

**1. ZADATAK**

Parni kotao proizvodi vodenu paru stanja 20 bar i 350 °C. Jedan dio pare odvodi se u turbinu u kojoj izentropski ekspandira do tlaka 2 bar. Drugi dio pare se odmah po izlasku iz kotla odvodi u tzv. "redukcijsku stanicu" u kojoj se prigušuje na tlak 2 bar i potom miješa s parom koja je ekspandirala u turbini. Mješavina tlaka 2 bar odvodi se u grijalicu u kojoj potpuno kondenzira i nastali se kondenzat pumpom tlači na kotlovski tlak te se vraća u kotao.

Ako je tražena snaga turbine 1000 kW, a potreban toplinski tok u grijalici 6000 kW, koliko kg/h pare treba proizvoditi kotao? Kakvo je stanje mješavine ispred grijalice ( $\mathcal{Q}$ ,  $h$ ,  $s$ )? Koliko snage troši pumpa za stlačivanje kondenzata na kotlovski tlak?

Skica procesa u  $T,s$ - i  $h,s$ -dijagramu!

**2. ZADATAK**

U dugačku čeličnu cijev promjera 56/64 mm, ulazi 500 kg/h pregrijane vodene pare tlaka 20 bar i temperature 240 °C. Cijev je okružena zrakom i velikim plohama jednake temperature 10 °C. Ukupni koeficijent prijelaza topline s cijevi na zrak iznosi  $\alpha_{uk,v} = 30 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ .

Ako kondenzacije pare u cijevi nema, para struji kao običan plin, s koeficijentom prijelaza topline  $\alpha_{k,u} = 280 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ . Ako para u cijevi kondenzira, za koeficijent prijelaza topline unutar cijevi uzeti vrijednost  $\alpha_{k,u} = 10000 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ !

Izračunajte izmjenjivani toplinski tok i provjerite hoće li doći do kondenzacije pare na unutarnjoj površini cijevi!

- Ako kondenzacije nema, izračunajte koliko je sniženje temperature pare po metru cijevi!
- Ako kondenzacije ima, izračunajte koliko kondenzata nastaje po metru duljine cijevi zbog odvođenja toplinskog toka i kolika je temperatura vanjske površine cijevi!

Raspored temperatura po polumjeru skicirajte u  $\mathcal{Q},r$ -dijagramu!

**3. ZADATAK**

Zid ložišta nekog kotla izveden je od šamota debljine 15 cm [ $\lambda_s = 0,35 \text{ W}/(\text{m K})$ ], tankog razdjelnog lima, izolacije od mineralne vune debljine 10 cm [ $\lambda_i = 0,06 \text{ W}/(\text{m K})$ ] te još jednog tankog lima (oplate) čija je „vanjska“ površina, premazana bojom ( $\varepsilon = 0,9$ ), u dodiru sa zrakom temperature 30 °C i izložena „velikim“ plohama temperature 20 °C. Unutar ložišta su dimni plinovi temperature 1300 °C. Ukupni koeficijent prijelaza topline između dimnih plinova i površine šamota iznosi 80  $\text{W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ .

Izračunajte koeficijent konvektivnog prijelaza topline na „vanjskoj“ površini lima uz pretpostavku da zrak miruje, da je temperatura lima 50 °C i da mu je visina 2 metra! Kolika je stvarna temperatura tog vanjskog lima? Kolika je temperatura razdjelnog lima i „unutarnje“ površine šamota? Koliko toplinskog toka prolazi kroz takvu višeslojnu stijenku, po  $\text{m}^2$  površine?

Raspored temperatura skicirati u  $\mathcal{Q},x$ -dijagramu!

**4. ZADATAK**

Protusmjerni izmjenjivač je napravljen kao snop od 40 paralelno spojenih čeličnih cijevi promjera 25/30 mm, tako da hladnija voda struji kroz cijevi, a toplija duž cijevi s njihove vanjske strane. Koeficijent prijelaza topline na strani toplije vode je  $\alpha_v = 1200 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ , a na strani hladnije vode  $\alpha_u = 900 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ . U njemu se zagrijava 2,1 kg/s hladnije vode, ulazne temperature 20 °C, s pomoću 1,3 kg/s toplije vode ulazne temperature 120 °C.

- a) Treba izračunati potrebnu duljinu cijevnog snopa tako da razlika temperature dviju struja nigdje ne bude manja od 30 °C! Koliki je izmjenjivani toplinski tok u takvom izmjenjivaču?
- b) Kolika je derivacija temperature toplije i hladnije vode po duljini cijevi na onom mjestu izmjenjivača na kojem hladnija voda postiže temperaturu 40 °C?

Raspored temperatura duž površine izmjenjivača skicirati u  $\mathcal{Q},A$ -dijagramu!

**1. ZADATAK**

Parni kotao proizvodi 5 kg/s vodene pare tlaka 20 bar i temperature 350 °C koja se kroz izoliranu cijev dovodi do turbine. Cijev je premalog presjeka i velike duljine, pa se zbog trenja tlak do izlaza iz cijevi smanji za 2 bar. U turbini para adijabatski s trenjem ekspanzira do okolišnog tlaka 1 bar. Izentropski stupanj djelovanja turbine je 0,85.

Koliko snage daje turbina i kakvo je stanje pare ( $x$ ,  $h$ ,  $s$ ) na kraju ekspanzije?

Skica procesa u  $p,v$ -,  $T,s$ - i  $h,s$ -dijagramu!

