Chương 22: Động cơ nhiệt, entropy, và nguyên lý thứ hai của nhiệt động lực học

Một động cơ Stirling vào đầu thế kỷ XIX được miêu tả như trên hình 22.1. Không khí được nung nóng trong xi-lanh ở dưới nhờ một nguồn bên ngoài. Khi đó, không khí sẽ giãn nở và đẩy pit-tông làm cho nó chuyển động. Sau đó, không khí nguội đi và bắt đầu một chu trình mới. Đây là một ví dụ về động cơ nhiệt mà chúng ta sẽ nghiên cứu trong chương này.

Nguyên lý thứ nhất nhiệt động lực học mà ta đã nghiên cứu trong chương 20 là một phát biểu về bảo toàn năng lượng xét trong các quá trình nhiệt động. Tuy nguyên lý thứ nhất nhiệt động lực học là rất quan trọng, nhưng nó cũng có một số hạn chế:

- *Không phân biệt được các quá trình diễn ra một cách tự nhiên và các quá trình không diễn ra một cách tự nhiên*. Ví dụ quá trình truyền nhiệt trong tự nhiên là từ vật nóng hơn sang vật lạnh hơn, chiều ngược lại không xảy ra.
- *Không chỉ ra chiều chiều chuyển hóa năng lượng*. Ví dụ một quả bóng cao su rơi xuống đất sẽ bật lên một vài lần rồi cuối cùng sẽ đứng yên. Nhưng một quả bóng đang nằm trên mặt đất không bao giờ thu được nội năng từ mặt đất và tự nảy lên được. Hay một con lắc đang dao động sẽ dần dần trở về trạng thái nghỉ do có va chạm với các phân tử không khí và ma sát ở điểm treo. Cơ năng của hệ được chuyển hóa thành nội năng trong không khí, con lắc và điểm treo. Sự chuyển hóa năng lượng ngược lại không bao giờ diễn ra.
- *Không đề cập đến chất lượng nguồn nhiệt*. Trong thực tế, một nguồn nhiệt độ cao sẽ có chất lượng hơn nguồn nhiệt độ thấp.

Hình 22.1: Động cơ Stirling vào đầu thế kỷ XIX

Nguyên lý thứ hai nhiệt động lực học, chủ đề chính của chương này sẽ chỉ rõ các chiều diễn biến mà nguyên lý 1 chưa nêu được. Chương này sẽ giới thiệu các phát biểu nguyên lý 2 theo Kelvin-Planck và Clausius một cách định tính. Phát biểu nguyên lý 2 một cách định lượng cũng được đề cập đến cùng khái niệm Entropy trong chương này.

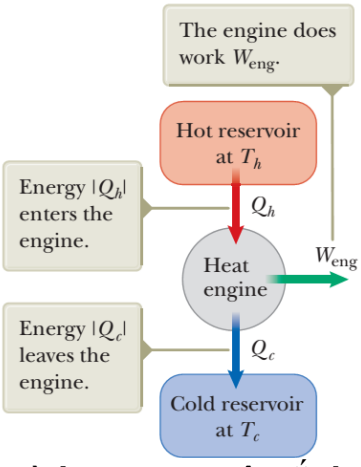
21.1 Động cơ nhiệt và định luật thứ hai của nhiệt động lực học

Máy nhiệt là máy hoạt động theo một chu trình tuần hoàn, liên tục *chuyển hóa:*

- *Nhiệt thành công:* đó là *động cơ nhiệt* ví dụ như động cơ Stirling, động cơ hơi nước, động cơ đốt trong hay động cơ diesel …
- *Công thành nhiệt* ví dụ máy lạnh, tủ lạnh, máy bơm nhiệt...

Tác nhân là các chất vận chuyển trong máy nhiệt.

Nguồn nhiệt là các vật có nhiệt độ khác nhau, trao đổi nhiệt với tác nhân. Nguồn nhiệt có nhiệt độ không đổi, sự trao đổi nhiệt không ảnh hưởng tới nhiệt độ của nó. Nguồn nhiệt có nhiệt độ cao hơn gọi là ***nguồn nóng*** T_h, nguồn nhiệt có nhiệt độ thấp hơn gọi là ***nguồn lạnh*** T_c.



Hình 22.2: Nguyên tắc hoạt động của một động cơ nhiệt

Hoạt động của động cơ nhiệt (hình 22.2): Tác nhân nhận nhiệt từ nguồn nóng (Q_h) để sinh công (W_{eng}) đồng thời mất nhiệt cho nguồn lạnh (Q_c) do có sự chênh lệch nhiệt độ. Sau một chu trình, hệ quay về trạng thái ban đầu nên $\Delta E_{int} = 0$, tương đương:

$$W_{net} + Q_{net} = 0 \leftrightarrow W_{net} = -Q_{net}$$

Với $W_{net} = \sum W_i$ là tổng công thực hiện sau 1 chu trình, W_i công thực hiện sau mỗi quá trình. $Q_{net} = \sum Q_i$ là tổng nhiệt lượng trao đổi sau 1 chu trình, Q_i nhiệt lượng trao đổi sau mỗi quá trình.

Gọi $Q_h = \sum Q_+$ là tổng lượng nhiệt hệ nhận vào sau 1 chu trình, Q_+ là nhiệt lượng nhận vào của quá trình, nên $Q_h > 0$; $Q_c = \sum Q_-$ tổng lượng nhiệt hệ tỏa ra sau 1 chu trình, Q_- là nhiệt lượng tỏa ra của quá trình, nên $Q_c < 0$.

Như vậy ta có $Q_{net} = Q_h - |Q_c|$, với $Q_h = \sum Q_+$ và $|Q_c| = |\sum Q_-|$

Từ đó ta có $W_{net} = -(Q_h + |Q_c|) < 0$, chứng tỏ tổng công thực hiện sau 1 chu trình nhỏ hơn 0, tức hệ sinh công sau 1 chu trình.

Gọi $W_{eng} = -W_{net}$ là lượng công hệ sinh ra sau 1 chu trình. Dựa vào biến đổi ở trên ta có:

$$W_{eng} = Q_h - |Q_c| \tag{22.1}$$

Biểu thức (22.1) thực chất là bảo toàn năng lượng: tổng nhiệt lượng hệ nhận Q_h vào 1 phần để sinh công W_{eng} và phần còn lại tỏa nhiệt $|Q_c|$ ra môi trường.

Hiệu suất hoạt động của động cơ nhiệt: là tỉ số giữa năng lượng có ích W_{eng} và năng lượng toàn phần Q_h.

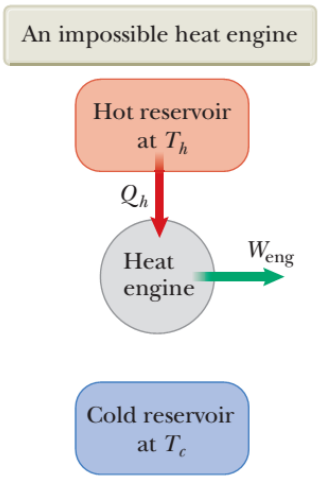
$$e = \frac{W_{eng}}{Q_h} = \frac{Q_h - |Q_c|}{Q_h} = 1 - \frac{|Q_c|}{Q_h} \tag{22.2}$$

Trong thực tế, mọi động cơ nhiệt chỉ sản sinh một phần năng lượng nhận được dưới dạng công cơ học. Do đó, hiệu suất của chúng luôn nhỏ hơn 100%. e < 1 nên $|Q_c|$ luôn khác 0, tức là một lượng năng lượng |Qc| nào đó phải được thải ra môi trường.

