NUMERO: 1065

DATA: 09/09/2014

A P P U N T I

STUDENTE: Taberna

MATERIA: Termodinamica Applicata + temi d'esame + Eserc.

Prof. Giaretto

MACCHINE TERMICHE

G.Taberna

Sistemi artificiali per produrre EFFETTO UTILE, cioè conversione tra forme di energia ($Q \rightarrow L$; $L \rightarrow Q$)

Operano in modo CICLICO

- macchine MOTRICI: $Q_n = L_n > 0$
- macchine OPERATRICI: $Q_n = L_n < 0$

MOTORI A GAS

Caratterizzati da FLUIDO MOTORE GASSOSO (non intervengono mai processi di evaporazione/condensazione → sempre una sola fase)

Motori a COMBUSTIONE INTERNA:

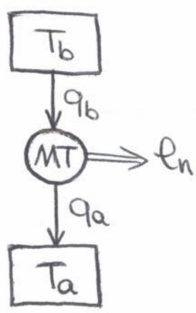
1. ALTERNATIVI: dispositivi cilindro-pistone, con un unico componente
   a) CICLO OTTO ("motori a benzina" ad accensione comandata)
   b) CICLO DIESEL

2. A RINNOVAMENTO DI FLUIDO: macchina caratterizzata da più componenti specializzati
   c) CICLO JOULE

CICLI IDEALI DI RIFERIMENTO

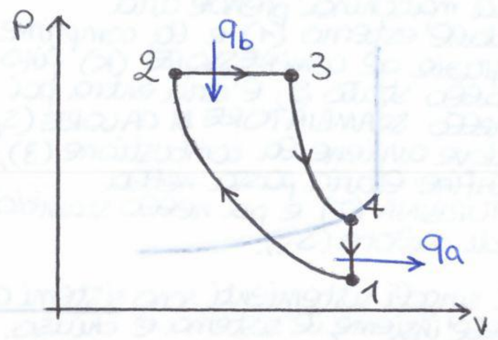
Cicli reversibili che approssimano il reale funzionamento delle macchine

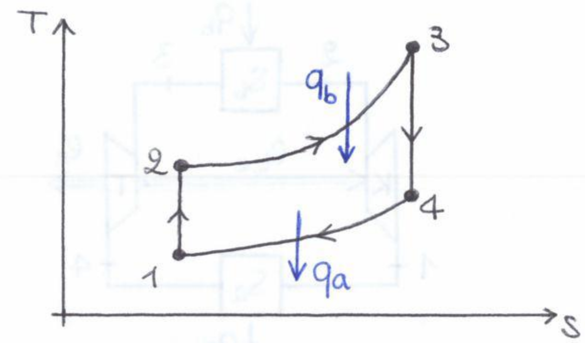
Approssimazioni:
1. nei motori la combustione è realizzata con molto comburente (O_2) → combustibile ≪ comburente
   il combustibile è trascurabile → il fluido motore è ARIA SECCA
   ↓
   elimino le reazioni, il fluido non deve essere rinnovato
2. la combustione esterna trasferisce al fluido (aria) il calore di combustione, cioè immagino che la combustione avvenga all'esterno e all'interno giunga solo il prodotto delle reazioni (calore)
3. l'aria è un gas ideale con proprietà costanti



il sistema è il fluido motore (aria)

b) CICLO DIESEL





- COMPRESSIONE ADIABATICA REVERSIBILE (lavoro)
- ESPANSIONE ISOBARA (q_b, iniezione di combustibile)
- ESPANSIONE ADIABATICA REVERSIBILE (lavoro)
- ISOCORA (q_a)

$$r_v = \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_4}{V_2}$$

RAPPORTO VOLUMETRICO DI COMBUSTIONE: $\boxed{r_c = \frac{V_3}{V_2}}$

$$\eta = 1 - \frac{|q_a|}{q_b} = 1 - \frac{c_v(T_4 - T_1)}{c_p(T_3 - T_2)}$$

$1 \to 2$ $\quad T_1 = T_2\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{1-\gamma} = T_2 \cdot r_v^{1-\gamma}$

$2 \to 3$ $\quad \frac{RT_2}{V_2} = \frac{RT_3}{V_3} \leftarrow p_2 = p_3 \qquad T_3 = T_2\,\frac{V_3}{V_2} = T_2 \cdot r_c$

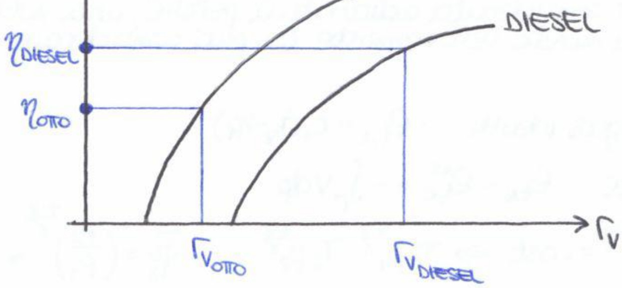
$3 \to 4$ $\quad T_3 V_3^{\gamma-1} = T_4 V_4^{\gamma-1} \qquad T_4 = T_3\left(\frac{V_3}{V_4}\right)^{\gamma-1} = T_3\left(\frac{V_3}{V_2}\cdot\frac{V_2}{V_4}\right)^{\gamma-1} = T_3\left(r_c \cdot \frac{1}{r_v}\right)^{\gamma-1} = (T_2 r_c)(r_c^{\gamma-1}\cdot r_v^{1-\gamma}) = T_2 r_c^{\gamma} r_v^{1-\gamma}$

$$\Rightarrow \quad \eta = 1 - \frac{1}{\gamma}\cdot\frac{\cancel{T_2} r_c^{\gamma} r_v^{1-\gamma} - \cancel{T_2} r_v^{1-\gamma}}{\cancel{T_2} r_c - \cancel{T_2}} \qquad \eta = 1 - r_v^{1-\gamma}\left[\frac{r_c^{\gamma} - 1}{\gamma(r_c - 1)}\right]$$

- più è elevato r_v più cresce il rendimento, perchè l'esponente $1-\gamma$ è negativo
- $r_c > 1 \to [\ldots] > 1$

$\Rightarrow$ quindi se $r_v = \text{cost}$, $\quad \eta_{DIESEL} < \eta_{OTTO} \quad \left(\eta_{OTTO} = 1 - r_v^{1-\gamma}\right)$

ma $\quad r_{v\,DIESEL} > r_{v\,OTTO} \Rightarrow \eta_{DIESEL} > \eta_{OTTO}$!



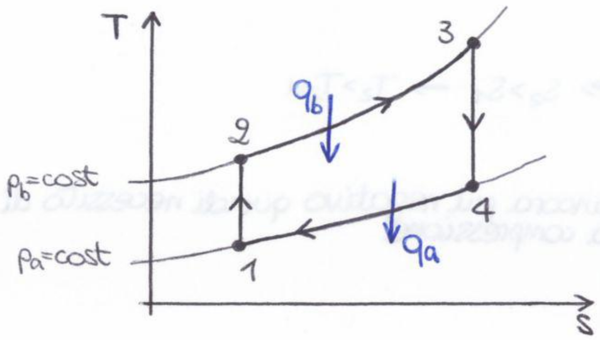
- CALORE FORNITO A S_b : q_b

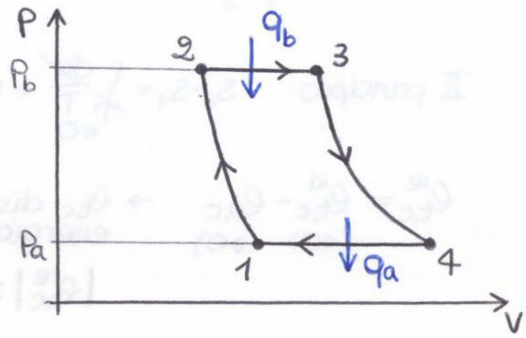
$p_2 = p_3 \rightarrow \Delta p = 0 \rightarrow \ell_t^{id} = 0$ — lo scambiatore opera una trasformazione reversibile senza dissipazioni

$q_b - \cancel{\ell_t} = \Delta h = c_p(T_3 - T_2) > 0$

Ogni forma di energia scambiata (ℓ_t, q) è vincolata a una Δh!

- DIAGRAMMI DEL CICLO





- RENDIMENTO

$$\eta = 1 - \frac{|q_a|}{q_b} = 1 - \frac{\cancel{c_p}(T_4 - T_1)}{\cancel{c_p}(T_3 - T_2)}$$

$q_a - \cancel{\ell_t} = c_p(T_1 - T_4) < 0 \quad |q_a| = c_p(T_4 - T_1)$

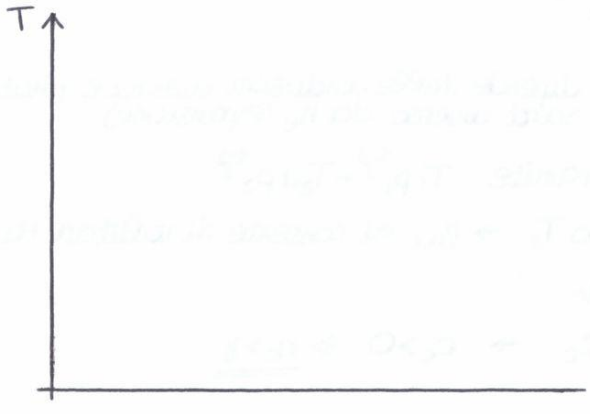
4 politropiche (2 adiabatiche, 2 isocore) → vale che $T_1 \cdot T_3 = T_2 \cdot T_4$; $\frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2}$

$$\Rightarrow \eta = 1 - \frac{T_1}{T_2} \frac{\cancel{\left(\frac{T_4}{T_1} - 1\right)}}{\cancel{\left(\frac{T_3}{T_2} - 1\right)}} \qquad \boxed{\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - r_b^{\frac{1-\gamma}{\gamma}}}$$

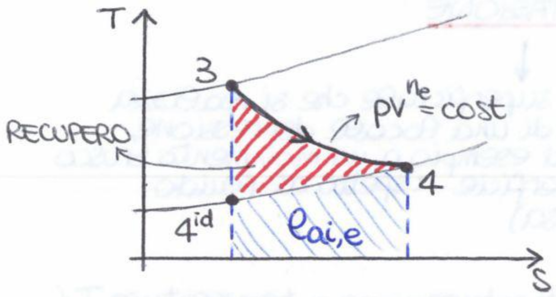
CICLO JOULE "REALE"

Tengo conto degli effetti delle irreversibilità negli scambi di energia meccanica (maggiore contributo rispetto agli scambi di energia termica).

Compressore e turbina sono ancora adiabatici.



• ESPANSIONE REALE



$\ell_{t,e}^{re} = \ell_{t,e}^{id} - \ell_{a,e} \Rightarrow \ell_{t,e}^{re} < \ell_{t,e}^{id}$
(>0) (>0)

$\ell_{a,e} = c_p(T_4 - T_{4^{id}})$ → è come se scambiassi calore lungo l'isobara

RECUPERO: l'aumento di temperatura favorisce l'espansione del fluido
→ mi basta meno lavoro

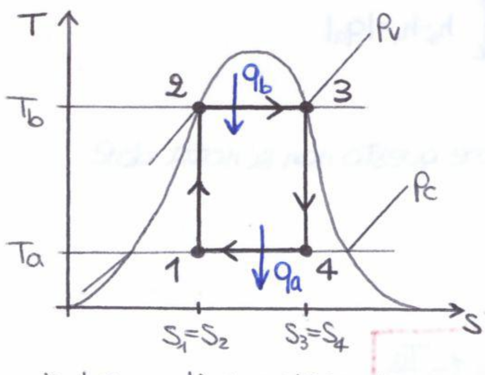
$\ell_{a,e} = \ell_{ai,e} + \ell_{RC}$ $\quad \ell_{a,e} = c_p(T_4 - T_{4^{id}}) = c_e(T_4 - T_3) + \ell_{RC}$
↳ recupero

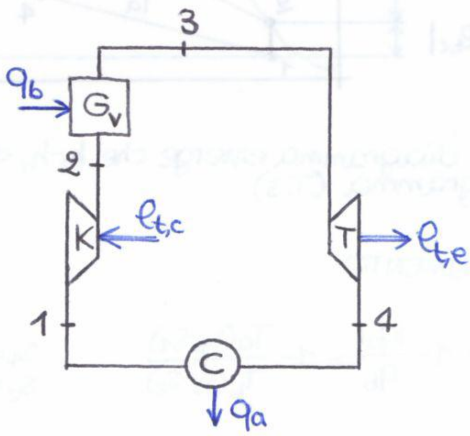
$c_e < 0 \rightarrow n_e = \frac{c_p - c_e}{c_v - c_e}; \quad 1 < n_e < \gamma$

MOTORI TERMICI A VAPORE

• Il fluido (acqua demineralizzata) cambia stato
• Riguardano grosse centrali
• Combustione esterna → il fluido non viene rinnovato

a) CICLO DIRETTO A VAPORE DI CARNOT





p_v: isobara di vaporizzazione
p_c: isobara di condensazione

Nel cambiamento di fase, le isobare diventano anche isoterme

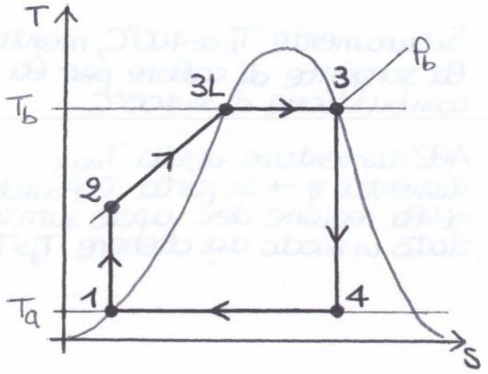
G_v: il generatore di vapore porta il fluido dalle condizioni di liquido saturo (2) a quelle di vapore saturo secco (3)

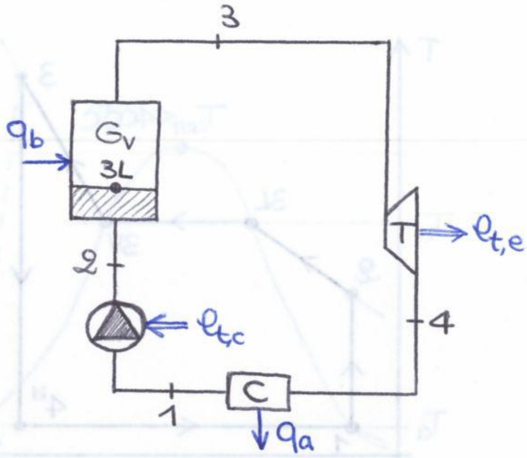
C: condensatore

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 9 di 98

b) CICLO RANKINE

Modifica al ciclo di Carnot per poterlo realizzare





Dato che non si riesce a controllare la fine della condensazione in modo da raggiungere esattamente lo stato 2, si pensa invece di eliminare completamente la fase vapore (posizione 1 sulla curva limite).

Evito l'uso del compressore → no cavitazione

▲ : POMPA

$$q_b = q_{b_{2\to 3L}} + q_{b_{3L\to 3}} = (h_{3L}-h_2)+(h_3-h_{3L}) = h_3-h_2$$

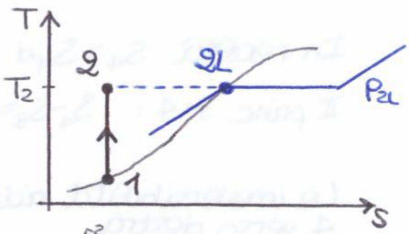
Lo stato 4 lo conosco solo se conosco il titolo del vapore.