**2. ZADATAK**

Dugačka čelična cijev, promjera 20/24 mm, obložena je izolacijom čija je toplinska provodnost  $\lambda_i = 0,1 \text{ W/(m K)}$  i koja je s vanjske strane omotana tankom folijom. Kroz cijev struji 750 kg/h kapljevito freona R-134a temperature  $-10 \text{ °C}$ . Oko vanjske površine izolacije je zrak tlaka 1 bar i temperature  $30 \text{ °C}$ . Ukupni koeficijent prijelaza topline na vanjskoj površini izolacije (folije) iznosi  $\alpha_{uk,v} = 15 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$ .

Izračunajte koeficijent prijelaza topline s unutarnje površine cijevi na freon! Izračunajte kolika smije biti najmanja debljina izolacije da temperatura površine folije kojom je omotana izolacija ne bude niža od  $20 \text{ °C}$ ! Kolika je derivacija temperature po radijusu na sredini debljine izolacije?

Raspored temperatura po radijusu nacrtajte u  $\mathcal{Q},r$ -dijagramu!

**3. ZADATAK**

U dugački čelični parovod promjera 106/114 mm, ulazi suhozasićena vodena para tlaka 10 bar, masenog protoka 2500 kg/h. Cijev je izvana obložena izolacijom ( $\lambda_i = 0,07 \text{ W/(m K)}$ ) debljine 30 mm i tankim aluminijskim limom ( $\varepsilon = 0,25$ ), a okružena je zrakom temperature  $20 \text{ °C}$  i velikim ploham temperature  $10 \text{ °C}$ . Koeficijent konvektivnog prijelaza topline s lima na zrak iznosi  $20 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$ .

Zanemarujući toplinske otpore konvekcije na unutarnjoj površini cijevi i provođenja kroz stijenku cijevi, izračunajte temperaturu vanjske površine izolacije te toplinski tok koji se izmjenjuje po metru duljine cijevi! Izračunajte temperaturu na sredini debljine izolacije te koliko (kg/h) pare kondenzira na unutarnjoj površini cijevi po metru njene duljine!

**4. ZADATAK**

Protusmjerni izmjenjivač je napravljen kao snop od 40 paralelno spojenih čeličnih cijevi promjera 25/30 mm, tako da hladnija voda struji kroz cijevi, a toplija duž cijevi s njihove vanjske strane. Koeficijent prijelaza topline na strani toplije vode je  $\alpha_v = 1200 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$ , a na strani hladnije vode  $\alpha_n = 900 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$ . U njemu se zagrijava 1,1 kg/s hladnije vode, ulazne temperature  $20 \text{ °C}$ , s pomoću 2,3 kg/s toplije vode ulazne temperature  $120 \text{ °C}$ .

- Treba izračunati potrebnu duljinu cijevnog snopa tako da razlika temperature dviju struja nigdje ne bude manja od  $30 \text{ °C}$ ! Koliki je izmjenjivani toplinski tok u takvom izmjenjivaču?
- Kolika je površina (mjerena od ulaza toplije struje) na kojoj toplija struja predaje prvu polovinu ukupnog toplinskog toka?

Raspored temperatura duž površine izmjenjivača skicirati u  $\mathcal{Q},A$ -dijagramu!

**1. ZADATAK**

U bazenu se voda temperature  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  zagrijava s pomoću dugačke vodoravne cijevi promjera  $68/76\text{ mm}$ . Unutar cijevi kondenzira vodena para, tako da je temperatura *vanjske* površine cijevi  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

- Izračunajte koeficijent konvektivnog prijelaza topline na vanjskoj površini cijevi ako voda nastrojava okomito na cijev brzinom  $0,5\text{ m/s}$ , i toplinski tok koji cijev predaje vodi!
- Ako se taj toplinski tok oslobađa potpunom kondenzacijom suhozasićene vodene pare tlaka  $1,8\text{ bar}$  unutar cijevi, koliko (kg/h) kondenzata nastaje?
- Kolika je temperatura unutarnje površine cijevi, ako je cijev čelična,  $\lambda_c = 50\text{ W/(m K)}$ ?
- Ako se nastali kondenzat prigušivanjem ispusti u okoliš tlaka  $1\text{ bar}$ , koliko će litara na sat vode ostajati u kapljevitom stanju?

**2. ZADATAK**

Dvije usporedne stijenke imaju stalne temperature  $\vartheta_1 = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$  i  $\vartheta_2 = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Toplija ploča ima emisijski faktor  $\varepsilon_1 = 0,8$ , a hladnija ploča ima crnu površinu. Između tih je ploča tanak zastor, čija je jedna površina idealno zrcalo, a druga površina ima emisijski faktor  $0,8$ . Kroz oba međuprostora struji zrak temperature  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , a koeficijent konvektivnog prijelaza topline jednak je na svim površinama i iznosi  $15\text{ W/(m}^2\text{ K)}$ .

Kolika je temperatura zastora? Koliko toplinskog toka treba izvana dovesti tim dvjema pločama (ili odvesti od njih?) i koliko toplinskog toka odnosi zrak iz tog sustava (sve po  $\text{m}^2$ ) u slučaju da je zrcalna površina okrenuta toplijoj ploči?

**3. ZADATAK**

U izmjenjivaču topline, koji je izveden kao snop od  $40$  čeličnih cijevi promjera  $30/36\text{ mm}$  i duljine  $6\text{ m}$ , zagrijava se  $20\,000\text{ kg/h}$  vode (koja struji kroz cijevi) od  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  na  $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Oko cijevi struji u istom smjeru vruća voda ulazne temperature  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Koeficijent prolaza topline sveden na unutarnju površinu cijevi iznosi  $1000\text{ W/(m}^2\text{ K)}$ .

