



Termodynamika požara

Odabrani primjeri

(Zagreb, 2.12.2011.)

Mladen Pavičić

pavicic@grad.hr ; Web: <http://m3k.grad.hr/pavicic>

Gradjevinski fakultet u Zagrebu

Brzina sagorjevanja

Brzina sagorjevanja je brzina kojom masa krutog tijela ili tekućine sagorjeva i pretvara se u plin. Ona se izražava kao masena brzina sagorjevanja po jediničnoj površini u kg po m² i sekundi.

Brzina sagorjevanja

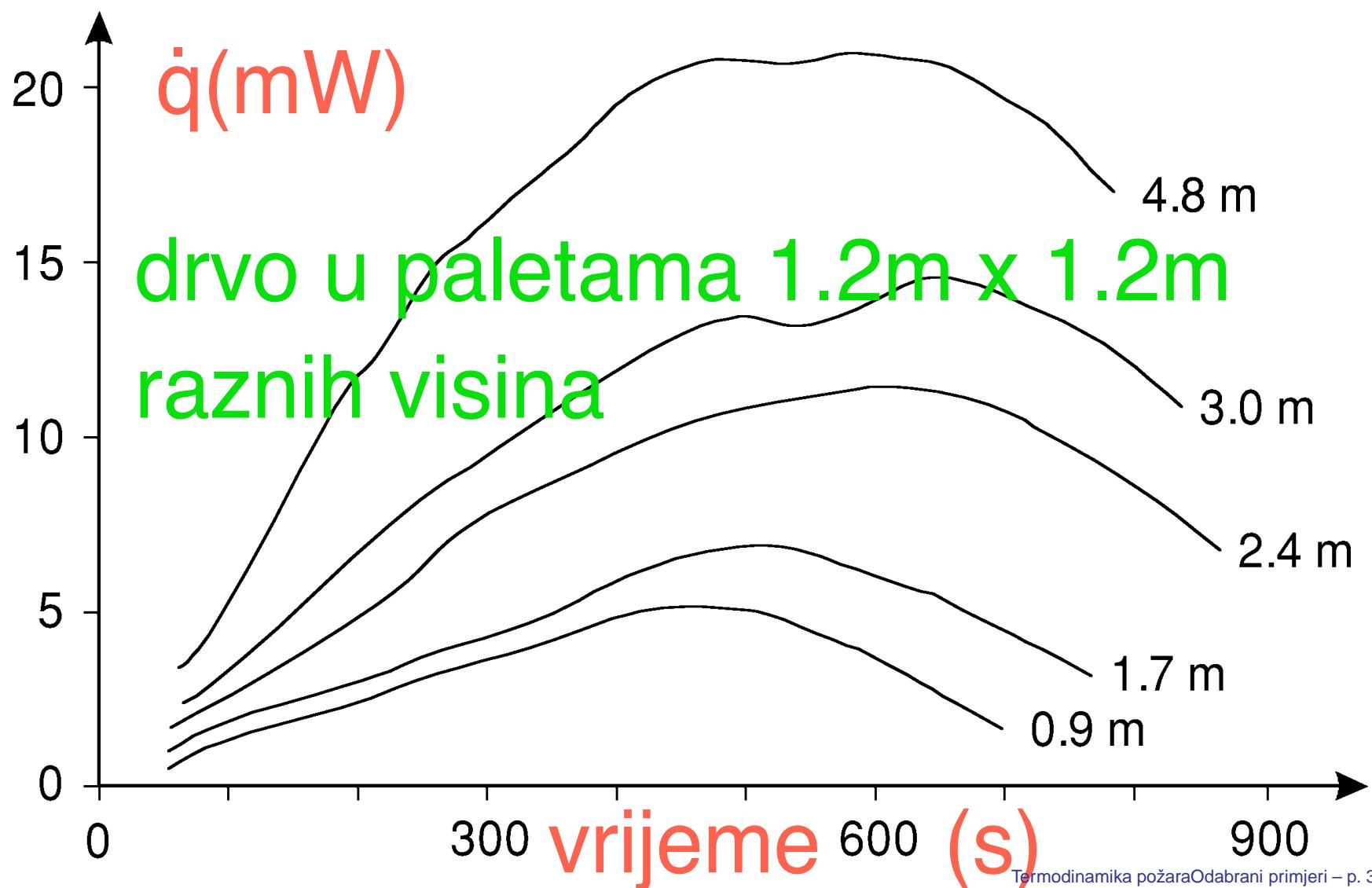
Brzina sagorjevanja je brzina kojom masa krutog tijela ili tekućine sagorjeva i pretvara se u plin.

Ona se izražava kao masena brzina sagorjevanja po jediničnoj površini u kg po m² i sekundi.

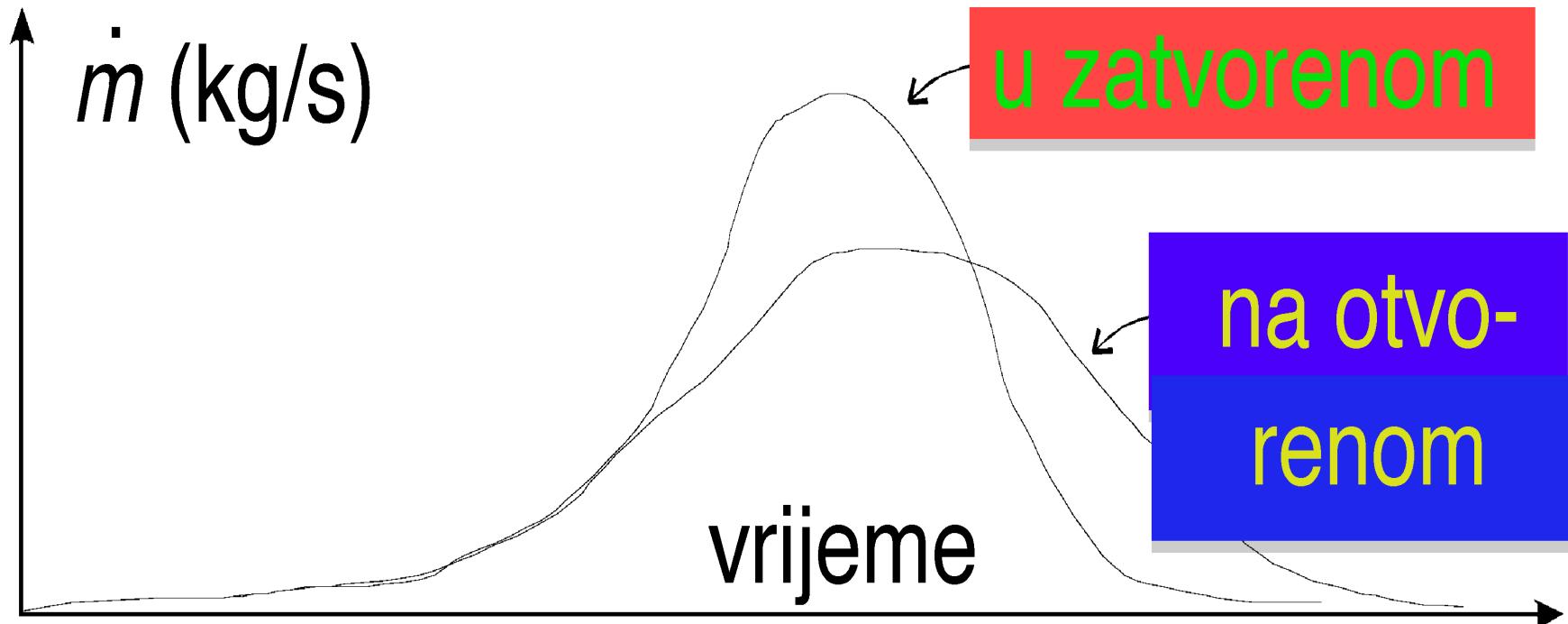
$$\dot{m}'' = \frac{\dot{q}''}{\Delta H_g} \quad (1)$$

gdje je \dot{q}'' ukupni toplinski tok od plamena do goriva, $[\dot{q}''] = \text{kW/m}^2$, a ΔH_g je toplina uplinjavanja; $[\Delta H_g] = \text{kJ/kg}$; za tekuća goriva ona je jednaka latentnoj toplini isparavanja, tj., energiji potrebnoj da se ispari tekućina nakon što je dovedena na temperaturu vrenja.

\dot{q} za palete drva



\dot{m} unutra—vani



Unutra: (a) vrući plinovi se skupljaju ispod stropa i zagrijavaju strop i zidove koji onda zrače natrag i povećavaju \dot{m} ; (b) otvoru nisu dovoljni za dotok kisika potrebnog za sagorijevanje—manja količina goriva sagorijeve i plinovi nepotpuno izgaraju.

Primjer

Plinovi gorućeg komada polimetilmetaakrilata (PMMA) se skupljaju u napi i odlaze kroz ventilacijski otvor. Količina nastalih plinova se mjeri i dobiva se masa toka plinova of 0.05kg/s . Udio mase kisika je 15% . Odredite toplinu koju odaje gorući komad.

Primjer

Plinovi gorućeg komada polimetilmetaakrilata (PMMA) se skupljaju u napi i odlaze kroz ventilacijski otvor. Količina nastalih plinova se mjeri i dobiva se masa toka plinova of 0.05kg/s. Udio mase kisika je 15%. Odredite toplinu koju odaje gorući komad.

Udio kisika u zraku je oko 23%. Masena brzina sagorjevanja je dakle $(0.23 - 0.15)0.05 \text{ kg/s}$. Svaki kg kisika odaje 13,100 kJ topline. Oslobođena energija je

$$\dot{Q} = 13,100(0.23 - 0.15)0.05 = 52.4 \text{ kJ/s} = 52.4 \text{ kW}$$

Brzina sagorjevanja (2)

Brzinu sagorjevanja možemo mjeriti i preko brzine gubljenja mase. To postižemo vaganjem goriva dok gori. Procjena brzine oslobođanja topline je moguća samo ako je poznata efektivna toplina sagorjevanja:

Brzina sagorjevanja (2)

Brzinu sagorjevanja možemo mjeriti i preko brzine gubljenja mase. To postižemo vaganjem goriva dok gori. Procjena brzine oslobođanja topline je moguća samo ako je poznata efektivna toplina sagorjevanja:

$$\dot{Q} = \dot{m}\Delta H_{\text{eff}} \quad (2)$$

gdje je \dot{m} dan u kg u sec, a ΔH_{eff} je efektivna toplina izgaranja u kJ po kg. Rezultirajuća brzina oslobođanja topline se tada mjeri u kJ u s, tj. u kW.