Phát biểu nguyên lý hai theo Kelvin-Planck

Không thể chế tạo được động cơ nhiệt hoạt động tuần hoàn, liên tục biến nhiệt thành công mà môi trường xung quanh không chịu sự biến đổi nào.

Động cơ nhiệt lý tưởng (động cơ vĩnh cữu) là động cơ nhiệt hoạt động tuần hoàn sinh công bằng với lượng nhiệt nhận vào (hình 22.3). Tức là động cơ hoạt động mà không tỏa nhiệt cho nguồn lạnh, đồng nghĩa hiệu suất 100%.Thực tế, không thể chế tạo một động cơ như vậy.



Hình 22.3: Mô hình động cơ vĩnh cữu

Câu hỏi 22.1: Một động cơ nhiệt nhận vào 1 năng lượng gấp 4 lần công mà nó thực hiện được. (i) Hiệu suất của động cơ là (a) 4, (b) 1, (c) 0,25 và (d) không xác định được. (ii) Tỉ số lượng nhiệt nhận vào trên lượng nhiệt tỏa ra là (a) 0,25, (b) 0,75, (c) 1 và (d) không xác định được.

Bài tập mẫu 22.1:

Một động cơ nhiệt nhận một nhiệt lượng $2.10^3\ J$ từ nguồn nóng trong 1 chu trình và tỏa ra cho nguồn lạnh lượng nhiệt $1{,}5.10^3\ J$. (a) Tính hiện suất của động cơ nhiệt. (b) Công mà động cơ sinh ra sau 1 chu trình? (c) Tính công suất của động cơ, biết động cơ quay được 2000 vòng/phút.

Giải:

(a) Áp dụng phương trình (22.2) tính được hiệu suất của động cơ nhiệt với $Q_h = 2.10^3 J$ và $|Q_c| = 1{,}5.10^3\ J$

$$e = 1 - \frac{|Q_c|}{Q_h} = 0{,}25\ hay\ 25\%$$

(b) Áp dụng phương trình (22.1) tính được công mà động cơ sinh ra sau một chu trình là:

$$W_{eng} = Q_h - |Q_c| = 5 \times 10^2 J$$

(c) Công suất của động cơ là khả năng sinh công của động cơ trên một đơn vị thời gian.

Đối với động cơ này, sau 1 chu kỳ T (thời gian thực hiện 1 vòng quay hay 1 chu trình) động cơ sinh công W_{eng}, thì công suất của động cơ là:

$$P = \frac{W_{eng}}{T}$$

Theo đề bài, ta có f = 2000 vòng/phút, suy ra:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{2000\ \frac{vòng}{phút}\cdot\frac{1\ phút}{60\ giây}} = 0{,}03\ giây$$

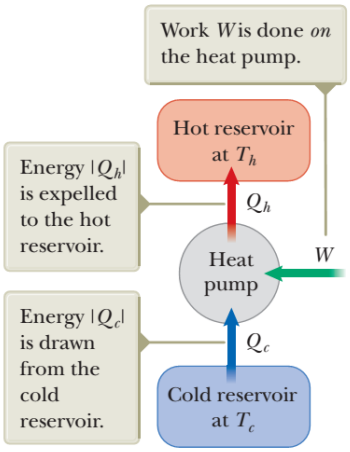
Vậy $P = \frac{5.10^2}{0{,}03} = 1{,}7.10^4 W$

21.2 Máy bơm nhiệt và máy làm lạnh

Các máy nhiệt có thể hoạt động theo hướng ngược lại với động cơ nhiệt. Đây không phải là hướng truyền năng lượng một cách tự nhiên. Ta phải đưa vào thiết bị một năng lượng để làm chuyện này. Các thiết bị làm được như vậy được gọi là *máy bơm nhiệt hay là máy lạnh.* Ví dụ tủ lạnh, máy điều hòa không khí là một dạng thường gặp của máy bơm nhiệt.

Một máy bơm nhiệt thực hiện chu trình biến đổi ngược với động cơ nhiệt. Nếu dấu mũi tên biểu diễn một chu trình của động cơ nhiệt là theo chiều kim đồng hồ thì đối với máy bơm nhiệt, dấu mũi tên theo chiều ngược chiều kim đồng hồ.

Trong một chu trình nghịch này, hệ sẽ nhận công W sau một chu trình, tức là bên ngoài phải thực hiện công lên hệ. Tác nhân nhận năng lượng này để thực hiện truyền nhiệt từ nguồn lạnh sang nguồn nóng, tức là tác nhân sẽ lấy được nhiệt lượng Q_c và tỏa nhiệt $|Q_h|$ ra nguồn nóng (hình 22.4).



Hình 22.4: Nguyên tắc hoạt động của máy bơm nhiệt.

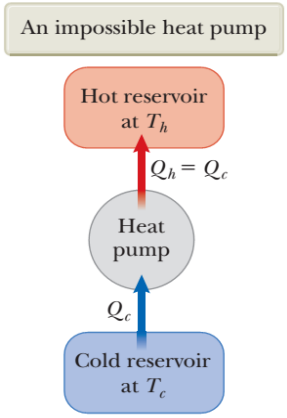
Suy ra

$$W = |Q_h| - |Q_c| \qquad (22.3)$$

Phát biểu nguyên lý hai theo Clausius

Không thể chế tạo được một máy hoạt động theo chu trình mà tác động duy nhất của nó là truyền nhiệt một cách liên tục từ một vật sang một vật khác có nhiệt độ cao hơn mà không nhận năng lượng dưới dạng công.

Máy làm lạnh lý tưởng là máy bơm nhiệt nhận năng lượng từ nguồn lạnh và truyền lượng năng lượng đó hoàn toàn cho nguồn nóng không cần nhận công. Đây là một máy bơm nhiệt không khả thi.



Hình 22.5: Máy bơm nhiệt lý tưởng

Hệ số thực hiện

Hiệu quả của một máy bơm nhiệt được mô tả bởi một số gọi là ***hệ số thực hiện*** (coefficient of performance – COP). Tương tự như hiệu suất nhiệt của động cơ nhiệt, nó là *tỉ số giữa cái mà ta nhận được* (năng lượng truyền cho hoặc nhận từ nguồn nhiệt) và *cái mà ta cho đi* (công nhận vào).

- Ở **chế độ làm** lạnh, ta "nhận" năng lượng từ nguồn lạnh.

$$\text{COP} = \frac{\textit{energy transferred at low temp}}{\textit{work done on the pump}} = \frac{|Q_c|}{W} \quad (22.4)$$

Một máy lạnh tốt cần phải có COP cao. Giá trị tiêu biểu thường là 5 hoặc 6.

- Ở **chế độ làm nóng**, COP là tỉ số giữa nhiệt lượng truyền vào với công cần thiết.

$$\text{COP} = \frac{\textit{energy transferred at high temp}}{\textit{work done by heat pump}} = \frac{|Q_h|}{W} \quad (22.5)$$

Nói chung, Q_h lớn hơn W, giá trị của COP khoảng là 4 (Với nhiệt độ bên ngoài khoảng 25°F).

Bài tập mẫu 22.2:

Một tủ lạnh gia đình có COP = 5. Khi tủ lạnh đang chạy, công suất ngõ vào 500W. Đặt một một mẫu nước nặng 500g, ở nhiệt độ 20°C vào trong ngăn đá. Hỏi rằng phải mất bao lâu mẫu nước đông thành đá ở 0°C. Giả sử tất cả các bộ phận khác của tủ lạnh ở cùng nhiệt độ và không có rò rỉ năng lượng ra bên ngoài.