Nell'ipotesi di fluido incompressibile, calcolo lo stato 2:

a) conosco T_2 :

$$h_2 \cong h_{2L} + v_{2L}(p_2 - p_{2L})$$

p_{2L} → pressione di saturazione a T_2



b) conosco lo stato 1:

$$h_2 \cong v_1(p_2-p_1)+h_1 \qquad \left.\begin{array}{l} h_2-h_1 = v_1(p_2-p_1) \\ \text{I princ. } -\ell_{t,c} = h_2-h_1 \end{array}\right\} \; |\ell_{t,c}| = h_2-h_1 \cong v_1(p_2-p_1) = \int_1^2 v\,dp$$

v → $= v_1$ (cost)

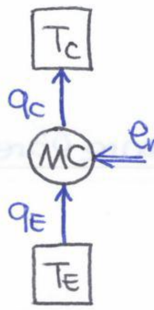
Se devo calcolare la potenza da fornire alla pompa, mi serve necessariamente sapere $|\ell_{t,c}|$ perchè

$$W_{t,c} = G \cdot \ell_{t,c}$$

Gli stati 1,2,3,4 sono noti usando le tabelle di saturazione, con l'ipotesi di fluido incompressibile.

In 4 ho ancora cavitazione perchè si ha un'espansione nella regione del vapore umido.

a) CICLO DI CARNOT INVERSO (macchina operatrice)



$T_C > T_E$

Funzione: trasferire energia termica (q_E) a un livello termico maggiore (T_C)

I princ. $\quad q_E - |q_C| + \underbrace{|\ell_n|}_{-\ell_n} = \underbrace{0}_{\text{ciclo}}$

II princ. $\quad \underbrace{0}_{S} = \frac{q_E}{T_E} - \frac{|q_C|}{T_C} + \underbrace{S_{irr}}_{=0 \text{ (ideale)}}$

• EFFICIENZA

spesa: $|\ell_n|$ $\qquad$ beneficio: $\begin{cases} q_E \text{ per un frigo a)} \\ |q_C| \text{ per una pompa di calore b)} \end{cases}$

a) $\varepsilon_f = \frac{q_E}{|\ell_n|} \underset{\text{I pr.}}{=} \frac{q_E}{|q_C| - q_E} = \frac{1}{\frac{|q_C|}{q_E} - 1} \underset{\text{II pr.}}{=} \frac{1}{T_C/T_E - 1}$ dipende solo dalle temperature estreme

$$\boxed{\varepsilon_f = COP = \frac{q_E}{|\ell_n|} = \frac{q_E}{|q_C| - q_E} = \frac{T_E}{T_C - T_E}}$$

Coefficient Of Performance

Caso diretto: $\eta = 1 - \frac{T_E}{T_C} \rightarrow \frac{T_E}{T_C} = 1 - \eta \ ; \ \frac{T_C}{T_E} = \frac{1}{1-\eta} \Rightarrow \varepsilon_f = \frac{1}{T_C/T_E - 1} = \frac{1}{\frac{1}{1-\eta} - 1} = \frac{1-\eta}{\eta}$

$\boxed{\varepsilon_f = \frac{1}{\eta} - 1}$ $\qquad$ per $\eta < 0{,}5 \Rightarrow \varepsilon_f > 1$

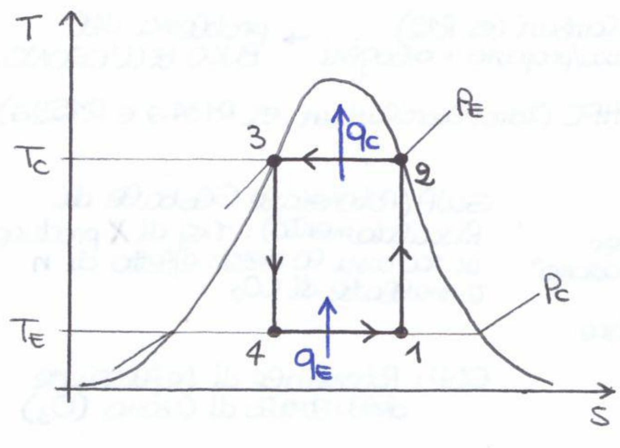
L'efficienza è molto elevata se c'è poca differenza tra T_E e T_C

b) $\varepsilon_p = \frac{|q_C|}{|\ell_n|} = \frac{|q_C|}{|q_C| - |q_E|} = \frac{|q_C|/q_E}{\frac{|q_C|}{q_E} - 1} = \frac{T_C/T_E}{\frac{T_C}{T_E} - 1}$ $\qquad \boxed{\varepsilon_p = \frac{|q_C|}{|\ell_n|} = \frac{|q_C|}{|q_C| - q_E} = \frac{T_C}{T_C - T_E}}$

$\boxed{\varepsilon_p = \varepsilon_f + 1}$ $\qquad$ vale per qualunque ciclo inverso

→ contributo termico dato dal lavoro di compressione

• DIAGRAMMI



1→2 compressione

2→3 condensazione (q_C)

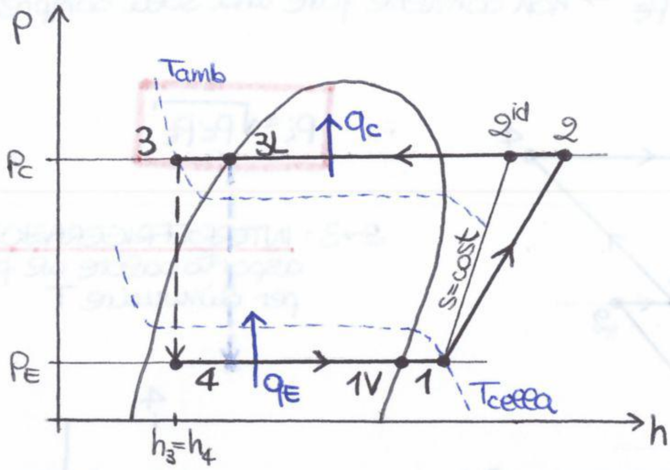
3→4 espansione con turbina

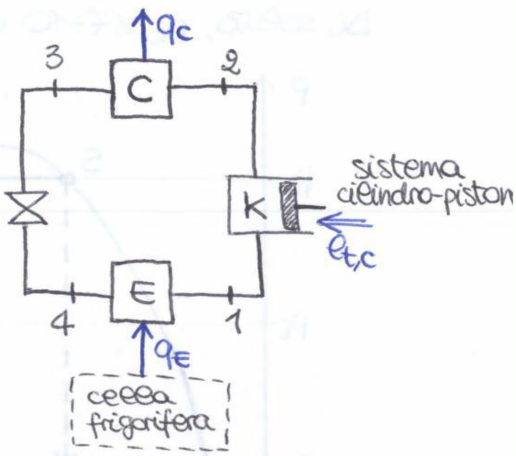
4→1 evaporazione (q_E)

p_E: bassa e vicina alla pressione esterna

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 13 di 98

b) CICLO A SEMPLICE COMPRESSIONE





Tamb: temperatura minima a cui posso portare il fluido nella condensazione

3→4 : laminazione isoentalpica

1→2 e 3→4 sono trasformazioni non reversibili

$$\varepsilon_f = \frac{q_E}{|\ell_{t,c}|} = \frac{\Phi_E}{|W_{t,c}|}$$

Tutti i componenti sono sistemi aperti: $\left.\begin{array}{l} q_E = h_1 - h_4 \\ -\ell_{t,c} = h_2 - h_1 \end{array}\right\} \rightarrow \varepsilon_f = \dfrac{h_1-h_4}{h_2-h_1}$

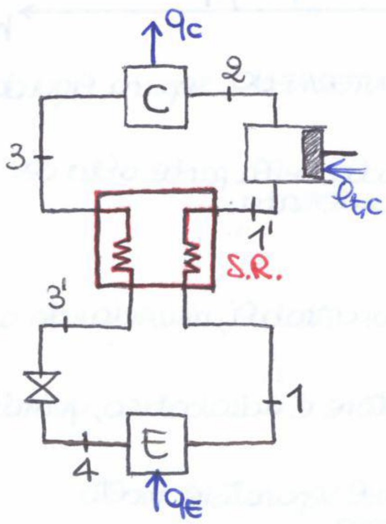
Ciclo utilizzato con temperature non molto basse : $T_E \geq -30°C$

Stato 1: la posizione limite è la curva limite superiore (1V)
Stato 3: la posizione limite è la curva limite inferiore (3L)

Se si stringe il tratto 3L-1V, diminuisce il numeratore di ε_f (h_1-h_4) → conviene avere una distanza maggiore per avere ε_f maggiore

È utile aggiungere un dispositivo per spostare a destra l'inizio della compressione (1) e a sinistra l'inizio dell'evaporazione (4).

c) CICLO A SEMPLICE COMPRESSIONE CON SCAMBIATORE RIGENERATIVO



Lo scambiatore garantisce che il compressore non aspiri liquido ma solo vapore (il liquido potrebbe far guastare il compressore).

$$\cancel{G}(h_{3'}-h_3) = \cancel{G}(h_{1'}-h_1)$$

q ceduto in S.R. q ricevuto in S.R.

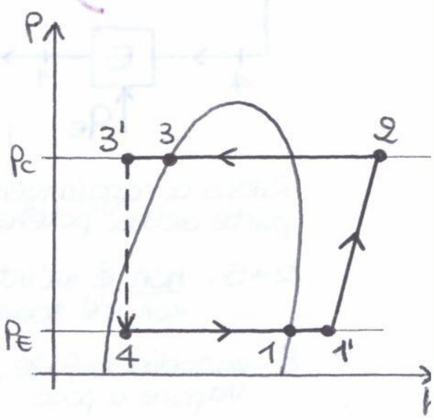
Nel diagramma (T,s) i segmenti $\overline{3'3}$ e $\overline{1'1}$ sarebbero isobare che sottendono la stessa area.

$\Delta h_{ev} = \cancel{h_{1'} - h_4}$ NO!

↓

$\Delta h_{ev} = h_1 - h_4$

$$\varepsilon_f = \frac{h_1-h_4}{h_2-h_{1'}}$$



- PORTATE CIRCOLANTI

Bilancio di energia sul separatore: $\underbrace{G_c h_8 + G_E h_2}_{\text{ingresso}} = \underbrace{G_c h_5 + G_E h_3}_{\text{uscita}}$

$$G_c(h_5-h_8)+G_E(h_3-h_2)=0$$

$$\frac{G_E}{G_c}=\frac{h_5-h_8}{h_2-h_3} < 1 \quad \text{(si nota dal diagramma)}$$

$$\varepsilon_f=\frac{G_E(h_1-h_4)}{G_E(h_2-h_1)+G_c(h_6-h_5)}$$

LIQUEFAZIONE DI FLUIDI CRIOGENICI

Esiste una vera e propria termodinamica delle basse temperature perché le proprietà degenerano, le trasformazioni sono particolari...

Fluido	NBP*	T_c	$T_{max\,inversione}$
N_2	~77K	~126K	$< \frac{27}{4}T_c \cong 852K$
O_2	~90K	~155K	$< \frac{27}{4}T_c \cong 1046K$

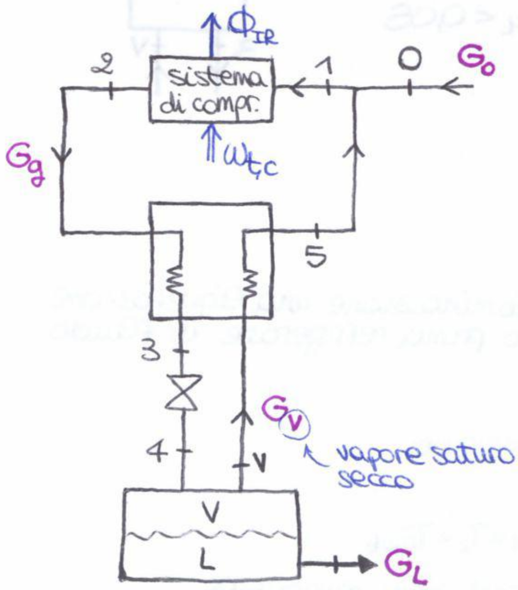
* Punto normale di ebollizione: temperatura alla pressione atmosferica

$$\varepsilon_{f_{CARNOT}}=\frac{q_E}{|\ell_n|}=\frac{T_E}{T_C-T_E}$$

se $T_E \to \phi K$, allora $\ell_n \to \infty$ la trasformazione sarebbe molto onerosa dal punto di vista energetico

PROCESSO LINDE SEMPLICE

- compressione multipla (p_{max}~200bar, p_{min}~1atm) con interrefrigerazione
- scambio rigenerativo, per raffreddare ulteriormente il gas compresso
- separazione della fase liquida a $p_{amb}=p_{min}$



G_g: portata di gas

G_L: più scende la T, più la portata di liquido spillata è piccola

$\boxed{G_V=G_g-G_L}$

$\boxed{G_0 \equiv G_L}$

Liquefazione parziale del fluido ottenuta comprimendo ad alta pressione

↓

scambio rigenerativo e separazione delle fasi

↓

ricompressione della fase vaporizzata

I princ. $\Phi_{IR} - W_{t,c} = G_g(h_2 - h_1)$

II princ. $G_g(s_2 - s_1) = \frac{\Phi_{IR}}{T_{amb}} + \underbrace{\cancel{\Sigma_{irr}}}_{=0 \text{ (reversibile)}}$

$$\frac{|\Phi_{IR}|}{T_{amb}} = -G_g(s_2 - s_1) = -G_g\left[\underbrace{\cancel{c_p \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)}}_{=0 \text{ perchè } T_2 = T_1} - R\ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right)\right]$$

$|\Phi_{IR}| = T_{amb} G_g R \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right)$ con $\frac{p_2}{p_1} = \frac{p_{max}}{p_{min}} \cong 200$

I princ. $-|\Phi_{IR}| - W_{t,c} = G_g c_p \underbrace{\cancel{(T_2 - T_1)}}_{=0}$

$$\rightarrow W_{t,c} = G_g T_{amb} R \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right) = \frac{G_L}{\varepsilon_L} T_{amb} R \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right)$$

$$\frac{W_{t,c}}{G_L} = e_{t,c} = \frac{T_{amb} \cdot R}{\varepsilon_L} \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right) = \frac{T_{amb} \cdot \bar{R}}{\varepsilon_L \cdot \bar{M}} \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right)$$

ES. $T_{amb} = 300K$; $\bar{M}_{O_2} = 32 \frac{kg}{kmol}$; $\frac{p_2}{p_1} = 200$

$\rightarrow e_{t,c}^{min} \cong 8 \frac{MJ}{kg_L}$

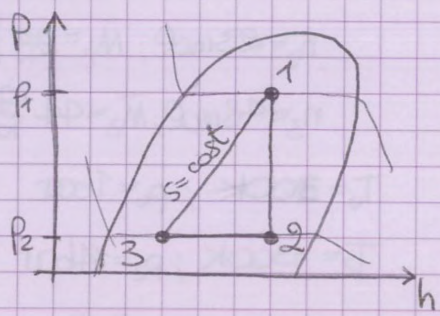
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 19 di 98

SIMULAZIONE

(2) $G = G_L + G_V \quad G_L = 57\frac{kg}{h} = 0{,}016\frac{kg}{s} \quad G_V = 150\frac{kg}{h} = 0{,}042\frac{kg}{s}$

- $p_1 = 125 bar \xrightarrow{\text{trafil.}} p_2 = 60 bar$
- condens. isobara $p_3 = p_2$
- compress. adiab. reversibile

W_n; $\Sigma_{irr} = ?$



$h_2 = h_1$

$x_1 = \frac{G_V}{G} = 0{,}725 \qquad h_1 = x_1 h_{1V} + (1-x_1) h_{1L} = x_1 \cdot 2678{,}1 + (1-x_1)\cdot 1511{,}9 = 2357{,}4 = h_2$

$s_1 = x_1 \cdot 5{,}4705 + (1-x_1)\cdot 3{,}5294 = 4{,}9367 = s_3$

$x_3 = \frac{s_3 - s_{3L}}{s_{3V} - s_{3L}} = 0{,}667 \qquad h_3 = x_3 h_{3V} + (1-x_3) h_{3L} = 2261{,}76$

$\underline{2\to3} \qquad \Phi_{23} - \underbrace{W_{t23}}_{=0} = G(h_3 - h_2) = -5{,}5 kW$

$\underline{3\to1} \qquad \underbrace{\Phi_{31}}_{=0} - W_{t31} = G(h_1 - h_3) \qquad W_{t31} = -5{,}5 kW$

$W_n = W_{t31} = \underline{-5{,}5 kW}$

$\Sigma_{irr_{12}} = G(s_2 - s_1) = 10{,}07 \frac{W}{K}$

$x_2 = \frac{h_2 - h_{2L}}{h_{2V} - h_{2L}} = 0{,}728 \qquad s_2 = x_2 s_{2V} + (1-x_2) s_{2L} = 5{,}1119$

$\left(\cancel{\Sigma_{irr_{23}} = G(s_3 - s_2) - \frac{\Phi_{23}}{T_2} =}\right)$?

