

Chương 7

NGUYÊN LÝ THỨ NHẤT NHIỆT ĐỘNG HỌC

7.1 Khái niệm về hệ nhiệt động - trạng thái cân bằng - quá trình cân bằng - công và nhiệt của quá trình cân bằng

7.1.1 Hệ nhiệt động

Một tập hợp các vật được xác định hoàn toàn bởi các thông số vĩ mô, độc lập với nhau, được gọi là hệ vĩ mô hay hệ nhiệt động (gọi tắt là hệ).

Các vật ngoài hệ là ngoại vật đối với hệ hay môi trường xung quanh của hệ.

Nếu hệ và môi trường không trao đổi nhiệt thì hệ cô lập đối với ngoại vật về phương diện nhiệt: ta nói rằng giữa hệ và ngoại vật có một vỏ cách nhiệt. Nếu hệ và ngoại vật trao đổi nhiệt nhưng không sinh ra công do sự nén hoặc giãn nở thì hệ cô lập đối với ngoại vật về phương diện cơ học.

Hệ gọi là cô lập nếu nó hoàn toàn không tương tác và trao đổi năng lượng với môi trường ngoài.

7.1.2 Trạng thái cân bằng - quá trình cân bằng

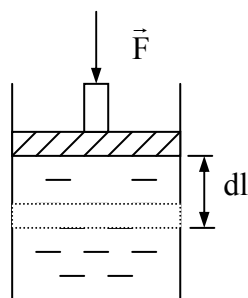
Định nghĩa: Trạng thái cân bằng của hệ là trạng thái không biến đổi theo thời gian và tính bất biến đó không phụ thuộc vào các quá trình của ngoại vật.

Quá trình cân bằng là một quá trình biến đổi gồm một chuỗi liên tiếp các trạng thái cân bằng.

Quá trình cân bằng theo định nghĩa trên chỉ là một quá trình lí tưởng, không có trong thực tế. Tuy nhiên nếu quá trình thực hiện rất chậm để có đủ thời gian thiết lập lại sự cân bằng mới thì quá trình đó được coi là quá trình cân bằng.

7.1.3 Công của áp lực trong quá trình cân bằng

Ngoại lực tác dụng lên pittông là \vec{F} (hình 7-1).



Hình 7-1

Khi pittông dịch chuyển một đoạn dl thì khối khí nhận được một công là:

$$\delta A = - F dl$$

Khi nén $dV < 0$ suy ra $\delta A > 0$ (khí thực sự nhận công).

Vì quá trình trên là cân bằng nên F bằng áp lực khối khí tác dụng lên pittông. Gọi p là áp suất của khí lên pittông có diện tích S thì: $F = p.S$

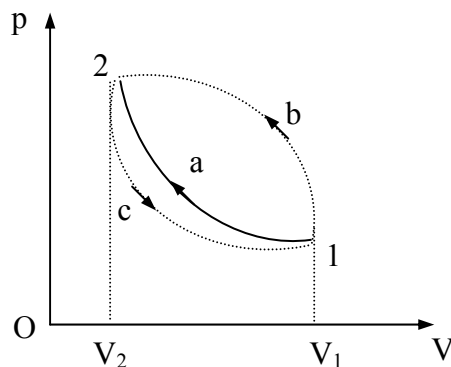
do đó: $\delta A = -PSdV = -pdV$

Công A mà khí nhận được trong suốt quá trình nén được tính:

$$A = \int \delta A = - \int_{V_1}^{V_2} pdV \quad (7-1)$$

Nếu hệ thực hiện theo một chu trình (1b2c1) (hình 7-2) thì khi trở về trạng thái cân bằng hệ thực hiện được một công A :

$$A = A_1 - A_2$$



Hình 7-2

trong đó $A_1 =$ số đo $S(2b1V_1V_2)$

$A_2 =$ số đo $S(1c2V_1V_2)$

7.1.4 Nhiệt trong quá trình cân bằng, nhiệt dung

Nhiệt dung riêng c của một chất là một đại lượng vật lý về trị số bằng nhiệt lượng cần thiết truyền cho một đơn vị khối lượng chất ấy để nhiệt độ của nó tăng lên 1° .