Giải:

Ở đây ta thấy, năng lượng rời khỏi nước và nhiệt độ nước giảm xuống làm nước đóng băng. Khoảng thời gian cần thiết cho toàn bộ quá trình này có liên quan đến tốc độ năng lượng bị rút khỏi nước, từ đó, nó liên quan đến đầu vào nguồn của tủ lạnh, tức là công suất ngõ vào.

Ta có công suất của ngõ vào $= \frac{W}{\Delta t} \rightarrow \Delta t = \frac{W}{P}$, với W là công thực hiện bởi bộ phận bơm nhiệt.

Mặc khác, phương trình (22.4) cho ta liên hệ giữa W và COP của tủ lạnh: $COP = \frac{|Q_c|}{W}$ với $|Q_c|$ là lượng nhiệt lấy đi từ mẫu nước.

Ta tính được nhiệt lượng cần lấy đi để mẫu nước từ 20°C đông đá chính bằng nhiệt lượng lấy đi để mẫu nước giảm nhiệt độ từ 20°C về 0°C cộng với nhiệt đông đặc nước đá ở 0°C:

$$|Q_c| = |mc\Delta T + L_f \Delta m|$$

Với m là khối lượng nước, $\Delta m = 0 - m = -m$ (khối lượng nước lúc sau trừ khối lượng nước ban đầu = khối lượng băng).

Tóm lại, ta tính được thời gian để làm đông nước:

$$\Delta t = \frac{|Q_c|}{P.(COP)} = \frac{|m(c\Delta T - L_f)|}{P.(COP)}$$

Theo đề bài: $m = 0{,}5\ kg$, $P = 500\ W$, $COP = 5$. Tra bảng ở chương 20 các số liệu nhiệt dung riêng và nhiệt chuyển pha: $c = 4186\ J/kg.^oC$ và $L_f = 3{,}33.10^5\ J/kg$. Thế số ta tính được $\boldsymbol{\Delta t = 83{,}3\ s}$.

21.4 Quá trình thuận nghịch và không thuận nghịch

Quá trình thuận nghịch:

- Là quá trình diễn biến theo cả hai chiều trong đó nếu lúc đầu quá trình diễn ra theo một chiều nào đó (chiều thuận) rồi sau lại diễn ra theo chiều ngược lại để trở về trạng thái ban đầu thì hệ đi qua mọi trạng thái giống như lúc hệ diễn biến theo chiều thuận và khi hệ đã trở về trạng thái ban đầu thì không gây ra một biến đổi gì cho môi trường xung quanh.
- Đặc tính tổng quát của quá trình thuận nghịch là không xuất hiện một tác dụng hao phí nào (các dòng xoáy của chất khí hoặc ma sát) để chuyển cơ năng thành nội năng.

Quá trình không thuận nghịch:

- Mọi quá trình thực do diễn biến nhanh hoặc vì bao giờ cũng có sự tỏa nhiệt do ma sát nên chúng đều không phải là quá trình thuận nghịch. Trong trường hợp này khi hệ trở lại trạng thái ban đầu thì quá trình đã gây ra một sự biến đổi cho môi trường. Những quá trình này gọi là quá trình không thuận nghịch.
- Mọi quá trình trong tự nhiên được biết là không thuận nghịch. Các quá trình thuận nghịch là một sự lý tưởng hóa, nhưng một số quá trình thực lại là sự gần đúng tốt. Nếu chúng xảy ra càng chậm và càng ít ma sát thì chúng càng gần đúng với quá trình thuận nghịch.

21.5 Động cơ Carnot

Đây là một động cơ lý thuyết được thiết kế bởi Sadi Carnot. Động cơ nhiệt hoạt động theo một chu trình lý tưởng, thuận nghịch (chu trình Carnot) giữa hai nguồn nhiệt. Động cơ này có hiệu suất cao nhất có thể đạt được. Động cơ này thiết lập giới hạn trên của các hiệu suất của tất cả các động cơ khác.

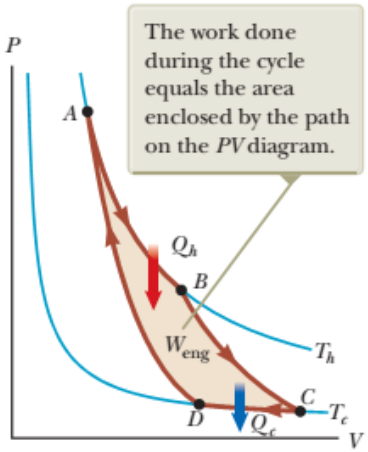
Định lý Carnot

Không có động cơ nhiệt nào hoạt động giữa hai nguồn nhiệt có thể đạt hiệu suất cao hơn động cơ Carnot hoạt động cũng giữa hai nguồn nhiệt đó.

Chu trình Carnot

Là chu trình gồm 2 quá trình đẳng nhiệt và 2 quá trình đoạn nhiệt xen kẽ nhau (hình 22.6). Cụ thể: A→B là sự giãn nở đẳng nhiệt, B→C là quá trình giãn nở đoạn nhiệt, C→D là quá trình nén đẳng nhiệt và D→A là quá trình nén đoạn nhiệt.

Công W_{eng} thực hiện bởi động cơ được chỉ ra trong hình là diện tích giới hạn bởi chu trình. $W_{eng} = Q_h - |Q_c| = Q_{AB} - |Q_{CD}|$



Hình 22.6: Chu trình Carnot

Hiệu suất của động cơ Carnot

Carnot đã chỉ ra rằng hiệu suất của động cơ phụ thuộc vào nhiệt độ của các nguồn nhiệt.

$$e = \frac{W_{eng}}{Q_h} = 1 - \frac{|Q_c|}{Q_h} = 1 - \frac{T_C}{T_h} \quad (22.6)$$

với các nhiệt độ phải tính theo Kelvin.

Lưu ý về hiệu suất Carnot

- Hiệu suất chỉ bằng 100% khi T_c = 0 K → Không thể có nguồn nhiệt như vậy, nên hiệu suất luôn nhỏ hơn 100%.
- Nhìn vào biểu thức (22.6) ta thấy hiệu suất tăng khi giảm T_c và tăng T_h. Trong hầu hết các trường hợp thực tiễn, T_c gần với nhiệt độ phòng (300 K). Như vậy, một cách tổng quát, để tăng hiệu suất động cơ nhiệt thì ta phải tăng nhiệt độ nguồn nóng T_h.

Chu trình Carnot ngược

Theo lý thuyết, một động cơ làm việc theo chu trình Carnot có thể chạy theo chiều ngược lại. Nó sẽ tạo ra một máy bơm nhiệt với hiệu suất cao nhất có thể.

Điều này sẽ xác định được giá trị lớn nhất có thể của COP đối với một tổ hợp cho trước của cá nguồn nóng và nguồn lạnh.

COP của các máy bơm nhiệt Carnot

- Chế độ sưởi ấm:

$$COP_C = \frac{|Q_h|}{W} = \frac{T_h}{T_h - T_c} \frac{\text{Opposite}}{\text{Hypotenuse}} \quad (22.7)$$

- Chế độ làm lạnh:

$$COP_C = \frac{|Q_c|}{W} = \frac{T_c}{T_h - T_c} \quad (22.8)$$

Trên thực tế, giá trị của COP là nhỏ hơn 10.

