

# Predlog za određivanje minimalne zapremine rezervoara za karakteristične komprimovane gasove na bazi koncepta maksimalnog rada

Proposal for determining the minimum volume of the reservoir for characteristic compressed gases based on the concept of maximum work

V. MIČIĆ<sup>1</sup>, B. PEJOVIĆ<sup>1</sup>, M. PERUŠIĆ<sup>1</sup>, S. PAVLOVIĆ<sup>1</sup>, J. PAVLIČEVIĆ<sup>2</sup>, J. B. SIMENDIĆ<sup>2</sup>, M. ANDRIĆ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Univerzitet u Istočnom Sarajevu, Tehnološki fakultet, Zvornik, Republika Srpska;

<sup>2</sup> Univerzitet u Novom Sadu, Tehnološki fakultet, Novi Sad

Ključne reči:  
dimenzionisanje;  
rezervoar; kiseonik;  
azot; maksimalni  
rad; termodinamička  
ravnoteža; povratni  
proces

*Polazeći od glavne relacije za zatvorene termodinamičke sisteme za maksimalan rad povratnih procesa, u radu je izveden opšti model za određivanje minimalne zapremine rezervoara u kome se nalaze komprimovani idealni gasovi azot i kiseonik koji su glavne sastavne komponente vazduha. Pored termičke i mehaničke neravnoteže, u posmatranom kompleksnom sistemu postoji i koncentraciona neravnoteža. Na taj način u analiziranom izolovanom sistemu su ispunjeni uslovi za dobijanje rada.*

*Pri određivanju modela, pošlo se od pretpostavke da su poznati početni parametri gasa u rezervoaru, stanje okoline kao i neophodna energija (maksimalni rad) koji treba dobiti od datog gasa. Termička i mehanička neravnoteža ostvarena je preko izentropske i izotermske promene stanja dok je problem koncentracione neravnoteže, s obzirom na posmatrane gasove, rešen na bazi relacije za zapreminski udeo komponente u mešavini gasova odnosno parcijalni pritisak posmatranog gasa u okolini. Pored analitičkog rešenja, radi kontrole dobijenih rezultata dato je i grafičko rešenje posmatranog problema korišćenjem p-v odnosno T-s dijagrama.*

*Na kraju rada primena modela ilustrovana je na jednom primeru iz prakse gde su određene minimalne zapremine rezervoara za azot i kiseonik, kao posmatrane karakteristične gasove. Radi poređenja rezultata određena je i zapremina rezervoara u kome se nalazi vazduh pod istim početnim uslovima odnosno istim parametrima okoline.*

*Dobijeni rezultati u praksi mogu poslužiti za dimenzionisanje odnosno procenu stvarne zapremine rezervoara za tehničke gasove s obzirom da su stvarni procesi sa termodinamičkog aspekta uglavnom nepovratni.*

Key words:  
dimensioning; tank;  
oxygen; nitrogen;  
maximum work;  
thermodynamic  
equilibrium; reverse  
processes

*Starting from the main relation for closed thermodynamic systems for maximum work of reverse processes, a general model for determining the minimum volume of the tank containing compressed ideal gases, nitrogen and oxygen, as the main constituent components of the air has been developed. In addition to thermal and mechanical, in the observed complex system there is a concentration imbalance. In this way, the analyzed isolated system fulfills the conditions for obtaining work.*

*In determining the model, it is assumed that the initial parameters of the gas in the tank, the state of the environment and the necessary energy (maximum work) to be obtained from the given gas are known. Thermal and mechanical imbalance is realized through an isentropic and isothermal state change, while the problem of concentration imbalance, considering the observed gases, is solved on the basis of the relation for the volume fraction of the component in the gas mixture, i.e. the partial pressure of the observed gas in the environment. In addition to the analytical, in order to control the obtained results, a graphical solution of the observed problem was given using the p-v i.e. T-s diagram.*

*At the end of the work, the application of the model is illustrated on a practical example from practice, where the minimum volumes of the tank for nitrogen and oxygen as characteristic gases, were defined. In order to compare the results, the volume of the tank in which the air is located is determined under the same initial conditions, i.e. the same parameters of the environment.*

*The obtained results can be used in practice for dimensioning or estimating the actual volume of the reservoirs for technical gases, since the actual processes are generally irreversible from the thermodynamic aspect.*

## 1. Uvod

Posude pod pritiskom su konstrukcioni oblici određene zapremine prilagođene za smeštaj fluida. Posude namenjene čuvanju rezerve fluida nazivaju se rezervoari [1, 2]. Za

skladištenje tehničkih gasova pod pritiskom često se koriste cilindrični i sferni rezervoari koji se najčešće izvode postupkom zavarivanja.

Pritisak u rezervoarima za gasove je obično visok da bi mogla da se smesti veća količina gasa.

Pored visokih pritisaka u rezervoarima, mogu se javiti i visoke temperature.

\* E-mail: micicvladan@yahoo.com

Posude treba da ispunjavaju propise u pogledu osnovnog materijala za izradu, kvaliteta zavarenih spojeva, tehnologije izrade i u pogledu sigurnosti u eksploataciji. Zbog toga se podvrgavaju kontroli pri izradi i prijemu i redovnim vremenskim inspekcijama tokom rada. Naročito su strogi zahtevi koje posude treba da ispune u slučaju dejstva visokog pritiska i visoke temperature [2, 3]. Jedan od osnovnih uslova za dobru konstrukciju je izbor prikladnog materijala, što je za posude od posebnog značaja. Veoma složeni uslovi u kojima se posude eksploatišu razlog su korišćenja različitih metalnih i nemetalnih materijala za njihovu izradu [3]. I kod tečnosti i kod gasova ima onih koji imaju agresivno dejstvo. Mnogi procesi u posudama se odigravaju na temperaturama višim od atmosfere, što često pojačava agresivnost radne sredine koje utiču na koroziju kao i na mehaničke karakteristike materijala [5].

U tehničkoj praksi, pri projektovanju, zapremina posuda najčešće se unapred zadaje i njena konačna mera se određuje na bazi izbora geometrijskih veličina. Pritisak koji dejstvuje unutar posude je glavna veličina preko koje se određuje debljina zida posude [1, 2, 5].

