

## ESERCIZI SVOLTI

### Argomenti:

D1 Condensatore –  $Q_{M\text{ acqua}}$ ;  $Q_{V\text{ acqua}}$

D2 Condensatore –  $Q_{M\text{ acqua}}$ ;  $S_{\text{tot}}$

D3 Condensatore –  $Z_{\text{tubi}}$

D4 Condensatore –  $L$

D5 Condensatore –  $S_{\text{tot}}$ ;  $Q_{M\text{ acqua}}$ ;  $Q_{M\text{ vap}}$ ; consumo d'acqua/kg di vapore condensato

### D1 Esercizio 1



Determinare la portata in massa e la portata in volume di acqua dolce impiegata per il raffreddamento di un impianto a vapore; questo fluido circola all'interno di un condensatore che deve sottrarre una potenza termica pari a 30 MW. È previsto un incremento pari a 15 °C della temperatura dell'acqua refrigerante all'uscita del condensatore.

Calcolare inoltre la portata dell'acqua condensatrice se si deve limitare l'incremento di temperatura a soli 6 °C (le relazioni richiamate fanno riferimento all'Approfondimento 5 nella parte digitale del testo).

### SOLUZIONE

Dalla relazione (5) relativa al calore  $P_Q$  che l'acqua di raffreddamento acquisisce nell'unità di tempo dal vapore condensante:

$$P_Q = Q_{M\text{ acqua}} \cdot c_{p\text{ acqua}} \cdot (T_u - T_i) \quad [\text{W}]$$

si ottiene, se si esplicita  $Q_{M\text{ acqua}}$ :

$$Q_{M\text{ acqua}} = \frac{P_Q}{c_{p\text{ acqua}} \cdot (T_u - T_i)} \quad \left[ \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$$

In base ai dati numerici di cui disponiamo, si ricava:

$$Q_{M\text{ acqua}} = \frac{30 \cdot 10^6 \text{ W}}{4182 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 15 \text{ K}} \approx 478,24 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

dato che è:  $T_u - T_i = 15 \text{ °C} = 15 \text{ K}$ ; si utilizzano indifferentemente i gradi Celsius o i kelvin, in quanto si tratta di una differenza di temperatura;

$$c_{p\text{ acqua}} = 4182 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \text{ per l'acqua dolce;}$$

$$30 \text{ MW} = 30 \cdot 10^6 \text{ W.}$$

Per quanto riguarda la portata in volume dell'acqua condensatrice, dalla relazione:

$$M = \rho \cdot V$$

se dividiamo entrambi i membri per il tempo  $t$  otteniamo:

$$\frac{M}{t} = \rho \cdot \frac{V}{t}$$

da cui:

$$Q_V = \frac{Q_M}{\rho}$$

Nel caso dell'acqua, se si assume per una temperatura pari a 20 °C:

$$\rho_{\text{acqua}} = 999 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

si ha:

$$Q_{V \text{ acqua}} = \frac{478,24 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{999 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} \approx 0,48 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Se occorre limitare l'incremento di temperatura dell'acqua di raffreddamento a soli 6 °C, si ricava, in base all'espressione (5), una portata in massa  $Q_{M \text{ acqua}}$  pari a:

$$Q_{M \text{ acqua}} = \frac{P_Q}{c_{p \text{ acqua}} \cdot (T_u - T_i)} = \frac{30 \cdot 10^6 \text{ W}}{4182 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 6 \text{ K}} \approx 1195,6 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

La corrispondente portata in volume  $Q_{V \text{ acqua}}$  è quindi:

$$Q_{V \text{ acqua}} = \frac{Q_{M \text{ acqua}}}{\rho_{\text{acqua}}} = \frac{1195,6 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{999 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} \approx 1,20 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

## D2 Esercizio 2



In un impianto a vapore un condensatore a fascio tubiero utilizza come fluido di raffreddamento acqua di mare che entra nel condensatore alla temperatura  $T_i = 12$  °C e ne esce alla temperatura  $T_u = 26$  °C.

