

Esercizi Fisica Tecnica 1

Esercizio 1

10 m³/h di azoto alla pressione di 3 kg/cm² ed alla temperatura di 100°C espandono fino alla pressione di 1 kg/cm²: a) adiabaticamente e reversibilmente; b) adiabaticamente ed irreversibilmente con un variazione di entropia Δs= 0.042 kJ/kg K. Calcolare la potenza meccanica nei casi a) e b). Nel caso b) calcolare il rendimento isoentropico dell'espansore.

Soluzione:

Trasformo i dati in unità di misura del S.I.(Sistema Internazionale)

$$G = 10 \text{ m}^3/\text{h} = 0.0027778 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$p_1 = 3 \text{ kg/cm}^2 = 3 \cdot 9.81 \cdot 10^4 = 2.943 \cdot 10^5 \text{ Pa.}$$

$$T_1 = 100 \text{ }^\circ\text{C} = 373 \text{ K}$$

$$p_2 = 1 \text{ kg/cm}^2 = 9.81 \cdot 10^4 \text{ Pa.}$$

Dalle tabelle ricavo l'entalpia h_1 e l'entropia di riferimento s_{01} nello stato 1 per interpolazione:

$$H_1 = H(300) + (H(400) - H(300)) \frac{T_1 - 300}{400 - 300} = 311.8 + (415.7 - 311.8)0.73 = 387.6 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$
$$s_{01} = s_0(300) + (s_0(400) - s_0(300)) \frac{T_1 - 300}{400 - 300} = 6.854 + (7.154 - 6.854)0.73 = 7.073 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \right]$$

L'entropia allo stato 1 è $s_1 = s_{01} - R_1 \log(p_1/p_0)$ dove:

p_0 è la pressione di riferimento $p_0 = 1 \text{ bar} \approx 1 \text{ kg/cm}^2$. Per l'azoto $R_1 = 8.314/28 = 0.2969 \text{ kJ/kg K}$

$$s_1 = 7.073 - 0.2969 \log(3) = 6.746 \text{ kJ/kg K.}$$

La trasformazione 1→2 è adiabatica reversibile: $\Delta s = 0$, $s_2 = s_1$.

$$p_2 = 1 \text{ kg/cm}^2 \Rightarrow s_{02} \approx s_2$$

Utilizzando il valore di s_{02} dalle tabelle posso ricavare t_2 e H_2 per estrapolazione.

$$T_2 = 260 + (300 - 260) \frac{s_{02} - s_0(260)}{s_0(300) - s_0(260)} = 260 + (300 - 260) \frac{6.746 - 6.704}{6.854 - 6.704} = 271 \text{ K}$$

$$H_2 = H(260) + (H(300) - H(260)) \cdot \frac{T_2 - 260}{300 - 260} = 270.2 + (311.8 - 270.2) \frac{271 - 260}{300 - 260} = 281.64 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right].$$

La portata massica $\dot{m} = \rho G = p_1 G / R_1 T_1 = 2.943 \cdot 10^5 \cdot 0.0027778 / (296.9 \cdot 373) = 0.00738 \text{ kg/s}$

La potenza meccanica scambiata nel caso a) è:

$$P = \dot{m} L = -\dot{m} (H_2 - H_1) = 0.00738(387.6 - 281.64) = 0.782 \text{ kW}$$

Nel caso di irreversibilità b)

$s_2 = s_1 + \Delta s = 6.746 + 0.042 = 6.788 \text{ [kJ/kg K]}$ interpolando come nel caso precedente si ottiene: $T_2 = 282.4 \text{ K}$;

$H_2 = 293.49 \text{ [kJ/kg]}$ da cui $P_{12} = 0.694 \text{ kW}$

Il rendimento isoentropico è $\eta = P_{12}/P = 0.888$

Esercizi Fisica Tecnica 1

Esercizio 2

Una turbina, in cui defluisce una portata di azoto $\dot{m}=3$ [kg/s], fornisce una potenza $P=1000$ [kW]. Le pressioni all'ingresso e all'uscita valgono rispettivamente $p_1=13$ [bar] e $p_2=1$ [bar]. La temperatura all'uscita vale $t_2 = 480$ [K]. La trasformazione è adiabatica e le variazioni di energia cinetica e potenziale sono trascurabili.

Determinare

- la temperatura iniziale T_1 ;
- il lavoro $L_{12'_{rev}}$, che si sarebbe ottenuto in condizioni di reversibilità, a parità di condizioni iniziali e di pressione finale;
- il rapporto A_1/A_2 tra le aree delle sezioni di ingresso e di uscita necessario affinché non vi siano variazioni di energia cinetica.