$\cancel{T_2 = 275{,}55°C = 548{,}55K}$

$\underline{2\to3}$ isobara: $\boxed{dh = Tds + \cancel{vdp}} \qquad T = \frac{h_3 - h_2}{s_3 - s_2} = 545{,}89K$

$\Sigma_{irr_{23}} = G(s_3 - s_2) - \frac{\Phi_{23}}{T} = 1{,}29 \frac{W}{K}$

$\Sigma_{irr} = \underline{11{,}36 \frac{W}{K}}$

10/09/12

(2) $r_p = 16$ compressione $\qquad \eta_{is}; \ell_{CR}; s_{irr} = ?$

A $\bar{M}_A = 4 \frac{kg}{kmol}$; $\gamma_A = 1{,}7$; $y_A = 0{,}37$

B $\bar{M}_B = 44 \frac{kg}{kmol}$; $\gamma_B = 1{,}3$

$T_1 = 25°C$; $p_1 = 1 bar$; $T_2 = 520°C = 793K$

$y_B = 1 - y_A = 0{,}63$

$$x_j = y_j \cdot \frac{\bar{M}_j}{\bar{M}} = y_j \cdot \frac{\bar{M}_j}{\sum y_j \bar{M}_j} \rightarrow x_A = 0{,}05 \; ; \; x_B = 0{,}95$$

$$R_A = \frac{\bar{R}}{\bar{M}_A} = 2078{,}5 \qquad R_B = 189 \qquad R = x_A R_A + x_B R_B = 283{,}5 \frac{J}{kg K}$$

$$c_{vA} = 2969{,}3 \qquad c_{vB} = 630 \qquad c_v = 747 \frac{J}{kg K}$$

$$c_{pA} = 5047{,}8 \qquad c_{pB} = 819 \qquad c_p = 1030{,}44 \frac{J}{kg K}$$

$$\left.\begin{matrix} c_v \\ c_p \end{matrix}\right\} \gamma = \frac{c_p}{c_v} = 1{,}38$$

$$\eta_{is_C} = \frac{\ell_{tc}^{id}}{\ell_{tc}^{re}} = \frac{T_{2id} - T_1}{T_2 - T_1} = \underline{0{,}69}$$

$$T_{2id} \cdot p_2^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = T_1 p_1^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} \qquad T_{2id} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} \cdot T_1 = \left(\frac{1}{r_p}\right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} \cdot T_1 = 639{,}4K$$

$$T_1 p_1^{\frac{1-n_c}{n_c}} = T_2 p_2^{\frac{1-n_c}{n_c}} \qquad \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{1-n_c}{n_c}} = \frac{T_1}{T_2} \qquad \frac{1-n_c}{n_c} = \frac{\ln(T_1/T_2)}{\ln(p_2/p_1)}$$

$$n_c = \frac{1}{1 + \frac{\ln(T_1/T_2)}{\ln(r_p)}} = 1{,}546$$

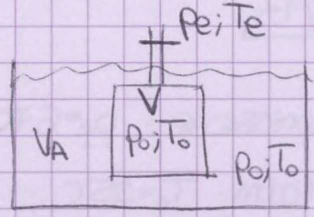
$$n_c = \frac{c_p - c_c}{c_v - c_c} \qquad n_c c_v - n_c c_c = c_p - c_c \qquad c_c = \frac{c_p - n_c c_v}{1 - n_c} = 227{,}88$$

$$\ell_{a,c} = \ell_{ai,c} + \ell_{CR} \qquad c_p (T_2 - T_{2id}) = c_c (T_2 - T_1) + \ell_{CR} \rightarrow \underline{\ell_{CR} = 45{,}47 \frac{kJ}{kg}}$$

$$s_2 - s_1 = \overset{=0 \text{ adiabatico}}{\cancel{\frac{q}{T}}} + s_{irr}$$

$$s_{irr} = c_p \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) - R \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right) = \underline{222{,}5} \frac{J}{kg K}$$

13/09/13



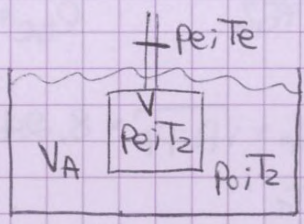
① $V = 50\,\ell$

$\boxed{O_2}$ $p_0 = 1\,atm$; $T_0 = 25°C$

$\boxed{H_2O}$ $V_A = 170\,\ell$; p_0 ; T_0

$T_e = T_0$; p_e

fine: $p_2 = p_e$; $T_2 = T_0 + 0{,}35 = 298{,}35\,K$



$\Delta M = ?$

$$M_1 = \frac{p_0 V}{R T_0} = 0{,}065\,kg$$

I princ. tubazione-bombola: $Q - \underbrace{L}_{=0} = M_2 u_2 - M_1 u_1 - (M_2 - M_1) h_e$

$$Q = M_2 c_v T_2 - M_1 c_v T_0 - (M_2 - M_1) c_p T_e$$

Calore ricevuto dall'acqua = calore ceduto dalla bombola

$$Q_A = c_A\, M_A (T_2 - T_0) = c_A\, \rho_A V_A (T_2 - T_0) = 249{,}07\,kJ$$

$$Q = -|Q_A|$$

$$M_2 = \frac{|Q_A| - M_1 c_v T_0 + M_1 c_p T_e}{c_p T_e - c_v T_2} = 3{,}292\,kg$$

$c_v = 649{,}53$; $c_p = 909{,}34$

$\Delta M = M_2 - M_1 = 3227\,g$

13/09/13

3 $G_A \gg G_g$

$\Delta_1 = 4{,}25 \cdot \Delta_2$

NTU, $\varepsilon = ?$

$$M \cong \frac{1}{C_{min}}$$

$$M = -\frac{1}{KS_{tot}} \ln\left(\frac{\Delta_2}{\Delta_1}\right) = \frac{1}{C_{min}} \qquad K \cdot S_{tot} = -C_{min} \ln\left(\frac{\Delta_2}{\Delta_1}\right)$$

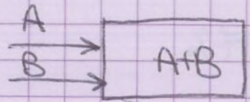
$$NTU = \frac{K \cdot S_{tot}}{C_{min}} = -\ln\left(\frac{\Delta_2}{\Delta_1}\right) = \underline{1{,}45}$$

$$C_{max} \to \infty : \quad \varepsilon = 1 - e^{-NTU} = \underline{0{,}77}$$

02/07/13

! (2) $G_A = 100\ \frac{kg}{h} = 0{,}028\ \frac{kg}{s}$ $\qquad G_B;\ \Sigma_{irr} = ?$

$\overline{M}_A = 39\ \frac{kg}{kmol} \qquad \gamma_A = 1{,}42$



$\overline{M}_B = \frac{\overline{M}_A}{2} \qquad \gamma_B = \gamma_A \qquad y_B = 0{,}3$

processo isotermo, isobaro, adiabatico

$G_A h_A + G_B h_B = G_M h_M \qquad G_A c_{pA} \cancel{T_A} + G_B c_{pB} \cancel{T_B} = (G_A + G_B) c_{pM} \cancel{T_M}$

$G_A \cancel{\frac{\gamma}{\gamma-1}} R_A + G_B \cancel{\frac{\gamma}{\gamma-1}} R_B = (G_A + G_B) \cancel{\frac{\gamma}{\gamma-1}} R_M$

$x_A = y_A \frac{\overline{M}_A}{y_A \overline{M}_A + y_B \overline{M}_B} = 0{,}82 \qquad x_B = 0{,}18$

$R_A = 213{,}18 \qquad R_B = 426{,}36 \qquad R_M = 251{,}55$

$G_B = G_A (R_M - R_A) / (R_B - R_M) = \boxed{21{,}95\ kg/h}$

$\Sigma_{irr} = (G_A + G_B) s_M - G_A s_A - G_B s_B = G_A (s_M - s_A) + G_B (s_M - s_A) =$

$= G_A \left[\cancel{c_p \ln\left(\frac{T_M}{T_A}\right)} - R_A \ln\left(\frac{p_{MA}}{p_A}\right) \right] + G_B \left[\cancel{c_p \ln\left(\frac{T_M}{T_B}\right)} - R_B \ln\left(\frac{p_{MB}}{p_B}\right) \right]$

$p_{MA} = p_A \cdot y_A \quad ; \quad p_{MB} = p_B \cdot y_B$

$\Sigma_{irr} = G_A (-R_A \ln y_A) + G_B (-R_B \ln y_B) = \boxed{5{,}26\ \frac{W}{K}}$

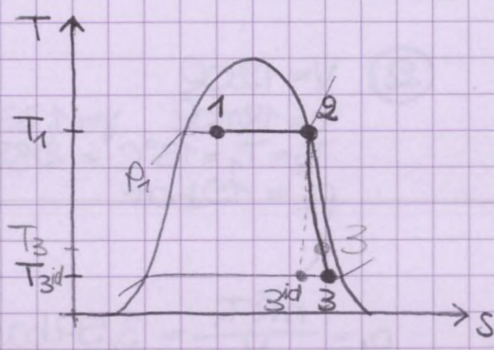
03/02/12

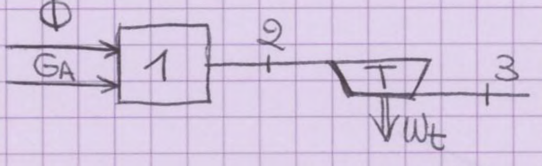
① $p_1 = 11\,bar$ $\qquad G_A; \Phi; \Sigma_{irr} = ?$

$H_2O: p_1; T_A = 25°C$

$p_3 = 1\,bar \qquad \eta_{ise} = 78\%$

$W_{t_{23}} = 66\,kW$





$\Phi_{1-2} - \underbrace{\cancel{W_{t_{12}}}}_{}^{=0} = G_v h_2 - G_A h_A$

tabelle: $h_2 = h_v(p_1) = 2779,45$

stato A: liquido sottoraffreddato

$h_A \cong h_{1L} + v_{1L}(\cancel{p_1 - p_{1L}}) = 780,52$

Stazionarietà: $G_A = G_V$

$\overset{=0}{\cancel{\Phi_{23}}} - W_{t_{23}} = G_V(h_3 - h_2)$

$\eta_{ise} = \dfrac{W_{t_{23}}^{re}}{W_{t_{23}}^{id}} = \dfrac{-\cancel{G_V}(h_3 - h_2)}{-\cancel{G_V}(h_{3id} - h_2)}$

tabelle: $S_2 = S_V(p_1) = 6,5511 = S_{3id}$

$S_{3id} = x_{3id} S_{3V} + (1 - x_{3id}) S_{3L} \qquad x_{3id} = \dfrac{S_{3id} - S_{3L}}{S_{3V} - S_{3L}} = 0,866$

$h_{3id} = x_{3id} h_{3V} + (1 - x_{3id}) h_{3L} = 2372,84$

$h_3 = h_2 + \eta_{ise}(h_{3id} - h_2) = 2462,29$

$G_V = -\dfrac{W_{t23}}{h_3 - h_2} = 208,1 \cdot 10^{-3} \dfrac{kg}{s} = \underline{749,15 \dfrac{kg}{h} = G_A}$

$\Phi_{12} = G_A(h_2 - h_A) = \underline{415,98\,kW}$

$x_3 = 0,906$

$S_3 = 6,7904$

$\cancel{h_1 = h_2 - \dfrac{\Phi_{12}}{G_A} = 780,57}$

2,1772

$s_{irr} = S_3 - S_A + \dfrac{\Phi_{12}}{T_A} \cong S_3 - S_{1L} + \dfrac{\Phi_{12}}{T_A} = 5,5286$

456,92K

$\Sigma_{irr} = G_A \cdot s_{irr} = 1149,5$

03/02/12

(3) $T_F = 37°C = 310K$ $\quad H; T_S = ?$

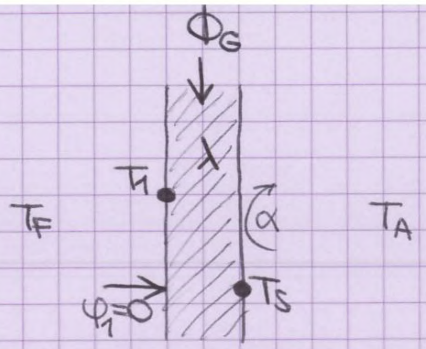
$T_A = 20°C = 293K$

$\lambda = 1{,}2 \frac{W}{mK}$

$s = 8mm$

$\alpha = 26 \frac{W}{m^2K}$

serbatoio adiabatico ($\varphi_1 = 0$)



Sup. esterna → condizioni I tipo
Sup. interna → condizioni II tipo

$\varphi_1 = 0 \quad \alpha(T_1 - T_F) = 0 \rightarrow T_1 = T_F$

$\varphi_2 = -\lambda \frac{dT}{dx} = \alpha(T_S - T_A) = \varphi_G \qquad \varphi_G = \frac{H \cdot V}{S} = H \cdot s \qquad Hs = \alpha(T_S - T_A)$

$T_1 = -\frac{H}{2\lambda}\left(-\frac{s}{2}\right)^2 + B\left(-\frac{s}{2}\right) + C = T_F$

$T_S = -\frac{H}{2\lambda}\left(\frac{s}{2}\right)^2 + B\left(\frac{s}{2}\right) + C$

$\frac{dT}{dx} = -\frac{H}{\lambda}x + B = 0 \quad (\varphi_1 = 0) \qquad B = +\frac{H}{\lambda}\left(-\frac{s}{2}\right) = -\frac{Hs}{2\lambda}$

$C = T_F + \frac{Hs^2}{8\lambda} - \frac{Hs^2}{4\lambda}$

$T_S = -\cancel{\frac{Hs^2}{8\lambda}} - \frac{Hs^2}{4\lambda} + T_F + \cancel{\frac{Hs^2}{8\lambda}} - \frac{Hs^2}{4\lambda} = T_F - \frac{Hs^2}{2\lambda} = T_F - \frac{\alpha(T_S - T_A)s}{2\lambda}$

$2\lambda T_S = 2\lambda T_F - \alpha s T_S + \alpha s T_A \qquad T_S = \frac{2\lambda T_F + \alpha s T_A}{2\lambda + \alpha s} = 308{,}64K = \boxed{35{,}64°C}$

$H = \frac{\alpha(T_S - T_A)}{s} = \boxed{50{,}83 \frac{kW}{m^3}}$

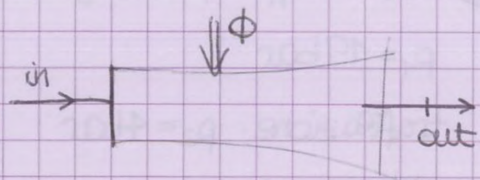
20/02/12

(2) $\bar{G} = 90 \frac{kmol}{h}$ $\bar{M} = 40 \frac{kg}{kmol}$ $\gamma = 1{,}67$