La potenza termica che deve essere asportata dall'acqua condensatrice è pari a 40 MW. Sappiamo inoltre che il vapore entra nel condensatore alla temperatura  $T_{\text{vap}} = 35$  °C e che la velocità con la quale l'acqua di refrigerazione percorre i tubi è pari a 2,8 m/s. Determinare la portata in massa  $Q_{M \text{ acqua}}$  di acqua refrigerante e la superficie complessiva di scambio termico (le relazioni richiamate fanno riferimento all'Approfondimento 5 nella parte digitale del testo).

### SOLUZIONE

La relazione (5) relativa alla potenza termica  $P_Q$  di un condensatore, cioè:

$$P_Q = Q_{M \text{ acqua}} \cdot c_{p \text{ acqua}} \cdot (T_u - T_i)$$

può anche scriversi, se si esplicita  $Q_{M \text{ acqua}}$ :

$$Q_{M \text{ acqua}} = \frac{P_Q}{c_{p \text{ acqua}} \cdot (T_u - T_i)} \quad \left[ \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$$

Con i valori assegnati dal testo dell'esercizio si ricava:

$$Q_{M \text{ acqua}} = \frac{40 \cdot 10^6 \text{ W}}{3980 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot (26 - 12) \text{ K}} \approx 717,88 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

dato che è:  $c_{p\text{ acqua}} = 3980 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$  per l'acqua di mare;

$T_u - T_i = (26 - 12)^\circ\text{C} = 14^\circ\text{C} = 14\text{ K}$ ; si utilizzano indifferentemente i gradi Celsius o i kelvin, in quanto si tratta di una differenza di temperatura;  
 $40\text{ MW} = 40 \cdot 10^6\text{ W}$ .

Per quanto riguarda la superficie complessiva  $S_{\text{tot}}$  di scambio termico, dall'espressione (1):

$$P_Q = C \cdot S_{\text{tot}} \cdot \Delta T_m$$

si ottiene, se si esplicita  $S_{\text{tot}}$ :

$$S_{\text{tot}} = \frac{P_Q}{C \cdot \Delta T_m}$$

La differenza media di temperatura  $\Delta T_m$  tra il vapore condensante e il fluido refrigerante vale, con la (2):

$$\Delta T_m \approx T_{\text{vap}} - \frac{T_i + T_u}{2} \approx 35^\circ\text{C} - \frac{(12 + 26)^\circ\text{C}}{2} \approx 16^\circ\text{C} = 16\text{ K}$$

Se si assume per il coefficiente globale di scambio termico  $C$  il valore:

$$C = 3350 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

si ha:

$$S_{\text{tot}} = \frac{40 \cdot 10^6\text{ W}}{3350 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \cdot 16\text{ K}} \approx 746,27\text{ m}^2$$

### D3 Esercizio 3



Calcolare il numero di tubi di cui dev'essere provvisto un condensatore a superficie avente i seguenti requisiti:

diametro interno dei tubi:  $D_{\text{int}} = 16\text{ mm}$ ;

portata dell'acqua di raffreddamento:  $Q_{M\text{ acqua}} = 717,88\text{ kg/s}$ ;

velocità dell'acqua di raffreddamento:  $v = 2,8\text{ m/s}$ .

### SOLUZIONE

Ciascun tubo del condensatore in esame ha, in sezione normale, un'area per il passaggio dell'acqua refrigerante  $A_{1\text{ tubo}}$  pari a:

$$A_{1\text{ tubo}} = \frac{\pi \cdot D_{\text{int}}^2}{4} = \frac{\pi \cdot (16\text{ mm})^2}{4} \approx 201,06\text{ mm}^2$$

D'altra parte, la portata in volume complessiva dell'acqua di raffreddamento  $Q_{V\text{ acqua}}$  vale:

$$Q_{V\text{ acqua}} = \frac{Q_{M\text{ acqua}}}{\rho_{\text{acqua}}} = \frac{717,88 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{999 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} \approx 0,72 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