Soluzione

Dalle tabelle ricavo

$$t_2 = 480 \text{ K} \quad p_2 = 1 \text{ bar} \quad \text{per interpolazione } H_2 = 415.7 + 0.8 \cdot (520.4 - 415.7) = 499.46 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{Il lavoro } L_{12} = P / \dot{m} = 1000 / 3 = 333.33 \text{ kJ/kg.}$$

Il primo principio della termodinamica per i sistemi aperti si scrive:

$dQ - dL = dH + w_{dw} + g dz$ integrando tra i punti 1 e 2 per una trasformazione adiabatica irreversibile senza variazione di velocità tra ingresso e uscita e trascurando la variazione di quota si ottiene:

$$H_1 = L_{12} + H_2 = 499.46 + 333.33 = 832.79 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{per interpolazione } t_1 = 700 + 100(832.79 - 734.3) / (846.4 - 734.3) = 787.9 \text{ K}$$

$$s_{01} = 7.75 + (7.893 - 7.75)(787.9 - 700) / (800 - 700) = 7.876 \text{ kJ/kgK}$$

L'entropia nel punto 1 è $s_1 = s_{01} - R_1 \log(p_1)$.

Per l'azoto il per molecolare $M = 28$ kg/mol per cui $R_1 = R/M = 8.314/28 = 0.2969$ kJ/kgK

si ottiene: $s_1 = s_{01} - R_1 \log(p_1) = 7.1144$ kJ/kg K.

Consideriamo ora l'espansione adiabatica reversibile: $ds = 0$;

$$s_2 = s_1 = 7.1144 \text{ kJ/kgK.} \quad \text{Dalle tabelle ricavo}$$

$$T_2 = 300 + 100(7.1144 - 6.854) / (7.154 - 6.854) = 386.8 \text{ K}$$

$$H_2 = 311.8 + (415.7 - 311.8)(386.8 - 300) / (400 - 300) = 402 \text{ kJ/kg}$$

Il lavoro che si ottiene con una trasformazione reversibile è

$$L_{12'} = H_1 - H_2 = 832.79 - 402 = 430.79 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{La potenza } P = \dot{m} L_{12'} = 1292 \text{ kW.}$$

L'equazione di continuità si scrive come $\dot{m} = \rho w A = \rho_1 w_1 A_1 = \rho_2 w_2 A_2$.

Perché non vi siano variazioni di energia cinetica si deve avere $w_1 = w_2$ da cui:

$$A_1/A_2 = \rho_2/\rho_1 = p_2/(R_1 T_2) / (p_1/(R_1 T_1)) = p_2 T_1 / p_1 T_2$$

$$\text{Nel caso reale } A_1/A_2 = (1 \cdot 787.9) / (13 \cdot 480) = 0.126$$

$$\text{Nel caso reversibile } A_1/A_2 = (1 \cdot 787.9) / (13 \cdot 386.8) = 0.157.$$

Esercizi Fisica Tecnica 1

Esercizio 3

Un fluido incomprimibile (densità costante $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$), alla temperatura di 300 K, scorre a regime permanente in un tubo orizzontale adiabatico di diametro interno $D=35\text{mm}$ alla velocità di 20 m/s. Valutare la produzione entropica totale nell'unità di tempo sapendo che la caduta di pressione provocata dagli attriti lungo il tubo vale 2.5 bar.

Soluzione

Se il liquido scorre in un tubo orizzontale ($z_2 - z_1 = 0$) a sezione costante ($w_2 - w_1 = 0$) adiabatico ($dQ=0$) senza scambi di lavoro con l'esterno ($dL=0$), il primo principio della termodinamica per i sistemi aperti si può scrivere come:

$$dH = 0 \text{ ossia } H_2 - H_1 = 0.$$

Dalla definizione di entropia si ha

$$Tds = dH - vdp = dH - dp/\rho \text{ da cui si ricava:}$$

$$\Delta s = \Delta H/T - \Delta p/\rho T = - (p_2 - p_1) / \rho T = 2.5 \cdot 10^5 \text{ [Pa]} / 1000[\text{kg/m}^3] / 300 \text{ [K]} = 0.8333 \text{ J/kgK}$$

$$\text{La portata massica è } \dot{m} = \rho WA = \rho W \pi D^2 / 4 = 1000 \cdot 20 \cdot 3.14 \cdot 0.035^2 / 4 = 19.24 \text{ kg/s}$$

La produzione entropica totale nell'unità di tempo è

$$\Delta \dot{S} = \dot{m} \Delta s = 0.8333 \cdot 19.24 = 16.0 \text{ W/K.}$$

Esercizio 4

Una portata di 1 kg/s di vapore alla pressione di $p_1=15.55 \text{ bar}$ e alla temperatura $t_1=200 \text{ }^\circ\text{C}$ espande, in una valvola di laminazione fino alla pressione ambiente $p_2=p_a=1.01325 \text{ bar}$.

