H. K. Lewis, 1948.
- [2] JONES, W. P.: *Theoretical aspects of air conditioning systems upon start-up*, Inst. Heat & Vent. Eng., 1963.
- [3] JANKOVIĆ, A.: *Ventilacija laboratorija*, časopis »KGH«, 4/1974.