

un frigorifero e il flusso negli scambiatori di calore. Altre volte, la trasmissione di calore è indesiderabile e i tubi o i condotti vengono isolati termicamente per impedire ogni cessione o acquisto di calore, in particolare quando è grande differenza di temperatura tra il fluido che scorre e l'ambiente. In questo caso trasmissione di calore è trascurabile.

Se il volume di controllo contenesse una porzione scaldante (conduttori elettrici), un ventilatore o una pompa, si dovrebbero considerare gli scambi di lavoro (Figura 6.40). Ovviamente, il lavoro di un ventilatore è generalmente piccolo spesso viene trascurato nell'analisi energetica.

Le velocità dei fluidi che scorrono in tubi e condotti sono relativamente basse e le variazioni di energia cinetica sono generalmente trascurabili, e ciò vale in particolare quando il diametro del tubo o del condotto è costante e gli effetti termici sono trascurabili. Ma le variazioni di energia cinetica possono essere rilevanti nel caso del flusso di un gas in condotti con area della sezione trasversale variabile, in particolare quando gli effetti di compressibilità sono rilevanti. Anche il termine di energia potenziale può essere rilevante quando il fluido subisce una notevole variazione di quota mentre scorre in un tubo in un condotto.

ESEMPIO 6.11

Il riscaldamento elettrico dell'aria in una casa

Il sistema di riscaldamento elettrico impiegato in alcune case è costituito da un semplice condotto provvisto di riscaldatori a resistenza elettrica. L'aria viene riscaldata mentre scorre sui resistori. Si consideri un sistema di riscaldamento elettrico che assorbe una potenza elettrica di 15 kW. L'aria entra nella sezione scaldante alla pressione di 100 kPa e alla temperatura di 17°C con una portata volumetrica di 150 m³/min. Se l'aria nel condotto cede all'ambiente una potenza termica di 200 W, si determini la temperatura dell'aria all'uscita del sistema.

Soluzione

Si considera il sistema di riscaldamento elettrico di una casa. Per l'assorbimento di potenza elettrica e la portata volumetrica specificati, si deve determinare la temperatura dell'aria all'uscita del sistema.

Ipotesi

1. Si tratta di un processo a flusso stazionario perché non avviene alcuna variazione in alcun punto nel tempo e quindi $\Delta m_{VC} = 0$ e $\Delta E_{VC} = 0$.
2. L'aria è un gas perfetto perché è a temperatura alta e a pressione bassa rispetto ai suoi valori del punto critico.
3. La variazione di energia cinetica e la variazione di energia potenziale sono trascurabili, $\Delta e_{cin} \cong \Delta e_{pot} \cong 0$.
4. Per l'aria si usano calori specifici costanti a temperatura ambiente.

Analisi

Si assume come sistema la sezione scaldante del condotto (Figura 6.41). Il sistema scelto è un volume di controllo perché il suo contorno è attraversato da un flusso di massa durante il processo. Si osserva che è presente una sola entrata e un

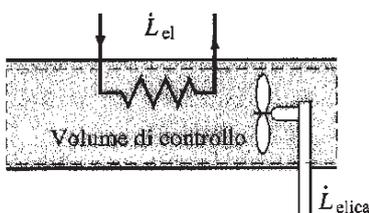


FIGURA 6.40

Il flusso in una tubazione o un condotto può comportare più di una forma di lavoro allo stesso tempo.

sola uscita e quindi $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}$. Inoltre, il sistema cede calore all'ambiente e sul sistema viene compiuto lavoro elettrico.

Alle temperature che si incontrano nelle applicazioni di riscaldamento e di condizionamento dell'aria, Δh può essere sostituita con $c_p \Delta T$, dove $c_p = 1.005$ kJ/(kg · °C) – il valore a temperatura ambiente – con un errore trascurabile (Figura 6.42). Quindi, il bilancio energetico per questo sistema a flusso stazionario, riferito all'unità di tempo, può essere espresso come

$$\frac{\dot{E}_{\text{entrante}} - \dot{E}_{\text{uscente}}}{\text{Potenza netta scambiata sotto forma di calore, lavoro e flusso di massa}} = \frac{dE_{\text{ sistema}}/dt^{-0} \text{ (stazionario)}}{\text{Variazione delle energie interna, cinetica, potenziale ecc. riferita all'unità di tempo}} = 0$$

$$\dot{E}_{\text{entrante}} = \dot{E}_{\text{uscente}}$$

$$\dot{L}_{el, \text{entrante}} + \dot{m}h_1 = \dot{Q}_{\text{uscente}} + \dot{m}h_2 \text{ (poiché } \Delta e_{\text{cin}} \cong \Delta e_{\text{pot}} \cong 0)$$

$$\dot{L}_{el, \text{entrante}} - \dot{Q}_{\text{uscente}} = \dot{m}c_p (T_2 - T_1)$$