Sapendo che la temperatura finale è $t_2= 120^\circ\text{C}$, calcolare il titolo del vapore nelle condizioni iniziali. Determinare il rapporto tra le sezioni di passaggio che consenta di ottenere $w_2 = w_1$.

Soluzione:

$$t_1 = 200^\circ \text{ C}$$

$$t_2 = 120^\circ \text{ C}$$

$$p_1 = 15.55 \text{ bar}$$

$$p_2 = 1.01325 \text{ bar}$$

$$x_1 = ? =$$

$$s_2 = ? = 7.467 \text{ kJ/kg K (per interpolazione dalla 3A)}$$

$$s_1 = ? =$$

$$H_2 = ? = 2716.3 \text{ kJ/kg (per interpolazione dalla 3A)}$$

$$H_1 = ? = 2716.3 \text{ kJ/kg}$$

$$v_2 = ? = 1.793 \text{ m}^3/\text{kg (per interpolazione dalla 3A)}$$

$$v_1 = ? =$$

Il punto 1 non è determinato perchè pressione e temperatura non sono indipendenti "sotto la campana".

Ricavo le altre funzioni di stato al punto 2 dalle tabelle del vapore surriscaldato (3A) per interpolazione lineare.

Applichiamo il I° Principio dei sistemi aperti alla valvola di laminazione:

$$Q_{12} - L_{12} = H_2 - H_1 + (w_2^2 - w_1^2) / 2 + g(z_2 - z_1)$$

Esercizi Fisica Tecnica 1

La trasformazione è adiabatica, non ci sono organi in movimento, si suppone che le sezioni 1 e 2 siano alla stessa quota e si impone che $w_1 = w_2$.

$$0 = H_2 - H_1$$

$$H_2 = H_1 = 2716.3 \text{ kJ/kg}$$

Conoscendo t_2 e H_2 , ricavo le altre funzioni di stato del sistema: x_2, v_2, s_2 .

$$x_1 = \frac{H_1 - H_{L_1}}{r} = \frac{2716.3 - 852.4}{1938.6} = 0.961$$

$$v_1 = v_L + x_1(v_v - v_L) = 0.0011565 + 0.961 \cdot (0.1272 - 0.0011565) = 0.122345 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Per l'equazione di continuità si può scrivere:

$$\dot{m} = \text{cost} = \rho_1 w_1 A_1 = \rho_2 w_2 A_2 = \frac{w_1 A_1}{v_1} = \frac{w_2 A_2}{v_2} \Rightarrow \frac{A_1}{A_2} = \frac{v_1}{v_2} \cong 0.07$$

Esercizio 5

Una portata di 1 kg/s di vapore alla pressione di $p_1=60$ bar e alla temperatura $t_1=482$ °C espande, in una turbina fino alla temperatura di $t_2=65$ °C.

Si supponga che il rendimento isoentropico di espansione sia $\rho_e=0.8$.

Supponendo $w_1=20$ m/s e $w_2=90$ m/s, calcolare la potenza prodotta dal sistema.

Soluzione:

$$t_1 = 482^\circ \text{C}$$

$$t_2 = 65^\circ \text{C}$$

$$t_2' = ?$$

$$p_1 = 60 \text{ bar}$$

$$p_2 = ? = 0.25 \text{ bar} \quad (\text{isotermobarica})$$

$$p_2' = ?$$

$$s_1 = ? = 6.8214 \text{ kJ/kg K} \quad (\text{per interpolazione dalla 3B}) \quad s_2 = ? = \text{kJ/kg K}$$

$$s_2' = ?$$

$$H_1 = ? = 3378.6 \text{ kJ/kg} \quad (\text{per interpolazione dalla 3B}) \quad H_2 = ? = \text{kJ/kg}$$

$$H_2' = ?$$

$$w_1 = 20 \text{ m/s}$$

$$w_2 = 90 \text{ m/s}$$

Determiniamo le condizioni al punto 5

$$H_1 = H_{400} + \frac{H_{500} - H_{400}}{500 - 400} (482 - 400) = 3180.1 + 0.82(3422.2 - 3180.1)$$

$$s_1 = s_{400} + \frac{s_{500} - s_{400}}{500 - 400} (482 - 400) = 6.5462 + 0.82(6.8818 - 6.5462)$$