Gọi m là khối lượng của vật, δQ là nhiệt lượng truyền cho vật trong một quá trình cân bằng nào đó và dT là độ biến thiên nhiệt độ của vật trong quá trình đó thì:

$$c = \frac{\delta Q}{mdT}$$

suy ra:

$$\delta Q = cmdT \quad (7-2)$$

Nhiệt dung phân tử C của một chất là một đại lượng cần thiết truyền cho 1mol chất đó để nhiệt độ của nó tăng lên 1° .

$$C = \mu c \quad (7-3)$$

μ là khối lượng của 1mol chất đó.

Trong hệ đơn vị SI đơn vị của c là J/kg.độ(K), đơn vị của C là J/mol.K.

Từ (7-2) và (7-3) suy ra:

$$\delta Q = \frac{m}{\mu} C_d T \quad (7-4)$$

7.2 Nguyên lý thứ nhất của nhiệt động học

Nguyên lý thứ nhất của nhiệt động học là một trường hợp riêng của định luật bảo toàn và chuyển hóa năng lượng vận dụng vào các quá trình vĩ mô.

7.2.1 Phát biểu

Độ biến thiên năng lượng toàn phần ΔW của hệ trong một quá trình biến đổi vĩ mô có giá trị bằng tổng của công A và nhiệt Q mà hệ nhận được trong quá trình đó.

$$\Delta W = A + Q \quad (7-5)$$

Ở trên ta đã giả thuyết rằng cơ năng của hệ không đổi ($W_d + W_t = \text{const}$) do đó $\Delta W = \Delta U$ nên (7-5) được viết lại:

$$\Delta U = A + Q \quad (7-6)$$

Trong một quá trình biến đổi, độ biến thiên nội năng của hệ có giá trị bằng tổng của công và nhiệt mà hệ nhận được trong quá trình đó.

Trong một số trường hợp, để tính toán thuận tiện, người ta còn dùng các ký hiệu và phát biểu sau:

Nếu A và Q là công và nhiệt mà hệ nhận được thì $A' = -A$ và $Q' = -Q$ là công và nhiệt mà hệ sinh ra, từ (7-6) ta có:

$$Q = \Delta U + A' \quad (7-7)$$

Nguyên lý thứ nhất của nhiệt động học có thể phát biểu như sau:

Nhiệt truyền cho hệ trong một quá trình có giá trị bằng độ biến thiên nội năng của hệ và công do hệ sinh ra trong quá trình đó.

Các đại lượng ΔU , A và Q có thể dương hoặc âm:

- $A > 0$ và $Q > 0 \Rightarrow \Delta U > 0$: nội năng của hệ tăng.
- $A < 0$ và $Q < 0 \Rightarrow \Delta U < 0$: nội năng của hệ giảm.

7.2.2 Hệ quả

Từ nguyên lý thứ nhất ta có thể suy ra một số hệ quả sau:

a/ *Đối với một hệ cô lập ($A = Q = 0$)*

$$\Delta U = 0 \text{ hay } U = \text{const}$$

Vậy: *Nội năng của một hệ cô lập là một đại lượng bảo toàn.*

Xét một hệ cô lập gồm 2 vật chỉ trao đổi nhiệt với nhau: gọi Q_1 và Q_2 là nhiệt lượng mà chúng nhận được thì:

$$Q = Q_1 + Q_2 = 0 \Rightarrow Q_1 = -Q_2$$

Nếu $Q_1 < 0$ (vật 1 tỏa nhiệt) thì $Q_2 > 0$ (vật 2 thu nhiệt) và ngược lại.