- Izračunajte izmjenjivani toplinski tok, maseni protok i izlaznu temperaturu vruće vode!
- Koliko se toplinskog toka izmijeni na jednoj (tamo gdje ulazi voda), a koliko na drugoj polovini površine izmjenjivača?
- Kolika je derivacija temperature vode po (unutarnjoj) površini na sredini izmjenjivača?

Raspored temperatura jedne i druge struje skicirati u  $\vartheta, A$ -dijagramu!

**4. ZADATAK**

Plin propan ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ) dostrujava u mješalište s temperaturom  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , a zrak s temperaturom  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Gorivo i zrak se pomiješaju u izoliranom mješalištu i tako pomiješani ulaze u ložište. Izgaranje u ložištu je potpuno s faktorom pretička zraka  $\lambda = 1,1$ , a cijeli proces teče na okolišnom tlaku  $1\text{ bar}$ .

- Ako u mješalište ulazi  $5\text{ m}^3/\text{h}$  goriva i odgovarajući protok zraka, izračunajte temperaturu gorive smjese nakon miješanja, a prije ulaska u ložište! Koliko se ukupno (kW) toplinskog toka dobiva pri hlađenju dimnih plinova do  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ?
- Koliko  $\text{m}^3/\text{h}$  zraka treba dovesti u mješalište, koliko kilograma na sat vodene pare nastaje izgaranjem i koliki je njen parcijalni tlak u dimnim plinovima?

Miješanje goriva i zraka računati s molarnim toplinskim kapacitetima pri  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , a izgaranje sa srednjim molarnim toplinskim kapacitetima!

**1. ZADATAK**

U bazenu se mirujuća voda temperature  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  zagrijava s pomoću dugačke vodoravne cijevi promjera  $68/76\text{ mm}$ . Unutar cijevi kondenzira vodena para, tako da je temperatura *vanjske* površine cijevi  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

- Izračunajte koeficijent konvektivnog prijelaza topline na vanjskoj površini cijevi i toplinski tok koji ona predaje vodi!
- Kolika je temperatura unutarnje površine cijevi, ako je cijev čelična,  $\lambda_c = 50\text{ W/(m K)}$ ?
- Ako se taj toplinski tok oslobađa potpunom kondenzacijom suhozasićene vodene pare tlaka  $1,4\text{ bar}$  unutar cijevi, koliko (kg/h) kondenzata nastaje?
- Ako se nastali kondenzat prigušivanjem ispusti u okoliš tlaka  $1\text{ bar}$ , koliko će litara na sat vode ostajati u kapljevitom stanju?

**2. ZADATAK**

Dvije usporedne stijenke imaju stalne temperature  $\vartheta_1 = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$  i  $\vartheta_2 = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Toplija ploča ima emisijski faktor  $\varepsilon_1 = 0,8$ , a hladnija ploča ima zrcalnu površinu. Između tih je ploča tanak zastor, čije obje površine imaju emisijski faktor  $0,8$ . Kroz oba međuprostora struji zrak temperature  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , a koeficijent konvektivnog prijelaza topline jednak je na svim površinama i iznosi  $15\text{ W/(m}^2\text{ K)}$ .

Kolika je temperatura zastora? Koliko toplinskog toka treba izvana dovesti tim dvjema pločama (ili odvesti od njih?) i koliko toplinskog toka odnosi zrak iz tog sustava (sve po  $\text{m}^2$ )?

**3. ZADATAK**

U izmjenjivaču topline, koji je izveden kao snop od  $40$  čeličnih cijevi promjera  $30/36\text{ mm}$ , zagrijava se  $20\,000\text{ kg/h}$  vode (koja struji kroz cijevi) od  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  na  $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Oko cijevi struji u istom smjeru vruća voda temperature  $130\text{ }^{\circ}\text{C}$  koja se hladi na  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Koeficijent prolaza topline sveden na vanjsku površinu cijevi iznosi  $1000\text{ W/(m}^2\text{ K)}$ .

- Izračunajte izmjenjivani toplinski tok, duljinu cijevnog snopa i maseni protok vruće vode!
- Kolika je površina (mjerena od ulaznog kraja) potrebna da se izmijeni polovina toplinskog toka? Kolika je derivacija temperature hladnije vode po (vanjskoj) površini na tom mjestu?

Raspored temperatura jedne i druge struje skicirati u  $\vartheta, A$ -dijagramu!

**4. ZADATAK**

Plin propan ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ) dostrujava u mješalište s temperaturom  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , a zrak s temperaturom  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Gorivo i zrak se pomiješaju u izoliranom mješalištu i tako pomiješani ulaze u ložište. Izgaranje u ložištu je potpuno, a cijeli proces teče na okolišnom tlaku  $1\text{ bar}$ .

- Ako u mješalište ulazi  $6\text{ m}^3/\text{h}$  goriva i  $200\text{ m}^3/\text{h}$  zraka, izračunajte temperaturu gorive smjese nakon miješanja, a prije ulaska u ložište! Koliko se ukupno (kW) toplinskog toka dobiva pri hlađenju dimnih plinova do  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ?
- Koliko kilograma na sat vodene pare nastaje izgaranjem i koliki je njen parcijalni tlak u dimnim plinovima?

Miješanje goriva i zraka računati s molarnim toplinskim kapacitetima pri  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , a izgaranje sa srednjim molarnim toplinskim kapacitetima!