Per determinare le condizioni al punto 2 si considera la trasformazione adiabatico isoentropica ideale:

$$s_1 = s_2$$

$$x_2 = \frac{s_2 - s_{L_2}}{s_v - s_{L_2}} = \frac{s_2 - s_{L_2}}{r/T} = \frac{6.8214 - 0.8933}{6.9388} = 0.854$$

Esercizi Fisica Tecnica 1

$$H_2 = H_L + x_2 r = 272 + 0.854 \cdot 2346.3 = 2276.5 \quad \text{kJ/kg}$$

Per la definizione di rendimento isoentropico si ha:

$$\rho_e = \frac{H_2 - H_1}{H_2 - H_1} \Rightarrow H_2 = H_1 - \rho_e (H_1 - H_2) = 3378.6 - 0.8(3378.6 - 2276.5) = 2497$$

$$x_2 = \frac{H_2 - H_L}{H_v - H_L} = \frac{H_2 - H_L}{r} = \frac{2497 - 272}{2346.3} = 0.948$$

$$v_2 = v_L + x_2 (v_v - v_L) = 0.0010199 + 0.948 \cdot (6.2023 - 0.0010199) = 5.8798 \quad \text{m}^3 / \text{kg}$$

Applichiamo il I° Principio dei sistemi aperti alla turbina:

$$Q_{12} - L_{12} = H_2 - H_1 + (w_2^2 - w_1^2)/2 + g(z_2 - z_1)$$

La trasformazione è adiabatica, si suppone che le sezioni 1 e 2 siano alla stessa quota.

$$L_{12} = H_1 - H_2 - (w_2^2 - w_1^2)/2$$
$$L_{12} = 3378.6 - 2497 - (90^2 - 20^2)/2 = 877.75 \text{ kJ/kg}$$

Esercizio 6

Un serbatoio contiene 0.4 kg di acqua alla temperatura di 250°C, alla pressione 39.776 bar e con un volume specifico di 0.018 m³/kg. L'acqua viene raffreddata a volume costante fino a che la pressione nel serbatoio vale 10 bar (punto 2).

In seguito si fornisce al sistema un calore pari a 65 kJ e il serbatoio si dilata mantenendo, al suo interno, la pressione costante fino ad arrivare al punto 3.

Infine avviene una espansione adiabatica (reversibile) fino alla pressione di 1 bar (punto 4).

Calcolare il calore e il lavoro in ognuna delle trasformazioni.

Calcolare il volume finale del sistema.

Soluzione

Considero il serbatoio come un sistema chiuso. Dapprima definisco i punti estremi delle trasformazioni:

Al punto 1 l'acqua si trova in condizioni di saturazione a $t_1=250^\circ\text{C}$, $p_1=39.776$ bar e $v_1=0.018$ m³/kg. Ricavo il titolo $x_1=(v_1-v_L)/(v_v-v_L)=0.343$ e di conseguenza

$$H_1=1673.9 \text{ kJ/kg e, dalla definizione, } u_1=H_1-p_1 v_1=1673.9 - (39.776 \cdot 10^5 \cdot 0.018) \cdot 10^{-3} =$$

$$u_1=1602.3 \text{ kJ/kg}$$

Al punto 2: $p_2=10$ bar e $v_2=0.018$ m³/kg: l'acqua si trova in condizioni di saturazione a $t_2=179.88$ °C.

Ricavo il titolo $x_2=(v_2-v_L)/(v_v-v_L)=0.087$ e di conseguenza

$$H_2=937.8 \text{ kJ/kg; } u_2=919.8 \text{ kJ/kg}$$

La trasformazione 2-3 avviene a pressione costante posso quindi scrivere:

$$p_3=p_2 \text{ e } Q_{23}=H_3 - H_2. \text{ Sapendo che } Q_{23}=\dot{Q}/m=65/0.4=162.5 \text{ kJ/kg}$$

ricavo $H_3=1100.3$ kJ/kg. Ricavo il titolo $x_3=(H_3-H_L)/(H_v-H_L)=0.168$ e di conseguenza

$$u_3=1066.8 \text{ kJ/kg; } s_3=2.8836 \text{ kJ/kgK}$$

Al punto 4: $p_4=1$ bar e $s_4=s_3=2.8836$ kJ/kgK: l'acqua si trova in condizioni di saturazione a $t_4=99.63$ °C.