In base all'equazione di continuità:

$$Q_{V\text{ acqua}} = v_{\text{acqua}} \cdot A_{1\text{ tubo}} \cdot z_{\text{tubi}}$$

possiamo scrivere, se si esplicita  $z_{\text{tubi}}$  dall'equazione precedente:

$$z_{\text{tubi}} = \frac{Q_{V\text{ acqua}}}{v_{\text{acqua}} \cdot A_{1\text{ tubo}}} = \frac{0,72 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{2,8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 201,06 \cdot 10^{-6}\text{ m}^2} \approx 1275$$

dato che, per ipotesi, la velocità dell'acqua di raffreddamento  $v_{\text{acqua}}$  è pari a  $2,8\text{ m/s}$ .

## D4 Esercizio 4



## SOLUZIONE

In un condensatore a superficie vengono utilizzati in tutto 1275 tubi aventi spessore  $s = 1$  mm e diametro interno  $D_{\text{int}} = 16$  mm; la superficie totale di scambio termico  $S_{\text{tot}}$  vale  $746,27 \text{ m}^2$ . Determinare la lunghezza di ciascun tubo del fascio (le relazioni richiamate fanno riferimento all'Approfondimento 5 nella parte digitale del testo).

Il diametro esterno  $D_{\text{est}}$  di ciascun tubo del fascio vale:

$$D_{\text{est}} = D_{\text{int}} + 2 \cdot s = 16 \text{ mm} + 2 \cdot 1 \text{ mm} = 18 \text{ mm}$$

Dall'espressione (3) relativa all'area della superficie complessiva di scambio termico  $S_{\text{tot}}$ , cioè:

$$S_{\text{tot}} = S_{1 \text{ tubo}} \cdot z_{\text{tubi}}$$

e dalla relazione (4) relativa alla superficie laterale di ciascun tubo  $S_{1 \text{ tubo}}$ , cioè:

$$S_{1 \text{ tubo}} = (\pi \cdot D_{\text{est}}) \cdot L$$

si ricava la lunghezza  $L$  di ogni tubo; essa vale:

$$L = \frac{S_{1 \text{ tubo}}}{\pi \cdot D_{\text{est}}} = \frac{S_{\text{tot}}}{z_{\text{tubi}} \cdot \pi \cdot D_{\text{est}}}$$

Con i dati numerici di cui disponiamo, si ha:

$$L = \frac{746,27 \text{ m}^2}{1275 \cdot \pi \cdot (18 \cdot 10^{-3}) \text{ m}} \approx 10,35 \text{ m}$$

## D5 Esercizio 5



In un impianto a vapore la temperatura dell'acqua di refrigerazione all'ingresso di un condensatore a superficie vale  $T_i = 13$  °C, quella all'uscita è  $T_u = 27$  °C. Il vapore condensante ha temperatura  $T_{\text{vap}} = 32$  °C; la quantità di calore scambiato nell'unità di tempo tra il vapore e l'acqua refrigerante è  $P_Q = 23,7 \cdot 10^3 \text{ kW}$ .

Assunto come valore del coefficiente globale di trasmissione del calore  $C = 3350 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$ .

Determinare l'area della superficie complessiva di scambio termico.

Calcolare inoltre la portata in massa  $Q_M \text{ acqua}$  dell'acqua occorrente per la condensazione del vapore, se come liquido refrigerante si utilizza acqua di fiume.

Determinare infine il consumo d'acqua per ogni chilogrammo di vapore condensato, noti i seguenti parametri, relativi alla turbina:

rendimento:  $\eta_{\text{turb}} = 82\%$ ;

salto entalpico teorico:  $(h_3 - h_4) = 1280 \text{ kJ/kg}$ ;

potenza erogata:  $P_{\text{ut}} = 8800 \text{ kW}$

(le relazioni richiamate fanno riferimento all'Approfondimento 5 nella parte digitale del testo, tranne quando diversamente specificato).