Câu hỏi 22.2: Ba động cơ hoạt động với các nguồn nhiệt riêng biệt đều chênh lệch 300 K. Cụ thể: động cơ A có T_h = 1000 K, T_c = 700K; động cơ B T_h = 800 K, T_c = 500K, động cơ C T_h = 600 K, T_c = 300K. Hãy sắp xếp hiệu suất của động cơ từ lớn nhất đến nhỏ nhất.

Bài tập mẫu 22.3:

Hãy dẫn ra biểu thức tính hiệu suất của chu trình Carnot (phương trình 22.6).

Giải:

Để tính hiệu suất của động cơ nhiệt, bước đầu tiên chúng ta liệt kê biểu thức nhiệt lượng của từ quá trình, sau đó xét dấu các nhiệt lượng đó để tính tổng nhiệt lượng hệ nhận vào Q_h và tổng nhiệt lượng hệ tỏa ra $|Q_c|$ sau một chu trình.

Liệt kê:

$Q_{AB} = nRT_h ln\frac{V_B}{V_A} > 0$ $(do\ V_B > V_A)$

$Q_{BC} = Q_{DA} = 0$ ($quá\ trình\ đoạn\ nhiệt$)

$Q_{CD} = nRT_c ln\frac{V_D}{V_C} < 0$ ($do\ V_D < V_C$)

Sau khi xét dấu, ta tính được:

Tổng nhiệt lượng hệ nhận vào Q_h sau một chu trình: $Q_h = Q_{AB} = nRT_h ln\frac{V_B}{V_A}$

Tổng nhiệt lượng hệ tỏa ra $|Q_c|$ sau một chu trình: $|Q_c| = |Q_{CD}| = nRT_c ln\frac{V_C}{V_D}$

Cuối cùng thế vào biểu thức tính hiệu suất của động cơ nhiệt:

$$e = 1 - \frac{|Q_c|}{Q_h} = 1 - \frac{nRT_c ln\frac{V_C}{V_D}}{nRT_h ln\frac{V_B}{V_A}} \qquad (1)$$

Áp dụng phương trình (21.18) đối với 2 quá trình đoạn nhiệt:

$$Quá\ trình\ B \to C: \qquad T_h V_B^{\gamma-1} = T_c V_C^{\gamma-1} \qquad (2)$$

$$Quá\ trình\ D \to A: \qquad T_c V_D^{\gamma-1} = T_h V_A^{\gamma-1} \qquad (3)$$

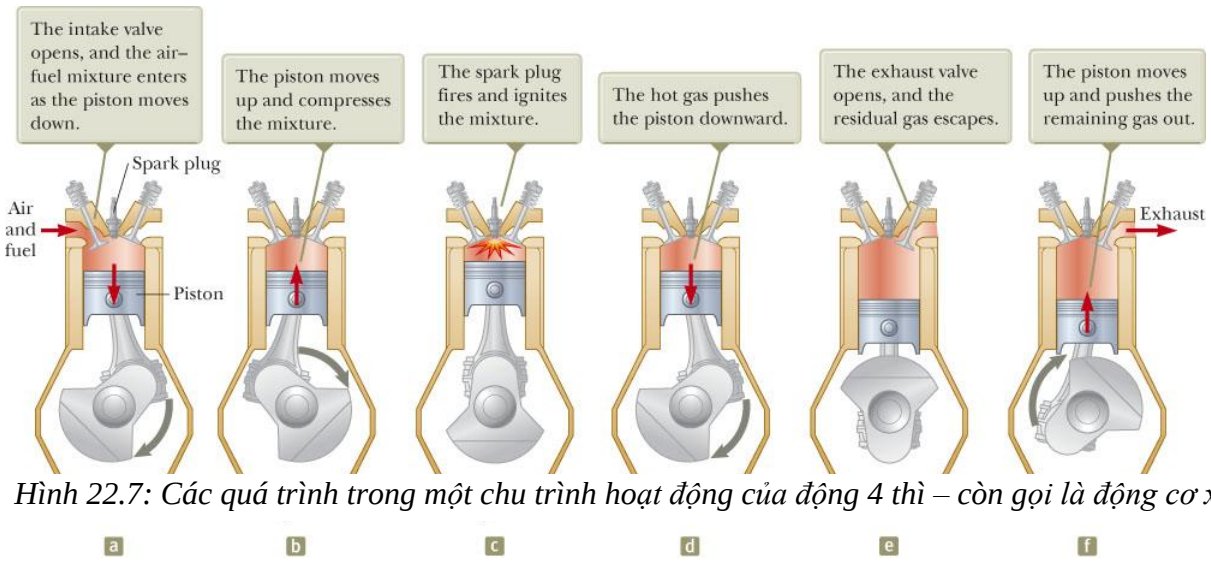
Tỉ lệ phương trình (2) và (3) cho nhau ta thu được tỉ số: $\frac{V_C}{V_D} = \frac{V_B}{V_A}$. Thế vào (1) ta được điều phải chứng minh:

$$e = 1 - \frac{T_C}{T_h}$$

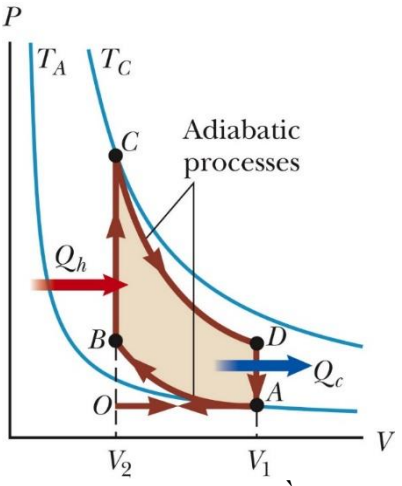
21.6 Động cơ xăng và động cơ Diesel

Một động cơ xăng diễn ra 6 quá trình tương ứng 4 kỳ nạp, nén, nổ, xả trong một chu trình như hình 22.7 bên dưới. Có thể xem các quá trình trong chu trình gần đúng với chu trình Otto như hình 22.8.

Cụ thể như sau:



Hình 22.7: Các quá trình trong một chu trình hoạt động của động 4 thì – còn gọi là động cơ xăng.



Hình 22.8: Giản đồ PV của chu trình Otto - động cơ xăng

- ***Thì nạp:*** Trong quá trình này, pit-tông chuyển động xuống dưới, hỗn hợp xăng và không khí được hút vào xi-lanh. Năng lượng đi vào hệ bởi sự truyền vật chất dưới dạng thế năng của nhiên liệu. Thể tích tăng từ V_2 đến V_1. *Quá trình nạp ứng với O → A trong đồ thị PV* của chu trình Otto.
- ***Thì nén:*** Pit-tông chuyển động lên trên, hỗn hợp không khí và nhiên liệu bị nén đoạn nhiệt. Thể tích của hỗn hợp biến thiên từ V_1 đến V_2. Nhiệt độ của hệ tăng lên. Công thực hiện lên khí là dương và bằng về độ lớn nhưng trái dấu với phần diện tích bên dưới đường cong. *Kỳ này ứng với đoạn A → B trong chu trình Otto.*
- ***Thì nổ:*** Sự đốt cháy xảy ra khi bu-gi đánh lửa. Sự đốt cháy xảy ra rất nhanh khi pit-tông đang ở vị trí cao nhất của nó. Sự đốt cháy ứng với sự trao đổi năng lượng từ thế năng sang nội năng. Nhiệt độ tăng từ T_B đến T_C nhưng thể tích vẫn gần như cũ. *Ứng với đoạn B → C trong chu trình Otto.* Sau đó khí giãn nở đoạn nhiệt. Thể tích biến đổi từ V_2 về V_1. Nhiệt độ giảm từ T_c đến T_D. Khí sinh công. Công này bằng diện tích bên dưới đường cong. *Ứng với đoạn C → D trong chu trình Otto.*
- ***Thì xả:*** Van xả mở ra khi pit-tông đến vị trí thấp nhất, áp suất giảm đột ngột, thể tích gần như không đổi. Không có sự sinh công, năng lượng thoát ra từ bên trong xi-lanh. *Đây là quá trình D → A trong đồ thị PV của chu trình Otto.*

Cuối cùng, pit-tông chuyển động lên trên trong khi van xả vẫn mở. Các khí còn dư được thải ra khí quyển. Thể tích giảm từ V_1 về V_2. *Ứng với đoạn A → O trên đồ thị PV của chu trình Otto.*

Bốn Thì Nạp, Nén, Nổ, Xả được hoàn tất và động cơ lại tiếp tục chu trình mới.