Brzina sagorjevanja (2)

Brzinu sagorjevanja možemo mjeriti i preko brzine gubljenja mase. To postižemo vaganjem goriva dok gori. Procjena brzine oslobođanja topline je moguća samo ako je poznata efektivna toplina sagorjevanja:

$$\dot{Q} = \dot{m}\Delta H_{\text{eff}} \quad (2)$$

gdje je \dot{m} dan u kg u sec, a ΔH_{eff} je efektivna toplina izgaranja u kJ po kg. Rezultirajuća brzina oslobođanja topline se tada mjeri u kJ u s, tj. u kW.

N.B. Kod nedovoljnog priliva kisika tvari mogu ispariti, ali ne moraju i izgoriti.

Brzina sagorjevanja (3)

Ako je poznata površina goriva i efektivna toplina sagorjevanja onda jednadžbu (2) možemo pisati kao

$$\dot{Q} = A_f \dot{m}'' \Delta H_{\text{eff}} \quad (3)$$

gdje je A_f horizontalna goruća površina, a \dot{m}'' masena brzina sagorjevanja po jediničnoj površini.

Toplina izgaranja (1)

Efektivna toplina izgaranja ili kemijska toplina izgaranja se može procijeniti iz jedn. (3).

$\Delta H_{\text{eff}} \neq \Delta H_c$. ΔH_c je toplina potpunog izgaranja, obično moguća samo u laboratoriju u kalorimetru. U požaru samo 70 do 80% tvari potpuno izgara.

Toplina izgaranja (1)

Efektivna toplina izgaranja ili kemijska toplina izgaranja se može procijeniti iz jedn. (3).

$\Delta H_{\text{eff}} \neq \Delta H_c$. ΔH_c je toplina potpunog izgaranja, obično moguća samo u laboratoriju u kalorimetru. U požaru samo 70 do 80% tvari potpuno izgara.

Primjer. Potpuno izgaranje PMMA:



ima $\Delta H_c = 24.9 \text{ kJ/g}$

Toplina izgaranja (2)

Kad je manje kisika dobavljivo formira se ugljični monoksid i čađa (ugljik) i onda se reakcija može prikazati kao

Toplina izgaranja (2)

Kad je manje kisika dobavljivo formira se ugljični monoksid i čađa (ugljik) i onda se reakcija može prikazati kao



Toplina izgaranja (2)

Kad je manje kisika dobavljivo formira se ugljični monoksid i čađa (ugljik) i onda se reakcija može prikazati kao



i njeni toplini izgaranja je $\Delta H_{\text{eff}} = 18.2 \text{ kJ/g}$, pa je *efikasnost izgaranja*

$$\chi = \frac{\Delta H_{\text{eff}}}{\Delta H_c} = \frac{18.2}{24.9} = 0.73 \text{ i.e., } 73\%. \quad (6)$$

Toplina izgaranja (2)

Kad je manje kisika dobavljivo formira se ugljični monoksid i čađa (ugljik) i onda se reakcija može prikazati kao



i njena toplina izgaranja je $\Delta H_{\text{eff}} = 18.2 \text{ kJ/g}$, pa je *efikasnost izgaranja*

$$\chi = \frac{\Delta H_{\text{eff}}}{\Delta H_c} = \frac{18.2}{24.9} = 0.73 \text{ i.e., } 73\%. \quad (6)$$

$$(3), (6) \Rightarrow \dot{Q} = A_f \dot{m}'' \chi \Delta H_c \quad (7)$$

Primjer

Komad polimetilmetaakrilata (PMMA, $C_5H_8O_2$) se važe dok gori i dobiva se gubitak mase od 3 g/s. Ukupna toplina izgaranja za PMMA je oko 25 kJ/g. Uzimajući da je efikasnost izgaranja 70% procijenite brzinu oslobađanja energije i veličinu komada PMMA-a, ako je brzina sagorjevanja po jediničnoj površini 25 $g/(m^2s)$.

Primjer

Komad polimetilmetaakrilata (PMMA, $C_5H_8O_2$) se važe dok gori i dobiva se gubitak mase od 3 g/s. Ukupna toplina izgaranja za PMMA je oko 25 kJ/g. Uzimajući da je efikasnost izgaranja 70% procijenite brzinu oslobađanja energije i veličinu komada PMMA-a, ako je brzina sagorjevanja po jediničnoj površini 25 g/(m²s).

Koristeći jednadžbu (3) dobivamo:

$$\dot{Q} = 3 \cdot 25 \cdot 0.7 = 52 \text{ kW} \quad (8)$$

Primjer

Komad polimetilmetaakrilata (PMMA, $C_5H_8O_2$) se važe dok gori i dobiva se gubitak mase od 3 g/s. Ukupna toplina izgaranja za PMMA je oko 25 kJ/g. Uzimajući da je efikasnost izgaranja 70% procijenite brzinu oslobađanja energije i veličinu komada PMMA-a, ako je brzina sagorjevanja po jediničnoj površini 25 g/(m²s).

Koristeći jednadžbu (3) dobivamo:

$$\dot{Q} = 3 \cdot 25 \cdot 0.7 = 52 \text{ kW} \quad (8)$$

Veličina gorućeg komada je $3/25=0.2 \text{ m}^2$.

Dobro ventilirani prostori - modeli

Ventilirane prostore u požaru ćemo prvo obraditi modeliranjem Bernoullievom jednadžbom i idealnim plinom.

Dobro ventilirani prostori - modeli

Ventilirane prostore u požaru ćemo prvo obraditi modeliranjem Bernoullievom jednadžbom i idealnim plinom.

Bernoullieva jednadžba vrijedi za idealizirani tok koji je

Dobro ventilirani prostori - modeli

Ventilirane prostore u požaru ćemo prvo obraditi modeliranjem Bernoullievom jednadžbom i idealnim plinom.

Bernoullieva jednadžba vrijedi za idealizirani tok koji je

(a) stacionaran

Dobro ventilirani prostori - modeli

Ventilirane prostore u požaru ćemo prvo obraditi modeliranjem Bernoullievom jednadžbom i idealnim plinom.

Bernoullieva jednadžba vrijedi za idealizirani tok koji je

- (a) stacionaran
- (b) nestlačiv

Dobro ventilirani prostori - modeli

Ventilirane prostore u požaru ćemo prvo obraditi modeliranjem Bernoullievom jednadžbom i idealnim plinom.

Bernoullieva jednadžba vrijedi za idealizirani tok koji je

- (a) stacionaran
- (b) nestlačiv
- (c) isoterman

Dobro ventilirani prostori - modeli

Ventilirane prostore u požaru ćemo prvo obraditi modeliranjem Bernoullievom jednadžbom i idealnim plinom.

Bernoullieva jednadžba vrijedi za idealizirani tok koji je

- (a) stacionaran
- (b) nestlačiv
- (c) isoterman
- (d) bez trenja ("suga voda")

Dobro ventilirani prostori - modeli

Ventilirane prostore u požaru ćemo prvo obraditi modeliranjem Bernoullievom jednadžbom i idealnim plinom.

Bernoullieva jednadžba vrijedi za idealizirani tok koji je

- (a) stacionaran
- (b) nestlačiv
- (c) isoterman
- (d) bez trenja ("suha voda")
- (e) adijabatski

Dobro ventilirani prostori - modeli

U hidraulici razlikujemo dva tipa otvora (*vent*)

Dobro ventilirani prostori - modeli

U hidraulici razlikujemo dva tipa otvora (*vent*)

(i) “rupu” (*orifice*) i

Dobro ventilirani prostori - modeli

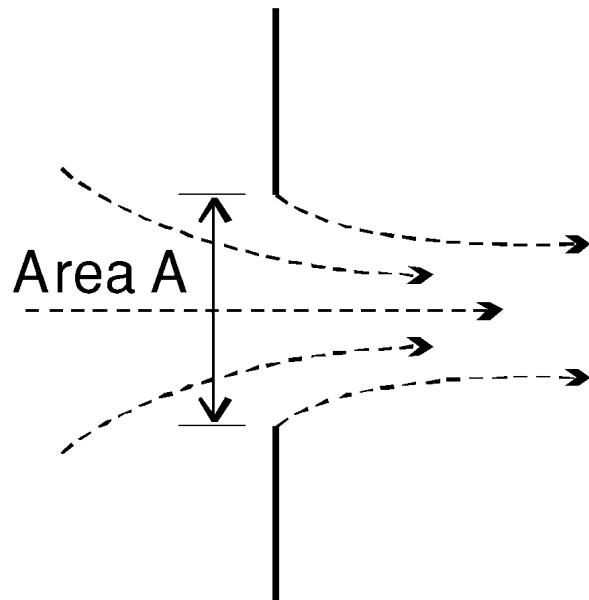
U hidraulici razlikujemo dva tipa otvora (*vent*)

- (i) “rupu” (*orifice*) i
- (ii) “mlaznicu” (*nozzle*)

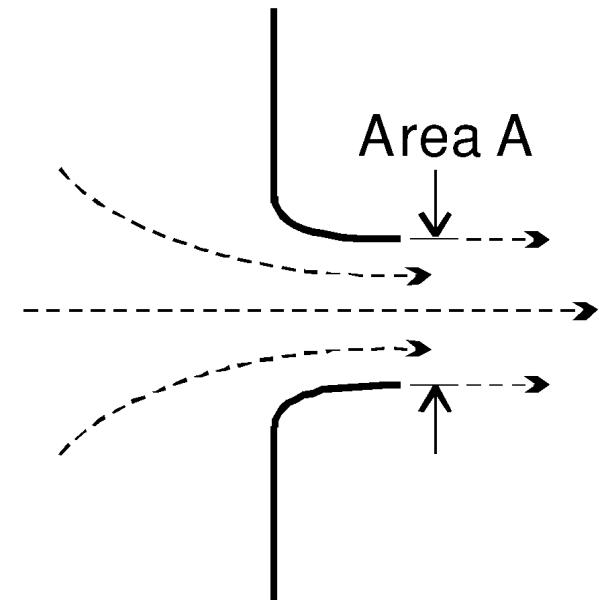
Dobro ventilirani prostori - modeli

U hidraulici razlikujemo dva tipa otvora (*vent*)

- (i) “rupu” (*orifice*) i
- (ii) “mlaznicu” (*nozzle*)



Orifice



Nozzle

Dobro ventilirani prostori - modeli (2)