## 2. Ideja za rad i postavka problema

Iz tehničke prakse je poznato na primer da akumulatorska baterija koja služi za pokretanje motora motornih vozila može da isporuči određenu količinu električne energije  $E$ . Ovakvih primera ima još mnogo u praksi. Polazeći od ove konstatacije, za vršenje rada koji je ekvivalentan prethodnoj količini energije, može se upotrebiti komprimovani gas koji se skladišti u rezervoaru na pritisku  $p$  i temperaturi  $T$ . Logično pitanje bilo bi i kolika treba da bude, pri datim uslovima, zapremina rezervoara za posmatrani komprimovani gas.

Ideja bi bila da se odredi eksergija odnosno maksimalni rad komprimovanog gasa u rezervoaru, datih parametara  $p$  i  $T$ , sa zadatom energijom  $E_{X_u} = E$ , uz pretpostavku da su poznate vrednosti parametara okoline  $p_0$  i  $T_0$ . Pri tome, za prethodne veličine parametara neophodno je izvesti odgovarajući izraz za rešavanje postavljenog problema. Očigledno je da ovde treba početi od termodinamičkog koncepta maksimalnog rada zatvorenih sistema, gde je  $W_{\max} = E_{X_u}$ , što predstavlja radnu sposobnost fluida u zatvorenom sistemu.

U odnosu na postojeće metode za dimenzionisanje rezervoara za komprimovani gas može se konstatovati da je predložen novi postupak za rešavanje prethodnog problema. Isto tako u tehničkoj praksi ne postoje neke opšte metode za dimenzionisanje rezervoara za tehničke gasove. Uglavnom se prema potrebi usvajaju rezervoari čije su zapremine standardizovane [1, 5].

U ovom radu, s obzirom na vrstu gasa posmatračemo kiseonik,  $O_2$  i azot,  $N_2$ , kao karakterističnu grupu gasova koji su glavne sastavne komponente vazduha a koje se često koriste u praksi.

Rešavanje problema za slučaj da se u rezervoaru nalazi vazduh detaljno je prikazano u radu [4].

## 3. Maksimalni rad zatvorenih sistema

U ovom slučaju energetski resurs je određena količina neke radne materije koja se kao zatvoreni termodinamički sistem nalazi na pritisku  $p_1$ , temperaturi  $T_1$  i zauzima zapreminu  $V_1$ . Okolnu sredinu karakteriše pritisak  $p_0$ , i temperatura  $T_0$  [6–8].

Potrebno je odrediti koliki bi maksimalno mogući rad mogao da se dobije pri promeni stanja radne materije od početnog stanja do stanja uravnoteženja sa okolnom sredinom. Očigledno je da posle dostizanja tog stanja nikakvo dalje dobitanje rada nije moguće [8, 9]. Pri tome, korišćićemo spregu izraza za Prvi i Drugi zakon termodinamike, pri čemu je

prenošenje toplote moguće samo između radne materije i okolne sredine. U literaturi postoje razni pristupi ovoj problematici [7, 10–14]. U radu će izvođenje glavne relacije biti dato na bazi nekoliko postojećih metoda [4, 13, 15–17].

Ukupna promena entropije sistema u najopštijem slučaju sastoji se od promene entropije radne materije  $S_1 - S_0$  i promene entropije okoline  $Q/T_0$ . Pod pretpostavkom da je smer u kome se toplota prenosi od okoline prema radnoj materiji, prema Drugom zakonu biće:

$$S_0 - S_1 - \frac{Q}{T_0} - \Delta S_{\text{nep}} = 0 \quad (1)$$

gde je  $\Delta S_{\text{nep}}$ , porast entropije usled nepovratnosti procesa.

Prema Prvom zakonu termodinamike biće:

$$Q = W + (U_0 - U_1) \quad (2)$$

Zamenom (2) u (1) dobija se:

$$(S_0 - S_1) T_0 - W (U_0 - U_1) - \Delta S_{\text{nep}} T_0 = 0 \quad (3)$$

Jednačina (3) predstavlja izraz na osnovu koga se može odrediti dobijeni rad u najopštijem slučaju. Maksimalni rad će se dobiti u slučaju kada su svi procesi koji se obavljaju povratni tj. pri  $\Delta S_{\text{nep}} = 0$ :

$$W_{\max} = U_0 - U_1 - T_0 (S_0 - S_1) \quad (4)$$

Radna materija u toku odvijanja procesa od stanja 1 do stanja 0, menja zapreminu od  $V_1$  do  $V_0$ , gde je  $V_0$  zapremina radne materije pri  $p_0$  i  $T_0$ .

Zbog pomenute zapremine vrši se rad protiv pritiska okoline u iznosu  $p_0(V_0 - V_1)$ . Za ovaj iznos treba umanjiti izraz za  $W_{\max}$ , s obzirom da rad potiskivanja okolne sredine ne može da se razmatra kao koristan efekat koji bi mogao da se iskoristi izvan sistema radna materija–okolina.

Prema tome iz (4) sledi da je:

$$W_{\max} = U_1 - U_0 - T_0 (S_1 - S_0) - p_0(V_0 - V_1) \quad (5)$$

odnosno zbog redosleda indeksa 1 i 0 biće:

$$W_{\max} = U_1 - U_0 - T_0 (S_1 - S_0) - p_0(V_1 - V_0) \quad (6)$$

ili u specifičnom obliku:

$$w_{\max} = u_1 - u_0 - T_0 (s_1 - s_0) - p_0(v_1 - v_0) \quad (7)$$

Izraz (6) odnosno (7) u suštini predstavlja eksergiju radne materije u zatvorenom sistemu koja, za bilo koje stanje radne materije definisano sa veličinama  $p$ ,  $T$  i  $V$ , ima oblik:

$$E_{X_u} = W_{\max} = U - U_0 - T_0 (S - S_0) - p_0(V - V_0) \quad (8)$$

U oznaci  $E_{X_u}$  donji indeks,  $u$ , treba da ukaže da je reč o eksergiji koja se odnosi na stanje radne materije u zatvorenom sistemu [16, 19–21, 28].