T_{out} ; Σ_{irr} ; $T_{out_0} = ?$

$T_{in} = 120°C = 393K$ $A_{in} = 80 cm^2$

$\Phi = 660 W$ $p = 1 bar$



ω_{out} trascurabile

$$G = \bar{G} \cdot \bar{M} = 3600 \frac{kg}{h} = 1 \frac{kg}{s}$$

$$\rho_{in} = \frac{1}{v_{in}} = \frac{p}{RT_{in}} = 1{,}22 \frac{kg}{m^3}$$

$$G = \rho_{in} A_{in} \omega_{in} \rightarrow \omega_{in} = 102{,}46 m/s$$

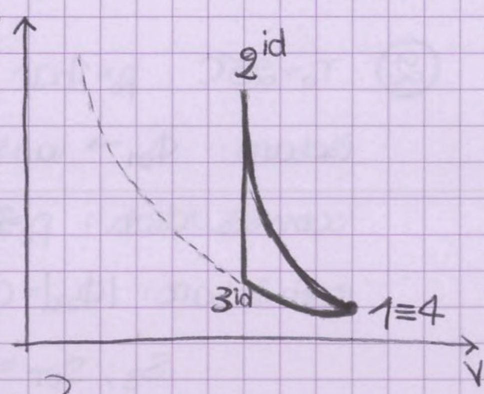
$$\Phi - \overset{=0}{\cancel{W_t}} = G\left[c_p(T_{out} - T_{in}) + \overset{trasc.}{\left(\frac{1}{2}(\cancel{\omega_{out}^2} - \omega_{in}^2\right)}\right]$$

$$T_{out} = \frac{\Phi + G c_p T_{in} + \frac{1}{2} G \omega_{in}^2}{G c_p} = \cancel{412{,}05K = 139{,}08°C} \quad 404{,}41K = \boxed{131{,}41°C}$$

$$T_{out_0} = \frac{\Phi + G c_p T_{in}}{G c_p} = \cancel{395{,}13K = 122{,}13°C} \quad 394{,}27K = \boxed{121{,}27°C}$$

$$G(s_{out} - s_{in}) = \frac{\Phi}{T_{out}} + \Sigma_{irr} \qquad \Sigma_{irr} = G c_p \ln\left(\frac{T_{out}}{T_{in}}\right) - \cancel{GR \ln\left(\frac{p_{out}}{p_{in}}\right)} - \frac{\Phi}{T_{out}} = \boxed{13{,}2 \, W/K}$$

07/02/13



① $\boxed{CO_2}$: $\bar{M}_{CO_2}=44\frac{kg}{kmol}$; $V_{1CO_2}=35\%V_1$; $\gamma_{CO_2}=1{,}33$

$\boxed{Ne}$: $\bar{M}_{Ne}=20{,}2\frac{kg}{kmol}$; $\gamma_{Ne}=1{,}67$

$V_1=120\ell$; $T_1=T_0=25°C$; $p_1=p_0=1bar$

a) $V_2=\frac{V_1}{3}$; $T_2=560°C=833K$ adiab.

b) $T_3=T_0$; $V_3=V_2$

c) $T_4=T_3$; $p_4=p_0$

$La_a ; La_c ; Q = ?$

$y_{CO_2}=0{,}35$ $\quad y_{Ne}=0{,}65$ $\qquad n=\frac{p_0V_1}{\bar{R}T_0}=4{,}84mol$

$x_{CO_2}=y_{CO_2}\cdot\frac{\bar{M}_{CO_2}}{y_{CO_2}\bar{M}_{CO_2}+y_{Ne}\bar{M}_{Ne}}=0{,}54$ $\quad x_{Ne}=0{,}46$

$R_{CO_2}=\frac{\bar{R}}{\bar{M}_{CO_2}}=188{,}95$ $\quad R_{Ne}=411{,}58$ $\quad R=333{,}66$

$c_{vCO_2}=572{,}58$ $\quad c_{vNe}=614{,}3$ $\quad c_v=599{,}7$

$c_{pCO_2}=761{,}53$ $\quad c_{pNe}=1025{,}88$ $\quad c_p=933{,}36$ $\quad \Big\}\ \gamma=1{,}56$

$V_2=40\ell$

1→2 $\quad T_1V_1^{\gamma-1}=T_{2id}V_2^{\gamma-1}$ $\quad T_{2id}=T_1\cdot(3)^{\gamma-1}=551{,}32K$

$\overset{adiab.}{\cancel{Q_{12}}}-L_{i_{12}}=c_v(T_2-T_1)\cdot M$

$L_{i_{12}}=L_{i_{12}}^{id}-La_a$ $\quad La_a=Mc_v(T_1-T_{2id})-Mc_v(T_1-T_2)=Mc_v(T_2-T_{2id})=$ $\underline{23{,}31kJ}$

2→3 $\quad Q_{23}-\overset{=0}{\cancel{L_{i_{23}}}}=Mc_v(T_3-T_2)=-44{,}28kJ$

$p_3=\frac{n\bar{R}T_3}{V_3}=3bar$

3→1 $\quad q_{31}^{id}-\ell_{i_{31}}^{id}=0$ $\quad q_{31}=\ell_{i_{31}}^{id}=-RT_3\ln\left(\frac{p_1}{p_3}\right)=109{,}24kJ/kg$

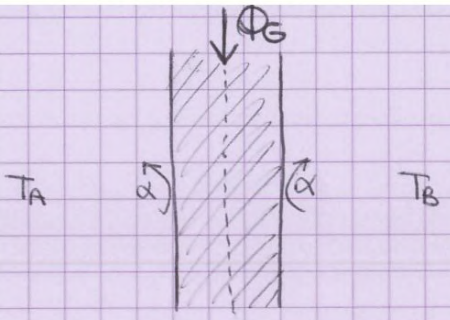
$M=n\cdot\bar{M}=0{,}138kg$ $\quad Q_{31}^{id}=L_{i_{31}}^{id}=M\cdot q=15{,}08kJ$

$L_{i_{31}}=\overset{=0}{\cancel{L_{t_{31}}}}+L_{o_{31}}=p_0(V_1-V_3)=p_0\cdot\frac{2}{3}V_1=8kJ$ $\quad Q_{31}=L_{i_{31}}=8kJ$

$La_c=L_{i_{31}}^{id}-L_{i_{31}}=\underline{7{,}08kJ}$

$Q=Q_{23}+Q_{31}=$ $\underline{-36{,}28kJ}$

07/02/13



③ $s = 50mm \quad \lambda = 1 \frac{W}{mK}$

$T_A = 85°C = 358K \quad T_B = 25°C = 298K$

$\alpha = 75 \frac{W}{m^2K} \quad H = 23 \frac{kW}{m^3} \quad \varphi_A ; \varphi_B = ?$

$$x_0 = \frac{\lambda}{H} \cdot \frac{T_2 - T_1}{s}$$

$$\varphi_G = H \cdot s = 1150 \frac{W}{m^2}$$

$$\begin{cases} \varphi_A = \alpha(T_1 - T_A) = -\lambda \left.\frac{dT}{dx}\right|_{x=-s/2} = -\lambda\left[-\frac{H}{\lambda}\left(-\frac{s}{2}\right) + \frac{T_2 - T_1}{s}\right] = -H\frac{s}{2} - \frac{\lambda(T_2 - T_1)}{s} \\ \varphi_B = \alpha(T_2 - T_B) = -\lambda \left.\frac{dT}{dx}\right|_{x=s/2} = H\frac{s}{2} - \frac{\lambda(T_2 - T_1)}{s} \end{cases}$$

$$-\frac{2\lambda}{s}(T_2 - T_1) = \alpha(T_2 - T_B + T_1 - T_A)$$

$$T_2 = \frac{\frac{2\lambda T_1}{s} + \alpha(T_B - T_1 + T_A)}{\alpha + \frac{2\lambda}{s}} =$$

$$-H\frac{s}{2} - \frac{\lambda}{s}\left[\frac{\frac{2\lambda T_1}{s} + \alpha(T_B - T_1 + T_A)}{\alpha + \frac{2\lambda}{s}} - T_1\right] = \alpha(T_1 - T_A)$$

...

$$T_1 = \frac{-\left(\alpha + \frac{2\lambda}{s}\right)\frac{Hs}{2} - \frac{\alpha\lambda}{s}(T_B + T_A) + \alpha\left(\alpha + \frac{2\lambda}{s}\right)T_A}{\alpha\left(\alpha + \frac{2\lambda}{s}\right) + \frac{2\lambda^2}{s^2} - \frac{\alpha\lambda}{s} - \frac{\lambda}{s}\left(\alpha + \frac{2\lambda}{s}\right)}$$

09.10.13

UNITÀ DI MISURA

$$G = g\,(G)$$

g: risultato di un calcolo / di un'operazione di misura

Grandezze
- PRIMITIVE
- DERIVATE

$$[G] = [L]^a \cdot [M]^b \cdot [t]^c \cdot \ldots$$

- ESTENSIVE: dipendono dalla quantità di materia (es. massa)
- INTENSIVE: non " " " " (es. pressione, temperatura)
- SPECIFICHE: rapporti tra grandezze estensive (es. densità)

SISTEMI DI MISURA ASSOLUTI:
- MKS (m, kg, s)
- CGS (cm, g, s)
- MKSA (m, kg, s, A)

SISTEMI GRAVITAZIONALI/PRATICI: m, kg_f, s

↳ forza peso esercitata da un kilo

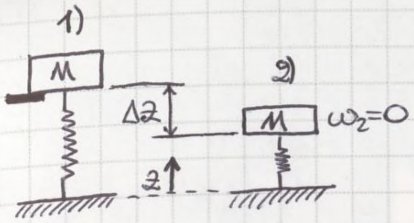
SISTEMA INTERNAZIONALE: m, kg, s, A, K, cd (candela), mol (mole)

GRANDEZZE DERIVATE: $Hz = s^{-1}$, $N = kg \cdot m/s^2$, $Pa = \frac{N}{m^2}$, $J = N \cdot m$, $W = J/s$

TEMPERATURA ASSOLUTA: $K = °C + 273{,}15 \rightarrow 0K = -273{,}15°C$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 41 di 98

2



$M = 10\,kg$

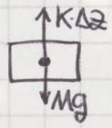
$\Delta z = 1{,}5\,mm$

$K = ?$

$Mg\Delta z = K\dfrac{\Delta z^2}{2}$ $\qquad \Delta E_{pot\,GRAV} = \Delta E_{pot\,EL}$

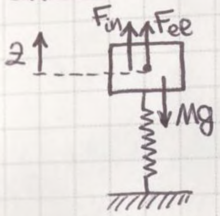
$K = \dfrac{2Mg}{\Delta z} \cong 130{,}8\,\dfrac{kN}{m}$

[$Mg = K\cdot\Delta z \qquad K = \dfrac{Mg}{\Delta z}$



NO! scrivere così significa riferirsi al punto in cui l'accelerazione è nulla]

oppure equilibrio dinamico:



$F_{in} = F_{ee} + F_{peso} \qquad M\ddot{z} = -Kz - Mg \qquad \ddot{z} + \dfrac{K}{M}z = -g$

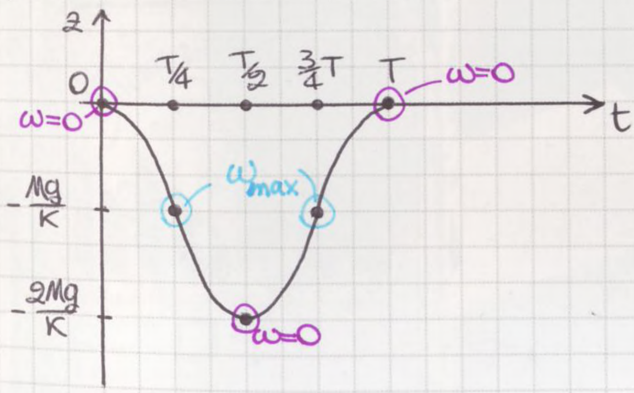
• omogenea associata: $\lambda^2 + \dfrac{K}{M}\lambda = 0 \qquad \lambda_{1,2} = \pm j\sqrt{\dfrac{K}{M}}$

$z(t)_{O.A.} = c_1\cdot\cos\left(\sqrt{\dfrac{K}{M}}\,t\right) + c_2\sin\left(\sqrt{\dfrac{K}{M}}\,t\right)$

• Particolare: $z(t)_p = C \qquad \dfrac{K}{M}C = -g \qquad C = -\dfrac{Mg}{K}$

$z(t) = c_1\cdot\cos\left(\sqrt{\dfrac{K}{M}}\,t\right) + c_2\sin\left(\sqrt{\dfrac{K}{M}}\,t\right) - \dfrac{Mg}{K}$

$\begin{cases} z(t=0) = 0 \\ \dot{z}(t=0) = 0 \end{cases} \Rightarrow c_1 = \dfrac{Mg}{K},\ c_2 = 0 \rightarrow z(t) = \dfrac{Mg}{K}\cos\left(\sqrt{\dfrac{K}{M}}\,t\right) - \dfrac{Mg}{K}$



$-\Delta z = -\dfrac{2Mg}{K}$

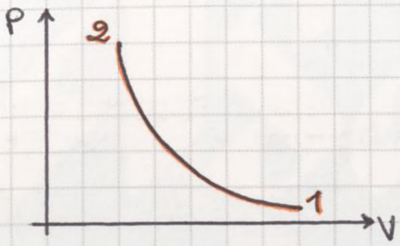
$K = \dfrac{2Mg}{\Delta z}$

B – Primo principio, sistemi aperti e chiusi

16.10.13

② $G_{V_1} = 150\,m^3/h$; $p_1 = 1\,bar$; $T_1 = 20°C$; $p_2 = 30\,bar$

a) ISOTERMA



$$\Phi - W_t = \cancel{\sum_j \pm G_j h_j} = 0 \rightarrow \Phi = W_t$$

$$W_t = G \cdot \ell_t$$

$$\underline{T_2 = T_1}$$

$$\ell_t = -\int_1^2 v\,dp = -RT\int_1^2 \frac{dp}{p} = -RT \ln\frac{p_2}{p_1}$$

$$R = \frac{\bar{R}}{\bar{M}} = \frac{\bar{R}}{28\,\frac{kg}{kmol}} = 297\,\frac{J}{kg\cdot K}$$

$$\ell_t = -RT_1 \ln\frac{p_2}{p_1} = -296{,}13\,\frac{kJ}{kg}$$

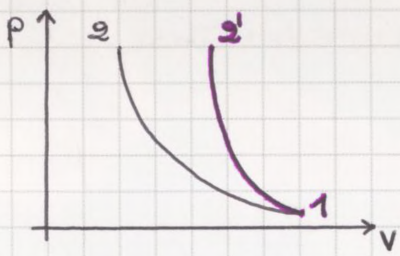
! Devo passare da portata in volume a portata in massa, facendo attenzione perchè G_V non si conserva mentre G sì → conosco G_V in entrata, quindi devo riferirmi sempre ai dati in entrata per calcolare ρ

$$G = \rho_1 \cdot G_{V_1}$$

$$\rho = \frac{1}{v} = \frac{p}{RT} \qquad \rho_1 = \frac{p_1}{RT_1} = 1{,}1486\,\frac{kg}{m^3} \rightarrow G = 0{,}04786\,kg/s$$

$$W_t = G \cdot \ell_t = \Phi = \underline{-14{,}17\,kW}$$

b) ADIABATICA



$$pv^{\gamma} = cost$$

$$\Phi = 0$$

$$-W_t = \sum_j \pm G_j h_j = G(h_{2'} - h_1)$$

trascuro ΔE_c e ΔE_p

③ $k = 100\,\frac{kN}{m}$; $p_0 = 1\,ata$; $T_0 = 20°C$; $\Delta x = 2cm$; $S_p = 100\,cm^2$; $V_1 = 1\,dm^3$;

$\gamma = 1{,}4$; $R = 287\,\frac{J}{kg \cdot K}$

$p_1 = p_0 = 1\,ata = 98100\,Pa = 0{,}981\,bar$

$pV = MRT \qquad M = \frac{pV}{RT} = 1{,}17\,g$

$V_2 = V_1 + S_p \Delta x = 0{,}0012\,m^3$

Teor. dell'energia : $L_i = L_t + L_0 + \cancel{\Delta E_p}^{=0} + \cancel{\Delta E_c}^{=0}$

$$\left.\begin{aligned} L_0 &= p_0 (V_2 - V_1) = 19{,}62\,J \\ L_t &= \frac{1}{2} k (x_2 - x_1)^2 = k \frac{(\Delta x)^2}{2} = 20\,J \end{aligned}\right\} \rightarrow L_i = 39{,}62\,J$$

$Q - L_i = \Delta U = U_2 - U_1 = M c_v (T_2 - T_1)$

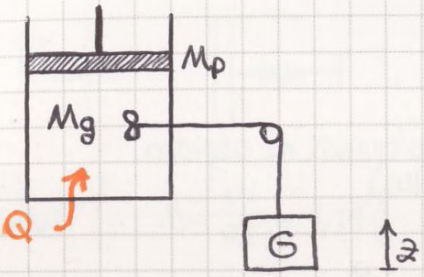
$T_2 = \frac{p_2 V_2}{MR} = 1069\,K$

$p_2 = p_0 + \frac{k \Delta x}{S_p} = 2{,}981\,bar$

$Q = L_i + M c_v (T_2 - T_1) = \underline{689\,J}$

(4) $M_g = 0{,}1\,kg$; N_2: $\bar{M} = 28\,kg/kmol$; $\gamma = 1{,}4$; $\Delta z = 1m$; $S_p = 1m^2$;

$M_p = 500\,kg$; $M_G = 12650\,kg$; $p_0 = 1bar$; $T_0 = 25°C$; $V_2 = 5V_1$



$$\cancelto{=0}{L_i} = L_t + \cancelto{=0}{L_o} + \Delta E_p + \cancelto{=0}{\Delta E_c}$$

$L_{t_G} = -\Delta E_p = -M_G g(z_2 - z_1) = 124097\,J$ (>0 perchè è lavoro tecnico <u>compiuto</u> dal sistema)

$L_{t_{gas}} = -L_{t_G} = -124097\,J$

Condizione iniziale: $V_1 = \dfrac{M_g R T_1}{p_1} = \dfrac{M_g \frac{\bar{R}}{\bar{M}} T_1}{p_1} = 0{,}0844\,m^3$

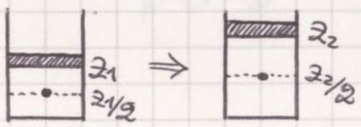
$p_1 = p_0 + \dfrac{M_p g}{S_p} = 104905\,Pa$

Condizione finale: $p_2 = p_1$ ma la trasf. <u>non</u> è necessariamente isobara!