Hiệu suất của chu trình Otto

Nếu hỗn hợp không khí–nhiên liệu được xem là khí lý tưởng thì hiệu suất của chu trình Otto là:

$$e = 1 - \frac{1}{(V_1/V_2)^{\gamma-1}} \tag{22.9}$$

Trong đó γ là tỉ số nhiệt dung phân tử, V_1/V_2 *được gọi là tỉ số nén.*

Thực tế, hiệu suất của động cơ Otto là từ 15% đến 20%. Chủ yếu là do ma sát, trao đổi năng lượng do truyền nhiệt và đốt cháy không hoàn toàn hỗn hợp không khí – nhiên liệu.

Động cơ Diesel

Hoạt động với một chu trình tương tự như chu trình Otto nhưng không có bu-gi. Tỉ số nén cao hơn nhiều nên nhiệt độ của xi-lanh vào cuối kỳ nén cũng cao hơn nhiều. Nhiên liệu được phun vào và nhiệt độ đủ cao để hỗn hợp tự cháy mà không cần bu-gi.

Động cơ Diesel có hiệu suất cao hơn động cơ xăng.

21.7 Entropy

Entropy là một biến trạng thái liên quan đến nguyên lý thứ hai nhiệt động lực học. Entropy không phải năng lượng. Chúng là các khái niệm rất khác nhau. Tầm quan trọng của entropy tăng theo sự phát triển của cơ học thống kê.

Một hệ cô lập có xu hướng ngày càng hỗn loạn và entropy là số đo tự nhiên của mức độ hỗn loạn.

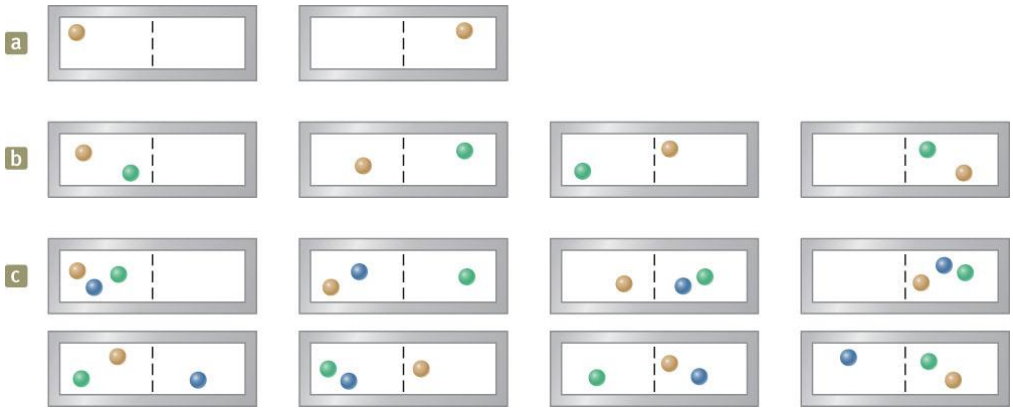
Trạng thái vi mô và trạng thái vĩ mô

- Trạng thái vi mô là một cấu hình cụ thể của các cấu thành riêng biệt của hệ.
- Trạng thái vĩ mô là sự mô tả về các điều kiện từ quan điểm vĩ mô. Các biến vĩ mô như áp suất, mật độ và nhiệt độ của khí.
- Đối với một trạng thái vĩ mô đã cho, có thể có nhiều trạng thái vi mô. Tất cả các trạng thái vi mô được giả định là đồng khả năng.

Khi tất cả các trạng thái vi mô khả dĩ được xem xét, người ta thấy rằng các trạng thái vĩ mô tương ứng với sự hỗn loạn có nhiều trạng thái vi mô hơn so với trạng thái vĩ mô tương ứng với sự trật tự.

Xác suất để một hệ biến đổi (theo thời gian) từ một trạng thái vĩ mô có trật tự sang một trạng thái vĩ mô hỗn loạn là lớn hơn so với sự dịch chuyển ngược lại.

Trạng thái vĩ mô hỗn loạn có nhiều trạng thái vi mô hơn. Càng có nhiều trạng thái vi mô trong một trạng thái vĩ mô cụ thể thì xác suất xuất hiện của trạng thái vĩ mô này càng cao.



Hình 22.9: Ví dụ về phân tử

Ví dụ về phân tử

- Một phân tử trong một bình chứa có hai phía có cơ hội 1 trong 2 để ở phía bên trái (hình 22.9a).
- Hai phân tử có cơ hội 1 trong 4 để có mặt đồng thời ở phía bên trái (hình 22.9b).
- Ba phân tử có cơ hội 1 trong 8 để đồng thời ở phía bên trái (hình 22.9c).
- Xét 100 phân tử trong bình chứa. Xác suất để 50 phân tử chuyển động nhanh nằm về một bên và 50 phân tử chuyển động chậm nằm về bên kia là $(½)^{100}$.
- Nếu ta có một mol khí, thì điều này rất khó xảy ra.

Ví dụ với các viên bi

Giả sử ta có một cái túi có 50 viên bi đỏ (R) và 50 viên bi lục (G). Rút ra một viên bi và ghi lại màu của nó, thả nó trở lại vào túi và rút một bi khác. Tiếp tục cho đến khi rút được 4 viên bi. Các trạng thái vĩ mô có thể là gì và xác suất của chúng bằng bao nhiêu?

Kết quả được xem xét trong bảng bên dưới. Kết luận:

- Trạng thái vĩ mô dễ xảy ra nhất và cũng là hỗn độn nhất là trạng thái ứng với nhiều trạng thái vi mô nhất.
- Trạng thái vĩ mô khó xảy ra nhất và cũng là trật tự nhất là trạng thái ứng với ít trạng thái vi mô nhất.

Bảng 22.1: Các kết quả khả dĩ việc rút bi khỏi túi

Macrostate	Possible Microstates	Total Number of Microstates
All R	RRRR	1
1G, 3R	RRRG, RRGR, RGRR, GRRR	4
2G, 2R	RRGG, RGRG, GRRG, RGGR, GRGR, GGRR	6
3G, 1R	GGGR, GGRG, GRGG, RGGG	4
All G	GGGG	1

21.8 Sự biến thiên Entropy trong các hệ nhiệt động

Entropy là đại lượng liên quan đến sự truyền năng lượng bằng nhiệt trong một quá trình thuận nghịch. Gọi dQ_r là năng lượng truyền do nhiệt khi một hệ biến đổi theo một đường thuận nghịch. ***Độ biến thiên Entropy của một quá trình vi phân*** là:

$$dS = \frac{dQ_r}{T} \tag{22.10}$$

Đặc điểm:

- Độ biến thiên của entropy chỉ phụ thuộc các điểm đầu và cuối của quá trình mà không phụ thuộc vào dạng đường đi.
- Độ biến thiên entropy đối với một quá trình không thuận nghịch có thể được xác định bằng cách tính độ biến thiên entropy của quá trình thuật nghịch có cùng điểm đầu và điểm cuối.