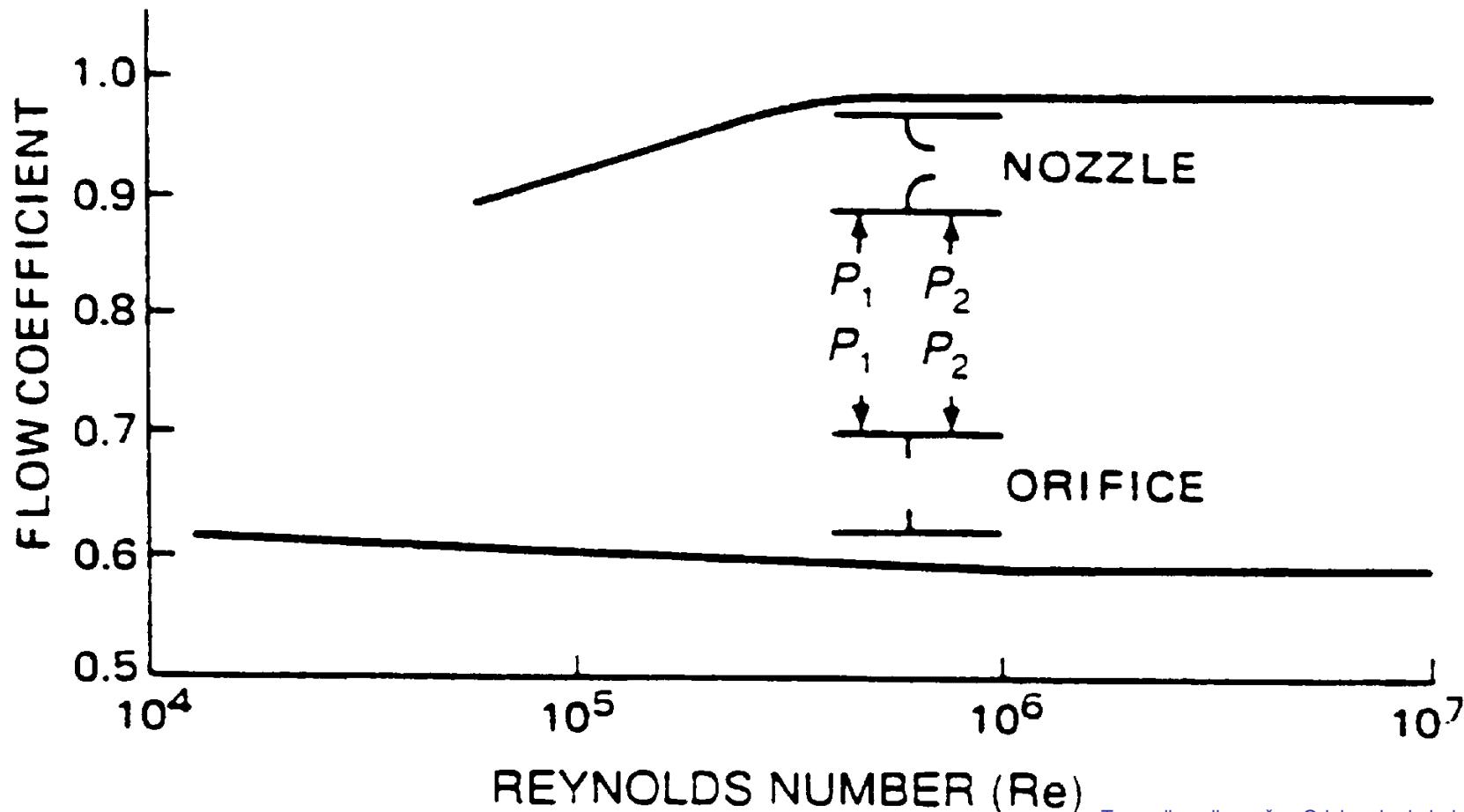
U požarnim primjenama se otvor u glavnom smatraju "rupama" kroz koje samo dio toka prolazi efikasno—tipično oko 60-70% i to se izražava koeficijentom toka C_d ($0.6 \leq C_d \leq 0.7$)

Dobro ventilirani prostori - modeli (2)

U požarnim primjenama se otvori uglavnom smatraju "rupama" kroz koje samo dio toka prolazi efikasno—tipično oko 60-70% i to se izražava koeficijentom toka C_d ($0.6 \leq C_d \leq 0.7$) C_d je funkcija Reynolds-ovog broja $Re = \frac{vD\rho}{\mu}$ gdje je v brzina, ρ gustoća, a μ viskoznost fluida koji prolazi kroz otvor; $D = \frac{4A}{P}$ je hidraulički promjer, gdje je A površina, a P opseg otvora.

Dobro ventilirani prostori - modeli (3)

Na slici je prikazano kako koeficijent toka C_d varira s Reynoldsovim brojem za dva tipa otvora.



Dobro ventilirani prostori - modeli (4)

Za obične otvore, kao što su vrata i prozori i brzinu fluida od 1 do 5 m/s, $Re \approx 10^6$, a C_d nešto veći od 0.6.

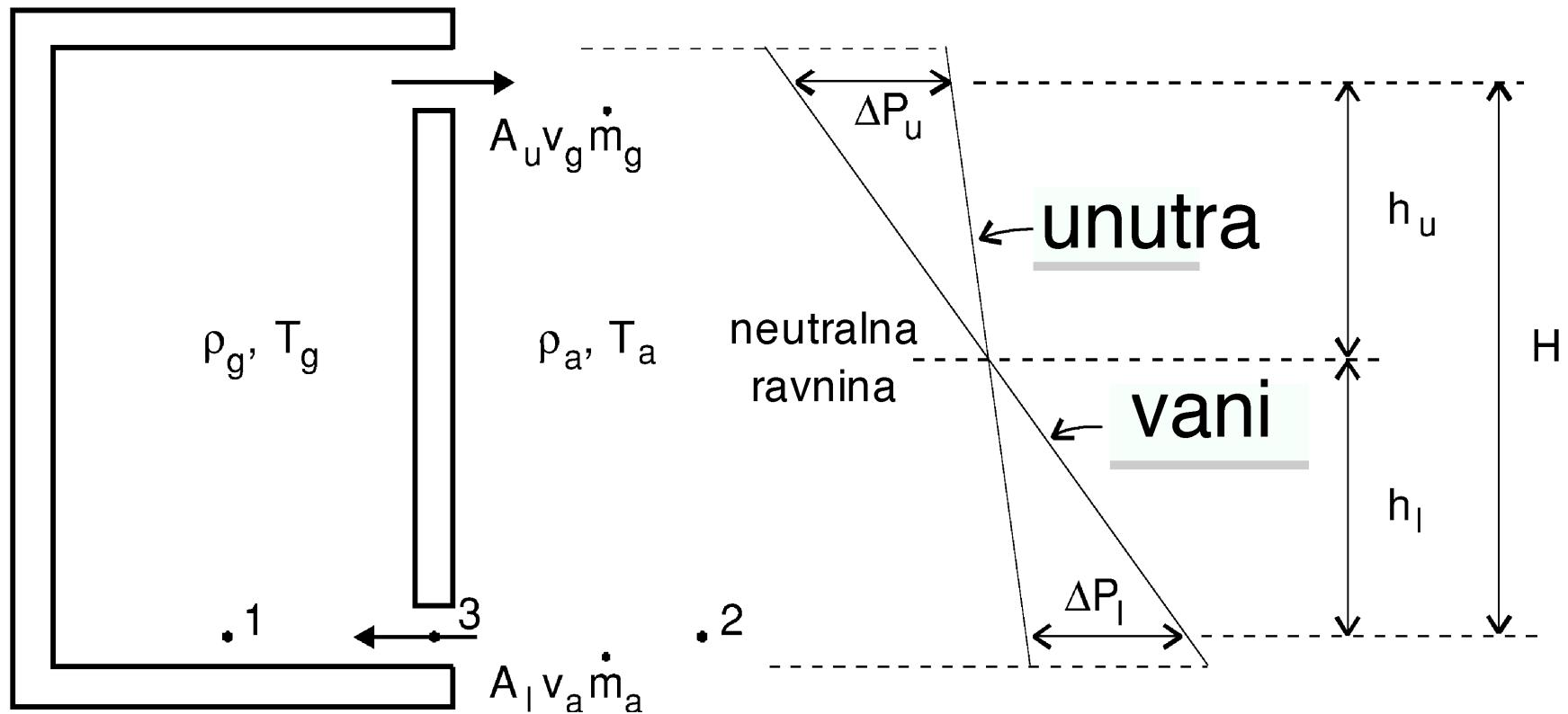
Za vrlo uske otvore, kao što je procjep između vrata i poda (npr 0.01 visok i 1m širok), i za brzine od 1 do 5 m/s, $Re \approx 10^3$ i C_d je bliži 0.7.

Dobro ventilirani prostori (1)

Na slici je vrući zrak unutra, a hladni vani. Oni približno miruju u prostorima, ali ne u otvorima gdje hidrostatski tlak prelazi u hidrodinamički.

Dobro ventilirani prostori (1)

Na slici je vrući zrak unutra, a hladni vani. Oni približno miruju u prostorima, ali ne u otvorima gdje hidrostatski tlak prelazi u hidrodinamički.

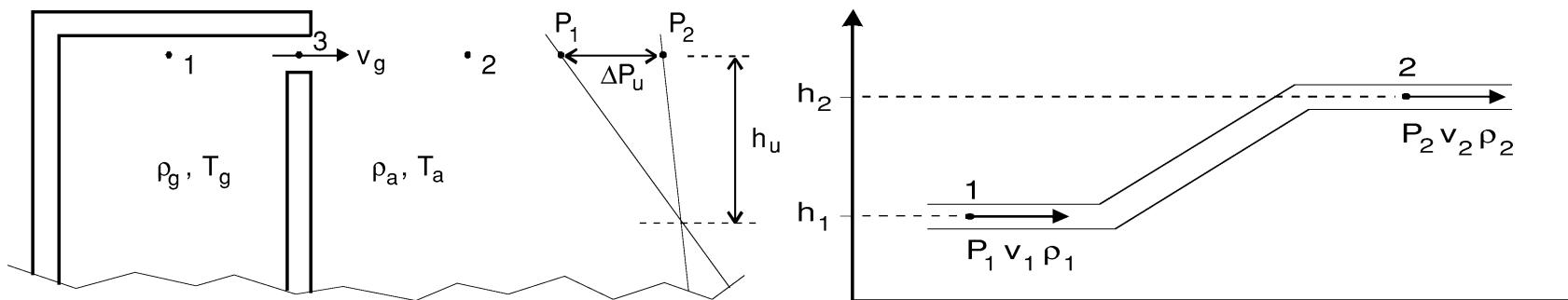


Dobro ventilirani prostori (2)

Koristimo Bernoullievu jednadžbu (laminarni tok i nestlačivi fluid su dobre approksimacije) za proračunavanje masenog toka kroz otvore. Bernoullieva jednadžba izražava očuvanje energije (kinetička—potencijalna).