1. Pregrijana vodena para tlaka 100 bar i temperature 360 °C izentropski ekspandira u visokotlačnom dijelu turbine do tlaka 18 bar. Količinski protok pare je 1000 kmol/h.

Koliko se snage dobije ekspanzijom? Koliki je u konačnom stanju maseni, a koliki volumenski udio kapljica kapljevine u struji mokre pare? Iz  $h,s$ -dijagrama očitajte kod kojeg tlaka i koje temperature stanje pare pri ekspanziji prelazi iz pregrijanog u mokro područje!

Skica procesa u  $p,v$ - i  $T,s$ -dijagramu!

2. Dugačka čelična cijev promjera 80/88 mm izolirana je s vanjske strane s dva sloja izolacije. Unutarnji sloj, debljine 30 mm ima toplinsku provodnost  $\lambda_U = 0,15 \text{ W/(m K)}$ , a vanjski sloj, također debljine 30 mm, toplinsku provodnost  $\lambda_V = 0,05 \text{ W/(m K)}$ . Kroz cijev struji voda temperature 90 °C brzinom 0,2 m/s. Oko izolacije se nalazi zrak temperature 20 °C. Ukupni koeficijent prijelaza topline s vanjske površine izolacije na zrak iznosi  $15 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$ .

Izračunajte toplinski tok koji voda predaje okolišu, promjenu temperature vode po metru duljine cijevi i temperaturu na sredini vanjskog sloja izolacije!

Raspored temperatura skicirati kao funkciju polumjera  $r$  !

3. U izmjenjivaču topline, koji je izveden kao snop od 60 čeličnih cijevi promjera 30/36 mm, oko cijevi isparava vrela voda tlaka 1,2 bar. Potreban toplinski tok daje 20 000 kg/h vode tlaka 5 bar koja struji kroz cijevi i koja se hladi od 150 °C na 110 °C. Koeficijent prijelaza topline na unutarnjoj površini cijevi iznosi  $1600 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$ , a na vanjskoj površini  $8000 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$ .

a) Izračunajte duljinu cijevnoga snopa, izmjenjivani toplinski tok i maseni protok nastale suhozasićene pare!

b) Kolika je temperatura vanjske površine cijevi na sredini duljine cijevnoga snopa?

Raspored temperatura jedne i druge struje skicirati u  $Q,A$ -dijagramu!

4. Zemni plin, molnog sastava: 87 % metana, 8 % etana i 5 % propana, potpuno izgara u ložištu. Količinski protok goriva (ulazne temperature 0 °C) je 2 kmol/h, a volumenski protok zraka (temperature 150 °C) na ulazu u ložište je  $820 \text{ m}^3/\text{h}$ . Izgaranje teče pri stalnom tlaku 1,02 bar.

a) Izračunajte faktor pretička zraka pri izgaranju, molni sastav vlažnih dimnih plinova i specifičnu donju ogrjevnu vrijednost goriva!

b) Koliki su volumenski protoci ( $\text{m}^3/\text{h}$ ) goriva na ulazu u ložište i dimnih plinova na temperaturi 200 °C?

1. Mokra vodena para tlaka 20 bar i početnog ukupnog volumena  $0,1 \text{ m}^3$ , u kojoj vrela voda ima početni volumen  $0,3 \text{ L}$ , prvo se izobarno zagrijava u cilindru do temperature  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ , a zatim izentropski expandira do tlaka 1 bar.

Kolika je ukupna masa mokre pare i njen konačni volumen? Koliko ukupno rada obavi para svojim širenjem i koliko topline ona primi u cijelom procesu?

Skica procesa u  $p, v$ - i  $T, s$ -dijagramu!

2. Dvije usporedne stijenke imaju stalne temperature  $\vartheta_1 = 200 \text{ }^\circ\text{C}$  i  $\vartheta_2 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ . Toplija (lijeva) ploča ima emisijski faktor  $\varepsilon_1 = 0,8$ , a hladnija (desna) ploča ima zrcalnu površinu. Između tih je ploča tanak zastor, čije obje površine imaju emisijski faktor 0,8. Između toplije stijenke i zastora struji zrak temperature  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , a između zastora i hladnije stijenke struji zrak temperature  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ . Koeficijent konvektivnog prijelaza topline na svim površinama s kojima je zrak u dodiru iznosi  $12 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ .

Kolika je temperatura zastora? Koliko toplinskog toka treba izvana dovesti toplijoj ploči i koliko toplinskog toka odnosi zrak iz tog sustava (sve po  $\text{m}^2$ )? Treba li hladniju stijenku s desne strane hladiti ili grijati i kolikim toplinskim tokom?

3. U velikoj prostoriji nalazi se čelična cijev promjera 54/60 mm, izolirana 20 mm debelim slojem mineralne vune. Izolacija je izvana omotana tankom tkaninom natopljenom gipsom (vanjski sloj ima svojstva gipsa). Kroz cijev struji voda temperature  $110 \text{ }^\circ\text{C}$ . Cijev je okružena mirujućim zrakom temperature  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  i velikim zidovima temperature  $17 \text{ }^\circ\text{C}$ . Koeficijent prijelaza topline s vode na unutarnju površinu cijevi iznosi  $\alpha_{k,u} = 2400 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ .

Kolika treba biti toplinska provodnost sloja izolacije da bi temperatura vanjske površine bila  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ ? Izračunajte ukupni toplinski tok koji se izmjenjuje po metru duljine cijevi! Kolika je temperatura na polumjeru  $r_x = 40 \text{ mm}$  i kolika je na tom polumjeru derivacija  $d\vartheta/dr$ ?