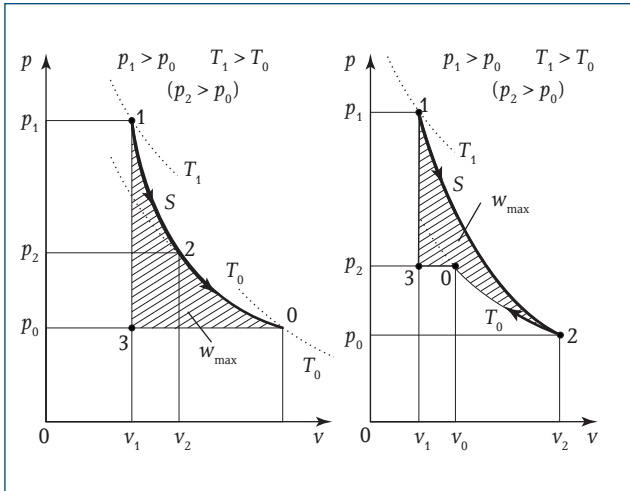
Koristeći izraze za unutrašnju energiju  $U = H - pV$  prema relaciji (8), može se napisati da je:

$$E_{X_u} = W_{\max} = H - H_0 - T_0 (S - S_0) - V(p - p_0) \quad (9)$$

Očigledno da se pri određivanju promene zapremine okoline smatra da je ona po apsolutnoj vrednosti jednaka promeni zapremine radne materije.

Treba zapaziti da se od neke određene količine materije može sa nekom promenom stanja dobiti rad ako se ta radna materija u odnosu na okolinu nalazi u termodinamičkoj neravnoteži, tj. mora postojati jedna od tri neravnoteže: termička, mehanička i koncentraciona. Pri ovome u okolini vladaju konstantni: temperatura,  $T_0$ , pritisak,  $p_0$  i sastav  $\xi_0$ .

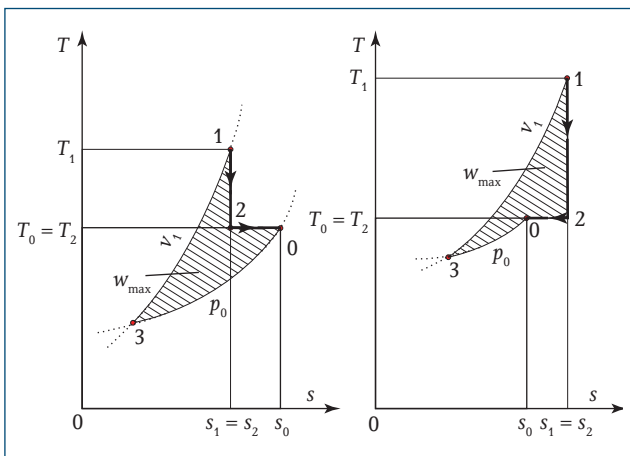
Grafička interpretacija ove problematike data je principijelno za dva karakteristična slučaja prema postavljenom problemu, na sl. 1. gde se rad predstavlja kao površina ispod linije procesa, pozitivan i negativan, zavisno od toga da li je u pitanju ekspanzija ili kompresija.



Slika 1. Grafičko predstavljanje maksimalnog rada zatvorenih sistema u  $p$ - $v$  dijagramu za karakteristične slučajeve [4, 18]

Zapaža se da se u najopštijem slučaju prelaženje iz datog stanja u stanje ravnoteže sa okolinom, na jedinstven povratan način, ostvaruje tako što se najpre obavlja izentropska promena do temperature okoline, a zatim izotermna promena do pritiska okoline. Na dijagramu se uočavaju delovi površina koji predstavljaju pojedine članove jednačine (6), odnosno (7). U vezi sa postavljenim problemom napominje se da je pritisak u rezervoaru  $p_1 > p_0$ , dok pritisak u tački 2 može biti  $p_2 > p_0$ , i  $p_2 < p_0$ , kao što je dato na sl. 1.

Radi potpunijeg prikaza opisanog procesa karakteristični slučajevi na sl. 1, mogu se prikazati principijelno i u  $T$ - $s$  dijagramu (sl. 2).



Slika 2. Grafičko predstavljanje maksimalnog rada zatvorenih sistema u  $T$ - $s$  dijagramu za karakteristične slučajeve [4]

Očigledno je da su ovde radovi ekspanzije pozitivni, a kompresije negativni.

Povratnom promenom može se dobiti veći rad (to je najveći mogući) nego nepovratnom, jer je razlika:

$$\Delta W = W_{\max} - W = T_0 \Delta S_5 > 0 \quad (10)$$

Izraz (10) predstavlja gubitak radne sposobnosti zbog nepovratnosti promene u sistemu [22–25, 29]. Napomenimo da

je koncept maksimalnog rada danas dosta zastupljen kako u oblasti termotehnike tako i u fizičkoj hemiji, termohemiji i drugim sličnim disciplinama [8, 12, 23, 26, 27, 30].

#### 4. Termodinamička ravnoteža

Od neke određene količine materije može se nekom promenom stanja dobiti rad ako se ta radna materija u odnosu na okolinu nalazi u termodinamičkoj neravnoteži, tj. mora postojati jedna od tri neravnoteže: termička, mehanička ili koncentraciona. U okolini vladaju konstantna temperatura,  $T_0$ , pritisak,  $p_0$  i sastav  $\zeta_0$ .

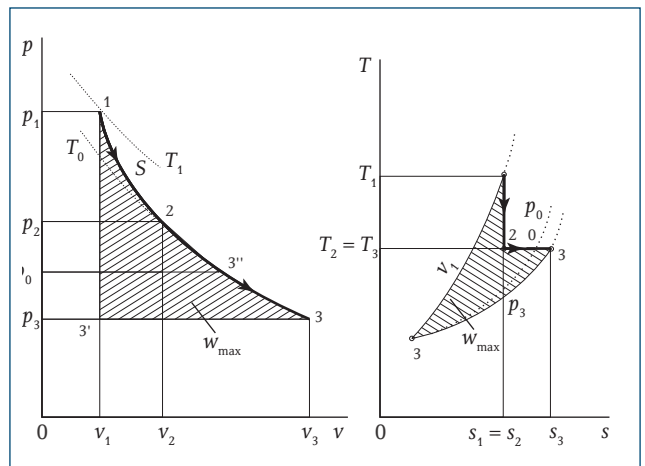
Ako su prethodni uslovi za dobijanje rada ispunjeni, onda se pod maksimalnim radom podrazumeva onaj rad koji se može dobiti obavljanjem procesa sa radnom materijom, ako se ona na povratan način dovodi u ravnotežu sa okolinom.