Độ biến thiên entropy của một quá trình hữu hạn

Đối với một quá trình hữu hạn, T không phải là hằng số trong suốt quá trình. Nên độ biến thiên entropy của hệ khi đi từ một trạng thái đến một trạng thái khác có cùng giá trị đối với mọi đường nối hai trạng thái này:

$$\Delta S = \int_i^f dS = \int_i^f \frac{dQ_r}{T} \tag{22.11}$$

Độ biến thiên hữu hạn của entropy chỉ phụ thuộc vào các thuộc tính của các trạng thái cân bằng đầu và cuối của hệ. Do đó, ta tùy ý chọn một đường thuận nghịch cụ thể để đánh

giá entropy thay vì phải chọn một đường thực tế, bởi vì các trạng thái đầu và cuối là như nhau.

Độ biến thiên entropy được biểu diễn trong công thức Bolzman

$$\Delta S = k_B ln\left(\frac{W_f}{W_i}\right) \qquad (22.12)$$

Hay Entropy trong thang chia vi mô

$$S = k_B lnW \qquad (22.13)$$

Với W_i, W_f là *số trạng thái vi mô* đầu và cuối cho các cấu hình đầu và cuối tương ứng của hệ. Nếu $W_f > W_i$ thì trạng thái cuối của hệ khả dĩ dơn trạng thái đầu và entropy của hệ tăng.

Càng có nhiều trạng thái vi mô ứng với một trạng thái vĩ mô cho trước thì entropy của trạng thái vĩ mô này lớn hơn. Điều này cho thấy rằng ***entropy là một số đo mức hỗn loạn.***

Câu hỏi 22.4: Một khí lý tưởng tăng nhiệt độ từ T_i đến T_f dọc theo 2 đường khác nhau. Đường A là quá trình đẳng áp, đường B là quá trình đẳng tích. Liên hệ độ biến thiên entropy của 2 đường này: (a) $\Delta S_A > \Delta S_B$, (b) $\Delta S_A = \Delta S_B$ và (c) $\Delta S_A < \Delta S_B$.

Câu hỏi 22.5: Độ biến thiên entropy của quá trình đoạn nhiệt bằng 0 do Q = 0 đúng hay sai?

Độ biến thiên entropy đối với một chu trình thuận nghịch

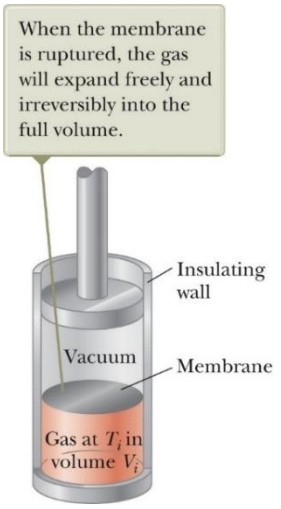
Entropy chỉ phụ thuộc vào trạng thái của hệ, nên sau một chu trình, hệ quay về trạng thái đầu tiên nên độ biến thiên entropy đối với một chu trình bằng 0.

$$\Delta S = \oint \frac{dQ_r}{T} = 0 \qquad (22.14)$$

Dấu tích phân chỉ ra rằng phép tích phân lấy trên một đường cong kín.

Độ biến thiên entropy đối với quá trình dãn nở tự do

Hãy xét sự giãn nở tự do, quá trình đoạn nhiệt (hình 22.10). Quá trình này là không thuận nghịch vì khí không thể tự động co lại một nửa thể tích sau khi đã chiếm toàn bộ thể tích. Chính vì vậy không thể lấy $Q = 0$, chúng ta cần tìm Q_r của quá trình nghịch với cùng điểm đầu và điểm cuối.



Hình 22.10: Quá trình giãn nở tự do đoạn nhiệt của chất khí.

Để đơn giản, ta chọn một sự giãn nở đẳng nhiệt, thuận nghịch trong đó khí chỉ ép vào pit-tông khi năng lượng đi vào hệ từ một nguồn có nhiệt độ T không đổi, ta thu được biểu thức:

$$\Delta S = \int_i^f \frac{dQ_r}{T} = \frac{1}{T}\int_i^f dQ_r = nRln\left(\frac{V_f}{V_i}\right) \qquad (22.15)$$

Do $V_f > V_i$, nên $\Delta S > 0$ có nghĩa là entropy tăng. Kết quả này cũng giống với giãn nở đoạn nhiệt không thuận nghịch.

Độ biến thiên entropy đối với quá trình truyền nhiệt

Xét một hệ gồm một nguồn nóng có nhiệt độ T_h và một nguồn lạnh có nhiệt độn T_c tiếp xúc nhiệt với nhau và cách nhiệt so với bên ngoài. Một quá trình truyền nhiệt lượng Q từ nguồn nóng sang nguồn lạnh. Đây là quá trình không thuận nghịch vì chiều truyền nhiệt ngược lại không xảy ra. Tóm lại, quá trình bao gồm 2 quá trình: năng lượng rời khỏi nguồn nóng và năng lượng đi vào nguồn lạnh. Chúng ta sẽ tính độ biến thiên entropy trong mỗi quá trình sau đó cộng lại sẽ được độ biến thiên entropy tổng hợp.

Nguồn lạnh nhận một năng lượng Q và entropy của nó biến đổi một lượng Q/T_c. Đồng thời, nguồn nóng mất một năng lượng Q và entropy biến đổi một lượng $-Q/T_h$. Như vậy độ biến thiên entropy của hệ là:

$$\Delta S = \frac{Q}{T_c} - \frac{Q}{T_h} \tag{22.16}$$

Do $T_h > T_c$, nên ta có $\Delta S > 0$, tức là entropy của hệ tăng.

21.9 Entropy và nguyên lý thứ hai nhiệt động học

Xét một hệ và môi trường xung quanh nó, hay là toàn bộ vũ trụ. Vũ trụ thì luôn vận động về phía trạng thái vi mô xác suất cao hơn, tương ứng với sự lan truyền năng lượng liên tục. Một cách phát biểu khác của quá trình này là:

"Entropy của Vũ trụ tăng trong tất cả quá trình thực"

Phát biểu này tương đương với các phát biểu nguyên lý thứ hai của Kelvin-Planck và Clausius.

$$\Delta S_U = \frac{Q}{T_c} + \frac{-Q}{T_h} > 0$$

Độ tăng entropy được mô tả trong nguyên lý hai là độ tăng entropy của hệ và của môi trường quanh nó. Khi một hệ và môi trường quanh nó tương tác trong một quá trình không thuận nghịch độ tăng entropy của cái này là lớn hơn độ giảm entropy của cái kia. Độ biến thiên entropy của Vũ trụ phải lớn hơn hoặc bằng 0 đối với quá trình không thuận nghịch và bằng 0 với quá trình thuận nghịch.