4. Plin propan ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ) volumenskog protoka  $4 \text{ m}^3/\text{h}$  ulazi u ložište s temperaturom  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ , a zrak s temperaturom  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ . Izgaranje je potpuno, a cijeli proces teče na tlaku 1 bar.

Ako ventilator dobavlja u ložište  $200 \text{ m}^3/\text{h}$  zraka, izračunajte temperaturu u ložištu kroz čije se stijenke odvodi  $15 \text{ kW}$  toplinskog toka (pretpostaviti  $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ )! Koliko se još (kW) toplinskog toka dobiva nakon izlaska iz ložišta pri hlađenju dimnih plinova do  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ ? Koliki bi udio ugljikovog dioksida bio izmjeren s pomoću Orsatovog aparata?

Računati sa srednjim molarnim toplinskim kapacitetima!

1. Pregrijana vodena para tlaka 20 bar i temperature  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ , početnog volumena  $0,1 \text{ m}^3$ , prvo se izobarno hladi u cilindru do volumena  $0,075 \text{ m}^3$ , a zatim izentropski expandira do tlaka 1 bar.

Kolika je ukupna masa pare i njen konačni volumen? Koliko rada primi para pri hlađenju i koliko topline ona pritom predaje? Koliko rada obavi para pri naknadnom širenju?

Skica procesa u  $p, v$ - i  $T, s$ -dijagramu!

2. Dvije usporedne stijenke imaju stalne i jednake temperature  $\vartheta_2 = \vartheta_1 = 200 \text{ }^\circ\text{C}$ . Lijeva ploča ima zrcalnu površinu, a desna ploča ima emisijski faktor  $\varepsilon_2 = 0,7$ . Između tih je ploča tanak zastor, čije obje površine imaju emisijski faktor 0,8. Između lijeve stijenke i zastora struji zrak temperature  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , a između zastora i desne stijenke struji zrak temperature  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ . Koeficijent konvektivnog prijelaza topline na svim površinama s kojima je zrak u dodiru iznosi  $20 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ .

Kolika je temperatura zastora? Koliko toplinskog toka treba izvana dovesti lijevoj i desnoj ploči i koliko toplinskog toka odnosi zrak iz tog sustava (sve po  $\text{m}^2$ )?

3. U velikoj prostoriji nalazi se čelična cijev promjera 54/60 mm, izolirana 20 mm debelim slojem mineralne vune toplinske provodnosti  $0,05 \text{ W}/(\text{mK})$ . Izolacija je izvana omotana tankom tkaninom natopljenom gipsom (vanjski sloj ima svojstva gipsa). Kroz cijev struji voda nepoznate temperature. Cijev je okružena mirujućim zrakom temperature  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  i velikim zidovima temperature  $17 \text{ }^\circ\text{C}$ . Koeficijent prijelaza topline s vode na unutarnju površinu cijevi iznosi  $\alpha_{k,u} = 2400 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ .

Kolika treba biti temperatura vode u cijevi da bi temperatura vanjske površine bila  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ ? Izračunajte ukupni toplinski tok koji se izmjenjuje po metru duljine cijevi! Kolika je temperatura na polumjeru  $r_x = 40 \text{ mm}$  i kolika je na tom polumjeru derivacija  $d\vartheta/dr$ ?

4. Plin propan ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ) volumenskog protoka  $4 \text{ m}^3/\text{h}$  ulazi u ložište s temperaturom  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ , a zrak s temperaturom  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ . Izgaranje je potpuno, a cijeli proces teče na tlaku 1 bar.

Koliko  $\text{m}^3/\text{h}$  zraka treba dobavljati ventilator u ložište, da bi faktor pretička zraka bio 1,2 i koliko toplinskog toka treba odvesti kroz stijenke ložišta da bi temperatura u ložištu bila  $1600 \text{ }^\circ\text{C}$ ? Koliko se još (kW) toplinskog toka dobiva nakon izlaska iz ložišta pri hlađenju dimnih plinova do  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ ?

Računati sa srednjim molarnim toplinskim kapacitetima!

1. Mokra vodena para temperature  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  i početnog ukupnog volumena  $0,1\text{ m}^3$ , u kojoj vreća voda ima početni volumen  $0,3\text{ L}$ , prvo izotermno ekspandira u cilindru do tlaka  $3\text{ bar}$ , a zatim izentropski do tlaka  $1\text{ bar}$ .

Kolika je ukupna masa mokre pare i njen konačni volumen? Koliko ukupno rada obavi para svojim širenjem i koliko topline ona primi u cijelom procesu?

Skica procesa u  $p,v$ - i  $T,s$ -dijagramu!

2. Dvije usporedne stijenke imaju stalne temperature  $\vartheta_1 = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$  i  $\vartheta_2$  nepoznatog iznosa. Toplija (lijeva) ploča ima emisijski faktor  $\varepsilon_1 = 0,8$ , a hladnija (desna) ploča ima zrcalnu površinu. Između tih je ploča tanak zastor, čije obje površine imaju emisijski faktor  $0,8$ . Kroz (lijevi) međuprostor između toplije stijenke i zastora struji zrak temperature  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , a između zastora i desne stijenke je vakuum. Koeficijent konvektivnog prijelaza topline na površinama s kojima je zrak u dodiru iznosi  $15\text{ W}/(\text{m}^2\text{ K})$ . Hladnija (desna) ploča je sa svoje desne strane toplinski izolirana.