Vậy: Trong một hệ cô lập gồm 2 vật chỉ trao đổi nhiệt, nhiệt lượng do vật này tỏa ra bằng nhiệt lượng mà vật kia thu vào.

b/ Hệ biến đổi theo một chu trình

Hệ là một máy làm việc tuần hoàn, nghĩa là nó biến đổi theo một quá trình kín hay chu trình. Sau một dãy các biến đổi hệ trở về trạng thái ban đầu. Như vậy sau một chu trình $\Delta U = 0$. Từ (7-6) $\Rightarrow A = -Q$

Vậy: Trong một chu trình, công mà hệ nhận được có giá trị bằng nhiệt do hệ tỏa ra bên ngoài, hay công do hệ sinh ra có giá trị bằng nhiệt mà hệ nhận vào từ bên ngoài.

Nếu hệ thực hiện một biến đổi vô cùng nhỏ thì (7-6) có dạng:

$$dU = \delta A + \delta Q \quad (7-8)$$

7.2.3 Ý nghĩa của nguyên lý thứ nhất

Từ hệ quả thứ hai của nguyên lý ta thấy rằng không thể có một máy nào làm việc tuần hoàn sinh công mà lại không nhận thêm năng lượng từ bên ngoài hoặc sinh công lớn hơn năng lượng truyền cho nó. Những máy này được gọi là động cơ vĩnh cửu loại 1.

Như vậy nguyên lý thứ nhất của nhiệt động học khẳng định rằng: “Không thể nào chế tạo được động cơ vĩnh cửu loại 1”.

7.3 Khảo sát các quá trình cân bằng của khí lý tưởng

Nguyên lý thứ nhất của nhiệt động học được ứng dụng rộng rãi trong mọi ngành khoa học để khảo sát các quá trình nhiệt động của các hệ khác nhau. Ở đây chúng ta chỉ giới hạn khảo sát các quá trình cân bằng, đặc biệt của khí lý tưởng.

7.3.1 Quá trình đẳng tích

Quá trình đẳng tích là quá trình trong đó thể tích không thay đổi, tức là $V = \text{const}$.

Ta tính công, nhiệt và độ biến thiên nội năng của khối khí trong quá trình đẳng tích. Vì $V = \text{const}$ nên $dV=0$. Ta có:

$$A = - \int_{V_1}^{V_2} p dV = 0 \quad (7-9)$$

Nếu nhiệt độ khối khí lúc đầu là T_1 và lúc cuối là T_2 thì nhiệt lượng được tính:

$$Q = \int \delta Q = \frac{m}{\mu} C_v \int_{T_1}^{T_2} dT = \frac{m}{\mu} C_v \Delta T \quad (7-10)$$

C_V là nhiệt dung phân tử đẳng tích. Áp dụng nguyên lý thứ nhất:

$$\Delta U = A + Q = Q \quad (7-11)$$

Độ biến thiên nội năng của khí lí tưởng là:

$$\Delta U = \frac{m}{\mu} \frac{i}{2} R \Delta T \quad (7-12)$$

Từ (7-10) và (7-12) suy ra:

$$C_V = \frac{i}{2} R \quad (7-13)$$

7.3.2 Quá trình đẳng áp

Quá trình đẳng áp là quá trình trong đó áp suất không thay đổi, tức là $p = \text{const.}$

Ta có:

$$A = - \int_{V_1}^{V_2} p dV = p(V_1 - V_2) \quad (7-14)$$

Nhiệt lượng được tính theo công thức:

$$Q = \int \delta Q = \frac{m}{\mu} C_p \int_{T_1}^{T_2} dT = \frac{m}{\mu} C_p \Delta T \quad (7-15)$$

C_p là nhiệt dung phân tử đẳng áp của khí. Áp dụng nguyên lý thứ nhất:

$$\Delta U = A + Q = p(V_1 - V_2) + \frac{m}{\mu} C_p \Delta T \quad (7-16)$$

Độ biến thiên nội năng của khí lí tưởng là:

$$\Delta U = \frac{m}{\mu} \frac{i}{2} R \Delta T$$

Từ phương trình trạng thái của khí lí tưởng, đối với quá trình đẳng áp ta có:

$$p(V_1 - V_2) = \frac{m}{\mu} R(T_1 - T_2) = - \frac{m}{\mu} R \Delta T$$

Thay vào (7-16) ta được:

$$C_p = \frac{i+2}{2} R \quad (7-17)$$

Từ (7-13) và (7-17) suy ra:

$$C_p - C_V = R \quad (7-18)$$

(7-18) gọi là hệ thức Mayer.