Sự chết nhiệt của Vũ trụ

Entropy của Vũ trụ sẽ đạt đến giá trị cực đại. Ở giá trị này, Vũ trụ sẽ ở một trạng thái đồng nhất về nhiệt và mật độ. Toàn bộ các quá trình vật lý, hóa học và sinh học sẽ ngừng lại. Trạng thái của sự hỗn loạn hoàn hảo hàm ý rằng không có năng lượng nào có thể sinh công. Trạng thái này được gọi là sự chết nhiệt của Vũ trụ.

Câu hỏi lý thuyết chương 22

1. Liệu nguyên lý thứ hai nhiệt động lực học có mâu thuẫn hay dùng để sửa chữa nguyên lý một không ? Lập luận cho câu trả lời của bạn.
2. "Nguyên lý thứ nhất nhiệt động lực học nói rằng không thể có động cơ vĩnh cửu, và nguyên lý thứ hai nhiệt động lực học nói rằng bạn thậm chí không thể chế tạo động cơ vĩnh cửu." Nêu một thiết bị hoặc quy trình cụ thể để giải thích tuyên bố trên.
3. Tua bin hơi nước là một thành phần chính của một nhà máy điện. Ta có nhiệt độ của hơi nước càng cao càng tốt. Giải thích tại sao?
4. Giả sử cô bạn dọn dẹp căn phòng bừa bộn của bạn sau một bữa tiệc lớn. Bởi vì cô ấy sắp xếp đồ đạc trật tự, gọn gang hơn, quá trình này có vi phạm nguyên lý thứ hai nhiệt động lực học không?
5. Yếu tố nào ảnh hưởng đến hiệu suất của động cơ ô tô ?

Bài tập chương 22

1. Một động cơ nhiệt có công suất là 5 kW và hiệu suất động cơ là 25%. Động cơ thải ra 8.10^3 J nhiệt lượng trong mỗi chu trình. Tính (a) Nhiệt lượng nhận vào trong mỗi chu trình và (b) thời gian thực hiện một chu trình.

   ĐS: 10,7 kJ; 0,53 s

2. Một động cơ nhiệt nhận nhiệt lượng 360 J từ nguồn nóng và thực hiện 25 J công trong mỗi chu trình. Tính (a) Hiệu suất động cơ ? (b) Nhiệt lượng tỏa ra cho nguồn lạnh trong mỗi chu trình.

   ĐS: 6,94 %; 355 J

3. Một động cơ xăng của máy bay, hoạt động ở tốc độ $2,5.10^3$ vòng/phút, nhận năng lượng $7,89.10^3$ J và thải ra $4,58.10^3$ J cho mỗi vòng quay của trục khuỷu . (a) Có bao nhiêu lít nhiên liệu được tiêu thụ trong 1giờ hoạt động nếu nhiệt đốt cháy nhiên liệu là $4,03.10^7$ J/L? (b) Tính công suất ở ngõ ra của động cơ (theo đơn vị mã lực)? Bỏ qua ma sát. (c) Mô men xoắn của trục khuỷu trên tải bằng bao nhiêu? (d) Công suất của hệ thống làm mát của động cơ?

   ĐS: 29,4 L/h; 185 hp; 527 N.m; $1,91.10^5$ W

4. Giả sử một động cơ nhiệt có hai nguồn, một nguồn là một hồ chứa nhôm nóng chảy ở nhiệt độ 660^0 C và một nguồn là một khối thủy ngân rắn có nhiệt độ $-38,9^0$ C. Động cơ chạy bằng cách làm đông đặc 1g nhôm và làm nóng chảy 15g thủy ngân trong mỗi chu trình. Cho biết nhiệt độ nóng chảy của nhôm là 660^0C và nhiệt độ nóng chảy của thủa ngân $-38,9^0$C Nhiệt nóng chảy của nhôm là $3,97.10^5$ J/kg; Nhiệt nóng chảy của thủy ngân là $1,18.10^4$ J/kg. Tính hiệu suất động cơ.

   ĐS: 55,4 %

5. Máy bơm nhiệt ở chế độ làm nóng có hệ số thực hiện là 3,8 và hoạt động với công suất tiêu thụ là $7{,}03.10^3$ W. (a) Tính nhiệt lượng mà máy thải ra nhà bạn trong thời gian hoạt động 8h liên tục? (b) Tính nhiệt lượng mà máy thu được từ không khí bên ngoài?

   ĐS: $7{,}69.10^8$ J; $5{,}67.10^8$ J

6. Tủ lạnh có hệ số thực hiện của chế độ làm lạnh là 3. Nhiệt độ trong ngăn đá là -20°C và nhiệt độ phòng là 22°C. Tủ lạnh có thể chuyển 30 g nước ở nhiệt độ 22°C thành 30 g đá ở nhiệt độ -20°C trong mỗi phút. Tính công suất của máy theo đơn vị W. Biết nhiệt dung riêng của nước và nước đá lần lượt là 4186 J/kg.^{o}C và 2090 J/kg.^{o}C; nhiệt nóng chảy của nước là $L_F = 3{,}33.10^5$ J/kg.

   ĐS: 77,8 W

7. Một động cơ hoạt động theo Carnot có công suất ra là 150 kW. Động cơ hoạt động giữa hai nguồn 20°C và 500°C. (a) Tính nhiệt lượng động cơ nhận được trong mỗi giờ? (b) Tính nhiệt lượng động cơ tỏa ra trong mỗi giờ?

   ĐS: $8{,}7.10^8$ J; $3{,}3.10^8$ J

8. Tính hệ số làm lạnh của tủ lạnh hoạt động theo chu trình Carnot với nhiệt độ hai nguồn là 23°C and 127°C.

   ĐS: 9

9. Tính công của một tủ lạnh hoạt động theo Carnot lý tưởng nhận 1 J nhiệt lượng từ heli hóa lỏng ở nhiệt độ 4 K và thải ra môi trường ngoài ở nhiệt độ phòng (293 K)?

   ĐS: 72,2 J

10. Một khối khí lý tưởng thực hiện chu trình Carnot. Quá trình giãn đẳng nhiệt xảy ra ở nhiệt độ 250°C, và quá trình nén đẳng nhiệt diễn ra ở nhiệt độ 50°C. Khí lấy $1{,}20\times 10^3$ J năng lượng từ nguồn nóng trong quá trình giãn đẳng nhiệt. Tìm (a) Nhiệt lượng thải ra nguồn lạnh trong mỗi chu kỳ và (b) Công thực hiện bởi khí trong mỗi chu kỳ.

    ĐS: 741 J; 459 J

11. Một động cơ nhiệt hoạt động trong chu trình Carnot giữa hai nguồn nhiệt 80°C và 350°C. Nó hấp thụ 21000 J nhiệt lượng từ nguồn nóng trong mỗi chu trình. Thời gian của mỗi chu trình là 1s. (a) Tính công suất của động cơ? (b) Tính nhiệt lượng tỏa ra trong mỗi chu trình?

    ĐS: 9,1 kW; 11,9 kJ

12. Một trạm phát điện được thiết kế để có công suất ngõ ra là 1,40 MW, sử dụng một tuabin có hiệu suất bằng hai phần ba hiệu suất của động cơ Carnot. Nhiệt lượng khí thải được truyền vào một tháp giải nhiệt có nhiệt độ 110^{o}C. (a) Tính công suất truyền nhiệt lượng của nhà máy điện cho tháp giải nhiệt theo nhiệt độ đốt cháy nhiên liệu T_h. (b) Nếu buồng đốt tăng nhiệt độ thì lượng khí thải ra thay đổi như thế nào? (c) Tính công suất của ống xả ứng với $T_h = 800^0$C. (d) T_h bằng bao nhiêu để công suất ống xả bằng một nửa giá trị

tính ở phần (c). (e) T_h bằng bao nhiêu để công suất ống xả bằng một phần tư giá trị tính ở phần (c).