$T_2 = \dfrac{p_2 V_2}{M_g R} = \dfrac{p_1 \cdot (5V_1)}{M_g \cdot R} = 1491\,K$

Teor. dell'energia cinetica per il gas: $L_i = L_t + L_o + \cancelto{=0}{\Delta E_c} + \cancelto{\approx 0}{\Delta E_p}$

ΔE_p <u>non</u> è nulla perchè il baricentro del gas varia →



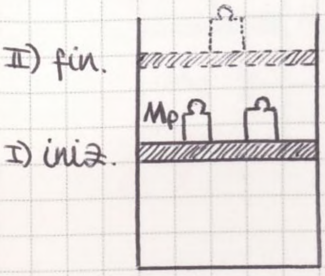
$\Delta E_p = M_g g \cdot \left(\dfrac{z_2}{2} - \dfrac{z_1}{2}\right) = 0{,}17\,J$

$z_i = \dfrac{V_i}{S_p}$

C – Primo e secondo principio, sistemi aperti e chiusi

23.10.13

① $M_g = 10\,kg$; $p_1 = 10\,bar$; $T_1 = 27°C$; $p_0 = 1\,bar$



$$p_P = \frac{M_P g}{S}$$

II principio: non tutti i processi termodinamici che soddisfano la conservazione dell'energia possono avvenire

Equilibrio di forze:

I) $p_1 \cancel{S} = p_0 \cancel{S} + 2 p_P \cancel{S}$ $\qquad p_P = \dfrac{p_1 - p_0}{2} = 4{,}5\,bar$

II) $p_2 = p_P + p_0 = 5{,}5\,bar$ $\qquad p_2 < p_1$: il gas espande

Teor. energia cinetica: $L_i = L_t + L_0 + \overset{=0}{\cancel{\Delta E_c}} + \overset{\approx 0}{\cancel{\Delta E_p}}$

$L_0 = p_0 (V_2 - V_1)$

$L_t = M_P g \Delta z = p_P S \Delta z = p_P (V_2 - V_1)$ → il lavoro tecnico equivale alla ΔE_P della massa M_P superstite

$L_i = L_t + L_0 = (p_P + p_0)(V_2 - V_1) = p_2 (V_2 - V_1)$

! Il gas subisce una trasf. adiabatica ma non reversibile:

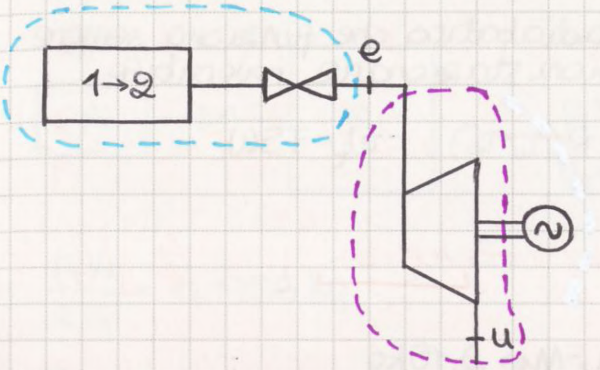
NO $pv^{\gamma} = cost$, ma vale sempre $Q = 0$

$\overset{=0}{\cancel{Q}} - L_i = U_2 - U_1 \qquad -p_2(V_2 - V_1) = M_g c_v (T_2 - T_1) = M_g \dfrac{R}{\gamma - 1}(T_2 - T_1) = \dfrac{1}{\gamma - 1}(p_2 V_2 - p_1 V_1)$

$M_g R T_i = p_i V_i$

$(\gamma - 1)(p_2 V_1 - p_2 V_2) = p_2 V_2 - p_1 V_1 \qquad \gamma p_2 V_1 - \gamma p_2 V_2 - p_2 V_1 + \cancel{p_2 V_2} = \cancel{p_2 V_2} - p_1 V_1$

3



$p_1 = 140\,bar$ $\qquad W_t = 75W$

$T_1 = T_2 = 20°C$

$p_e = 7\,bar$

$p_u = 1\,bar$

$t = 1h$

1) Decidere quale sistema usare : serbatoio + valvola

- VALVOLA DI LAMINAZIONE : adiabatica e isoentalpica (isodinamica)
- SERBATOIO : rigido, non scambia lavoro

$$\begin{cases} \Phi = \left(\frac{dU}{dt}\right)_{V_c} + G h_e \\ 0 = \left(\frac{dM}{dt}\right)_{V_c} + G \end{cases}$$

← sistema con nessun ingresso e un'uscita

$\frac{dM}{dt} = 0$: conservazione della massa

$$\Phi = \left(\frac{dU}{dt}\right)_{V_c} - \left(\frac{dM}{dt}\right)_{V_c} h_e$$

I) Per un gas ideale, h=cost equivale a T=cost (mentre p varia)

II) Il processo si arresta quando la pressione del serbatoio è uguale a p_e

I) $T_e = T_2 = 20°C$ $\qquad$ II) $p_2 = p_e$ $\Rightarrow h_e = h_2 = u_2 + p_2 v_2$

$p : p_1 \to p_2$

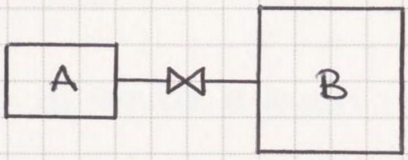
$$Q = (M_2u_2 - M_1u_1) - (M_2 - M_1)(u_2 + p_2v_2) = \cancel{M_2u_2} - \cancel{M_1u_1} - \cancel{M_2u_2} - M_2p_2v_2 + \cancel{M_1u_2} + M_1p_2v_2$$

si elidono perché $u_1 = u_2$

$$Q = M_1p_2v_2 - M_2p_2v_2 = (M_1 - M_2)RT_1$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 53 di 98

2



$V_A = 0{,}2\,m^3$ $\quad H_2: \bar{M} = 2\,kg/kmol$

$p_1 = 12\,bar$ $\quad T_1 = 22°C$

$V_B = 2V_A$

$$M_{H_2} = \frac{p_1 V_A}{R T_1} = 0{,}1956\,kg$$

$M_{H_2} = M_A + M_B$ → massa di H_2 che alla fine del processo si trova in A

Eq. di stato: 1) $p_1 V_A = (M_A + M_B) R T_1$

2) $p_2 V_A = M_A R T_{2A}$

$p_2 V_B = M_B R T_{2B}$

Dal punto di vista complessivo, il sistema è CHIUSO (no scambi di massa):

$\cancel{Q}^{=0} - \cancel{L_i}^{=0} = \Delta U \quad \rightarrow \Delta U = 0 \rightarrow U_2 = U_1$

↳ sistema rigido

↳ sistema adiabatico

$U_1 = (M_A + M_B)\, c_v (T_1 - T_{rif})$

$U_2 = M_A c_v (T_{2A} - T_{rif}) + M_B c_v (T_{2B} - T_{rif})$

$U_2 = U_1 \rightarrow \quad M_A \cancel{c_v} (T_{2A} - T_{rif}) + M_B \cancel{c_v} (T_{2B} - T_{rif}) = (M_A + M_B) \cancel{c_v} (T_1 - T_{rif})$

$(M_A + M_B) T_1 = M_A T_{2A} + M_B T_{2B}$

MRT = pV

$(M_A + M_B) R T_1 = M_A R T_{2A} + M_B R T_{2B} \rightarrow \quad p_1 V_A = p_2 V_A + p_2 V_B$ → $V_B = 2V_A$

$p_1 \cancel{V_A} = p_2 (3 \cancel{V_A}) \rightarrow p_2 = \frac{p_1}{3} = 4\,bar$

In A, la trasf. è adiabatica reversibile: $T_{2A}\, p_2^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = T_1\, p_1^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} \quad T_{2A} = T_1 \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = 215{,}6\,K$

Eq. di stato in A: $M_A = \frac{p_2 V_A}{R T_{2A}} = 0{,}0892\,kg$

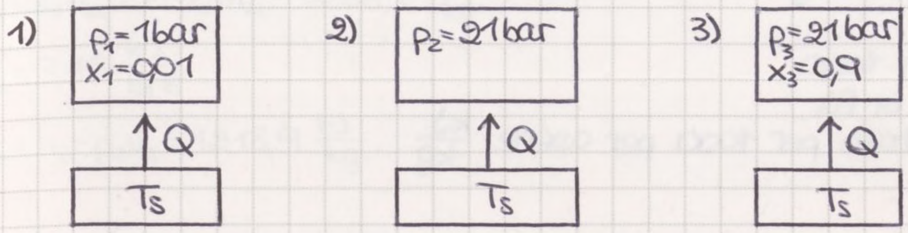
$M_B = M_{H_2} - M_A = 0{,}1064\,kg$

D - I e II principio: cambiamenti di fase, gas reali e miscele ideali 30.10.13

Problema di liquidi e vapori: non si conosce analiticamente l'equazione di stato → devo leggere i valori delle variabili di stato da tabelle e diagrammi (es. Mollier)

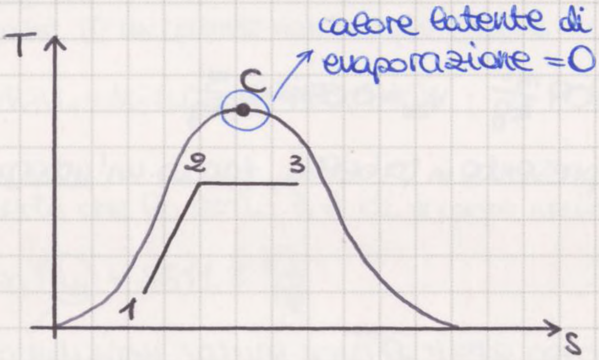
① $V = 0{,}15\,m^3$ $\quad p_1 = 1\,bar$ $\quad x_1 = 0{,}01$ $\quad T_S = 260°C$

$p_2 = 21\,bar$ $\quad x_3 = 0{,}9$



pentola a pressione

2→3 si apre la valvola e il vapore sfiata → p = cost



1→2: trasf. isocora
2→3: trasf. isobara

Stato 1: miscela liquido-vapore (vapore umido)

Nota p_1, dalle tabelle ricavo $T_1 = 99{,}6°C$; $v_{1L} = 0{,}0010434 \frac{m^3}{kg}$;
$v_{1V} = 1{,}694 \frac{m^3}{kg}$; $h_{1L} = 417{,}51 \frac{kJ}{kg}$; $h_{1V} = 2675{,}4 \frac{kJ}{kg}$; $s_{1L} = 1{,}3027 \frac{kJ}{kg \cdot K}$;
$s_{1V} = 7{,}3598 \frac{kJ}{kg \cdot K}$

Problema: la miscela contiene sia liquido sia vapore → devo considerare la media pesata sulle frazioni di massa!

Dato che il sistema non scambia massa e la trasformazione è isocora:

$M_2 = M_1$ e $V = cost \rightarrow v_2 = v_1 = 0{,}018\ \frac{m^3}{kg} \rightarrow$ stato di vapore umido

Calcolo il titolo: $x_2 = \frac{v_2 - v_{2L}}{v_{2V} - v_{2L}} = 0{,}1791$

Leggo da tabella: $h_{2L} = 920{,}0\ \frac{kJ}{kg}$; $h_{2V} = 2799{,}7\ \frac{kJ}{kg}$; $s_{2L} = 2{,}47021\ \frac{kJ}{kg \cdot K}$;

$s_{2V} = 6{,}32152\ \frac{kJ}{kg \cdot K}$

$h_2 = x_2 h_{2V} + (1-x_2) h_{2L} = 1256{,}7\ \frac{kJ}{kg}$

$s_2 = 3{,}16\ \frac{kJ}{kg \cdot K}$

$u_2 = h_2 - p_2 v_2 = 1218{,}9\ \frac{kJ}{kg}$

Eq. di conservazione dell'energia al processo $1 \rightarrow 2$:

$Q_{12} - \underbrace{\cancel{L_{12}}}_{=0} = U_2 - U_1$

=0 perché il recipiente non compie lavoro

$Q_{12} = M_2 u_2 - M_1 u_1 = M_1 (u_2 - u_1) = 6515\ kJ$

Sappiamo di certo che lo stato 3 è di vapore umido.

$h_3 = x_3 h_{2V} + (1-x_3) h_{2L} = 2611{,}7\ \frac{kJ}{kg}$

le condizioni sature sono le stesse perché p è la stessa (anche se varia x)

$v_3 = x_3 v_{2V} + (1-x_3) v_{2L} = 0{,}08536\ \frac{m^3}{kg}$

$s_3 = 5{,}9364\ \frac{kJ}{kg \cdot K}$; $u_3 = h_3 - p_2 v_3 = 2432{,}0\ \frac{kJ}{kg}$

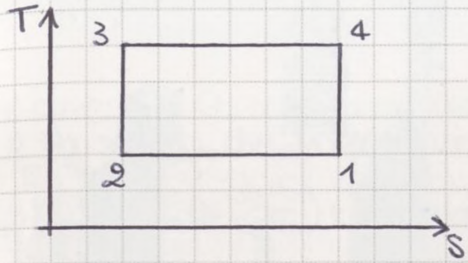
$M_3 = \frac{V}{v_3} = 1{,}753\ kg$

$\rightarrow \Delta M = |M_3 - M_2| = |M_3 - M_1| = \underline{6{,}593\ kg}$

5 Gas non ideale

$$p = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{V^2}$$

! Il ciclo di Carnot ha sempre η proporzionale alle temperature, qualunque sia il gas di cui si parla (ideale e non)



$\underline{1 \to 2}$

$$l_i = \int_1^2 p\,dv = \int_1^2 \frac{RT}{V-b}\,dv - \int_1^2 a\frac{dv}{V^2} = RT_1 \ln\left(\frac{V_2-b}{V_1-b}\right) + a\left(\frac{1}{V_2} - \frac{1}{V_1}\right)$$

$u(T,p)$ oppure $u(T,v) \to$ <u>non</u> è più $u(T)$!

$$\Delta u_{12} = \underbrace{c_v\,\cancel{(T_2 - T_1)}}_{=0 \text{ perché è un'isoterma}} - a\left(\frac{1}{V_2} - \frac{1}{V_1}\right)$$

Eq. di conservazione dell'energia: $q_{12} - l_{i_{12}} = \Delta u_{12}$

$$q_{12} = (u_2 - u_1) + l_{i_{12}} = \cancel{-a\left(\frac{1}{V_2} - \frac{1}{V_1}\right)} + RT_1 \ln\left(\frac{V_2-b}{V_1-b}\right) \cancel{+ a\left(\frac{1}{V_2} - \frac{1}{V_1}\right)} = RT_1 \ln\left(\frac{V_2-b}{V_1-b}\right)$$