Kolika je temperatura zastora? Koliko toplinskog toka treba izvana dovesti toplijoj ploči i koliko toplinskog toka odnosi zrak iz tog sustava (sve po  $\text{m}^2$ )?

3. U izmjenjivaču topline, koji je izveden kao snop od 20 čeličnih cijevi promjera  $30/36\text{ mm}$ , zagrijava se  $20\text{ 000 kg/h}$  vode (koja struji kroz cijevi) od  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  na  $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Oko cijevi potpuno kondenzira pregrijana vodena para tlaka  $2\text{ bar}$  i ulazne temperature  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Koeficijent prolaza topline sveden na unutarnju površinu cijevi iznosi  $1500\text{ W}/(\text{m}^2\text{ K})$ .

- Izračunajte duljinu cijevnoga snopa, izmjenjivani toplinski tok i potrošak pare!
- Koliko se toplinskog toka izmijeni na jednoj (tamo gdje ulazi voda), a koliko na drugoj polovini površine izmjenjivača?
- Kolika je derivacija temperature vode po površini na sredini površine izmjenjivača?

Raspored temperatura jedne i druge struje skicirati u  $\vartheta,A$ -dijagramu!

4. U ložištu kotla potpuno izgara  $150\text{ kg/h}$  ugljena masenog sastava:  $c = 0,68$ ;  $h = 0,06$ ;  $o = 0,01$ ;  $w = 0,08$  i  $a = 0,17$ . Gorivo ulazi u ložište s  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , zrak za izgaranje sa  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , a dimni plinovi se po izlasku iz ložišta hlade u izmjenjivačima topline i potom izbacuju s temperaturom  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  kroz dimnjak u okoliš. Volumenski protok zraka je  $2000\text{ m}^3/\text{h}$ , a tlak je  $1\text{ bar}$ !

Izračunajte faktor pretička zraka i temperaturu koju postižu dimni plinovi u ložištu, ako se ono hladi s  $1700\text{ kg/h}$  vode koja se zagrije za  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  (pretpostaviti  $1750\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Koliko toplinskog toka predaju dimni plinovi nakon izlaska iz ložišta, a prije izbacivanja u dimnjak?

Računati sa srednjim molarnim toplinskim kapacitetima!

### 3. ponovljeni kolokvij iz Uvoda u termodinamiku 7. veljače 2012.

#### 1. ZADATAK

U čelični parovod promjera 106/114 mm i duljine 25 metara, ulazi pregrijana vodena para tlaka 10 bar i temperature 300 °C, protočne mase 2500 kg/h. Cijev je izvana obložena izolacijom debljine 60 mm ( $\lambda_i = 0,07 \text{ W/(m K)}$ ) i tankim aluminijskim limom ( $\varepsilon = 0,25$ ), a okružena je zrakom i velikim plohamo jednake temperature 10 °C. Koeficijent konvektivnog prijelaza topline s lima na zrak iznosi  $20 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$ .

Izračunajte temperaturu vanjske površine izolacije te toplinski tok koji se izmjenjuje na cijeloj duljini cijevi! Koliki je toplinski otpor same izolacije? Za koliko se smanji temperatura pare prolaskom kroz cijev?

#### 2. ZADATAK

U izmjenjivaču topline pregrijava se 10 000 kg/h suhozasićene vodene pare tlaka 10 bar na temperaturu 300 °C. Potreban toplinski tok daju dimni plinovi molarnog toplinskog kapaciteta  $33,2 \text{ kJ/(kmol K)}$ , koji se hlade od 1050 °C na 600 °C. Izmjenjivač je izveden kao snop od 60 paralelno spojenih čeličnih cijevi promjera 32/38 mm, kroz koje struji vodena para, a okomito na cijevi, s vanjske strane, struje dimni plinovi. Koeficijent prijelaza topline na strani pare iznosi  $180 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$ , a na strani dimnih plinova  $80 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$ .

Treba izračunati potrebnu duljinu cijevnog snopa i potreban količinski protok dimnih plinova! Kolika je srednja gustoća toplinskog toka koja se izmjenjuje u tom izmjenjivaču, svedena na njegovu vanjsku površinu?

#### 3. ZADATAK

Plinska smjesa molnog sastava 25 % CO, 12 % H<sub>2</sub>, 5 % CH<sub>4</sub> i 58 % N<sub>2</sub> potpuno izgara s 15 % suviška zraka. I gorivo i zrak za izgaranje pomiješani ulaze u ložište s temperaturom 200 °C. Volumenski protok *gorive smjese* (goriva i zraka) pri tlaku 1 bar i temperaturi 200 °C je  $2500 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Koliko *kilograma* vodene pare nastaje po *sat*? Izračunajte teorijsku temperaturu izgaranja (pretpostaviti 1800 °C – bez iteracije)!

Računati sa srednjim molarnim toplinskim kapacitetima!

**1. ZADATAK**

U cilindru se nalazi pregrijana vodena para tlaka 100 bar i temperature 360 °C, početnog volumena 0,01 m<sup>3</sup>. Para izentropski ekspandira do tlaka 18 bar, a potom se izotermno hladi, tako da na kraju opet ima volumen 0,01 m<sup>3</sup>.

Koliki je najveći volumen sadržaja cilindra i koliko se rada dobije ekspanzijom? Koliko se topline odvodi prilikom hlađenja i koliko se pritom rada troši?

Skica procesa u  $p,v$ - i  $T,s$ -dijagramu!