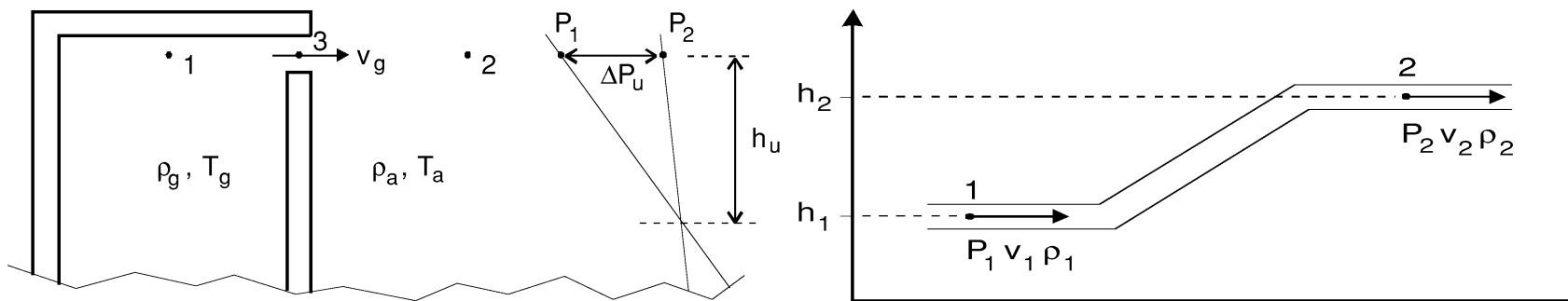
Dobro ventilirani prostori (2)

Koristimo Bernoullievu jednadžbu (laminarni tok i nestlačivi fluid su dobre approksimacije) za proračunavanje masenog toka kroz otvore. Bernoullieva jednadžba izražava očuvanje energije (kinetička—potencijalna).



Dobro ventilirani prostori (2)

Koristimo Bernoullievu jednadžbu (laminarni tok i nestlačivi fluid su dobre approksimacije) za proračunavanje masenog toka kroz otvore. Bernoullieva jednadžba izražava očuvanje energije (kinetička—potencijalna).



$$P_1 + \frac{\rho_1 v_1^2}{2} + \rho_1 g h_1 = P_2 + \frac{\rho_2 v_2^2}{2} + \rho_2 g h_2 \quad (9)$$

Dobro ventilirani prostori (3)

Uzimamo da su $v_1 = v_2 = 0$.

$$\Delta P_u = P_1 - P_2 = \rho_2 gh_2 - \rho_1 gh_1 = h_u(\rho_a - \rho_g)g \quad (10)$$

Dobro ventilirani prostori (3)

Uzimamo da su $v_1 = v_2 = 0$.

$$\Delta P_u = P_1 - P_2 = \rho_2 gh_2 - \rho_1 gh_1 = h_u(\rho_a - \rho_g)g \quad (10)$$

Da povežemo brzine u prostoriji s brzinama u otvoru koristimo

$$P_1 + \frac{\rho_1 v_1^2}{2} + \rho_1 g h_1 = P_3 + \frac{\rho_3 v_3^2}{2} + \rho_2 g h_3 \quad (11)$$

Dobro ventilirani prostori (3)

Uzimamo da su $v_1 = v_2 = 0$.

$$\Delta P_u = P_1 - P_2 = \rho_2 gh_2 - \rho_1 gh_1 = h_u(\rho_a - \rho_g)g \quad (10)$$

Da povežemo brzine u prostoriji s brzinama u otvoru koristimo

$$P_1 + \frac{\rho_1 v_1^2}{2} + \rho_1 g h_1 = P_3 + \frac{\rho_3 v_3^2}{2} + \rho_2 g h_3 \quad (11)$$

Uzimajući $v_1 = 0$, $\rho_1 = \rho_2 = \rho_g$, $h_1 = h_2 = h_u$:

$$\Delta P_u = P_1 - P_3 = \frac{v_3^2 \rho_3}{2} - \frac{v_g^2 \rho_g}{2} \quad (12)$$

Dobro ventilirani prostori (4)

Dakle, za brzinu na gornjem otvoru dobivamo:

$$v_g = \sqrt{\frac{2\Delta P_u}{\rho_g}} = \sqrt{\frac{2h_u(\rho_a - \rho_g)g}{\rho_g}} \quad (13)$$

Dobro ventilirani prostori (4)

Dakle, za brzinu na gornjem otvoru dobivamo:

$$v_g = \sqrt{\frac{2\Delta P_u}{\rho_g}} = \sqrt{\frac{2h_u(\rho_a - \rho_g)g}{\rho_g}} \quad (13)$$

Vrijednosti za donji otvor:

$$\Delta P_1 = P_1 - P_2 = h_1(\rho_a - \rho_g)g = \frac{v_a^2 \rho_a}{2} \quad (14)$$

Dobro ventilirani prostori (4)

Dakle, za brzinu na gornjem otvoru dobivamo:

$$v_g = \sqrt{\frac{2\Delta P_u}{\rho_g}} = \sqrt{\frac{2h_u(\rho_a - \rho_g)g}{\rho_g}} \quad (13)$$

Vrijednosti za donji otvor:

$$\Delta P_1 = P_1 - P_2 = h_1(\rho_a - \rho_g)g = \frac{v_a^2 \rho_a}{2} \quad (14)$$

odakle dobivamo

$$v_a = \sqrt{\frac{2h_1(\rho_a - \rho_g)g}{\rho_a}} \quad (15)$$

Dobro ventilirani prostori (5)

Brzina protoka mase:

$$\dot{m} = C_d A v \rho \quad [\text{kg/s}] \quad (16)$$

gdje je A površina presjeka otvora [m^2], v konstantna brzina kroz presjek [m/s], ρ gustoća plina, a C_d korekcijski faktor između 0.6 i 0.7.

Dobro ventilirani prostori (5)

Brzina protoka mase:

$$\dot{m} = C_d A v \rho \quad [\text{kg/s}] \quad (16)$$

gdje je A površina presjeka otvora [m^2], v konstantna brzina kroz presjek [m/s], ρ gustoća plina, a C_d korekcijski faktor između 0.6 i 0.7.

Koristeći (16) i (13) dobivamo za gornji otvor:

$$\dot{m}_g = C_d A_u \rho_g \sqrt{\frac{2 h_u (\rho_a - \rho_g) g}{\rho_g}} \quad (17)$$

Dobro ventilirani prostori (5)

Brzina protoka mase:

$$\dot{m} = C_d A v \rho \quad [\text{kg/s}] \quad (16)$$

gdje je A površina presjeka otvora [m^2], v konstantna brzina kroz presjek [m/s], ρ gustoća plina, a C_d korekcijski faktor između 0.6 i 0.7.

Koristeći (16) i (13) dobivamo za gornji otvor:

$$\dot{m}_g = C_d A_u \rho_g \sqrt{\frac{2h_u(\rho_a - \rho_g)g}{\rho_g}} \quad (17)$$

Za donji otvor dobivamo

$$\dot{m}_a = C_d A_1 \rho_a \sqrt{\frac{2h_1(\rho_a - \rho_g)g}{\rho_a}} \quad (18)$$

Dobro ventilirani prostori (6)

Iz jednadžbi (17) i (18), izjednačujući brzinu toka mase dobivamo

$$\frac{h_1}{h_u} = \left(\frac{A_u}{A_1} \right)^2 \frac{\rho_g}{\rho_a} \quad (19)$$

Dobro ventilirani prostori (6)

Iz jednadžbi (17) i (18), izjednačujući brzinu toka mase dobivamo

$$\frac{h_1}{h_u} = \left(\frac{A_u}{A_1} \right)^2 \frac{\rho_g}{\rho_a} \quad (19)$$

Ukupna visina između centara otvora (v. sl. na str. 11) je $H = h_u + h_1$. Koristeći jednadžbu idealnog plina: $PM = \rho RT$ [M je molekularna masa (zraka: 0.0289 kg/mol); standardni $P=101300 \text{ N/m}^2$] iz (19) dobivamo

$$\frac{h_1}{h_u} = \left(\frac{A_u}{A_1} \right)^2 \frac{T_a}{T_g} \quad (20)$$

Primjer

Zgrada visoka 31 m ima otvore visoke 1 m i široke 2 m, na najgornjem katu i u prizemlju. Vanjska tempertura je 0° C , a unutarnja 20° C . Izračunajte:

Primjer

Zgrada visoka 31 m ima otvore visoke 1 m i široke 2 m, na najgornjem katu i u prizemlju. Vanjska tempertura je 0° C , a unutarnja 20° C . Izračunajte:

- (a) visinu neutralne ravnine (v. sl. na str. 11) iznad referentne točke;

Primjer

Zgrada visoka 31 m ima otvore visoke 1 m i široke 2 m, na najgornjem katu i u prizemlju. Vanjska tempertura je 0° C , a unutarnja 20° C . Izračunajte:

- (a) visinu neutralne ravnine (v. sl. na str. 11) iznad referentne točke;
- (b) razliku tlakova na otvorima;

Primjer

Zgrada visoka 31 m ima otvore visoke 1 m i široke 2 m, na najgornjem katu i u prizemlju. Vanjska tempertura je 0° C , a unutarnja 20° C . Izračunajte:

- (a) visinu neutralne ravnine (v. sl. na str. 11) iznad referentne točke;
- (b) razliku tlakova na otvorima;
- (c) brzinu toka u centru otvora;

Primjer

Zgrada visoka 31 m ima otvore visoke 1 m i široke 2 m, na najgornjem katu i u prizemlju. Vanjska tempertura je 0° C , a unutarnja 20° C . Izračunajte:

- (a) visinu neutralne ravnine (v. sl. na str. 11) iznad referentne točke;
- (b) razliku tlakova na otvorima;
- (c) brzinu toka u centru otvora;
- (d) brzinu masenog toka.

Primjer (2)

Koristeći jednadžbu idealnog plina dobivamo

$$\rho_a = 353/273 = 1.293 \text{ kg/m}^3,$$

$$\rho_g = 353/293 = 1.205 \text{ kg/m}^3,$$

Primjer (2)

Koristeći jednadžbu idealnog plina dobivamo

$$\rho_a = 353/273 = 1.293 \text{ kg/m}^3,$$

$$\rho_g = 353/293 = 1.205 \text{ kg/m}^3,$$

(a) koristeći (19) $\frac{h_1}{h_u} = 0.932$. Iz $h_u + h_1 = 30$ (od centra do centra otvora) je $(30 - h_u)/h_u = 0.932$, odakle je $h_u = 15.53$ i $h_1 = 14.47$. Ako uzmemo da je centar donjeg otvora naša referentna točka, tada je visina neutralne ravnine 14.47 m iznad te točke. Ako je pod u prizemlju naša referentna točka, tada je visina neutralne ravnine 14.97 m.

Primjer (3)

(b) Razlika tlakova na gornjem otvoru je dana jednadžbom (10):

$\Delta P_u = 15.53(1.293 - 1.205)9.81 = 13.4 \text{ Pa}$, a na donjem jednadžbom (14):

$\Delta P_1 = 14.47(1.293 - 1.205)9.81 = 12.49 \text{ Pa}$.