Uravnoteženje temperature i pritiska je relativno jednostavno, dok je kod koncentracije problem komplikovaniji. U slučajevima kada se koncentracija radne materije može izraziti parcijalnim pritiskom u okolini, umesto pritiska okoline  $p_0$  uzimamo taj parcijalni pritisak  $p_3$ .

Na sl. 3 dat je prikaz u dijagramima  $p$ - $v$  i  $T$ - $s$  karakterističnog slučaja gde postoji kompletna termodinamička neravnoteža ( $T_1 \neq T_0$ ,  $p_1 \neq p_0$ ,  $\zeta_1 \neq \zeta_0$ ). Išrafirana površina u oba dijagrama ekvivalentna je maksimalnom radu  $W_{\max}$ .

Očigledno je prikazan karakterističan slučaj  $p_2 > p_0$  pri parcijalnom pritisku gasa u okolini  $p_3 < p_0$ .

Drugi karakterističan slučaj pri  $p_2 < p_0$ , dat je na sl. 4 gde je takođe u dijagramima  $p$ - $v$  i  $T$ - $s$  predstavljen maksimalni rad  $W_{\max}$ . Za oba data slučaja važi da je  $p_1 > p_0$ ,  $T_1 > T_0$ , što je i najčešći slučaj u praksi.



Slika 3. Predstavljanje maksimalnog rada u radnom i toplotnom dijagramu za slučaj potpune termodinamičke ravnoteže pri  $p_2 > p_0$

Pritisak u mešavini idealnih gasova rezultat je dejstva svih molekula, što znači da je on svakako jednak zbiru pritiska pojedinih komponenta zvanih parcijalni pritisci [7, 9, 31, 32]:

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_n \quad (11)$$

Ako bi se  $i$ -ta komponenta izdvojila i smestila u zapremini  $V_i$ , tako da joj pritisak ima vrednost pritiska mešavine  $p$ , a temperatura ostane ista kao u mešavini, bilo bi:

$$pV_i = m_i R_i T \quad (12)$$

gde je  $V_i$  parcijalna zapremina koja predstavlja fiktivnu vrednost.

Odnosom ove zapremine i ukupne zapremine definiše se zapreminski udeo  $i$ -te komponente:

$$r_i = \frac{V_i}{V} = \frac{p}{\frac{m_i R_i T}{p}} = \frac{p_i}{p} \quad (13)$$

Zbir zapreminskih udela jednak je jedinici [8, 10]:

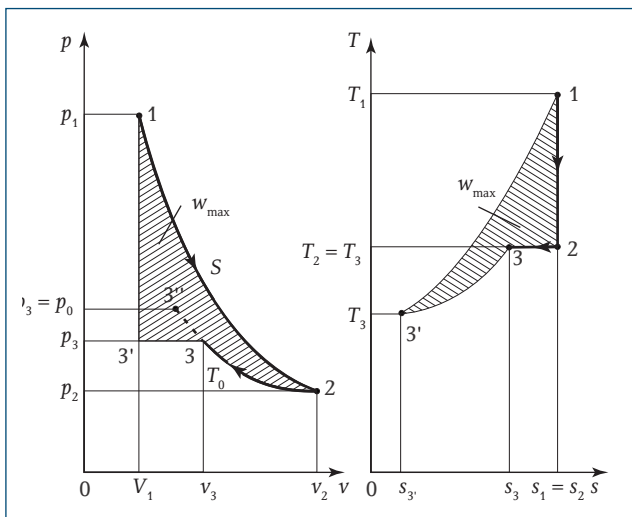
$$r_1 + r_2 + \dots + r_n = 1 \quad (14)$$

Za slučaj da je poznat zapreminski udeo komponente u mešavini gasova, parcijalni pritisak komponente u mešavini prema (13) biće [11, 13, 33, 34]:

$$p_i = r_i p \quad (15)$$

Za komponente vazduha  $N_2$  i  $O_2$  koje su tema rada, zapreminski udeli su  $r_{N_2} = 0,79$ ,  $r_{O_2} = 0,21$ , pa je parcijalni pritisak prema (15):

$$p_{N_2} = 0,79 p, p_{O_2} = 0,21 p \quad (16)$$



Slika 4. Predstavljanje maksimalnog rada u radnom i toplotnom dijagramu za slučaj potpune termodinamičke ravnoteže pri  $p_2 < p_0$

## 5. Glavna relacija za rešavanje problema

Pri rešavanju postavljenog problema poći će se od pretpostavke da su poznati stanje okoline ( $T_0$ ,  $p_0$ ) i početno stanje posmatranog gasa u rezervoaru ( $T_1$ ,  $p_1$ ). Isto tako smatraćemo da je poznata energija (maksimalni rad) koja treba da se dobije od komprimovanog gasa  $E = E_{Xu}$  [J]. Za ove uslove izvršiće se dimenzionisanje rezervoara odnosno odrediće se njegova zapremina  $V_1$  [ $m^3$ ].

Pri tome će se poći od glavne jednačine (7) izvedene u poglavlju 2.

Isto tako smatraćemo da je poznat parcijalni pritisak  $p_3$  posmatranih gasova u okolini ( $p_3 = 0,21$  bar za kiseonik,  $p_3 = 0,79$  bar za azot), za slučaj da je pritisak okoline  $p_0 = 1$  bar, relacija (16).

Jednačina (7) zamenom:

$$u_1 = h_1 - p_1 v_1; u_0 = h_0 - p_0 v_0 \quad (17)$$

prelazi u pogodniji oblik za praktičnu primenu:

$$w_{\max} = h_1 - p_1 v_1 - h_0 + p_0 v_0 - T_0 (s_1 - s_0) + p_0 (v_1 - v_0) \quad (18)$$

Dobijena relacija može se nakon sređivanja napisati ovako:

$$w_{\max} = h_1 - h_0 - T_0 (s_1 - s_0) + v_1 (p_1 - p_0) \quad (19)$$

Pri tome, za promenu unutrašnje energije, entalpije i entropije važi da je:

$$u_1 - u_0 = c_v (T_1 - T_0) = \frac{R}{k-1} (T_1 - T_0) \quad (20)$$

$$h_1 - h_0 = c_p (T_1 - T_0) = \frac{Rk}{k-1} (T_1 - T_0) \quad (21)$$

$$s_1 - s_0 = c_p \ln \frac{T_1}{T_0} - R \ln \frac{p_1}{p_0} = \frac{Rk}{k-1} \left( \ln \frac{T_1}{T_0} - \frac{k-1}{k} \ln \frac{p_1}{p_0} \right) \quad (22)$$