## SOLUZIONE

In base all'espressione (1) relativa alla potenza termica  $P_Q$  di un condensatore a superficie:

$$P_Q = C \cdot S_{\text{tot}} \cdot \Delta T_m$$

si ricava la superficie totale di scambio termico  $S_{\text{tot}}$ , ovvero:

$$S_{\text{tot}} = \frac{P_Q}{C \cdot \Delta T_m}$$

La differenza media di temperatura  $\Delta T_m$  tra il vapore condensante e il fluido refrigerante vale, in base all'espressione (2):

$$\Delta T_m \approx T_{\text{vap}} - \frac{T_i + T_u}{2} \approx 32^\circ\text{C} - \frac{(13 + 27)^\circ\text{C}}{2} \approx 12^\circ\text{C} = 12\text{ K}$$

Si utilizzano indifferentemente i gradi Celsius o i kelvin, in quanto si tratta di una differenza di temperatura. Pertanto si ha:

$$S_{\text{tot}} = \frac{23,7 \cdot 10^6 \text{ W}}{3350 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \cdot 12 \text{ K}} \approx 589,55 \text{ m}^2$$

La portata in massa dell'acqua occorrente per la condensazione del vapore si ricava dalla relazione (5):

$$P_Q = Q_{M \text{ acqua}} \cdot c_{p \text{ acqua}} \cdot (T_u - T_i)$$

e vale:

$$Q_{M \text{ acqua}} = \frac{P_Q}{c_{p \text{ acqua}} \cdot (T_u - T_i)} = \frac{23,7 \cdot 10^6 \text{ W}}{4182 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot (27 - 13) \text{ K}} \approx 404,80 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

dato che è:  $c_{p \text{ acqua}} = 4182$  per l'acqua di fiume;

$$P_Q = 23,7 \cdot 10^3 \text{ kW} = 23,7 \cdot 10^6 \text{ W};$$

$T_u - T_i = (27 - 13)^\circ\text{C} = 14^\circ\text{C} = 14 \text{ K}$ ; si utilizzano indifferentemente i gradi Celsius o i kelvin, in quanto si tratta, anche in questo caso, di una differenza di temperatura.

Dall'espressione (9) del testo a stampa, relativa al rendimento della turbina:

$$\eta_{\text{turb}} = \frac{P_{\text{ut}}}{Q_{M \text{ vap}} \cdot (h_3 - h_4)}$$

si ricava:

$$Q_{M \text{ vap}} = \frac{P_{\text{ut}}}{\eta_{\text{turb}} \cdot (h_3 - h_4)} = \frac{8800 \cdot 10^3 \text{ W}}{0,82 \cdot (1280 \cdot 10^3) \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}} \approx 8,38 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

La quantità d'acqua di raffreddamento necessaria per condensare 1 kg di vapore vale perciò:

$$\frac{Q_{M \text{ acqua}}}{Q_{M \text{ vap}}} = \frac{404,80 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{8,38 \frac{\text{kg}}{\text{s}}} = 48,31 \frac{\text{kg}_{\text{acqua}}}{\text{kg}_{\text{vapore condensato}}}$$

## VERIFICA DELL'APPRENDIMENTO

**Riconoscere se le seguenti affermazioni sono vere (V) o false (F).**

1. Nei rigeneratori "chiusi" impiegati talvolta negli impianti a vapore con recupero di calore, il vapore spillato dalla turbina è mescolato direttamente con l'acqua proveniente dal condensatore.
2. In un condensatore a superficie la quantità di calore ceduta nell'unità di tempo dal vapore condensante dipende dalla velocità dell'acqua di raffreddamento circolante nei tubi.

☐ V ☐ F

☐ V ☐ F

## QUESITI

**Individuare la risposta esatta ai seguenti quesiti a risposta multipla.**

1. La principale caratteristica degli impianti combinati gas-vapore è:
  - ☐ a il loro altissimo costo di installazione
  - ☐ b i lunghi tempi di realizzazione dell'impianto
  - ☐ c i fortissimi problemi di impatto ambientale che essi generano
  - ☐ d il loro elevato rendimento