Ricavo il titolo $x_4=(s_4-s_L)/(s_v-s_L)=0.26$ e di conseguenza

$$H_4=1004.6 \text{ kJ/kg; } u_4=960.4 \text{ kJ/kg}$$

Esercizi Fisica Tecnica 1

Per calcolare gli scambi di calore e di lavoro applico il primo principio della termodinamica per i sistemi chiusi:

$$Q_{ab} - L_{ab} = u_a - u_b.$$

La trasformazione 1 2 è una trasformazione isocora di un sistema chiuso:

$$L_{12}=0; \quad Q_{12}=u_2 - u_1 = 682.4 \text{ kJ/kg}. \quad \dot{Q} = m Q_{12} = 273 \text{ kJ}.$$

La trasformazione 2 3 è una trasformazione isobara di un sistema chiuso:

$$Q_{23}=162.5 \text{ kJ/kg}; \quad L_{23}=-(u_3 - u_2 - Q_{23}) = 15.6 \text{ kJ/kg};$$

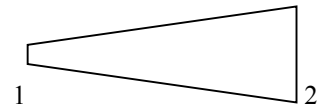
$$\dot{Q} = m Q_{23} = 65 \text{ kJ}; \quad \dot{L} = m L_{23} = 6.2 \text{ kJ}.$$

La trasformazione 3 4 è una trasformazione adiabatca di un sistema chiuso:

$$Q_{34}=0; \quad L_{34}=-(u_4 - u_3) = 106.3 \text{ kJ/kg}; \quad \dot{L} = m L_{34} = 42.6 \text{ kJ}.$$

Esercizio 7

Dell'aria in condizioni $p_1=2 \text{ bar}$ e $t_1=200^\circ\text{C}$ entra in un diffusore alla velocità di $w_1=150 \text{ m/s}$ e ne esce con velocità $w_2=15 \text{ m/s}$. Calcolare la pressione finale e temperatura finale nel caso in cui la trasformazione sia reversibile e senza scambi termici e di lavoro.



Calcolare le sezioni di ingresso e di uscita nel caso in cui la portata sia 0.12 kg/s .

Soluzione

Dalle tabelle ricavo le condizioni al punto 1:

$$t_1=200^\circ\text{C}=473 \text{ K}$$

$$p_1=2 \text{ bar}$$

$$\text{Per aria ho: } R_1 = 0.287 \text{ kJ/kgK}$$

$$\text{da cui } \rho_1 = 1.47 \text{ kg/m}^3 \text{ e } A_1 = \dot{m} / (\rho_1 w_1) = 0.000543 \text{ m}^2 = 5.4 \text{ cm}^2.$$

Per interpolazione

$$H_1=476.77 \text{ kJ/kg}$$

$$s_{r1}=7.32889 \text{ kJ/kgK}$$

$$s_1 = s_{r1} - R_1 \log p_1 = 7.12996 \text{ kJ/kgK}$$

Per il primo principio della termodinamica per i sistemi aperti posso scrivere:

$$Q - L_e = H_2 - H_1 + (w_2^2 - w_1^2)/2 + g(z_2 - z_1) \text{ da cui:}$$

$$H_2 = H_1 + (w_1^2 - w_2^2)/2 = 476.77 + (22500 - 225)/2000 = 487.9 \text{ kJ/kg}$$

dalle tabelle ricavo:

$$t_2=483.8 \text{ K} = 210.65^\circ\text{C}$$

$$s_{r2}=7.35396 \text{ kJ/kgK}$$

Poiché la trasformazione è reversibile $s_2 = s_1 = 7.12996 \text{ kJ/kgK}$, posso ricavare:

$$p_2 = \exp[(s_{r2} - s_2)/R_1] = 2.18 \text{ bar}.$$

$$\text{da cui } \rho_2 = 1.57 \text{ kg/m}^3 \text{ e } A_2 = \dot{m} / (\rho_2 w_2) = 0.00509 \text{ m}^2 = 51 \text{ cm}^2.$$

Esercizio 8

Un volume $V=10 \text{ m}^3$ di acqua (liquido+vapore) si trova in condizioni di saturazione alla pressione $p=100 \text{ bar}$ (stato A).

Il volume occupato dal liquido è pari al 30% del totale. Calcolare il titolo e la massa di acqua.