Zamenom (21) i (22) u (19) biće:

$$w_{\max} = \frac{Rk}{k-1} (T_1 - T_0) - T_0 \frac{Rk}{k-1} \left( \ln \frac{T_1}{T_0} - \frac{k-1}{k} \ln \frac{p_1}{p_0} \right) + v_1 (p_0 - p_1) \quad (23)$$

odnosno konačno:

$$w_{\max} = c_p (T_1 - T_0) - T_0 c_p \left( \ln \frac{T_1}{T_0} - \frac{k-1}{k} \ln \frac{p_1}{p_0} \right) - RT_1 \left( 1 - \frac{p_0}{p_1} \right) \quad (24)$$

Pri tome je:

$$w_{\max} = E_{Xu} = m w_{\max} \quad (25)$$

Specifični maksimalni rad prema (7) može se izraziti i na drugi način, preko relacija (20) i (22):

$$w_{\max} = \frac{R}{k-1} (T_1 - T_0) - T_0 \frac{Rk}{k-1} \left( \ln \frac{T_1}{T_0} - \frac{k-1}{k} \ln \frac{p_1}{p_0} \right) - p_0 \left( \frac{RT_1}{p_1} - v_0 \right) \quad (26)$$

Za početno stanje važi da je:

$$p_1 v_1 = m R T_1 \quad (27)$$

Odavde će zapremina rezervoara u kome se nalazi gas biti:

$$V_1 = m \frac{R T_1}{p_1} \quad (28)$$

Masa gasa prema (25) će biti:

$$m = \frac{W_{\max}}{w_{\max}} = \frac{E_{Xu}}{w_{\max}} \quad (29)$$

odnosno prema (24):

$$m = \frac{E_{Xu}}{c_p (T_1 - T_0) - T_0 c_p \left( \ln \frac{T_1}{T_0} - \frac{k-1}{k} \ln \frac{p_1}{p_0} \right) - RT_1 \left( 1 - \frac{p_0}{p_1} \right)} \quad (30)$$

Zapremina rezervoara dobija se prema (28):

$$V_1 = \frac{E_{Xu} R T_1}{c_p (T_1 - T_0) - T_0 c_p \left( \ln \frac{T_1}{T_0} - \frac{k-1}{k} \ln \frac{p_1}{p_0} \right) - RT_1 \left( 1 - \frac{p_0}{p_1} \right)} \frac{1}{p_1} \quad (31)$$

Relacija (31) predstavlja opšti model za rešavanje postavljenog problema, za slučaj da se u rezervoaru nalazi vazduh kao posmatrani gas, gde je zastupljena koncentraciona ravnoteža.

Napomenimo da je ovaj slučaj detaljno razrađen u radu [4].



Za naš slučaj u rezervoaru, kao karakteristični gasovi su kiseonik i azot, čiji su parcijalni pritisci u okolini  $p_3$  (sl. 3 i 4). Za ovaj slučaj opšti model za rešavanje problema dobiće se ako u relaciji (31) zamenimo  $p_0 = p_3$ . Razlog za ovo je dovođenje posmatranog sistema u koncentracionu ravnotežu. S obzirom na prethodno, iz (31) sledi da je:

$$V_1 = \frac{E_{xu} RT_1}{c_p (T_1 - T_0) - T_0 c_p \left( \ln \frac{T_1}{T_0} - \frac{k-1}{k} \ln \frac{p_1}{p_3} \right) - RT_1 \left( 1 - \frac{p_3}{p_1} \right)} p_1 \quad (32)$$

## 6. Grafičko rešavanje problema

Kao što je rečeno, prilikom vršenja povratnog procesa dovođenje radne materije u ravnotežu sa okolinom dolazi u opštem slučaju do promene zapremine i radne materije i okoline. Algebarski zbir apsolutnih (zapreminskih) radova u sistemu radna materija-okolina je maksimalni rad, odnosno najveći rad širenja u prikazanom slučaju.

Maksimalan specifični zapreminski rad može se odrediti grafički, na primer prema slici 4 biće:

$$w_{\max} = w_{12} + w_{23} + w_{33'} \quad (33)$$

Pojedinačni zapreminski radovi biće:

$$w_{12} = c_v (T_1 - T_2) = \frac{R}{k-1} (T_1 - T_2) \quad (34)$$

$$w_{23} = RT_2 \ln \frac{p_2}{p_3} \quad (35)$$

$$w_{33'} = p_3 (v_{3'} - v_3) \quad (36)$$

zamenom (34), (35) i (36) u (33), dobijamo:

$$w_{\max} = \frac{R}{k-1} (T_1 - T_2) + RT_2 \ln \frac{p_2}{p_3} + p_3 (v_{3'} - v_3) \quad (37)$$

Zbog ispravnog prikaza u dijagramima  $p$ - $v$  i  $T$ - $s$  neophodno je definisati tačku 2 u procesu (sl. 1).

Iz zakona izentrope u  $T$ - $p$  dijagramu:

$$T \left( \frac{1}{p} \right)^{\frac{k-1}{k}} = \text{const.} \quad (38)$$

dobija se pritisak u tački 2:

$$p_2 = p_1 \left( \frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (39)$$

U relaciji (26) očigledno je da je:

$$v_3 = v_1 = \frac{RT_1}{p_1}, \quad \text{a} \quad v_0 = \frac{RT_0}{p_0}, \quad \text{dok je} \quad T_2 = T_0$$

Na slikama 1 i 2, išrafirana površina je ekvivalentna maksimalnom radu u radnom odnosno toplotnom dijagramu [8, 18, 23].

## 7. Računski primer

U sfernom rezervoaru (sl. 3) nalaze se kiseonik,  $O_2$ , odnosno azot,  $N_2$ , kao komprimovani gasovi istog stanja  $t_1 = 120$  °C i  $p_1 = 15$  bar. Stanje okoline je  $p_0 = 1$  bar,  $t_0 = 15$  °C.