$\underline{2 \to 3}$

Il processo è un'adiabatica reversibile $\to$ processo isoentropico

$$\underbrace{\cancel{S_3 - S_2}}_{=0 \text{ perché isoentropico}} = c_v \ln\left(\frac{T_3}{T_2}\right) + R\ln\left(\frac{V_3-b}{V_2-b}\right) \qquad \ln\left(\frac{V_3-b}{V_2-b}\right) = -\frac{c_v}{R}\ln\left(\frac{T_3}{T_2}\right)$$

$$\frac{V_3-b}{V_2-b} = \left(\frac{T_2}{T_3}\right)^{\frac{c_v}{R}}$$

Adiabatica reversibile: $l_{i_{23}} = -\Delta u_{23} = -\left[c_v(T_3 - T_2) - a\left(\frac{1}{V_3} - \frac{1}{V_2}\right)\right]$

$\underline{3 \to 4}$ isoterma

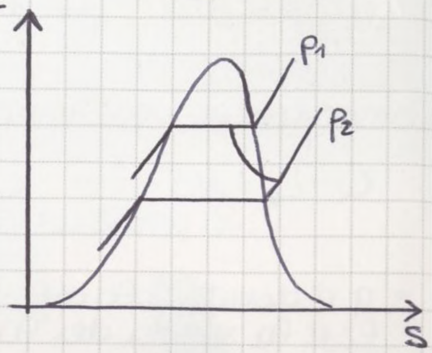
$$l_{i_{34}} = RT_3 \ln\left(\frac{V_4-b}{V_3-b}\right) + a\left(\frac{1}{V_4} - \frac{1}{V_3}\right)$$

$$q_{34} = RT_3 \ln\left(\frac{V_4-b}{V_3-b}\right)$$

③ $p_1 = 15\,bar$: miscela liquido-vapore

06.11.13

$p_2 = 2\,bar$ $\quad T_2 = 150°C$



Dalle tabelle di saturazione leggo: $p_2 \to T_s = 120°C$

$T_2 > T_s \to$ vapore surriscaldato

Dal diagramma di Mollier:

interseco $T = 150°C$ e $p = 2\,bar$ e trovo $h_2 \cong 2770\,\frac{kJ}{kg}$; $s_2 \cong 7{,}25\,\frac{kJ}{kg \cdot K}$

$\underline{T_1 = 198{,}2°C}$ lo stato 1 è sotto la T limite; T_1 rimane cost. fino al cambiamento di stato

$h_{1e} = 844{,}32\,\frac{kJ}{kg}$; $h_{1v} = 2789{,}75\,\frac{kJ}{kg}$; $s_{1e} = 2{,}31365\,\frac{kJ}{kg \cdot K}$; $s_{1v} = 6{,}4413\,\frac{kJ}{kg \cdot K}$

! La trafilazione è isoentalpica $\to h_1 = h_2 < h_{1v}$

Trovo il titolo: $x_1 = \frac{h_1 - h_{1e}}{h_{1v} - h_{1e}} = \underline{0{,}99}$

$s_1 = (1 - x_1)\, s_{1e} + x_1 s_{1v} = 6{,}3994\,\frac{kJ}{kg \cdot K}$

$\Delta s = s_2 - s_1 = \underline{0{,}85\,\frac{kJ}{kg \cdot K}}$

7 $n_{CO_2} = 0{,}1\,kmol$

$n_{O_2+N_2} = n_{aria} = 0{,}9\,kmol$

$T_0 = 300K$; $p_0 = 1bar$

processo irreversibile → devo spendere lavoro

$p_{CO_2} = y_{CO_2} \cdot p_1 = y_{CO_2} p_0 = 0{,}1\,bar$

$p_{aria} = y_{aria} p_1 = 0{,}9\,bar$

$$V = (n_{CO_2} + n_{aria}) \frac{\bar{R} T_1}{p_1} = 24{,}9429\,m^3$$

modello di Amagat-Leduc: $V = V_{CO_2} + V_{aria}$

$$V_{1CO_2} = \frac{n_{CO_2} \bar{R} T_1}{p_1} \quad ; \quad V_{1aria} = \frac{n_{aria} \bar{R} T_1}{p_1}$$

Nello stato finale i due componenti sono separati e posso applicare a ciascuno l'equazione di stato:

$$V_{2CO_2} = n_{CO_2} \frac{\bar{R} \cdot T_{2CO_2}}{p_2} \quad ; \quad V_{2aria} = n_{aria} \frac{\bar{R} \cdot T_{2aria}}{p_2} \quad \begin{cases} \bullet\, p_{2CO_2} = p_{2aria} & \text{(equilibrio barometrico)} \\ \bullet\, T_{2CO_2} = T_{2aria} = T_1 & \text{(processo isotermo)} \end{cases}$$

in più, dato che $V = V_{1CO_2} + V_{1aria} = V_{2CO_2} + V_{2aria} \Rightarrow p_1 = p_2$

Processo isotermo: $Q - L_{12} = \Delta U = 0$

Voglio trovare la <u>minima</u> spesa di lavoro, cioè il lavoro reversibile (ideale)

$$L_{12}^{rev} = Q_{12}^{rev}$$

$$S_1 = n_{CO_2}\left[\bar{c}_{pCO_2} \ln\left(\frac{T_1}{T_0}\right) - \bar{R} \ln\left(\frac{p_{1CO_2}}{p_0}\right)\right] + n_{aria}\left[\bar{c}_{p\,aria} \ln\left(\frac{T_1}{T_0}\right) - \bar{R} \ln\left(\frac{p_{1aria}}{p_0}\right)\right]$$

$$S_2 = n_{aria}\left[\bar{c}_{p\,aria} \ln\left(\frac{T_2}{T_0}\right) - \bar{R} \ln\left(\frac{p_2}{p_0}\right)\right] + n_{CO_2}\left[\bar{c}_{pCO_2} \ln\left(\frac{T_2}{T_0}\right) - \bar{R} \ln\left(\frac{p_2}{p_0}\right)\right]$$

$$S_2 - S_1 = n_{CO_2}\left[-\bar{R} \ln\left(\frac{p_2}{p_{1CO_2}}\right)\right] + n_{aria}\left[-\bar{R} \ln\left(\frac{p_2}{p_{aria}}\right)\right]$$

8) $G_A = 1{,}09 \ kg/s \quad T_A = 26°C \quad \varphi_A = 0{,}5$

$G_E = 0{,}12 \ kg/s \quad T_E = 34°C \quad \varphi_E = 0{,}7$ } RICIRCOLO

$p = 1 \ atm$ (miscelazione adiabatica, trasformazione isobara)

$$x_A = 0{,}622 \frac{\varphi_A \cdot p_{vsA}}{p - \varphi_A p_{vsA}} = 0{,}01050 \ \frac{kg_v}{kg_a}$$ NON è il titolo!

da tabella: $p_{vsA} = 0{,}03363 \ bar$

$$h_A = c_{pa} T_A + (c_{pv} T_A + h_0) x_A = 52{,}76 \ \frac{kJ}{kg}$$

$c_{pa} = 1 \ \frac{kJ}{kg \cdot K}$, $c_{pv} = 1{,}9 \ \frac{kJ}{kg \cdot K}$, $h_0 = 2500 \ \frac{kJ}{kg}$

$p_{vsE} = 0{,}05323 \ bar$ (da tabella)

$$x_E = 0{,}622 \frac{\varphi_E p_{vsE}}{p - \varphi_E p_{vsE}} = 0{,}02375$$

$$h_E = c_{pa} T_E + (c_{pv} T_E + h_0) x_E = 94{,}90 \ \frac{kJ}{kg}$$

Equilibrio di flussi entalpici: $\begin{cases} G_A h_A + G_E h_E = G_M h_M \\ G_M = G_A + G_E \end{cases}$

$$\rightarrow h_M = \frac{G_A h_A + G_E h_E}{G_A + G_E} = \underline{56{,}94 \ \frac{kJ}{kg}}$$

G_A: portata di aria secca, che porta con sè una quantità $G_A x_A$ di vapore

$$x = \frac{M_v}{M_a} = \frac{G_v}{G_a}$$

Ide MUUUh!

$$G_A x_A + G_E x_E = G_M x_M \qquad x_M = \frac{G_A x_A + G_E x_E}{G_A + G_E} = \underline{0{,}01181 \ \frac{kg_v}{kg_a}}$$

$$h_M = c_{pa} T_M + (c_{pv} T_M + h_0) x_M = T_M (c_{pa} + c_{pv} x_M) + h_0 x_M$$

$$T_M = \frac{h_M - h_0 x_M}{c_{pa} + c_{pv} x_M} = \underline{26{,}8°C}$$

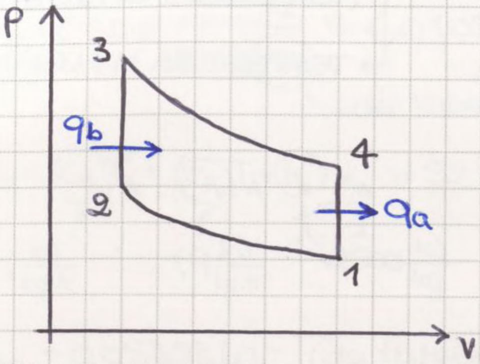
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 67 di 98

E - Cicli di riferimento per motori termici a gas

13.11.13

① $T_3 = 1390°C$; $T_1 = 15°C$; $q_b = 190 \frac{kcal}{kg}$; $T_s = 1500°C$; $T_0 = 15°C$

Ciclo Otto



Supponiamo che il fluido rimanga aria in tutte le trasformazioni:

$R = 287 \frac{J}{kg \cdot K}$

$\gamma = 1{,}4$

$(1 kcal = 4186 J)$

$\underline{2 \to 3}$ $\quad q_b = c_v (T_3 - T_2) = \frac{R}{\gamma - 1}(T_3 - T_2)$ $\qquad T_2 = 281{,}3°C$

$r_v = \frac{v_1}{v_2}$

$\underline{1 \to 2}$ adiabatica reversibile: $T_1 v_1^{\gamma-1} = T_2 v_2^{\gamma-1} \rightarrow \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\gamma-1} = r_v^{\gamma-1}$

$r_v = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{1}{\gamma-1}} = \underline{5{,}136}$

$\eta = 1 - r_v^{1-\gamma} = \underline{0{,}48}$

Stato 3: $v_3 = \frac{RT_3}{P_3} = v_2$ → perchè $2 \to 3$ è un'isocora

Stato 1: $v_1 = \frac{RT_1}{P_1}$

$r_v = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\cancel{R}T_1}{P_1} \cdot \frac{P_3}{\cancel{R}T_3} \rightarrow \frac{P_3}{P_1} = \frac{T_3}{T_1} r_v = \underline{29{,}64}$

Le trasformazioni sono tutte reversibili, quindi le irreversibilità interne sono tutte nulle:

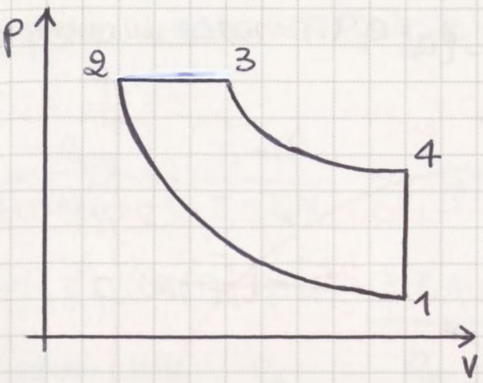
$$S_3 - S_2 = \int_2^3 \frac{\delta q}{T} + \int_2^3 \delta S_{irr} = \int_2^3 \frac{c_v dT}{T} + \int_2^3 \delta S_{irr} = c_v \ln\left(\frac{T_3}{T_2}\right) + S_{irr}$$

$$S_3 - S_2 = \int_2^3 c_v \frac{dT}{T} + \int_2^3 R \frac{dv}{v} = c_v \ln\left(\frac{T_3}{T_2}\right) + \underbrace{\cancel{R \ln\left(\frac{v_3}{v_2}\right)}}_{=0 \text{ perchè } v_3 = v_2}$$

$\Rightarrow S_{irr} = 0$

I relazione di Gibbs

②



$T_1 = 30°C$
$p_1 = 15 psi$
$T_2 = 400°C$
$T_3 = 1700°C$

$$\eta = 1 - r_v^{1-\gamma} \frac{r_c^\gamma - 1}{\gamma(r_c - 1)}$$

1→2 adiabatica reversibile: $T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_2^{\gamma-1}$ $\quad \frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\gamma-1} = r_v^{1-\gamma}$

$$r_c = \frac{V_3}{V_2} = \frac{V_3}{V_1} \cdot \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_3}{V_1} \cdot r_v = \frac{\cancel{R}T_3}{p_3} \cdot \frac{p_1}{\cancel{R}T_1} \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\frac{1}{1-\gamma}} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\frac{1}{1-\gamma}} \cdot \frac{T_3}{T_1} \cdot \frac{p_1}{p_2}$$

→ $= p_3$ perchè 2→3 è un'isobara

$$T_1 p_1^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = T_2 p_2^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} \rightarrow \frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{\gamma}{1-\gamma}} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{-\frac{\gamma}{1-\gamma}}$$

$$\rightarrow r_c = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\frac{1}{1-\gamma}} \cdot \frac{T_3}{T_1} \cdot \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{-\frac{\gamma}{1-\gamma}} = \frac{\cancel{T_1}}{T_2} \cdot \frac{T_3}{\cancel{T_1}} = \frac{T_3}{T_2}$$

$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2} \cdot \frac{(T_3/T_2)^\gamma - 1}{\gamma\left(\frac{T_3}{T_2} - 1\right)} = \underline{0{,}416}$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 71 di 98

NON posso usare $\cancel{T_1 T_3 = T_2 T_4}$ perchè vale solo se tutte le trasformazioni sono reversibili !

$$\boxed{\eta_{is_e} = \frac{\ell_{t,e}}{\ell_{t,e}^{id}}} = \frac{T_3 - T_4}{T_3 - T_{4id}} \rightarrow T_4 = T_3 - \eta_{is_e}(T_3 - T_{4id}) = 799\,K$$

$$\ell_n = R\frac{\gamma}{\gamma - 1}(T_1 - T_2 + T_3 - T_4) = \underline{317{,}4\ \frac{kJ}{kg}} \quad < \ell_n^{id}$$ giusto perchè diminuisce la capacità di fornire lavoro

$$\eta = \frac{\text{effetto utile}}{\text{spesa}} = \frac{\ell_n}{q_{23}} = \frac{\ell_n}{c_p(T_3 - T_2)} = \underline{0{,}388} \quad < \eta^{id}$$

isobara

Il riscaldamento prodotto dall'attrito dilata il gas, ma io voglio comprimerlo
→ devo spendere più lavoro per la compressione

Durante l'attrito scambio simultaneamente calore e lavoro:

$\ell_{ai,c} = q_{12}$ → calore scambiato lungo una politropica di esponente da specificare

$$\ell_{ai,c} = q_{12} = c_c(T_2 - T_1)$$

$p_1 v_1^{n_c} = p_2 v_2^{n_c}$: POLITROPICA EQUIVALENTE che "invento" per quantificare l'effetto dell'attrito

$$T_1 p_1^{\frac{1-n_c}{n_c}} = T_2 p_2^{\frac{1-n_c}{n_c}} \qquad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{1-n_c}{n_c}} = r_p^{\frac{n_c - 1}{n_c}}$$

$$\frac{n_c - 1}{n_c} = \frac{\ln(T_2/T_1)}{\ln(r_p)} \rightarrow n_c = \frac{1}{1 - \frac{\ln(T_2/T_1)}{\ln(r_p)}} = 1{,}445$$

$$n_c = \frac{c_c - c_p}{c_c - c_v} \rightarrow c_c = \frac{n_c c_v - c_p}{n_c - 1} = \frac{c_v(n_c - \gamma)}{n_c - 1} = \frac{R(n_c - \gamma)}{(\gamma - 1)(n_c - 1)} = 0{,}073\ \frac{kJ}{kg \cdot K}$$

$$\Rightarrow \ell_{ai,c} = c_c(T_2 - T_1) = 23{,}8\ \frac{kJ}{kg}$$

$$\ell_{ai,e} = c_e(T_4 - T_3)$$

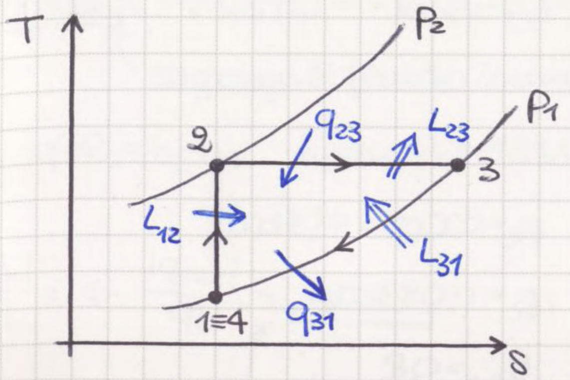
$$p_3 v_3^{n_e} = p_4 v_4^{n_e} \qquad T_3 p_3^{\frac{1-n_e}{n_e}} = T_4 p_4^{\frac{1-n_e}{n_e}} \qquad \frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{p_3}{p_4}\right)^{\frac{1-n_e}{n_e}} = r_p^{\frac{n_e - 1}{n_e}}$$