Esercizi Fisica Tecnica 1

In una trasformazione reale, l'acqua si porta rapidamente, in modo adiabatico, compiendo un lavoro pari a 210 kJ sull'esterno, alla pressione di 1 bar. (stato B) Calcolarne il volume finale.

Calcolare il lavoro scambiato nel caso in cui l'acqua, a partire dallo stato A, espandesse, in modo adiabatico reversibile, fino alla pressione $p=1$ bar, (stato C).

Soluzione

Dalle tabelle del vapore, in condizioni di saturazione, ricavo:

T	p	v_l	v_v	H_l	H_v	s_l	s_v	u_l	u_v
310.96	100	0.0014526	0.018041	1408.1	2727.7	3.3606	5.6198	1393.6	2547.3
99.63	1	0.0010434	1.6937	417.5	2675.4	1.3027	7.3598	417.4	2506

Il volume specifico è $v=v_l+(v_v-v_l)x$; il volume occupato dal liquido è $v_l(1-x)$ da cui si ricava che la frazione volumetrica

$$\text{di liquido è } F_l = \frac{v_l(1-x)}{v_l+(v_v-v_l)x}; \quad \text{da cui } \rightarrow x = \frac{(1-F_l)v_l}{F_l v_v + (1-F_l)v_l} = \frac{0.7 \cdot 0.0014526}{0.3 \cdot 0.018041 + 0.7 \cdot 0.0014526} = 0.158.$$

$$\text{Il volume specifico } v_A = 0.0014526 + 0.158 \cdot (0.018041 - 0.0014526) = 0.00408 \text{ [m}^3/\text{kg]}$$

$$\text{e la massa } m = V_A/v_A = 10/0.00408 = 2450 \text{ kg.}$$

$$\text{L'energia interna } u_A = 1393.6 + 0.158 \cdot (2547.3 - 1393.6) = 1576.1 \text{ [kJ/kg]}$$

$$\text{L'entropia } s_A = 3.3606 + 0.158 \cdot (5.6198 - 3.3606) = 3.71791 \text{ [kJ/kgK]}$$

Applico il primo principio della termodinamica (per sistemi chiusi) alla massa d'acqua:

$$Q - L = u_B - u_A \text{ [kJ/kg]; } \quad Q = 0; \quad L = 210000/2450 = 85.6 \text{ [kJ/kg];} \quad \text{da cui } u_B = u_A - L = 1576.1 - 85.6 = 1490.5 \text{ [kJ/kg]}$$

$$\text{Dalle tabelle a } p=1 \text{ bar ricavo: } x_B = \frac{u_B - u_l}{u_v - u_l} = \frac{1490.5 - 417.4}{2506 - 417.4} = 0.514$$

$$v_B = 1.0434 \cdot 10^{-3} + 0.514(1.6937 - 1.4526 \cdot 10^{-3}) = 0.871 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right] \quad \text{da cui } V_B = v_B m = 2134 \text{ m}^3.$$

Nel caso di espansione adiabatica reversibile dal punto A al punto C si ha: $s_C = s_A$ da cui ricavo

$$x_C = \frac{s_C - s_l}{s_v - s_l} = \frac{3.71791 - 1.3027}{7.3598 - 1.3027} = 0.399; \quad u_C = 417.4 + 0.399(2506 - 417.4) = 1251.4 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right]$$

$$L_{AC} = u_A - u_C = 1576.1 - 1251.4 = 324.7 \text{ [kJ/kg]} \quad \text{e il lavoro totale } \dot{L} = m L_{AC} = 2450 \cdot 324.7 = 795.5 \text{ [MJ]}$$

Esercizio 9

Un compressore aspira a regime permanente una portata di aria pari a 850 m³/h in condizioni di pressione 1 bar e temperatura 27°C. La compressione avviene in due stadi successivi, il primo fino a 3.5 bar e il secondo da 3.5 bar fino a 11 bar. Tra i due stadi di compressione viene interposto uno scambiatore di calore che raffredda l'aria a pressione costante fino a T=50°C (ingresso secondo stadio) tramite una portata di acqua pari a 0.2 m³/h alla pressione di 0.1 bar e in condizione di liquido saturo. L'acqua all'uscita dello scambiatore viene poi fatta vaporizzare completamente in un ulteriore elemento. Si calcoli:

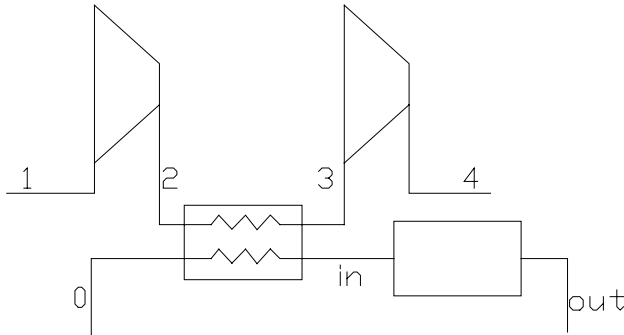
1. Le condizioni dell'aria alla fine della prima compressione (temperatura, entalpia, entropia);
2. La potenza totale del compressore;

Esercizi Fisica Tecnica 1

3. Le condizioni dell'acqua di refrigerazione all'uscita dallo scambiatore (titolo, entalpia, entropia);
4. La potenza termica necessaria a vaporizzare completamente l'acqua (stato "out": vapore saturo secco).

Si considerino le compressioni reversibili e adiabatiche; inoltre si trascurino le variazioni di energia potenziale e cinetica.

Nel caso in cui non si sia svolta la parte dell'esercizio relativa all'aria, si assuma (per lo svolgimento della parte relativa al vapore) la potenza termica ceduta al vapore nello scambiatore pari a 30 kW.



Soluzione

Le condizioni iniziali dell'aria sono:

$$p_1 = 1 \text{ bar} \quad T_1 = 300 \text{ K}$$
$$H_1 = 300.6 \text{ kJ/kg} \quad S_1 = 6.8726 \text{ kJ/kg K}$$

Dopo la prima fase di compressione si hanno le seguenti condizioni:

$$p_2 = 3.5 \text{ bar}$$
$$S_2 = S_1 = 6.8726 \text{ kJ/kg K} \text{ perché compressione adiabatica e reversibile}$$
$$S_2 = S_r(T_2) - R_1 \ln(p_2) \quad S_r(T_2) = S_2 + R_1 \ln(p_2) = 6.8726 + 0.287 \cdot \ln(3.5) = 7.2321 \text{ kJ/kg K}$$

Si trova quindi la temperatura per interpolazione:

$$T_2 = 430.5 \text{ K}$$

Dalla temperatura si valuta l'entalpia:

$$H_2 = 433.1 \text{ kJ/kg}$$

Dopo la refrigerazione le condizioni dell'aria sono:

$$p_3 = 3.5 \text{ bar} \quad T_3 = 323 \text{ K}$$
$$H_3 = 323.9 \text{ kJ/kg} \quad S_3 = 6.5798 \text{ kJ/kg K}$$

Alla fine della seconda compressione si hanno le seguenti condizioni:

$$p_4 = 11 \text{ bar}$$
$$S_4 = S_3 = 6.5798 \text{ kJ/kg K} = S_r(T_4) - R_1 \ln(p_4) \quad S_r(T_4) = 7.2680 \text{ kJ/kg K}$$
$$T_4 = 446.3 \text{ K}$$
$$H_4 = 449.3 \text{ kJ/kg}$$

La potenza totale del compressore risulta:

Esercizi Fisica Tecnica 1

$$\rho_1 = \frac{p_1}{R_1 T_1} = 1.1614 \text{ kg/m}^3 \quad \dot{m} = \rho_1 G_1 = 0.274 \text{ kg/s}$$

$$P = \dot{m} (H_1 - H_2 + H_3 - H_4) = -70.66 \text{ kW}$$

L'acqua si trova nelle seguenti condizioni di ingresso:

$$p_0 = 0.1 \text{ bar} \quad x_0 = 0 \quad H_0 = 191.8 \text{ kJ/kg}; \quad \rho_0 = 989.9 \text{ kg/m}^3; \quad \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} = 0.055 \text{ kg/s}$$

Dal bilancio energetico tra aria e acqua:

$$\dot{m}(H_3 - H_2) = \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}(H_0 - H_{\text{in}})$$

$$H_{\text{in}} = H_0 - \frac{\dot{m}(H_3 - H_2)}{\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}} = 735.8 \text{ kJ/kg}$$

$$x_{\text{in}} = \frac{H_{\text{in}} - 191.8}{2392.9} = 0.23 \quad S_{\text{in}} = 2.3747 \text{ kJ/kg K}$$

La potenza necessaria a far vaporizzare completamente l'acqua è:

$$H_{\text{out}} = H_v(0.1 \text{ bar}) = 2584.8 \text{ kJ/kg}$$

$$q = \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}(H_{\text{out}} - H_{\text{in}}) = 101.7 \text{ kW}$$

Esercizio 10

Una portata di 80 m³/h di vapore defluisce all'interno di un condotto di diametro interno D_i=180 mm. Lo stato del vapore nella sezione di ingresso è p₁=2 bar, T₁=220°C. Supponendo trascurabili le perdite di carico e la variazione di energia cinetica e potenziale, si valuti lo stato (entalpia, titolo) del vapore in una sezione che dista 16 metri dalla sezione di ingresso e la quantità di acqua raccolta in un'ora in una bacinella di scarico-condensa posta in tale sezione, nel caso in cui la superficie del condotto (a pareti rigide) disperda verso l'esterno in media un flusso termico pari a 2.25 kW/m.