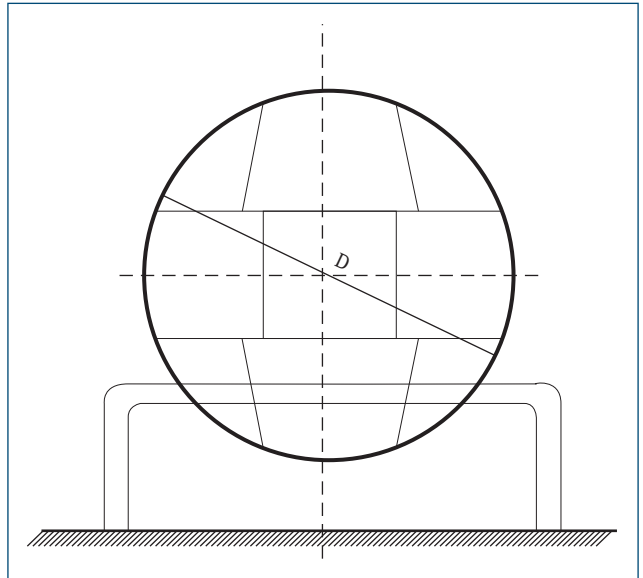
Potrebna energija koju treba obezbediti za oba komprimovana gasa je  $E = E_{xu} = 5000$  kJ.

Odredićemo minimalnu zapreminu rezervoara za oba posmatrana gasa.

Isto tako, radi poređenja rezultata odredićemo minimalnu zapreminu rezervoara za slučaj da je u rezervoaru vazduh pod istim uslovima.

### Rešenje

S obzirom da postoje sve tri termodinamičke neravnoteže, ispunjeni su uslovi za dobijanje rada. Rešavanje problema sprovedimo sledećim redosledom:



Slika 5. Sferni rezervoar za tehničke gasove

#### a) Pritisak u tački 2

Pritisak u tački 2 prema (39) biće isti za oba gasa (zbog nepromenjenog eksponenta  $k = 1,4$ ):

$$p_2 = p_1 \left( \frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{k}{k-1}} = 15 \left( \frac{283}{393} \right)^{1,4} = 4,75 \text{ bar}$$

Odavde sledi da je u pitanju proces prema sl. 1a. Prilikom konstruisanja dijagrama treba proveriti položaj tačke 1 u odnosu na tačku 0 odnosno 3, poređenjem odgovarajućih specifičnih zapremina.

Ovde su ispunjeni uslovi za dobijanje rada, jer u posmatranom izolovanom sistemu vladaju termička, mehanička i koncentraciona neravnoteža. Maksimalan rad dobiće se dovođenjem posmatranih gasova na povratan način u ravnotežu sa okolinom. Da bi se izolovani sistem doveo prvo u termičku ravnotežu potrebno je izvršiti izentropsku ekspanziju posmatranih gasova do temperature okoline. Pri tome stanje 2 je određeno pritiskom  $p_2 = 4,75$  bar.

Nakon izentropske ekspanzije vrši se kvazistatička izotermna ekspanzija gasa prvo do pritiska okoline, da bi se sistem doveo u mehaničku ravnotežu, a zatim do pritiska  $p_3$  parcijalnog pritiska kiseonika odnosno azota u okolini.

#### b) Specifične zapremine u tački 1

– za kiseonik:

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{260 \cdot 393}{15 \cdot 10^5} = 0,068 \text{ m}^3/\text{kg}$$

– za azot:

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{297 \cdot 393}{15 \cdot 10^5} = 0,079 \text{ m}^3/\text{kg}$$

### c) Specifične zapremine u tački 2

– za kiseonik:

$$v_2 = v_1 \left( \frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1}{k}} = 0,068 \left( \frac{15}{4,75} \right)^{\frac{1}{1,4}} = 0,155 \text{ m}^3/\text{kg}$$

– za azot:

$$v_2 = v_1 \left( \frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1}{k}} = 0,079 \left( \frac{15}{4,75} \right)^{\frac{1}{1,4}} = 0,180 \text{ m}^3/\text{kg}$$

### d) pritisak u tački 3

– za kiseonik:

$$p_3 = 0,21 \text{ bar}$$

– za azot:

$$p_3 = 0,79 \text{ bar}$$

### e) specifične zapremine u tački 3

– za kiseonik:

$$v_3 = \frac{RT_3}{p_3} = \frac{260 \cdot 288}{0,21 \cdot 10^5} = 3,566 \text{ m}^3/\text{kg}$$

– za azot:

$$v_3 = \frac{RT_3}{p_3} = \frac{297 \cdot 288}{0,79 \cdot 10^5} = 1,083 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Odavde sledi da se termodinamički proces, odvija u  $p$ - $v$  i  $T$ - $s$  dijagramu prema šemi na sl. 3.

### f) Minimalna zapremina rezervoara

Prema (32):

$$V_1 = \frac{E_{X_u} RT_1}{c_p(T_1 - T_0) - T_0 c_p \left( \ln \frac{T_1}{T_0} - \frac{k-1}{k} \ln \frac{p_1}{p_3} \right) - RT_1 \left( 1 - \frac{p_3}{p_1} \right)} p_1$$

biće:

– za kiseonik:

$$V_1 = \frac{5000 \cdot 10^3 \cdot 260 \cdot 393}{913 \cdot 105 - 288 \cdot 913 \left( \ln \frac{393}{288} - \frac{0,4}{1,4} \ln \frac{15}{0,21} \right) - 260 \cdot 393 \left( 1 - \frac{0,21}{15} \right)} 15 \cdot 10^5$$

$$V_1 = 1,455 \text{ m}^3$$

– za azot:

$$V_1 = \frac{5000 \cdot 10^3 \cdot 297 \cdot 393}{1047 \cdot 105 - 288 \cdot 1047 \left( \ln \frac{393}{288} - \frac{0,4}{1,4} \ln \frac{15}{0,79} \right) - 297 \cdot 393 \left( 1 - \frac{0,79}{15} \right)} 15 \cdot 10^5$$

$$V_1 = 2,36 \text{ m}^3$$

### g) Potrebna masa gasa u rezervoaru

Polazeći od relacije:

$$m = \frac{p_1 V_1}{RT_1}$$

dobijamo za:

– kiseonik:

$$m = \frac{15 \cdot 10^5 \cdot 1,455}{260 \cdot 393} = 21,36 \text{ kg}$$

– azot:

$$m = \frac{15 \cdot 10^5 \cdot 2,36}{297 \cdot 393} = 30,33 \text{ kg}$$

### h) Kontrola dobijenih rezultata

Može se izvesti prema (37) odnosno grafičkom metodom (kao nezavisnom metodom):

$$W_{\max} = \frac{R}{k-1} (T_1 - T_2) + RT_2 \ln \frac{p_2}{p_3} + p_3 (v_3 - v_2) = \frac{E_{X_u}}{m}$$

Takođe do rešenja problema, kao što je rečeno, moguće je doći i preko gornje relacije. Ovde je očigledno  $v_3 = v_1$ , dok je  $p_3 v_3 = RT_3 = RT_0$  odnosno  $v_3 = RT_0/p_3$ .