**2. ZADATAK**

Parni kotao proizvodi 2,8 kg/s vodene pare stanja 16 bar i 400 °C. Para u turbini ekspandira u dva stupnja. Nakon prvog stupnja, 43 % protoka pare odvodi se u grijalicu u kojoj potpuno kondenzira pri temperaturi 150 °C, zagrijavajući toplinskim tokom vodu od 60 °C na 90 °C. Kondenzat iz grijalice ne vraća se u kotao, nego se ispušta u okoliš, a umjesto njega u kotao se dodaje isti maseni protok svježije vode temperature 15 °C iz okoliša. Ostatak pare ekspandira u drugom stupnju turbine i zatim se odvodi u kondenzator u kojem je temperatura 30 °C. Taj se kondenzat iz kondenzatora vraća u kotao.

Izračunajte snagu turbine i toplinski tok dovođen u kotlu i odvođen u kondenzatoru! Koliko svježije vode treba dodavati u procesu? Koliko toplinskog toka para predaje u grijalici i koliko se kg/h vode njime zagrijava?

Proces skicirati u  $T,s$ - i  $h,s$ -dijagramu!

**3. ZADATAK**

U čelični parovod promjera 106/114 mm i duljine 25 metara, ulazi pregrijana vodena para tlaka 10 bar i temperature 300 °C, protočne mase 2500 kg/h. Cijev je izvana obložena izolacijom debljine 60 mm ( $\lambda_i = 0,07$  W/(m K)) i okružena je zrakom temperature 20 °C. Ukupni koeficijent prijelaza topline na dodiru izolacije sa zrakom iznosi 30 W/(m<sup>2</sup> K).

Izračunajte toplinski tok koji se izmjenjuje na cijeloj duljini cijevi, te temperaturu vanjske površine izolacije! Koliki je toplinski otpor same izolacije? Za koliko se smanji temperatura pare prolaskom kroz cijev?

**1. ZADATAK**

Voda temperature 120 °C struji brzinom 0,4 m/s kroz dugačku čeličnu cijev promjera 80/90 mm. Cijev je izvana izolirana 20 mm debelim slojem staklene vune [ $\lambda = 0,043$  W/(m K)], koja je izvana obložena tankim aluminijskim limom ( $\varepsilon = 0,25$ ). Lim je okružen mirujućim zrakom temperature 0 °C i velikim ploham temperature -10 °C.

(Poznate su vrijednosti koeficijenta prijelaza topline u cijevi [ $\alpha_u = 2850$  W/(m<sup>2</sup> K)] i na vanjskoj površini lima [ $\alpha_{v,konv.} = 4$  W/(m<sup>2</sup> K)])

Treba izračunati stvarnu temperaturu aluminijskog lima i promjenu temperature vode po metru duljine cijevi! Kolika je temperatura u sredini debljine izolacije?

**2. ZADATAK**

U izmjenjivaču topline, koji je izveden kao snop od 60 čeličnih cijevi promjera 30/36 mm, oko cijevi isparava vrela voda tlaka 1,2 bar. Potreban toplinski tok daje 20 000 kg/h vode tlaka 5 bar koja struji kroz cijevi i koja se hladi od 150 °C na 110 °C. Koeficijent prolaza topline sveden na unutarnju površinu cijevi iznosi 1500 W/(m<sup>2</sup> K).

- Izračunajte duljinu cijevnoga snopa, izmjenjivani toplinski tok te maseni (kg/h) i volumenski (m<sup>3</sup>/h) protok nastale suhozasićene pare!
- Koliko se toplinskog toka izmjenjuje na jednoj (tamo gdje ulazi voda), a koliko na drugoj polovini površine izmjenjivača?

Raspored temperatura jedne i druge struje skicirati u  $\mathcal{A}$ -dijagramu!

**3. ZADATAK**

U ložištu kotla potpuno izgara 150 kg/h ugljena masenog sastava:  $c = 0,63$ ;  $h = 0,04$ ;  $o = 0,02$ ;  $w = 0,11$  i  $a = 0,20$ . Gorivo i zrak za izgaranje ulaze u ložište s 0 °C, a dimni plinovi se po izlasku iz ložišta hlade i potom izbacuju s temperaturom 200 °C kroz dimnjak u okoliš. Volumenski protok zraka je 1300 m<sup>3</sup>/h, a tlak u cijelom procesu je 1 bar!

Izračunajte faktor pretička zraka i temperaturu koju postižu dimni plinovi u ložištu, ako je ono toplinski izolirano (pretpostaviti 1750 °C - bez iteracije!), te koliko ukupno toplinskog toka predaju dimni plinovi prije izbacivanja u dimnjak! Koliki je parcijalni tlak vodene pare u dimnim plinovima?

Računati sa srednjim molarnim toplinskim kapacitetima!



### 1. ZADATAK

U čvrstoj posudi volumena 100 L nalazi se mokra vodena para temperature 20 °C, koja sadrži jednu litru vrele kapljevine.

Odredite konačno stanje u posudi ako se sadržaj posude zagrije do temperature 400 °C! Izračunajte toplinu dovedenu sadržaju posude i srednju temperaturu dovođenja topline! Kod kojeg će tlaka nestati posljednje kapljice kapljevine?

Skica obaju procesa u istom  $p,v$ - i  $T,s$ -dijagramu!

### 2. ZADATAK

Parni kotao proizvodi vodenu paru stanja 70 bar i 450 °C. U prvom stupnju turbine para ekspandira do 20 bar. Pri tom tlaku dio pare se odvaja za regenerativno predgrijavanje kondenzata, a ostatak se vodi u drugi stupanj turbine u kojem nastavlja ekspanziju sve do kondenzatorskog tlaka 0,07 bar, pri kojem potpuno kondenzira. Kondenzat koji nastaje u kondenzatoru tlači se pumpom na 20 bar i miješa s parom oduzetom iz turbine u takvom omjeru da nastaje vrela voda tlaka 20 bar. Drugom pumpom dobivena se vrela kapljevina tlači na kotlovski tlak 70 bar i utiskuje u kotao.