ĐS: 1,87 MW; $3,84.10^3$ K

13. Khí gaz trong một xy lanh của động cơ ô tô có thể tích 50 cm^3 và áp suất ban đầu là $3,00.10^6$ Pa. Khi đốt cháy nhiệt độ tăng làm cho khí đốt giãn nở tạo nên áp suất tác dụng lên một piston (pít-tông) đẩy piston này di chuyển đi. Pít-tông giãn nở đến thể tích cuối cùng là 300 cm^3 và khí xem như giãn nở đoạn nhiệt. (a) Tính Áp suất cuối cùng của khí? (b) Tính công việc được thực hiện trong quá trình này?

ĐS: $2,44.10^5$ Pa; 192 J

14. Một động cơ diesel lý tưởng hoạt động theo chu trình cấp nhiệt đẳng áp, thể hiện như hình bên. Đặc điểm của chu trình này là trong quá trình nạp, xylanh chỉ nạp không khí, sau đó, không khí được nén đoạn nhiệt theo quá trình A-B. Tại trạng thái B, áp suất cao, nhiệt độ cao hơn nhiệt độ tự bốc cháy của nhiên liệu, khi đó, người ta phun nhiên liệu lỏng vào xylanh có sẵn không khí nóng, và tự bốc cháy. B-C là quá trình vừa cháy vừa dịch chuyển pittông, xem là quá trình đẳng áp (cháy chậm). Sau đó, pittông di chuyển đi xuống, hai van nạp và xả đóng, sản phẩm cháy giãn nở đoạn nhiệt, sinh công có ích (quá trình CD),. Khi pittông đến điểm D, van xả mở, van nạp đóng, sản phẩm cháy được thải ra ngoài làm áp suất trong xylanh giảm xuống đột ngột (quá trình DA), pittông lại dịch chuyển lên, sản phẩm cháy còn lại trong xylanh được quét thải ra ngoài, tiếp tục thực hiện lại quá trình nạp như ban đầu. Chứng minh hiệu suất của động cơ hoạt động trong chu kỳ diesel này là $e = 1 - \frac{1}{\gamma}\left(\frac{T_D - T_A}{T_C - T_B}\right)$

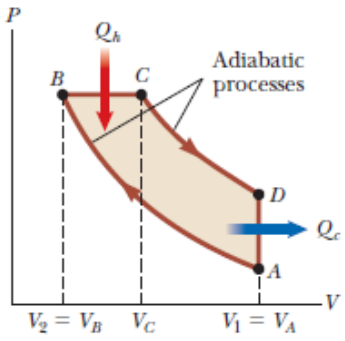


Figure P22.38

15. Một thùng chứa 2L có hai ngăn bằng nhau như trong hình. Ngăn bên trái chứa 0,044mol khí H_2 và ngăn bên phải chứa 0,044mol khí O_2. Cả hai loại khí đều ở nhiệt độ phòng và ở áp suất khí quyển. Nếu bỏ vách ngăn hai bên khí được phép trộn lẫn nhau. Entropy của hệ tăng lên bao nhiêu?

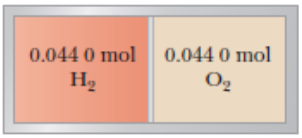


Figure P22.49

ĐS: 0,51 J/K

16. Entropy thay đổi như thế nào khi một khối băng nặng 27,9 g ở -12°C được chuyển thành hơi ở nhiệt độ 115°C?

ĐS: 244 J/K

17. Cho 1 mol khí đơn nguyên tử thực hiện chu trình như hình vẽ. Quá trình AB là quá trình giãn đẳng nhiệt. Tính (a) Tổng công khí thực hiện, (b) Nhiệt lượng khí nhận vào, (c) Nhiệt lượng khí tỏa ra (d) Hiệu suất chu trình. (e) So sánh hiệu suất trên với hiệu suất của động cơ hoạt động theo chu trình Carnot với nhiệt độ nguồn nóng và nguồn lạnh lần lượt là nhiệt độ cực đại và cực tiểu của chu trình trên.

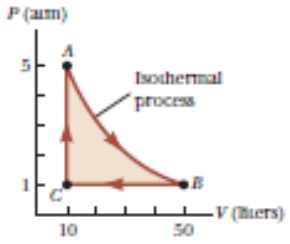
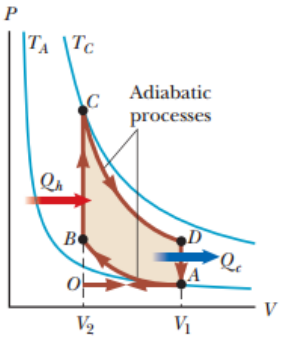


Figure P22.73

18. Một khối khí lý tưởng lưỡng nguyên tử hoạt động theo chu trình Otto như hình vẽ. Cho $V_1/V_2 = 8$, $V_1 = 500\ cm^3$, $P_A = 100$ kPa, $t_A = 20^oC$, $t_C = 750^oC$.



(a) Điền những giá trị còn thiếu trong 2 bảng bên dưới:

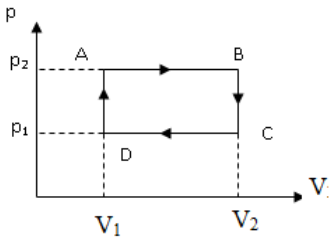
	T (K)	P (kPa)	V (cm^3)
A	293	100	500
B			
C	1 023		
D			

(b) Fill in this table to follow the processes:

	Q	W	ΔE_{int}
$A \rightarrow B$			
$B \rightarrow C$			
$C \rightarrow D$			
$D \rightarrow A$			
$ABCDA$			

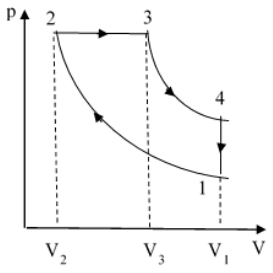
(b) Tính nhiệt lượng hệ tỏa ra và nhận vào sau 1 chu trình.
(c) Tính hiệu suất của chu trình Otto.

19. Một kmol khí lý tưởng lưỡng nguyên tử thực hiện một chu trình gồm hai quá trình đẳng áp và hai quá trình đẳng tích như hình bên. Biết rằng $V_2 = 3V_1$, $p_2 = 2p_1$ và nhiệt độ thấp nhất của chu trình là $T_{min} = 300^oK$. Tính:



(a) Nhiệt độ các trạng thái còn lại.
(b) Công hệ sinh ra sau 1 chu trình.
(c) Nhiệt lượng mà khối khí thu vào và tỏa ra sau 1 chu trình.
(d) Tính hiệu suất của động cơ hoạt động theo chu trình trên.

20. Hai mol khí lý tưởng O_2 thực hiện chu trình như hình vẽ. Quá trình 1-2 và 3-4 là quá trình đẳng nhiệt. Nhiệt độ thấp nhất của chu trình là 300 K. Cho các tỷ số $V_1/V_2 = 6$ và $V_3/V_2 = 4$. Hãy tính:



(a) Nhiệt độ của 4 trạng thái.
(b) Nhiệt lượng mà khối khí thu vào và tỏa ra sau 1 chu trình.
(c) Tính công hệ sinh ra sau 1 chu trình.
(d) Tính hiệu suất của động cơ hoạt động theo chu trình trên.