Unutrašnji prečnik sfernog rezervoara može se jednostavno odrediti iz njegove poznate zapremine.

Radi poređenja rezultata, minimalna zapremina rezervoara u kome se nalazi vazduh pod istim uslovima kao i posmatrani gasovi, može se odrediti prema relaciji (31) što je detaljno razrađeno u radu [4].

## 8. Zaključak

Dobijeni rezultati su sasvim opšti i važe za bilo kakvu promenu stanja neke konačne količine materije koja se uravnotežuje sa okolinom. Uravnoteženje temperature i pritiska je relativno jednostavno, dok je kod koncentracije to znatno komplikovanije. Za slučaj kada je radna materija vazduh, koncentracija radne materije može se izraziti njenim parcijalnim pritiskom u okolini, primena izraza za radnu sposobnost je jednostavna. Kod ostalih materija, problem uglavnom komplikuje baš koncentracija.

U praksi nije uobičajeno da se zapremina rezervoara u kome se nalazi komprimovani gas određuje na predloženi način. Možemo slobodno tvrditi da kod zatvorenih sistema kakav je prikazani, radna sposobnost koja se izražava preko zapreminskog (apsolutnog) rada a koja je jednaka maksimalnom radu može poslužiti kao merodavan kriterijum za procenu dimenzija rezervoara. Razlog za ovo je taj što se pri stvarnim nepovratnim procesima dobija manji rad nego kod povratnih procesa. Dobijeno rešenje može se smatrati kao prvo približenje stvarnoj vrednosti zapremine.

Za dobijanje rada dovoljan je uslov da je ispunjena jedna od tri opisane neravnoteže odnosno da posmatrani sistem bude neuravnotežen. Predloženi model je opšti tako da ga je jednostavno primeniti direktno i za slučajeve kada ne postoje sve tri neravnoteže. Isto tako dobijeno rešenje kao što je pokazano, može se primeniti i za slučaj da je radna materija vazduh. Dobijena glavna relacija modela omogućuje analizu uticajnih faktora.

Radi potpunijeg prikaza, procese treba prikazivati i pratiti kako u radnom  $p$ - $v$  dijagramu tako i u toplotnom  $T$ - $s$  dijagramu. Stanje gde se završava izentropska odnosno gde počinje izotermna promena treba precizno definisati kako bi se došlo do ispravnog rezultata. Predložena grafička metoda kao nezavisna u odnosu na analitičku metodu može se koristiti kako za rešavanje postavljenog problema, tako i za kontrolu rezultata dobijenih prema izvedenom analitičkom modelu.

Dobijena minimalna zapremina rezervoara, kao što je pokazano, dosta zavisi od vrste gasa i ako su svi ostali uslovi isti. Glavni razlog za to su različite toplotne osobine gasova ( $c_p$  i  $R$ ).

Za slučaj da se proces odvija pri većim temperaturnim razlikama ( $\Delta T = T_1 - T_0$ ), gas treba posmatrati kao poluidealan s obzirom da specifični toplotni kapacitet zavisi od temperature, radi dobijanja tačnijih rezultata.

Koncept maksimalnog rada široko se primenjuje u termotecnici tako da prikazani rad predstavlja jednu od mogućnosti njegove primene.

## 9. Literatura

- [1] **Kasatkin, A. G.**, *Osnovne procesi i aparati, hemičeskoj tehnologiji, Himija*, Moskva, 1991.
- [2] **Lašinski, A. A.**, *Osnovi konstruiranja i račeta hemičeskih aparatura*, Mašinstroenie, Leningrad 1980.
- [3] **Popović, I.**, *Elementi hemijskih aparata*, TMF, Beograd, 1980.
- [4] **Perušić, M., B. Pejović, R. Filipović, M. Smiljanić, M. Radić**, *Novi prilaz određivanju minimalne zapremine rezervoara za komprimovani vazduh*, Journal of Engineering & Processing Management, Volume 8, No. 1, 2016, 65–72.
- [5] **Zirpke, K.**, *Zahnräder*, VEB Fachbuchverlag, Leipzig, 2003.
- [6] **Abbott, M. M., H. C. Van Ness**, *Thermodynamics*, Schaum's outline Series, McGraw-Hill, Book Co, New York, 1976.
- [7] **Baehr, H. D.**, *Thermodynamik*, Springer-Verlag, Berlin, 1983.
- [8] **Базаров, И. П.**, *Термодинамика*, Высшая школа, Москва, 1983.
- [9] **Black W. Z., J. G. Hartlay**, *Thermodynamics*, Harper and Row, New York, 1985.
- [10] **Bosnjakovic, F.**, *Nauka o toplini, dio prvi*, (3. izdanje), Tehnička knjiga, Zagreb, 1962.
- [11] **Büki, G.**, *Energetika*, MK, Budapest, 1997.
- [12] **Carnot, S.**, *Reflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres a developper cette puissance*, Bachelier, Paris, 1984.
- [13] **Doering, E., H. Schedwill, M. Dehl**, *Grundlagen der Technischen Thermodynamik* (5. Aufl.), Teubner, Stuttgart, 2005.
- [14] **Жуковский, В. С.**, *Термодинамика*, Энергоатомиздат, Москва, 1983.
- [15] **Fenn, J. B.**, *Engines, Energy and Entropy*, W. H. Freeman and Comp., New York, 1982.
- [16] **Fermi, E.**, *Thermodynamics*, Dover Publ. Inc, New York, 1976.
- [17] **Гухман, А. А.**, *Об основаниях термодинамики*, Энергоатомиздат, Москва, 1986.
- [18] **Karlekar, B. V.**, *Thermodynamics for Engineers*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, 1983.
- [19] **Kozić, Đ, R. Šelmić**, *Termodinamika i termotehnika* (7. Prer. Izd.), Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Beograd, 2004.
- [20] **Kozić, Đ, B. Vasiljević, B. Bekavac**, *Priručnik za termodinamiku* (14. Izd.), Mašinski fakultet, Beograd, 2007.
- [21] **Леонова, В. Ф.**, *Термодинамика*, Высшая школа, Москва, 1968.
- [22] **Michael J. M., N. S. Howard**, *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*, Wiley, New York, 1999.
- [23] **Rant, Z.**, *Termodinamika – knjiga sa uk i prakso*, Univerza v Ljubljani, Ljubljana, 1963.
- [24] **Reynolds, W. C.**, *Thermodynamics*, Mc Graw-Hill, Book Co., New York, 1968.
- [25] **Szargut, J.**, *Termodinamika*, PWN, Warszawa, 1985.
- [26] **Tribus, M.**, *Thermostatics and thermodynamics*, Van Nostrand Comp., Princeton, New Jersey, 1987.
- [27] **Вейник, А. Н.**, *Техническая термодинамика и основы шейлопередачи*, Металлургия, Москва, 1986.
- [28] **Petrić, N., I. Vojnović, V. Martinac**, *Tehnička termodinamika*, Kemijsko-tehnološki fakultet u Splitu, Split, 2007.
- [29] **Galović, A.**, *Termodinamika I*, IV izdanje, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010.
- [30] **Kanoglu, M., Y. A. Cengel, I. Dincer**, *Efficiency Evaluation of Energy Systems*, Springer Briefs in Energy, Springer Verlag, New York, 2012.
- [31] **Dincer, I, M. A. Rosen**, *Exergy, Energy, Environment and Sustainable Development*, Elsevier, Oxford, 2013.
- [32] **Kotes, T. J.**, *The Exergy Method of Thermal Plant Analysis*, Butterworths, London, 1986.
- [33] **Golub, M., T. Kurevija, Z. Pravica**, *Maximum Energy Output of Geopressured Geothermal Reservoirs in Croatia*, International Congress of Energy and Environment 2006, Vol. II, Opatija, Croatia, 25–27. October 2006, 121–130.
- [34] **Kurevija, T., R. Kos**, *Possibility of Energy Utilization in Greenhouses at the Velika Ciglena Reservoir Field*, International Congress of Energy and Environment 2004, Opatija, Croatia, 27–29. October 2004, Vol. II, 39–46.
- [35] **Lund, J. W., P. J. Lienau, B. C. Lunis**, *Geothermal Direct-Use Engineering and Design Guidebook*, U.S. Department of Energy, Idaho Operation Office, Idaho Falls, 1998, 454
- [36] **Milora, S. L., J. W. Tester**, *Geothermal energy as a source of electric power*, The MIT Press, New York, 1976.