$\ell_{ai} = \ell_{ai,c} + \ell_{ai,e}$ $\qquad \Delta h = c_p(T_2 - T_{2id})$ lavoro che spendo in più rispetto al caso ideale

$\ell_{tot} = \ell_{ai} + \Delta h$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 73 di 98

4



(1) $p_1 = 1{,}5\,bar$, $T_1 = 200°C$ (3) $T_3 = T_2$, $p_3 = p_1$

(1→2) $M(h_2 - h_1) = 400\,kJ$ (4) ≡ (1)

<u>1→2</u>

$$\Delta h = 400\,\frac{kJ}{kg} \qquad \Delta h = c_p(T_2 - T_1) = R\frac{\gamma}{\gamma-1}(T_2 - T_1) \qquad T_2 = 598{,}2\,°C$$

$$\cancel{q} - \ell_{12} = \Delta u = c_v(T_2 - T_1) \qquad \ell_{12} = c_v(T_1 - T_2) = \frac{R}{\gamma-1}(T_1 - T_2) = \underline{-285{,}7\,\frac{kJ}{kg}}$$

<u>2→3</u>

$$q_{23} = \ell_{23} = \int_2^3 p\,dv = RT_2 \ln\left(\frac{v_3}{v_2}\right)$$

$$T_2 v_2^{\gamma-1} = T_3 v_3^{\gamma-1} \qquad v_2 = v_1\left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\frac{1}{\gamma-1}} = \frac{RT_1}{p_1}\left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\frac{1}{\gamma-1}}$$

$$v_3 = \frac{RT_3}{p_3} = \frac{RT_2}{p_1} \quad ; \quad v_1 = \frac{RT_1}{p_1}$$

$$\frac{v_3}{v_2} = \frac{RT_2}{p_1}\cdot\frac{p_1}{RT_1}\left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{1}{\gamma-1}} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \rightarrow \ell_{23} = RT_2\ln\left(\frac{v_3}{v_2}\right) = RT_2\ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} = \underline{534{,}5\,\frac{kJ}{kg}} = q_{23}$$

<u>3→1</u>

$$q_{31} = c_p(T_1 - T_3) = \underline{-400\,\frac{kJ}{kg}} \qquad \ell_{31} = q_{31} - c_v(T_1 - T_3) = (c_p - c_v)(T_1 - T_3) = R(T_1 - T_3) = \underline{-114{,}3\,\frac{kJ}{kg}}$$

$$\ell_n = \ell_{12} + \ell_{23} + \ell_{31} = 134{,}5\,\frac{kJ}{kg} \quad ; \quad q_n = \overset{=0}{\cancel{q_{12}}} + q_{23} + q_{31} = 134{,}5\,\frac{kJ}{kg} \rightarrow \ell_n = q_n \quad (q - \ell = \Delta u = 0)$$

$$\eta = \frac{\ell_n}{q_{23}} = \underline{0{,}252}$$

$$l_c = -\int_1^2 v\,dp = -v(p_2-p_1) = -v_1(p_2-p_1) = -4{,}2\ \frac{kJ}{kg} \qquad \ll l_e\ !$$

suppongo il fluido incomprimibile ($v=cost$)

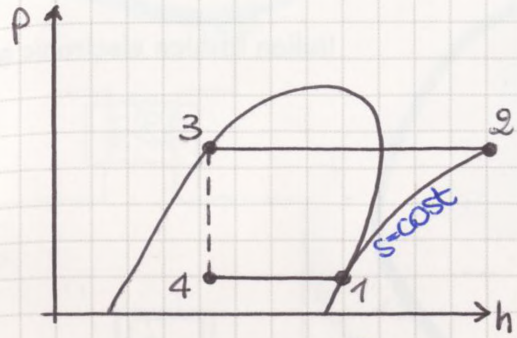
$\underline{1\to2}$ $\cancel{q} - l_c = h_2 - h_1 \qquad h_2 = h_1 - l_c = 181{,}0\ \frac{kJ}{kg}$

$$\eta = \frac{|l_n|}{q} = 1 - \frac{|q_{out}|}{q_{in}} = \underline{0{,}274}$$

$$\begin{cases} q_{in} = h_3 - h_2 = 2618{,}9\ kJ/kg \\ |q_{out}| = h_4 - h_1 = 1900{,}3\ \frac{kJ}{kg} \end{cases}$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 77 di 98

3 vapori di R134a : $p_c = 8\,bar$ (compressione adiabatica reversibile)
$p_e = 1\,bar$



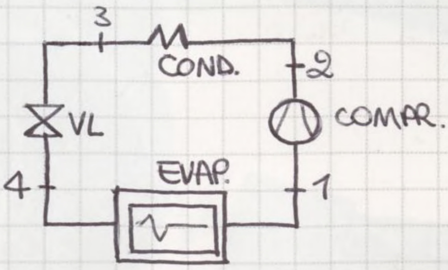


Tabelle: $\begin{cases} h_1 = 382{,}6\ \frac{kJ}{kg} \\ s_1 = 1{,}7475\ \frac{kJ}{kg \cdot K} \end{cases}$ $p_e = 1\,bar$

$h_3 = 243{,}65\ \frac{kJ}{kg} = h_4$

Stato 2 $p_2 = p_c$; $s_2 = s_1$

da Mollier leggo $h_2 = 425{,}81\ \frac{kJ}{kg}$

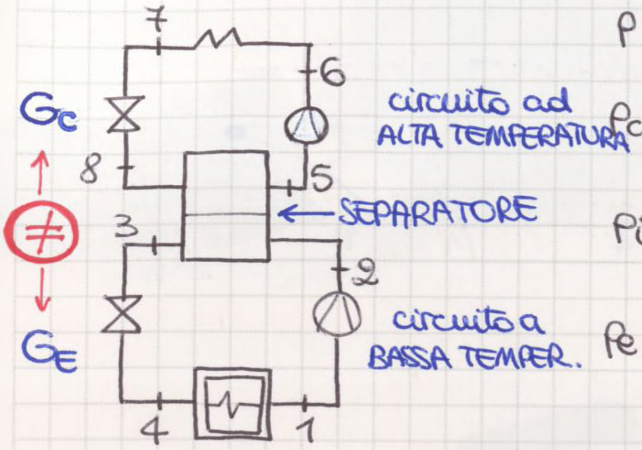
$l_c = (h_1 - h_2) = -43{,}21\ \frac{kJ}{kg}$ (spesa)

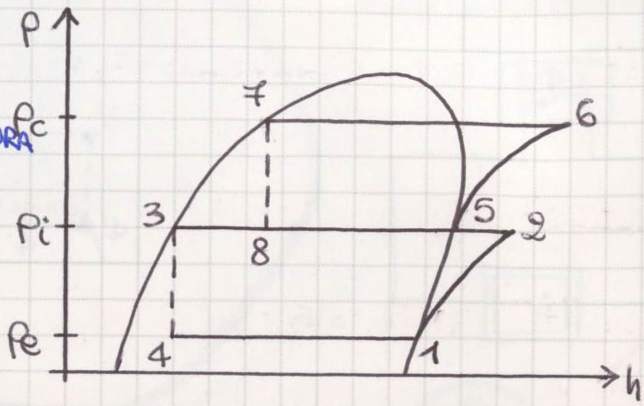
$q_e = h_1 - h_4 = 138{,}95\ \frac{kJ}{kg}$ (effetto utile)

$COP = \frac{q_e}{|l_c|} = \underline{3{,}22}$

⑤ Vapori di R134a $T_e = -35°C$; $T_c = 50°C$

$p_i = \sqrt{p_e \cdot p_c}$ $\Phi_e = 50 \frac{Mcal}{h}$





Da tabelle: $p_e(T_e) = 0{,}66\,bar$
$p_c(T_c) = 13{,}18\,bar$

Le temperature di esercizio a cui funziona l'impianto sono quelle a cui avvengono i cambiamenti di stato

$p_i = \sqrt{p_e p_c} = 2{,}95\,bar$

All'interno del separatore si ha vapore (da 2) e liquido (da 8); gli stati 3 e 5 sono miscelazione di 2 e 8

BASSA TEMP.

Stato 1 da tabelle $\begin{cases} h_1 = 377{,}17\ kJ/kg \\ s_1 = 1{,}7575\ \frac{kJ}{kg \cdot K} \end{cases}$

Stato 2 1→2 è adiabatica reversibile $s_2 = s_1$; $p_2 = p_i$
tabelle $\begin{cases} h_2 = 407{,}22\ kJ/kg \\ T_2 = 9{,}7°C \end{cases}$

Stato 3 $h_3 = 176{,}89 \frac{kJ}{kg} = h_4$ la laminazione è isoentalpica

ALTA TEMP.

Stato 5 $h_5 = 398{,}72\ kJ/kg$; $s_5 = 1{,}7270 \frac{kJ}{kg \cdot K}$

Stato 7 $h_7 = 271{,}62 \frac{kJ}{kg} = h_8$ laminazione

Stato 6 $s_6 = s_5$; $p_6 = p_c$
tabelle $\begin{cases} h_6 = 423{,}88\ kJ/kg \\ T_6 = 55{,}3°C \end{cases}$
temp. dello stato più caldo (deve essere distante dai 100°C o si danneggia il compressore)

27.11.13

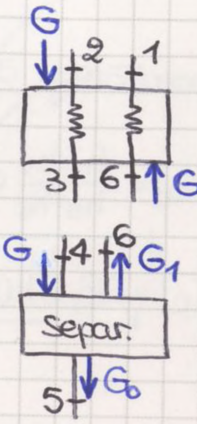
① $G_0 = 75\,kg/h$; $p_5 = 1\,atm$; $p_1 = 1\,atm$; $t_1 = 25°C$; $p_2 = 102\,atm$; $t_2 = t_1$; $\eta_{iT} = 0,5$

1→2 compressione a più stadi (almeno 3)

<u>Stato 1 (alimentazione)</u>: quasi gas $h_1 = 116,5\,\frac{BTU}{lb} = 270,98\,\frac{kJ}{kg}$; $s_1 = 1,53\,\frac{BTU}{lb\,°R} = 6,4058$;

<u>Stato 2</u>: $h_2 = 246,55\,\frac{kJ}{kg}$; $s_2 = 5,1498\,\frac{kJ}{kg\cdot K}$

<u>Stato 5</u>: $h_5 = -132,6\,\frac{kJ}{kg}$ <u>Stato 6</u>: $h_6 = 79,8\,\frac{kJ}{kg}$



Bilancio di entalpie nello scambiatore: $\underbrace{\cancel{\Phi}}_{=0} - \underbrace{\cancel{W_t}}_{=0} = \sum_j \pm G_j h_j$

$$\overbrace{G h_2 + G_1 h_6}^{ingresso} = \overbrace{G h_3 + G_1 h_1}^{uscita} \qquad G(h_2 - h_3) = G_1(h_1 - h_6)$$

$$G = G_0 + G_1 \quad G_1 = G - G_0 \rightarrow G(h_2 - h_3) = (G - G_0)(h_1 - h_6)$$

RESA dell'impianto: $\varepsilon_L = \frac{G_0}{G}$

Bilancio nel separatore: $G h_4 = G_0 h_5 + G_1 h_6$

$h_4 = h_3$ perché 4 è l'uscita della laminazione

$$G h_3 = G_0 h_5 + (G - G_0) h_6$$

$$G = G_0 \frac{h_1 - h_5}{h_1 - h_2} = \underline{1239\,kg/h} ; \quad h_3 = h_4 = 67,0\,\frac{kJ}{kg}$$

$$(q_{12})_{rev} - (\ell_{12})_{rev} = h_2 - h_1 \; ; \quad (\ell_{12})_{rev} = (q_{12})_{rev} - (h_2 - h_1) = -349,78\,\frac{kJ}{kg}$$

$(q_{12})_{rev} = T_1(s_2 - s_1)$

$$P_C = \frac{G \cdot (\ell_{12})_{rev}}{\eta_{iT}} = \underline{-240,8\,kW}$$

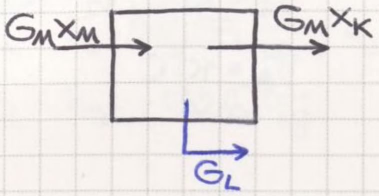
$\eta_{iT} = \frac{(\ell_{12})_{rev}}{\ell_{12}}$

$P_C = G \cdot \ell_{12}$

Flusso nel deumidificatore: $\Phi_F = G_M(h_K - h_M) = \underline{-20,3\,kW}$

Flusso di riscaldamento: $\Phi_C = G_M(h_I - h_K) = \underline{1,7\,kW}$

Portata di liquido: $G_L = G_M(x_M - x_K) \cong \underline{11,3\,\frac{kg}{h}}$

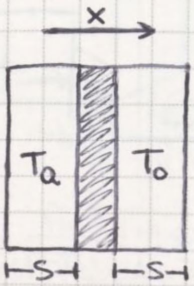


© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 85 di 98

04.12.13

G - Conduzione stazionaria attraverso strati piani e cilindrici

(1)



$\lambda_a = 30 \frac{kcal}{h\,m\,°C}$; $\lambda_o = 70 \frac{kcal}{h\,m\,°C}$; $s = 50mm$

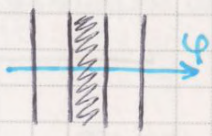
$T_a = 100°C$; $T_o = 50°C$; $\varphi_R = 20 \frac{kW}{m^2}$

- condizioni stazionarie → flusso uniforme
- direzione x prevalente

POSTULATO DI FOURIER : $\boxed{\varphi = -\lambda \frac{dT}{dx}}$ legge contro gradiente

$$\begin{cases} \varphi_a = \frac{\lambda_a}{s}(T_a - T_R) \\ \varphi_o = \frac{\lambda_o}{s}(T_R - T_o) \\ \varphi_a + \varphi_R = \varphi_o \end{cases}$$

scelta arbitraria della direzione del flusso!



$$\begin{cases} \varphi_a \frac{s}{\lambda_a} = T_A - T_R \\ (\varphi_a + \varphi_R) \frac{s}{\lambda_o} = T_R - T_o \end{cases}$$

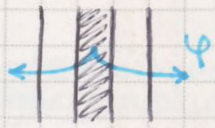
$\varphi_a \left(\frac{s}{\lambda_a} + \frac{s}{\lambda_o}\right) + \varphi_R \frac{s}{\lambda_o} = T_a - T_o$

$\underline{T_R = 73{,}6°C}$

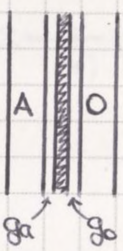
$$\varphi_a = \frac{T_a - T_o - \varphi_R \frac{s}{\lambda_o}}{\frac{s}{\lambda_a} + \frac{s}{\lambda_o}} = 15{,}8 \frac{Mcal}{h\,m^2} = \underline{= 18425 \frac{W}{m^2}}$$

Se $\varphi_R = 140 \frac{kW}{m^2}$: $\varphi_a = -17585 \frac{W}{m^2}$ il verso che avevo imposto non è corretto