In base all'equazione di stato dei gas perfetti, il volume specifico dell'aria all'entrata del condotto è

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{0.287 \times 290}{100} = 0.832 \text{ m}^3/\text{kg}$$

La portata volumetrica dell'aria nel condotto si ottiene da

$$\dot{m} = \frac{\dot{w}_1}{v_1} = \frac{150}{0.832} \left(\frac{1}{60} \right) = 3.0 \text{ kg/s}$$

Sostituendo le quantità note, si ottiene la temperatura dell'aria all'uscita del condotto:

$$15 - 0.2 = 3 \times 1.005(T_2 - 17)$$

da cui

$$T_2 = 21.9^\circ\text{C}$$

Considerazioni

Si noti che la cessione di calore dal condotto riduce la temperatura dell'aria all'uscita del condotto stesso.

6.5 L'analisi energetica dei processi a flusso non stazionario

Durante un processo a flusso stazionario non avvengono variazioni entro il volume di controllo nel tempo; perciò, non è necessario interessarsi di ciò che accade entro il contorno del volume di controllo. Poiché non ci si deve preoc-

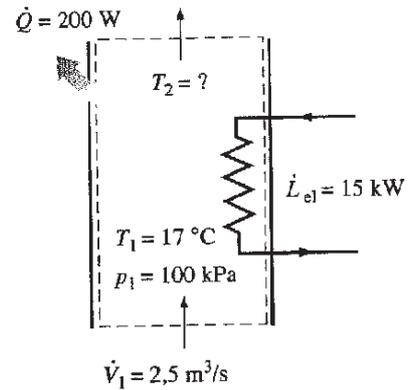


FIGURA 6.41
Schema per l'Esempio 6.11.

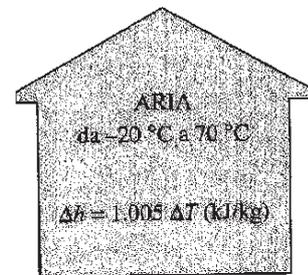


FIGURA 6.42
L'errore che si commette nel calcolo di $\Delta h = c_p \Delta T$, in cui $c_p = 1.005$ kJ/(kg · °C), è minore dello 0.5% per l'aria nell'intervallo di temperatura -20°C a 70°C.

Soluzione

Nota la potenza termica assorbita da un refrigeratore, si devono calcolare il suo COP e la potenza termica scaricata nell'ambiente.

Ipotesi

Il sistema opera in condizioni stazionarie.

Analisi

(a) Il coefficiente di prestazione di un frigorifero definito dall'Equazione 7.9 è:

$$COP_F = \frac{\dot{Q}_i}{\dot{L}_{n,e}} = \frac{6}{2} = 3$$

(b) La potenza termica scaricata nell'ambiente, determinata con l'Equazione 7.10, è:

$$\dot{Q}_s = \dot{Q}_i + \dot{L}_{n,e} = 6 + 2 = 8 \text{ kW}$$

Considerazioni

Si noti che sia l'energia asportata dall'ambiente freddo sotto forma di calore sia l'energia fornita al compressore come lavoro elettrico vengono scaricate sotto forma di calore nell'ambiente e si trasformano in energia interna dell'aria in essa contenuta.

Ciò a ulteriore dimostrazione del fatto che l'energia si trasforma da una forma a un'altra, si trasferisce da un corpo a un altro, ma non viene mai distrutta durante una qualsiasi trasformazione.

ESEMPIO 7.4

Il riscaldamento di una casa con una pompa di calore

Per sopperire al fabbisogno termico di una casa e mantenerne la temperatura interna a 20°C si ricorre all'uso di una pompa di calore.

In un giorno nel quale la temperatura esterna cala fino a -2°C, si stima che la casa dissipi una potenza termica di 20 kW. Sapendo che la pompa di calore in queste condizioni ha un COP_{PdC} di 2.5, si determini (a) la potenza elettrica assorbita dalla pompa di calore e (b) la potenza termica assorbita dall'aria esterna.

Soluzione

Dato il COP di una pompa di calore, si devono determinare la potenza elettrica e la potenza termica assorbita.