### Vrhunske performanse uz estetski dizajn



DID 642, do 450 m<sup>3</sup>/h svežeg vazduha

TROX indukcioni uređaji

- Visina uređaja već od 170 mm
- Atraktivan dizajn sa perforacijama koje se smanjuju ka ivicama
- Energetski efikasna regulacija u prostoriji u kombinaciji sa X-AIRCONTROL
- Nizak nivo buke i mala brzina vazduha u zoni boravka
- Moguća izvedba sa dodatnim funkcijama kao npr. osvetljenje, zvučnici, sprinkleri, senzori dima i senzori prisutnosti



DID 614, do 300 m<sup>3</sup>/h svežeg vazduha



The art of handling air

[www.trox.rs](http://www.trox.rs)

## Firme koje su potvrdile podršku 49. Kongresu i izložbi o KGH

(Beograd, Sava centar, 5–7.12.2018)

Generalni pokrovitelj kongresa



Pokrovitelj izložbe



### Glavni sponzori

AIRTREND – KOVENT ■ AYVAZ ■ DANFOSS ■ DADANCO EUROPE ■ EMERSON ■ ETAŽ ■ FENIKS BB ■ FILTER FRIGO ■ GROUP PROTEM ■ GRUNDFOS SRBIJA ■ IMI INTERNATIONAL ■ ITN GROUP ■ KLIMA M ■ LG ELECTRONICS ■ LINDAB d.o.o. Beograd ■ MPG KGH ■ MIKOTERM ELECTRONIC ■ OVEX INŽENJERING ■ PET-PROM ■ PORTAL ■ ROBERT BOSCH ■ SİDEK INŽENJERING ■ SIPATEC ■ SMART BUILDING TECHNOLOGIES ■ SOKO INŽINJERING ■ STEELSOFT – LG ■ SYSTEMAIR ■ TDM ■ TECHNOLOGY INTERNATIONAL SERVICES ■ TECE ■ TERMO PLUS ■ TERMOINŽENJERING ■ TRACO ■ TROX AUSTRIA, Predstavništvo Beograd ■ UN ENVIRONMENT ■ VAILLANT ■ VISSMANN ■ ZEHNDER/MTA ■ WILO Beograd

### Sponzori

AKTING ■ ALFA CLIMA ■ ANTIĆ KLIMATIZACIJA ■ BELIMO AUTOMATION ■ CALEFFI, HIDROTERMIKA ■ CIM GAS ■ CWG BALKAN ■ ELMARK ■ ESOT-INVEST ■ EURO HEAT ■ EUROFRIGO ■ GAS LIDER ■ HALTON FOODSERVICE ■ HERZ ARMATUREN ■ INSTALACIJA INŽENJERING ■ INTERFRIGO ■ IPROS ■ ISOPLUS ■ IZOLIR ■ KAN Sp. z o.o. ■ KIM TEC ■ KLIMA DOP ■ KOMO-YU ■ KORAJA ■ OVENTROP ■ PEZOS EXPORT IMPORT ■ P.V.F. TRADERS ■ RACIONALIZACIJA ENERGIJE ■ REHAU ■ TEHNOSAM ■ TERMOMEHANIKA ■ TERMOPLUS (CIAT) ■ TOPTHERM ■ TRACO INVEST ■ UNICOM ■ VIS COMPANY ■ WEISHAUP

### Izlagачi na izložbi

CAREL ■ CENTRAL H ■ FOCUS COMPUTERS ■ MINICHOTHERM ■ MRU GmbH ■ OZON DOOEL ■ RADING ■ SVECOM ■ TEHNIKA KB ■ TOPEKO HVAC & FIRESTOP SYSTEMS ■ TOPIZ ■ VALVE TRADE ■ VOGEL & NOOT ■ IBPSA – DANUBE