$T_R = 125{,}2°C$



Caso reale: $g_a = g_o = 1mm$; $\lambda_F = 0{,}03 \frac{W}{mK}$; $\frac{S_{ca}}{S} = \frac{S_{co}}{S} = 0{,}02$



$\varphi_a' = \frac{\lambda_a}{s}(T_a - T_{a_{int}})$ $\quad \frac{s}{\lambda_a}\varphi_a' = T_a - T_{a_{int}}$ $\quad \varphi_a' = \frac{T_{a_{int}} - T_R'}{R_{CTa}}$ $\quad R_{CTa}\varphi_a' = T_{a_{int}} - T_R'$

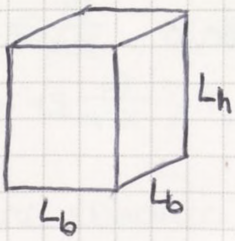
$\varphi_o' = \frac{T_R' - T_{o_i}}{R_{CTo}}$ $\quad R_{CTo}\varphi_o' = T_R' - T_{o_i}$

$\varphi_o' = \frac{\lambda_o}{s}(T_{o_i} - T_o)$ $\quad \frac{s}{\lambda_o}\varphi_o' = (T_{o_i} - T_o)$

$\varphi_a' + \varphi_R' = \varphi_o'$

$$\varphi_a'\left(\frac{s}{\lambda_a} + R_{CTa}\right) + \varphi_o'\left(\frac{s}{\lambda_o} + R_{CTo}\right) = T_a - T_o \rightarrow \varphi_a'\left[\left(\frac{s}{\lambda_a} + R_{CTa}\right) + \left(\frac{s}{\lambda_o} + R_{CTo}\right)\right] + \varphi_R\left(R_{CTo} + \frac{s}{\lambda_o}\right) = T_a - T_o$$

2



$L_b = 0{,}6\,m$; $L_h = 1{,}4\,m$; $T_i = -4°C$; $T_e = 30°C$

$\lambda = 0{,}04\,\frac{W}{mK}$; $s = 6\,cm$; $G_V = 2\,\frac{m^3}{h}$; $\alpha_e = \alpha_i = \alpha = 8\,\frac{W}{m^2K}$

$\eta_{ee} = 0{,}915$ (rendimento elettrico)

$\rho_e = \frac{P_0}{R\,T_e} = 1{,}165\,\frac{kg}{m^3}$; $G = G_V\,\rho_e = 0{,}647\,g/s$

$S_{TOT} = 4L_bL_h + L_b^2 = 3{,}72\,m^2$

NON $2L_b^2$ perchè il pavimento è adiabatico!

$\varphi_{COND} = \dfrac{T_i - T_e}{\frac{2}{\alpha} + \frac{s}{\lambda}} = -19{,}43\,\frac{W}{m^2}$

$\Phi_{COND} = S_{TOT}\cdot\varphi_{COND} = -72{,}3\,W$ cioè $\Phi_{COND} = 72{,}3\,W$ entranti

$|\Phi_{VENT}| = G_V c_p (T_e - T_i) = 22{,}9\,W$ (eq. di conservazione dell'energia)

$\Phi_{TOT} = \Phi_{COND} + \Phi_{VENT} = 94{,}4\,W$

$COP = \dfrac{T_i}{T_e - T_i} = 7{,}92$ $\quad COP = \dfrac{\Phi_{TOT}}{|W_t|} \Rightarrow |W_t| = \dfrac{\Phi_{TOT}}{COP} = 11{,}92\,W$

$P_{ee} = \dfrac{|W_t|}{\eta_{ee}} = 13\,W$

$\Phi'_{TOT} = 0{,}8\,\Phi_{TOT} = 75{,}52\,W$ $\quad \Phi'_{TOT} = \Phi'_{COND} + \Phi'_V = \Phi'_{COND} + \Phi_V$

$\Phi'_V = \Phi_V$ perchè non dipende dalla struttura

$\Phi'_{COND} = \Phi'_{TOT} - \Phi_V = 53{,}4\,W$

$\varphi' = \dfrac{\Phi'_{COND}}{S_{TOT}} = 14{,}36\,\frac{W}{m^2}$

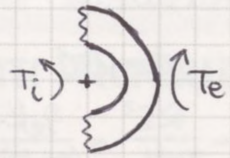
$\varphi' = \dfrac{T_e - T_i}{2/\alpha + s'/\lambda} \rightarrow s' = \lambda\left[\dfrac{T_e - T_i}{\varphi'} - \dfrac{2}{\alpha}\right] = 8{,}5\,cm$

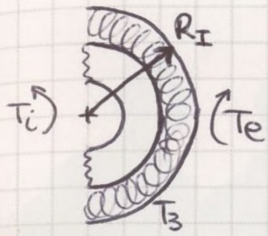
$\Delta s = s' - s = \boxed{2{,}5\,cm}$

4) $\lambda = 15 \frac{W}{mK}$; $d_i = 50mm$; $d_e = 54mm$; $T_i = 200°C$; $T_e = 15°C$; $\alpha_i = 120 \frac{W}{m^2K}$;
$\alpha_e = 12 \frac{W}{m^2K}$; $T_3 = 30°C$

Geometria cilindrica → ipotesi di monodimensionalità
→ simmetria assiale (no direzioni privilegiate)
⇒ flusso monodimensionale, in direzione radiale

$$\varphi_{L0} = \frac{2\pi(T_i - T_e)}{\frac{1}{r_i\alpha_i} + \frac{1}{\lambda}\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right) + \frac{1}{r_e\alpha_e}} = 340 \frac{W}{m}$$





Quando aggiungo l'isolante:
- aumento la resistenza termica (vantaggio)
- aumento l'area di scambio (svantaggio)

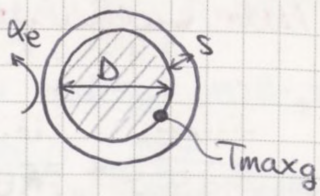
$$\varphi_L = \frac{\varphi_{L0}}{2} = 170 \frac{W}{m}$$

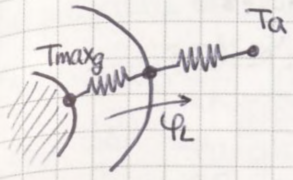
$$\Phi = \alpha_e (2\pi R_I L)(T_3 - T_e) \qquad \varphi_L = \alpha_e 2\pi R_I (T_3 - T_e) \rightarrow R_I = \frac{\varphi_L}{2\pi\alpha_e(T_3 - T_e)} = 0{,}15m$$

$$\varphi_L = \frac{2\pi(T_i - T_3)}{\frac{1}{r_i\alpha_i} + \frac{1}{\lambda}\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right) + \frac{1}{\lambda_I}\ln\left(\frac{R_I}{r_e}\right)} \rightarrow \lambda_I = \left[\frac{\frac{2\pi(T_i - T_3)}{\varphi_L} - \frac{1}{r_i\alpha_i} - \frac{1}{\lambda}\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)}{\ln\left(\frac{R_I}{r_e}\right)}\right]^{-1} = 0{,}29 \frac{W}{mK}$$

② $D = 2{,}59\,mm$ $\quad s = 1{,}27\,mm$ $\quad T_a = 48{,}9\,°C$ $\quad \alpha_e = 19{,}52\,\frac{kcal}{h m^2 °C}$

$\lambda_g = 0{,}119\,\frac{kcal}{hmk}$ $\quad \rho = 9024\,\Omega\,\frac{mm^2}{m}$ $\quad I_{max} \mid T_{maxg} = 93{,}3\,°C$



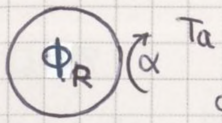


$\varphi_L = U^*(T_{maxg} - T_a)$

$$U^* = \frac{1}{\frac{1}{\lambda_g 2\pi}\ln\left(\frac{D+2s}{D}\right) + \frac{1}{\alpha_e \pi (D+2s)}} = 0{,}284\,\frac{W}{mK} \rightarrow \varphi_L = 12{,}61\,W$$

$$\varphi_L = \frac{\rho}{\pi \frac{D^2}{4}} \cdot I_{max}^2 \qquad \boxed{I_{max} = 52{,}61\,A}$$

④



$\phi_R = 0{,}1\,W$ $\quad S = 1\,cm^2$ $\quad \theta(t=3\tau) = 50\,°C$

condiz. iniziali: $T_i = T_a$; $\theta(t=0) = T_i - T_a = 0$

$$\rho c V \frac{dT}{dt} = \underbrace{-\alpha S (T - T_a)}_{\text{convezione}} + \underbrace{\phi_R}_{\text{generaz. interna}} \qquad \frac{dT}{dt} = -\frac{\alpha S}{\rho c V}(T - T_a) + \frac{\phi_R}{\rho c V}$$

$$\frac{d(T-T_a)}{dt} + \frac{\alpha S}{\rho c V}(T - T_a) = \frac{\phi_R}{\rho c V} \qquad \frac{d\theta}{dt} + \underbrace{\frac{\alpha S}{\rho c V}}_{=\frac{1}{\tau}}\theta = \frac{\phi_R}{\rho c V} \qquad \tau = \frac{\rho c V}{\alpha S}$$

$$\theta(t) = \frac{\tau \phi_R}{\rho c V}\left(1 - e^{-t/\tau}\right)$$

$$\theta(t = 3\tau) = 50\,°C \rightarrow \quad \tau = \frac{50\,\rho c V}{\phi_R (1 - e^{-3})} \qquad \frac{\cancel{\rho c V}}{\alpha S} = \frac{50\,\cancel{\rho c V}}{\phi_R (1 - e^{-3})}$$

$$\alpha = \frac{\phi_R (1 - e^{-3})}{50\,S} = \boxed{19\,\frac{W}{m^2 K}}$$

③ $\rho_e = 0{,}194\ \mu\Omega m$ $L = 5mm$ $d = 0{,}1mm$ $T_e = 20°C$ $1{,}2 m/s \leq \omega \leq 10\ m/s$ $T_s = 280°C$

$Nu = C \cdot Re^n \cdot Pr^{0,33}$

Il flusso d'aria scambia per convezione con un filamento di platino
Le proprietà del fluido vengono prese a una T intermedia $T_f = \frac{T_e + T_s}{2} = 150°C$

temp. media di film

* $\lambda = 0{,}0355\ \frac{W}{mK}$ (a 150°C) ; * $\nu = 0{,}294 \cdot 10^{-4}\ \frac{m^2}{s}$

$Nu = \frac{\alpha X}{\lambda}$ → lunghezza caratteristica

$Re = \frac{\rho \omega X}{\mu} = \frac{\omega X}{\nu}$ $Pr = \frac{\mu c_p}{\lambda} = \frac{\nu}{a}$ → diffusività termica

$\frac{\text{entità degli scambi di en. meccanica}}{\text{entità degli scambi di en. termica}}$

* $Pr = 0{,}688$

Vista la giacitura del filo rispetto al flusso, $X = d = 0{,}1mm$ → $Re = \frac{\omega d}{\nu}$ < $Re = 4{,}1$ ($\omega = 1{,}2 m/s$) ; $Re = 34$ ($\omega = 10 m/s$)

$Re = 4 \div 40$ → $C = 0{,}903$; $n = 0{,}385$

$Nu = 0{,}903 \cdot Re^{0,385} \cdot Pr^{0,33}$ $H = \rho_e \left(\frac{I}{\frac{\pi d^2}{4}}\right)^2$ generazione interna

Caso stazionario: potenza interna = potenza dissipata

$HV = \Phi$ $\frac{HV}{S} = \frac{\Phi}{S} = \varphi = \alpha (T_s - T_e)$

$\alpha = \frac{Nu\,\lambda}{d}$ < $489\ \frac{W}{m^2K}$ ($\omega = 1{,}2 m/s$) ; $1102\ \frac{W}{m^2K}$ ($\omega = 10 m/s$) CONVEZIONE FORZATA

$\rho_e \left(\frac{I}{\frac{\pi d^2}{4}}\right)^2 \cdot \frac{d}{4} = \alpha (T_s - T_e)$ $I = 1{,}23\,\omega^{0,1925}$

$I =$ < $1{,}274\ A$; $1{,}916\ A$

* da tabelle

② condensatore → fluido in cambiamento di stato → montaggio indifferente

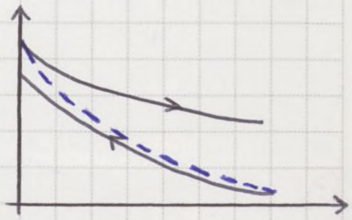
$K_i A_i = K_e A_e \qquad K_e = \dfrac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \cancel{R_{cond}} + \frac{1}{\alpha_e}}$

↑ trascuro sempre!

$K_e = \dfrac{1}{\frac{A_e}{A_i}\left(\frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{\alpha_e}\right)} = 871{,}7 \, \dfrac{W}{m^2 K} \qquad NTU = \dfrac{K_e A_e}{C_{min}} = \dfrac{K_e A_e}{\underbrace{G_f c_f}_{4{,}67 \frac{kW}{K}}} = 0{,}28$

$\varepsilon = 1 - e^{-NTU}$ caso particolare per $C_R = \dfrac{C_{min}}{C_{max}} \to 0$ (cambiamento di stato)

$\varepsilon = 0{,}244 \qquad \varepsilon = \dfrac{\Phi}{\Phi_{max}} = \dfrac{C(T_u - T_i)}{C_{min}(T_{ci} - T_{fi})} = \dfrac{\cancel{C_{min}} \cdot |T_u - T_i|_{max}}{\cancel{C_{min}}(T_{ci} - T_{fi})}$



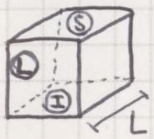
C_{min} compete al fluido freddo → $\varepsilon = \dfrac{T_{fu} - T_{fi}}{T_{ci} - T_{fi}} = \dfrac{T_{fu} - T_{fi}}{T_{cond} - T_{fi}}$

$T_{cond} = T_{fi} + \dfrac{T_{fu} - T_{fi}}{\varepsilon} = \underline{76{,}4 °C}$

K - Scambi radiativi tra corpi neri e grigi

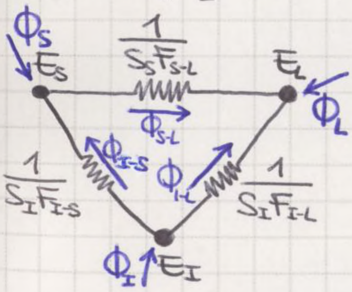
13.01.14

①



$L = 10 m \quad T_S = 1500 K \quad T_I = 800 K \quad T_L = 500 K$

$E = \sigma T^4 \quad \left(\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}\right)$



da tabelle: $F_{I-S} = 0{,}2$

$F_{I-S} + F_{I-L} = 1 \to F_{I-L} = 0{,}8$

Reciprocità: $S_S F_{S-I} = S_I F_{I-S} \qquad F_{S-I} = \dfrac{S_I}{S_S} F_{I-S}$

$S_S F_{S-L} = S_I F_{I-L} \qquad F_{S-L} = F_{I-L} = 0{,}8 \qquad F_{S-I} + F_{S-L} = 1 \qquad F_{S-I} = 0{,}2$

$$\begin{cases} \Phi_I = \Phi_{I-S} + \Phi_{I-L} \\ \Phi_S + \Phi_{I-S} = \Phi_{S-L} \\ \Phi_L + \Phi_{S-L} + \Phi_{I-L} = 0 \end{cases}$$

$\Phi_I + \Phi_S + \Phi_L = 0$

$\Phi_{I-S} = \dfrac{E_I - E_S}{\frac{1}{S_I F_{I-S}}} = S_I F_{I-S} \sigma (T_I^4 - T_S^4) = \underline{-5276{,}4 kW}$

$\Phi_{I-L} = \dfrac{E_I - E_L}{\frac{1}{S_I F_{I-L}}} = S_I F_{I-L} \sigma (T_I^4 - T_L^4) = \underline{1574{,}4 kW}$

$\Phi_{S-L} = S_S F_{S-L} \sigma (T_S^4 - T_L^4) = \underline{22680 kW}$

$\Phi_I = -3702 kW \; ; \; \Phi_S = 27956{,}4 kW \; ; \; \Phi_L = -24254{,}4 kW \qquad \Phi_I + \Phi_S + \Phi_L = 0$ ✓