Primjer (3)

(b) Razlika tlakova na gornjem otvoru je dana jednadžbom (10):

$$\Delta P_u = 15.53(1.293 - 1.205)9.81 = 13.4 \text{ Pa, a na donjem jednadžbom (14):}$$

$$\Delta P_1 = 14.47(1.293 - 1.205)9.81 = 12.49 \text{ Pa.}$$

(c) Brzina toka u centru gornjeg otvora je dana jednadžbom (13):

$$v_g = \sqrt{\frac{2 \cdot 15.53(1.293 - 1.205) \cdot 9.81}{1.205}} = 4.72 \text{ m/s. Brzina toka kroz donji otvor je}$$

$$v_a = \sqrt{\frac{2 \cdot 14.47(1.293 - 1.205) \cdot 9.81}{1.293}} = 4.40 \text{ m/s}$$

Primjer (4)

(d) Uzimamo da je $C_d = 0.7$. Brzina massenog toka kroz gornji otvor je dana jednadžbom (17):

$$\dot{m}_g = 0.7 \cdot 2 \cdot 1.205 \sqrt{\frac{2 \cdot 15.53(1.293 - 1.205)9.81}{1.205}} = 7.96$$

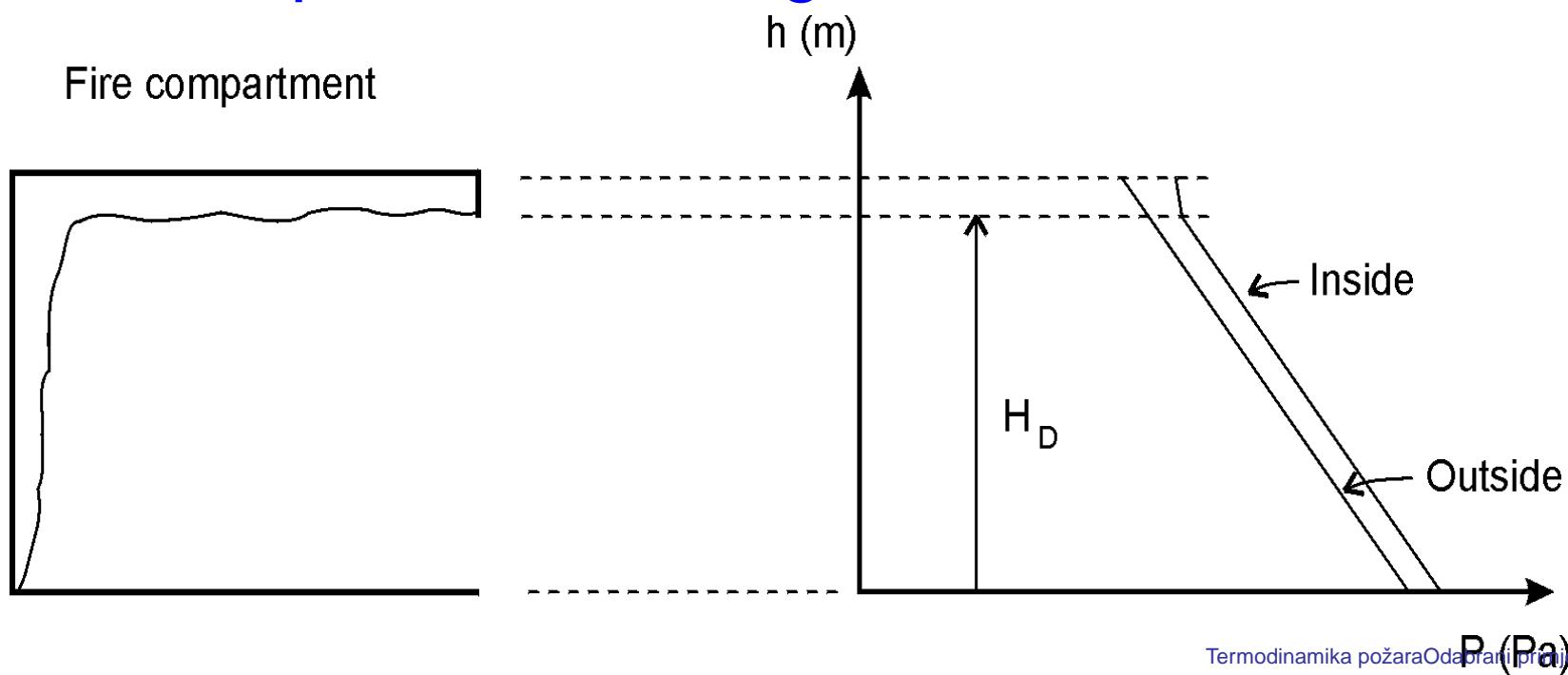
kg/s. Kroz donji otvor iz jednadžbe (18):

$$\dot{m}_g = 0.7 \cdot 2 \cdot 1.293 \sqrt{\frac{2 \cdot 14.47(1.293 - 1.205)9.81}{1.2293}} = 7.96$$

kg/s. $\dot{m}_a = \dot{m}_g$ zadovoljava zakon o očuvanju mase. To je dobra provjera našeg računanja.

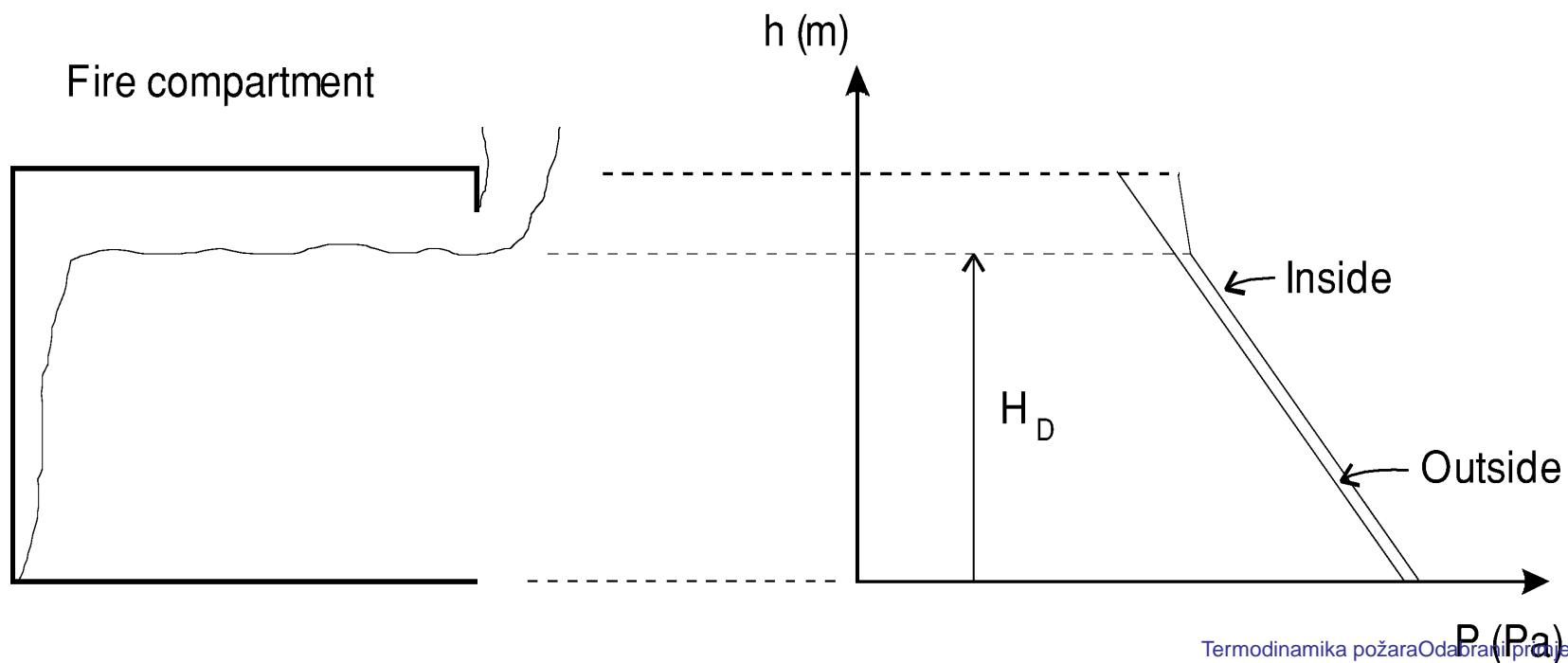
Gorući prostor s otvorom - faza 1

Prva faza požara: vrući plinovi još nisu počeli izlaziti kroz otvor. Cijeli prostor je pod višim tlakom nego okolina i samo je hladan zrak potisnut kroz otvor. Krivulja je strmija na vrhu jer su vrući plinovi lakši nego hladni.



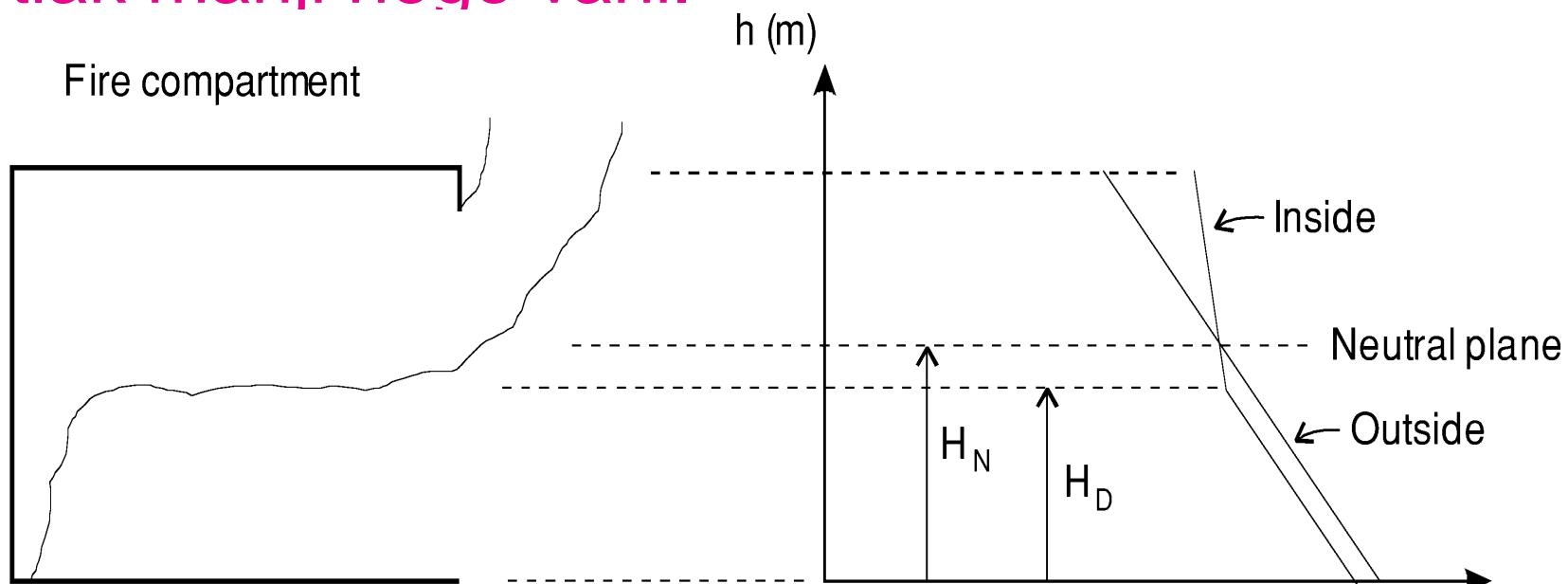
Gorući prostor s otvorom - faza 2

Druga faza požara: vrući plinovi su počeli izlaziti kroz otvor. Protok hladnog zraka kroz donji dio prostorije se nastavlje zbog termalne ekspanzije vrućih plinova. Tlak je još uvijek veći u u prostoriji nego u okolini.