Valutare infine la variazione di entropia durante la trasformazione.

Soluzione

Le condizioni in ingresso sono le seguenti:

$$p_1 = 2 \text{ bar} \quad T_1 = 220 \text{ °C}$$

Per interpolazione dalla tabella del vapore surriscaldato:

$$v_1 = 1.1278 \text{ kg/m}^3 \quad H_1 = 2910.8 \text{ kJ/kg} \quad S_1 = 7.5882 \text{ kJ/kg K}$$

$$\dot{m} = \rho_1 G_1 = \frac{G_1}{v_1} = 0.0197 \text{ kg/s}$$

Il 1° Principio per i sistemi aperti si riduce a (non c'è lavoro esterno netto, né i termini cinetico e potenziale):

$$Q_{12} = H_2 - H_1$$

. Quindi:

$$H_2 = H_1 + Q_{12} = H_1 - \frac{q \cdot 16}{\dot{m}} = 1083.7 \text{ kJ/kg}$$

$$x_2 = \frac{1083.7 - 504.7}{2201.6} = 0.26 \quad (\text{a } 2 \text{ bar})$$

$$S_2 = 2.9852 \text{ kJ/kg K}$$

La portata di acqua prodotta è pari a:

$$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} = \dot{m}(1 - x_2) = 0.0146 \text{ kg/s}$$

Esercizi Fisica Tecnica 1

In un'ora la massa d'acqua raccolta sarà pari a:

$$m_{H_2O} = \dot{m}_{H_2O} \cdot 3600 = 52.48 \text{ kg}$$

La variazione di entropia sarà:

$$\Delta S = S_2 - S_1 = -4.6029 \text{ kJ/kg K}$$

Esercizio 11

In una turbina a gas entra aria alla pressione $p_1 = 9.5 \text{ bar}$ e alla temperatura $t_1 = 727 \text{ °C}$ con velocità $w_1 = 28 \text{ m/s}$ ed esce alla pressione $p_2 = 1 \text{ bar}$ con velocità $w_2 = 84 \text{ m/s}$. Supporre l'espansione adiabatica isoentropica. Calcolare la temperatura di uscita dell'aria dalla turbina. Sapendo che la potenza sviluppata dall'espansore è $P = 300 \text{ kW}$, calcolare la portata di aria e le sezioni di ingresso e di uscita dell'espansore (condotto orizzontale).

Soluzione

Le condizioni in ingresso sono le seguenti:

$$p_1 = 9.5 \text{ bar} \quad T_1 = 1000 \text{ K} \quad \rho_1 = p_1 / R_1 T_1 = 3.31 \text{ kg/m}^3$$

$$H_1 = 1046.4 \text{ kJ/kg}$$

$$S_1 = 8.1395 - 0.287 \cdot \ln(9.5) = 7.4934 \text{ kJ/kg K}$$

L'entropia nel punto 2 è uguale a quella di ingresso (tr. ad. rev), quindi:

$$S_2 = S_1 = 7.4934 \text{ kJ/kg K} = S_r(T_2); \quad \text{per interpolazione: } T_2 = 554.2 \text{ K}; \quad \rho_2 = p_2 / R_1 T_2 = 0.629 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Quindi: } H_2 = 560.9 \text{ kJ/kg}$$

Dal 1° Principio per i sistemi aperti risulta:

$$L_{e12} = \frac{P}{\dot{m}} = H_1 - H_2 - \left(\frac{w_2^2 - w_1^2}{2} \right) \cdot 10^{-3} \quad \Rightarrow \quad \dot{m} = 0.622 \text{ kg/s}$$

Le sezioni risultano:

$$A_1 = \frac{\dot{m}}{\rho_1 w_1} = 0.006711 \text{ m}^2$$

$$A_2 = \frac{\dot{m}}{\rho_2 w_2} = 0.01177 \text{ m}^2$$