Ipotesi

Il sistema opera in condizioni stazionarie

Analisi

(a) La potenza assorbita dalla pompa di calore (Figura 7.25) può essere determinata ricorrendo alla definizione di coefficiente di prestazione di una pompa di calore (Equazione 7.12):

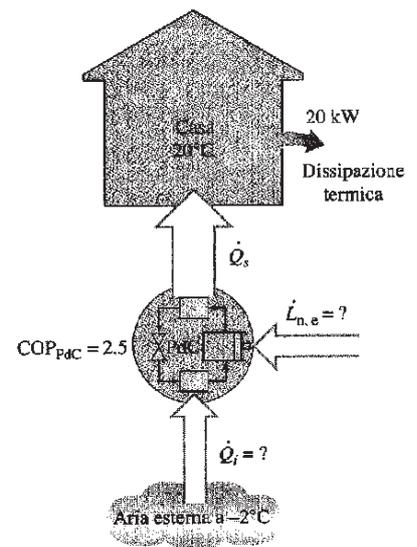


FIGURA 7.25 Schema per l'Esempio 7.4.

$$\dot{L}_{n,e} = \frac{\dot{Q}_s}{COP_{PdC}} = \frac{20}{2.5} = 8 \text{ kW}$$

(b) La casa dissipa la potenza termica di 20 kW. Se la temperatura della casa deve essere mantenuta costante a 20°C, la pompa di calore deve fornire alla casa una potenza termica pari a quella persa, 20 kW. È possibile, allora, calcolare la potenza termica assorbita dall'aria esterna con il principio di conservazione dell'energia applicato alle macchine cicliche (Equazione 7.10):

$$\dot{Q}_i = \dot{Q}_s - \dot{L}_{n,e} = 20 - 8 = 12 \text{ kW}$$

Considerazioni

Questa relazione sottolinea che 12 kW su 20 kW forniti alla casa provengono dall'aria fredda esterna e che solo 8 kW provengono dal lavoro elettrico del compressore (cioè si ottengono 20 kW spendendo per soli 8 kW). Nel caso di una stufa elettrica si sarebbe dovuta fornire l'intera potenza di 20 kW attingendo solo alla rete elettrica con un costo per il riscaldamento più alto di 2.5 volte. Per questa ragione le pompe di calore si sono diffuse come sistemi di riscaldamento e vengono preferite alle semplici stufe a resistenze elettriche nonostante il loro più alto costo iniziale.

7.4.1 Il secondo principio della termodinamica: l'enunciato di Clausius

L'enunciato di Clausius del secondo principio della termodinamica afferma che:

è impossibile realizzare una macchina con funzionamento ciclico il cui unico effetto sia il trasferimento di una quantità di calore da un corpo a bassa temperatura a un altro a temperatura più alta.

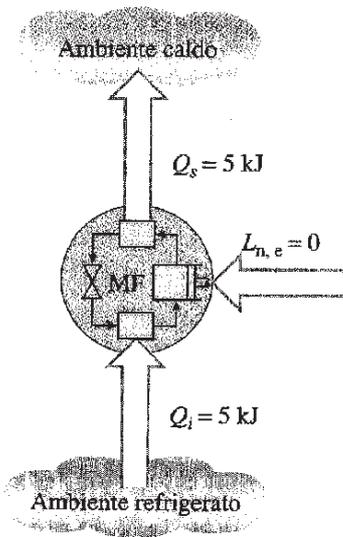


FIGURA 7.26 Una macchina frigorifera in contrasto con l'enunciato di Clausius del secondo principio della termodinamica.

Il trasferimento di calore da un corpo più freddo a uno più caldo, che non avviene spontaneamente, può realizzarsi impiegando una macchina termica (macchina frigorifera o pompa di calore). L'enunciato di Clausius non nega la possibilità di costruire una tale macchina, ma afferma che questa macchina oltre al trasferimento del calore dovrà avere altri effetti, come per esempio l'assorbimento di energia (quella fornita al compressore da un motore, Figura 7.26) che inevitabilmente lascia tracce nell'ambiente. Entrambi gli enunciati del secondo principio della termodinamica, quello di Clausius e quello di Kelvin-Planck, stabiliscono un'impossibilità e come tali non possono essere dimostrati. Tuttavia, essi non sono mai stati contraddetti dall'esperienza.

7.4.2 L'equivalenza dei due enunciati

I due enunciati del secondo principio della termodinamica, di Kelvin-Planck e di Clausius, sono equivalenti nelle loro conseguenze, e possono essere usati indifferentemente: ogni macchina che dovesse violare il secondo principio della termodinamica secondo l'enunciato di Kelvin-Planck lo violerebbe anche secondo Clausius, e viceversa.