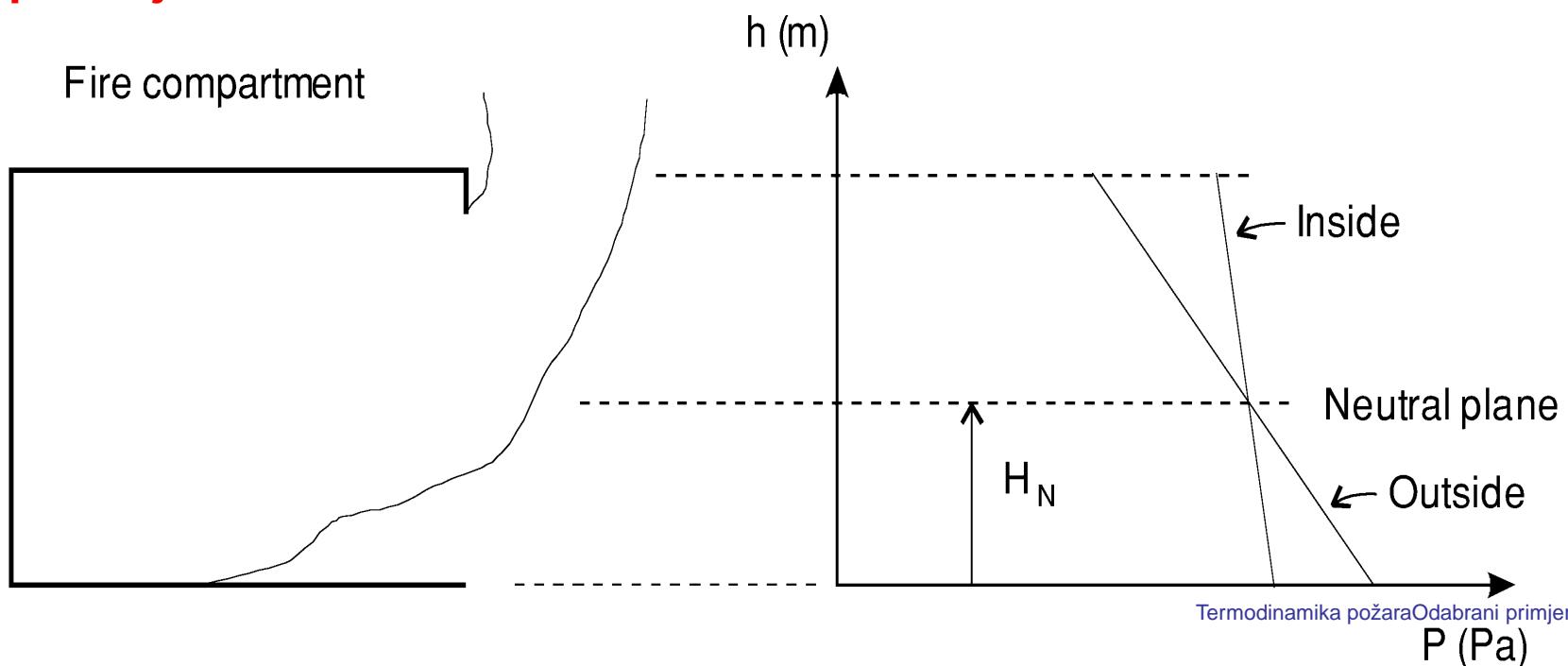
Gorući prostor s otvorom - faza 3

Treća faza požara: hladni zrak sad samo ulazi kroz donji dio otvora, a vrući plinovi izlaze kroz gornji. Na visini H_N nema toka uopće - razlika tlakova mijenja iz pozitivne u negativnu. Visina se naziva *visinom neutralne ravnine*. Ispod nje je tlak manji nego vani.



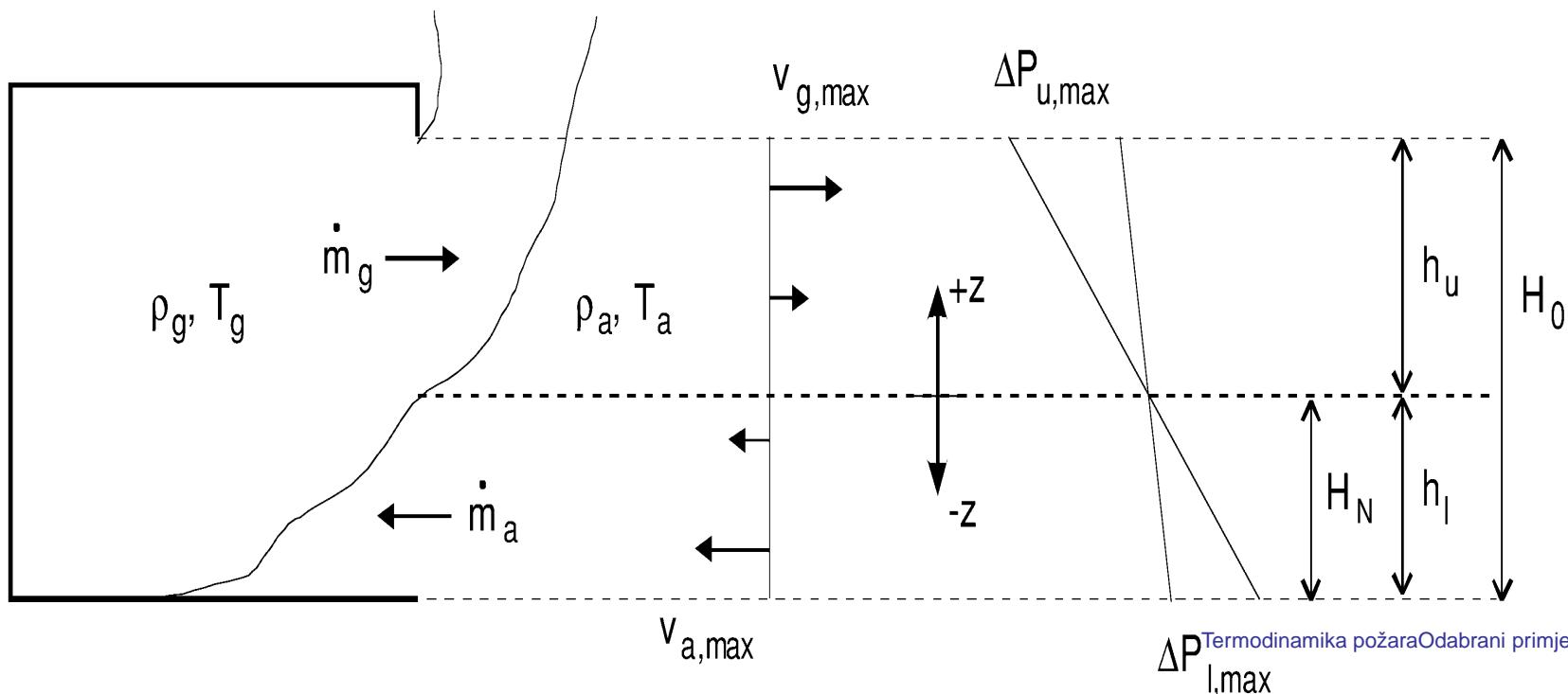
Gorući prostor s otvorom - faza 4

Četvrta faza požara (*potpuno razvijeni požar, može biti post-flashover ili uniformno gorenje*); vrući plinovi su se spustili do poda. Oba tlaka su linearne. Faza se još naziva "dobro pomješanom."



Dobro pomješana faza (1)

Oznake na sl. su jasne. z je uveden s obzirom na neutralnu ravnicu. Budući da se brzina promjene toka mijenja s obzirom na neutralnu ravnicu, mi moramo integrirati da bismo dobili ukupan maseni tok kroz otvor.



Dobro pomješana faza (2)

Jednadžba (16) je dala brzinu protoka mase ($\dot{m} = C_d A v \rho$) gdje je brzina kroz otvor konstantna po njegovoj površini. Kad brzina *nije* konstantna po površini otvora imamo:

$$\dot{m} = C_d \int_A \rho v dA \quad (21)$$

Dobro pomješana faza (2)

Jednadžba (16) je dala brzinu protoka mase ($\dot{m} = C_d A v \rho$) gdje je brzina kroz otvor konstantna po njegovoj površini. Kad brzina *nije* konstantna po površini otvora imamo:

$$\dot{m} = C_d \int_A \rho v dA \quad (21)$$

Uvodeći $dA = W dz$, gdje je W širina otvora, dobivamo brzinu protoka mase na visini z :

$$\dot{m} = C_d \int_0^z W \rho_g v(z) dz \quad (22)$$

Dobro pomješana faza (3)

Iz jednadžbi (10) i (14) dobivamo

$$\begin{aligned}\Delta P_{u,max} &= h_u(\rho_a - \rho_g)g, \\ \Delta P_{l,max} &= h_1(\rho_a - \rho_g)g\end{aligned}\quad (23)$$

Dobro pomješana faza (3)

Iz jednadžbi (10) i (14) dobivamo

$$\begin{aligned}\Delta P_{u,max} &= h_u(\rho_a - \rho_g)g, \\ \Delta P_{l,max} &= h_l(\rho_a - \rho_g)g\end{aligned}\quad (23)$$

gdje se držimo konvencije da su i h_u i h_l pozitivni s obzirom na neutralnu ravninu, tako da je $\Delta P_{l,max}$ pozitivno u otvor, $\Delta P_{u,max}$ je pozitivno iz otvora.

Dobro pomješana faza (3)

Iz jednadžbi (10) i (14) dobivamo

$$\begin{aligned}\Delta P_{u,max} &= h_u(\rho_a - \rho_g)g, \\ \Delta P_{l,max} &= h_l(\rho_a - \rho_g)g\end{aligned}\quad (23)$$

gdje se držimo konvencije da su i h_u i h_l pozitivni s obzirom na neutralnu ravninu, tako da je $\Delta P_{l,max}$ pozitivno u otvor, $\Delta P_{u,max}$ je pozitivno iz otvora.