Koliki je termički stupanj djelovanja opisanog procesa? Koliki je maseni protok pare koju proizvodi kotao, ako dimni plinovi (koji daju ukupan toplinski tok potreban za proces svojim hlađenjem od 1600 °C do 150 °C) imaju toplinski kapacitet 20 kW/K? Kolika je snaga turbine i toplinski tok dovođen u kotlu, te koliko rashladne vode treba dovoditi za hlađenje kondenzatora, ako se ona pritom smije zagrijati za 10 °C?

Skica procesa u  $T,s$ - i  $h,s$ -dijagramu!

### 3. ZADATAK

Prozorsko staklo debljine 5 mm, širine 2 m i visine 1 m, dijeli zrak u prostoriji, temperature 23 °C, od vanjskog zraka temperature -7 °C. Ukupni koeficijent prijelaza topline na unutarnjoj površini stakla može se uzeti 5 W/(m<sup>2</sup> K), a toplinska provodnost stakla je 0,7 W/(m K).

- Izračunajte toplinski tok koji prolazi kroz staklo, te temperaturu unutarnje i vanjske površine stakla, ako vani puše vjetar brzinom 7 m/s! (Koeficijent konvektivnog prijelaza topline na vanjskoj površini stakla izračunati sa svojstvima zraka pri -4 °C, a zračenje zanemariti!)
- Ako sve zadane vrijednosti kao i izračunati koeficijent konvektivnog prijelaza topline na vanjskoj površini stakla ostanu isti, a prozor se napravi od dvaju jednakih stakala između kojih je sloj potpuno nepomičnog zraka debljine 10 mm (toplinsku provodnost zraka uzeti za 0 °C, a zračenje između dvaju stakala zanemariti), izračunajte toplinski tok koji prolazi kroz takav prozor, te temperaturu svih četiriju površina stakla!

### 1. ZADATAK

U neizoliranoj čvrstoj posudi volumena 100 L nalazi se pregrijana vodena para tlaka 30 bar i temperature 400 °C.

Ako posuda dulje vrijeme stoji u okolišu temperature 20 °C, odredite konačno stanje u posudi, izračunajte toplinu odvedenu od sadržaja posude i srednju temperaturu odvođenja topline! Kod kojeg će se tlaka pri hlađenju početi pojavljivati kapljice? Koliko će *litara* kapljevine biti na kraju?

Skica procesa u  $p,v$ - i  $T,s$ -dijagramu!

### 2. ZADATAK

Parni kotao proizvodi vodenu paru stanja 70 bar i 450 °C. U prvom stupnju turbine para ekspandira do 20 bar. Pri tom tlaku dio pare se odvaja za regenerativno predgrijavanje kondenzata, a ostatak se vodi u drugi stupanj turbine u kojem nastavlja ekspanziju sve do kondenzatorskog tlaka 0,07 bar, pri kojem potpuno kondenzira. Kondenzat koji nastaje u kondenzatoru tlači se pumpom na 20 bar i miješa s parom oduzetom iz turbine u takvom omjeru da nastaje vrela voda tlaka 20 bar. Drugom pumpom dobivena se vrela kapljevina tlači na kotlovski tlak 70 bar i utiskuje u kotao.

Koliki je termički stupanj djelovanja opisanog procesa? Koliki je maseni protok pare koju može proizvoditi kotao, ako raspoložemo s 1,5·10<sup>6</sup> kg/h rashladne vode koja se prilikom prolaska kroz kondenzator smije zagrijati za 10 °C? Kolika je snaga turbine i toplinski tok dovođen u kotlu? Koliki treba biti toplinski kapacitet dimnih plinova, ako oni ukupan toplinski tok potreban za proces daju svojim hlađenjem od 1700 °C do 150 °C?

Skica procesa u  $T,s$ - i  $h,s$ -dijagramu!

### 3. ZADATAK

Prozorsko staklo debljine 4 mm, širine 1,5 m i visine 1 m, dijeli zrak u prostoriji, temperature 23 °C, od vanjskog zraka temperature -7 °C. Ukupni koeficijent prijelaza topline na unutarnjoj površini stakla može se uzeti u iznosu 6 W/(m<sup>2</sup> K), a toplinska provodnost stakla je 0,7 W/(m K).

- Izračunajte toplinski tok koji prolazi kroz staklo, te temperaturu unutarnje i vanjske površine stakla, ako vani puše vjetar brzinom 9 m/s! (Koeficijent konvektivnog prijelaza topline na vanjskoj površini stakla izračunati sa svojstvima zraka pri -4 °C, a zračenje zanemariti!)
- Ako sve zadane vrijednosti kao i izračunati koeficijent konvektivnog prijelaza topline na vanjskoj površini stakla ostanu isti, a prozor se napravi od triju jednakih stakala između kojih su dva sloja potpuno nepomičnog zraka debljine 8 mm svaki (toplinsku provodnost obaju slojeva zraka uzeti za 0 °C, a zračenje između stakala zanemariti), izračunajte toplinski tok koji prolazi kroz takav prozor, te temperaturu unutarnje površine unutarnjeg stakla, vanjske površine vanjskog stakla i temperaturu na sredini srednjeg stakla!