Općenito je

$$\Delta P(z) = z(\rho_a - \rho_g)g \quad (24)$$

Dobro pomješana faza (4)

Iz jednadžbi (13) i (15) dobivamo za brzinu iznad i ispod neutralne ravnine:

$$v_g(z) = \sqrt{\frac{2z(\rho_a - \rho_g)g}{\rho_g}} \quad (25)$$

$$v_a(z) = \sqrt{\frac{2z(\rho_a - \rho_g)g}{\rho_a}} \quad (26)$$

Dobro pomješana faza (5)

Iz jednadžbe (22) dobivamo

$$\dot{m}_g = C_d \int_0^{h_u} W \rho_g v_g(z) dz \quad (27)$$

Dobro pomješana faza (5)

Iz jednadžbe (22) dobivamo

$$\dot{m}_g = C_d \int_0^{h_u} W \rho_g v_g(z) dz \quad (27)$$

Uvrštavajući (25) dobivamo

$$\dot{m}_g = \frac{2}{3} C_d W \sqrt{2h_u^3(\rho_a - \rho_g)\rho_g g} \quad (28)$$

Dobro pomješana faza (5)

Iz jednadžbe (22) dobivamo

$$\dot{m}_g = C_d \int_0^{h_u} W \rho_g v_g(z) dz \quad (27)$$

Uvrštavajući (25) dobivamo

$$\dot{m}_g = \frac{2}{3} C_d W \sqrt{2h_u^3(\rho_a - \rho_g)\rho_g g} \quad (28)$$

Analogno dobivamo u donjem dijelu

$$\dot{m}_a = \frac{2}{3} C_d W \sqrt{2h_l^3(\rho_a - \rho_g)\rho_a g} \quad (29)$$

Dobro pomješana faza (6)

Da bismo mogli koristiti jednadžbe (28) i (29) mi moramo znati h_u i h_l , tj., moramo odrediti gdje je neutralna ravnina. Prvo, $h_u = H_o - h_l$ (H_o je visina otvora). Zatim mora biti $\dot{m}_g = \dot{m}_a$. Sada koristimo (28) i (29) i dobivamo.

$$h_l = \frac{H_o}{1 + (\rho_a / \rho_g)^{1/3}} \quad (30)$$

Visina neutralne ravnine, H_N , od neke referentne točke se sad može odrediti. Ako je ta referentna točka dno otvora, onda je $H_N = h_l$.

Primjer

Vatra je u prostoriji imala flashover i temperatura plinova je uniformno 1000° . Prostor ima otvor 3m širok i 2 m visok. Izračunajte:

Primjer

Vatra je u prostoriji imala flashover i temperatura plinova je uniformno 1000° . Prostor ima otvor 3m širok i 2 m visok. Izračunajte:

(a) položaj neutralnog sloja mjereno od donjeg kraja otvora;

Primjer

Vatra je u prostoriji imala flashover i temperatura plinova je uniformno 1000° . Prostor ima otvor 3m širok i 2 m visok. Izračunajte:

- (a) položaj neutralnog sloja mjereno od donjeg kraja otvora;
- (b) brzine masenog toka u i iz otvora.

Primjer

Vatra je u prostoriji imala flashover i temperatura plinova je uniformno 1000° . Prostor ima otvor 3m širok i 2 m visok. Izračunajte:

- (a) položaj neutralnog sloja mjereno od donjeg kraja otvora;
- (b) brzine masenog toka u i iz otvora.

Neka je okolna temperatura 20° . Korištenjem jednadžbe idealnog plina, nalazimo

$$\rho_g = \frac{353}{1000+273} = 0.277 \text{ kg/m}^3 \text{ i } \rho_a = \frac{353}{20+273} = 1.2 \text{ kg/m}^3.$$

Primjer

Vatra je u prostoriji imala flashover i temperatura plinova je uniformno 1000° . Prostor ima otvor 3m širok i 2 m visok. Izračunajte:

- (a) položaj neutralnog sloja mjereno od donjeg kraja otvora;
- (b) brzine masenog toka u i iz otvora.

Neka je okolna temperatura 20° . Korištenjem jednadžbe idealnog plina, nalazimo

$$\rho_g = \frac{353}{1000+273} = 0.277 \text{ kg/m}^3 \text{ i } \rho_a = \frac{353}{20+273} = 1.2 \text{ kg/m}^3.$$

- (a) Iz (30): $h_l = 0.76 \text{ m}$; $H_N = 0.76 \text{ m}$; $h_u = 1.24$

Primjer

Vatra je u prostoriji imala flashover i temperatura plinova je uniformno 1000° . Prostor ima otvor 3m širok i 2 m visok. Izračunajte:

- (a) položaj neutralnog sloja mjereno od donjeg kraja otvora;
- (b) brzine masenog toka u i iz otvora.

Neka je okolna temperatura 20° . Korištenjem jednadžbe idealnog plina, nalazimo

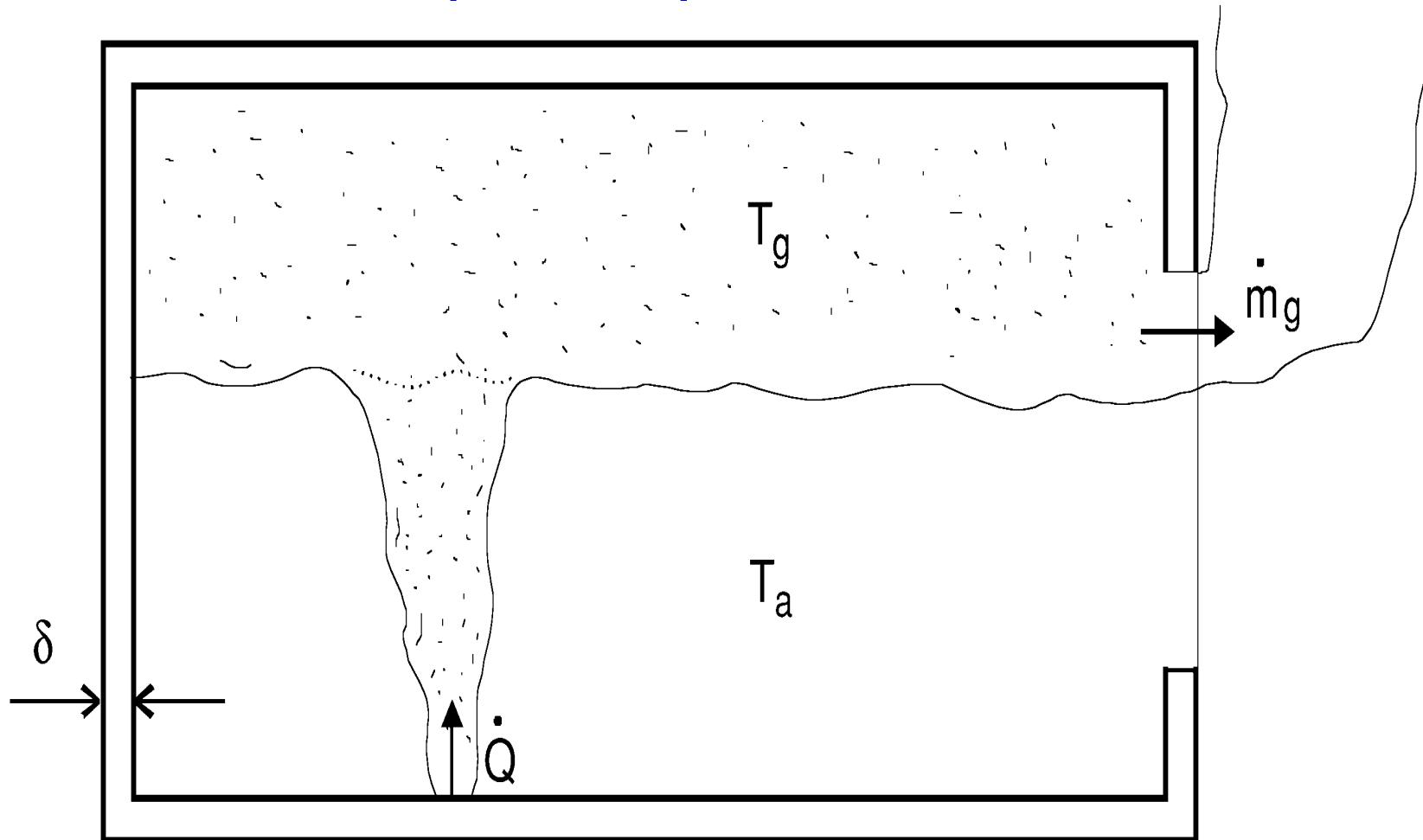
$$\rho_g = \frac{353}{1000+273} = 0.277 \text{ kg/m}^3 \text{ i } \rho_a = \frac{353}{20+273} = 1.2 \text{ kg/m}^3.$$

(a) Iz (30): $h_l = 0.76 \text{ m}$; $H_N = 0.76 \text{ m}$; $h_u = 1.24$

(b) Iz (29), uzimajući $C_d = 0.6$, dobivamo $\dot{m}_a = 3.71 \text{ kg/s}$. Brzina masenog toka vrućih plinova je, naravno, također $\dot{m}_g = 3.71 \text{ kg/s}$.

Temperatura; Pred-flashover (1)

Prikaz vatre u prostoriji.



Temperatura; pred-flashover (2)

Energetska ravnoteža:

Temperatura; pred-flashover (2)

Energetska ravnoteža:
Brzina oslobađanja energije

Temperatura; pred-flashover (2)

Energetska ravnoteža:

Brzina oslobađanja energije

= Brzina gubljenja energije kroz otvore

Temperatura; pred-flashover (2)

Energetska ravnoteža:

Brzina oslobađanja energije

= Brzina gubljenja energije kroz otvore
+ Brzina gubljenja energije kroz zidove

Temperatura; pred-flashover (2)

Energetska ravnoteža:

Brzina oslobađanja energije

= Brzina gubljenja energije kroz otvore
+ Brzina gubljenja energije kroz zidove

Najjednostavniji pristup je preko ravnotežne jednadžbe $\dot{Q} = \dot{m}_g c_p (T_g - T_a) + \dot{q}_{gub}$ (31), gdje je $\dot{q} = h_k \frac{A_T}{\delta} (T_g - T_a)$ (32), gdje je δ debljina, a A_T površina zidova, stropa i poda (kondukcija).

Temperatura; pred-flashover (2)

Energetska ravnoteža:

Brzina oslobađanja energije

= Brzina gubljenja energije kroz otvore
+ Brzina gubljenja energije kroz zidove

Najjednostavniji pristup je preko ravnotežne jednadžbe $\dot{Q} = \dot{m}_g c_p (T_g - T_a) + \dot{q}_{gub}$ (31), gdje je $\dot{q} = h_k \frac{A_T}{\delta} (T_g - T_a)$ (32), gdje je δ debljina, a A_T površina zidova, stropa i poda (kondukcija).

Ovdje je još važna varijabla *termalno*

penetracijsko vrijeme kondukcije: $t_p = \frac{\delta^2 \rho c}{4k}$ koje indicira vrijeme u kojem je $\approx 15\%$ temperaturnog porasta doseglo suprotnu stranu stijenki. ρ , k i c su tabelirani.

Temperatura; pred-flashover (3)

Kombinacijom gornjih jednažbi:

Temperatura; pred-flashover (3)

Kombinacijom gornjih jednažbi:

$$\dot{m}_g = \frac{2}{3} C_d W \sqrt{2(H_o - H_N)^3 (\rho_a - \rho_g) \rho_g g} \quad (31)$$

Temperatura; pred-flashover (3)

Kombinacijom gornjih jednažbi:

$$\dot{m}_g = \frac{2}{3} C_d W \sqrt{2(H_o - H_N)^3 (\rho_a - \rho_g) \rho_g g} \quad (31)$$

$$\Delta T = \frac{\dot{Q}}{\dot{m}_g c_p + h_k A_T} \quad (32)$$

Temperatura; pred-flashover (3)

Kombinacijom gornjih jednažbi:

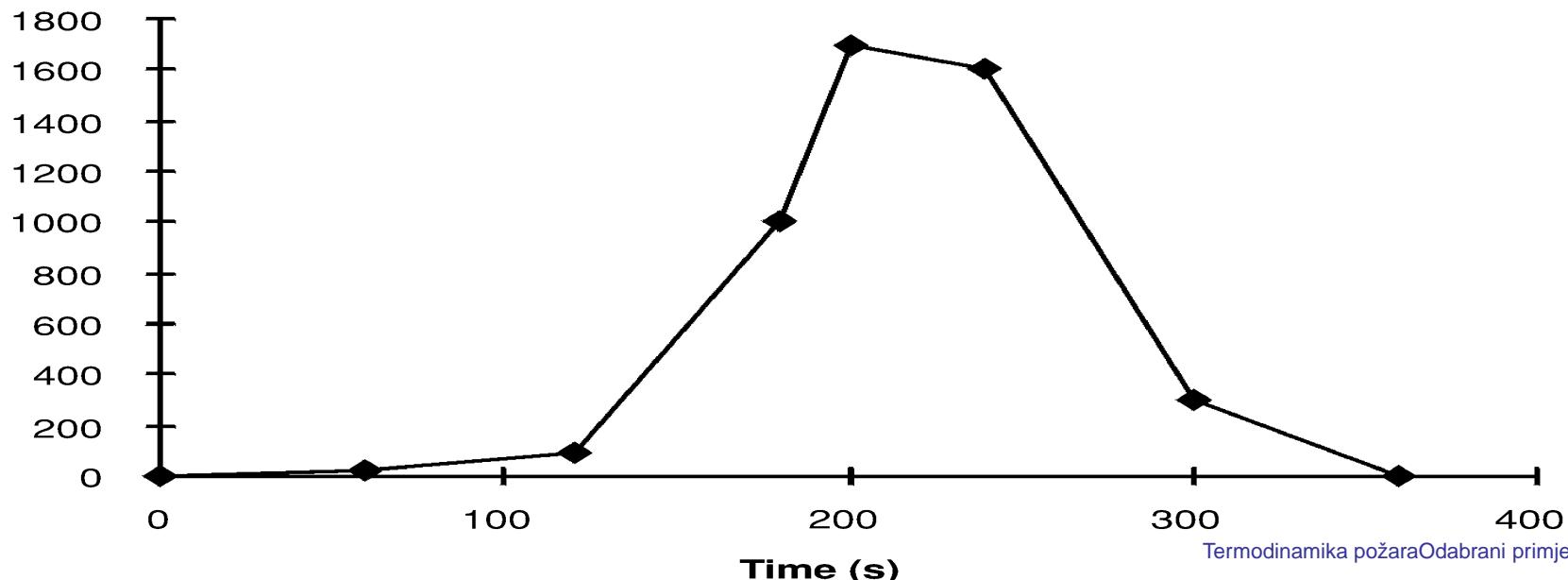
$$\dot{m}_g = \frac{2}{3} C_d W \sqrt{2(H_o - H_N)^3 (\rho_a - \rho_g) \rho_g g} \quad (31)$$

$$\Delta T = \frac{\dot{Q}}{\dot{m}_g c_p + h_k A_T} \quad (32)$$

Ako znamo H_N , (32) se može riješiti pomoću (31). H_N se može dobiti iteracijama na kompjuteru.

Primjer

Pokućstvo je gorjelo u sobi dimenzija $3.6 \times 2.4 \times 2.4$ metra. Otvor je bio 0.8 m širok i 2 m visok. Stijenke su od betona 0.15 m debelog. Oslobođena energija je mjerena i dana na slici. Izračunajte temperaturu gornjeg sloja plinova nakon 3 i nakon 5 min.



Primjer (2)

$t_p = 5$ sati. Za $t = 180s$, empirijska formula McCafrray-a daje $h_k = \sqrt{k\rho c/t} = 0.0204$ kW/(m²K). $A_R = 44.48$ m². Za $t = 180$ s, $\dot{Q} = 1000$ kW. $\Delta T = 539^\circ$ C. Za $T_a = 20^\circ$ C, dobivamo $T_g = 559^\circ$ C. Za $t = 300$ s, $T_g = 283^\circ$ C.

Vodenje topline; kondukcija

Kao što smo vidjeli u prethodnom bloku predavanja kondukcija je opisana Fourierovim zakonom. U dinamičkoj notaciji Fourierov zakon glasi:

Vođenje topline; kondukcija

Kao što smo vidjeli u prethodnom bloku predavanja kondukcija je opisana Fourierovim zakonom. U dinamičkoj notaciji Fourierov zakon glasi:

$$\vec{\dot{q}''} = -k \nabla T = -k \text{grad } T \quad (33)$$

gdje je $\vec{\dot{q}''}$ toplinski tok (brzina protoka topline po jediničnoj površini), ∇T je temperaturni gradient, a k je konduksijski koeficijent.

Vodenje topline; konvekcija

Kao što smo također vidjeli u prethodnom bloku predavanja, konvekcija je opisana Newtonovim zakonom. U dinamičkoj notaciji Newtonov zakon glasi:

Vodenje topline; konvekcija

Kao što smo također vidjeli u prethodnom bloku predavanja, konvekcija je opisana Newtonovim zakonom. U dinamičkoj notaciji Newtonov zakon glasi:

$$\dot{q}'' = h\Delta T = h(T - T_s) \quad (34)$$

gdje je \dot{q}'' konvekcijski toplinski tok (brzina protoka topline po jediničnoj površini), T je temperatura fluida, T_s je temperatura stijenke, a h je konvekcijski koeficijent.

Vodenje topline; zračenje

Kao što smo još vidjeli u prethodnom bloku predavanja, zračenje je opisano Planckovim zakonom. Monokromatska emisijska snaga je dana jednažbom:

Vodenje topline; zračenje

Kao što smo još vidjeli u prethodnom bloku predavanja, zračenje je opisano Planckovim zakonom. Monokromatska emisijska snaga je dana jednažbom:

$$E_{b,\lambda} = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{C_2/\lambda T} - 1} \quad (35)$$

gdje je $C_2 = 3.743 \cdot 10^8 \text{ W} \mu\text{m}^4/\text{m}^2$,
 $C_1 = 1.4387 \cdot 10^4 \mu\text{m}^4 \cdot K$, T je temperatura tijela (K), λ je valna duljina (μm), a b je oznaka za crno tijelo (black body).

Stefan-Boltzmannov zakon

Integriranjem jednadžbe (35) dobivamo Stefan-Boltzmannov zakon:

Stefan-Boltzmannov zakon

Integriranjem jednadžbe (35) dobivamo Stefan-Boltzmannov zakon:

$$E_b = \sigma T^4 \quad (36)$$

gdje je $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{W/m}^2\text{K}^4$
Stefan-Boltzmannova konstanta.

Sivo tijelo

Koeficijenti

- refleksije (ρ)
- apsorpcije (α)
- transmisiјe (τ)
- emisije (ϵ); $E = \epsilon E_b$

Sivo tijelo

Koeficijenti

- refleksije (ρ)
- apsorpcije (α)
- transmisije (τ)
- emisije (ϵ); $E = \epsilon E_b$

Kirchhoffov zakon:

$$\alpha_\lambda = \alpha(\lambda, T) = \epsilon_\lambda(\lambda, T) \quad (37)$$

Prepostavka sivog tijela:

$$\alpha(T) = \epsilon(T) \quad (38)$$

Primjer

Temperaturni senzor je smješten u veliku cijev koja se grie da bi mjerio temperaturu plina koji prolazi kroz cijev. Stijenke cijevi su na temperaturi od 450°C , a senzor pokazuje 170°C . Konvekcijski koeficijent se procjenjuje na $150 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C})$, a emisijski koeficijent materijala sensora je 0.5. Kolika je temperatura plina? Prepostavite da plin ne sudjeluje u transferu topline zračenjem.

Primjer

Temperaturni senzor je smješten u veliku cijev koja se grie da bi mjerio temperaturu plina koji prolazi kroz cijev. Stijenke cijevi su na temperaturi od 450°C , a senzor pokazuje 170°C . Konvekcijski koeficijent se procjenjuje na $150 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C})$, a emisijski koeficijent materijala sensora je 0.5. Kolika je temperatura plina? Prepostavite da plin ne sudjeluje u transferu topline zračenjem.

Toplinska ravnoteža senzora je dana jednadžbom:

$$\frac{dT}{dt} = hA(T_g - T) + \dot{q}(\lambda, \text{aps}) - \dot{q}(\lambda, \text{emit}) - \dot{q}_k(\text{transf})$$

Primjer (2)

Uvjeti su stacionarni: $dT/dt = 0$

Primjer (2)

Uvjeti su stacionarni: $dT/dt = 0$ Toplinska ravnoteža senzora: [konvekcija na senzor]+[zračenje od zida na senzor (kao crno tijelo)]=[zračenje senzora+refleksija zračenja od senzora], tj.

$$h(T_g - T_s) + \tau\sigma T_w^4 = \epsilon\sigma T_s^4 + (1 - \epsilon)\sigma T_w^4 \quad (40)$$

Primjer (2)

Uvjeti su stacionarni: $dT/dt = 0$ Toplinska ravnoteža senzora: [konvekcija na senzor]+[zračenje od zida na senzor (kao crno tijelo)]=[zračenje senzora+refleksija zračenja od senzora], tj.

$$h(T_g - T_s) + \tau\sigma T_w^4 = \epsilon\sigma T_s^4 + (1 - \epsilon)\sigma T_w^4 \quad (40)$$

Prepostavljajući da je $\tau = 1$, dobivamo:

$$h(T_g - T_s) = \sigma\epsilon(T_s^4 - T_w^4), \text{ tj.}$$

$$150(T_g - 443) = 5.67 \cdot 10^{-8} \cdot 0.5(443^4 - 723^4),$$

odakle je $T_g = 399 \text{ K} = 126^\circ \text{ C}$. Značajna razlika!

Treba uzeti u obzir.