Tỉ số:

$$\frac{C_p}{C_V} = \frac{i+2}{i} = \gamma \quad (7-19)$$

(7-19) gọi là hệ số Poisson hay là chỉ số đoạn nhiệt.

7.3.3 Quá trình đẳng nhiệt

Quá trình đẳng nhiệt là quá trình trong đó nhiệt độ không thay đổi, tức là $T = \text{const}$.

Ta có:

$$A = - \int_{V_1}^{V_2} p dV$$

Từ phương trình $pV = \frac{m}{\mu} RT$ ta có:

$$A = - \frac{m}{\mu} RT \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} = - \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (7-20)$$

Theo nguyên lý thứ nhất: $\Delta U = A + Q$, vì $T = \text{const}$

$$\Rightarrow \Delta U = 0 \Rightarrow A = -Q$$

$$Q = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{V_2}{V_1} = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{p_1}{p_2} \quad (7-21)$$

7.3.4 Quá trình đoạn nhiệt

Quá trình đoạn nhiệt là quá trình trong đó hệ không trao đổi nhiệt với môi trường ngoài, tức là $Q = 0$ (hay $\delta Q = 0$).

Ta có:

$$\Delta U = A = \frac{m}{\mu} \frac{i}{2} R \Delta T$$

Xét trong một quá trình biến đổi nhỏ:

$$dU = \delta A = \frac{m}{\mu} \frac{i}{2} R dT \quad (7-22)$$

Vì $\delta A = -pdV$ và $C_v = \frac{i}{2} R$ nên (7-22) được viết lại:

$$-pdV = \frac{m}{\mu} C_v dT \quad (7-23)$$

Theo phương trình trạng thái của khí lý tưởng $p = \frac{m}{\mu} \frac{RT}{V}$ ta có:

$$-RT \frac{dV}{V} = C_v dT$$

hay:

$$\frac{dT}{T} + \frac{R}{C_v} \frac{dV}{V} = 0 \quad (7-24)$$

$$\frac{R}{C_v} = \frac{C_p - C_v}{C_v} = \gamma - 1$$

Tích phân (7-24) ta được:

$$\ln T + (\gamma - 1) \ln V = \text{const}$$

hay

$$\ln(TV^{\gamma-1}) = \text{const}$$

$$\Rightarrow TV^{\gamma-1} = \text{const} \quad (7-25)$$

Bằng cách sử dụng phương trình trạng thái của khí lý tưởng và công thức (7-25) biến đổi, ta cũng có mối liên hệ khác giữa các đại lượng:

$$\Rightarrow pV^\gamma = \text{const} \quad (7-26)$$

$$\Rightarrow Tp^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = \text{const} \quad (7-27)$$

Ta có các công thức tính công trong quá trình đoạn nhiệt:

$$A = \frac{p_1 V_1}{\gamma - 1} \left[\left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{1-\gamma} - 1 \right] \quad (7-28)$$

hoặc:

$$A = \frac{p_2 V_2 - p_1 V_1}{\gamma - 1} \quad (7-29)$$

$$A = \frac{m}{\mu} \frac{RT_1}{(\gamma - 1)} \left[\left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{1-\gamma} - 1 \right] \quad (7-30)$$

$$A = \frac{m}{\mu} \frac{RT_1}{(\gamma - 1)} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \quad (7-31)$$

Ví dụ 1: Tìm nhiệt dung riêng đẳng tích của một chất khí đa nguyên tử, biết rằng khối lượng riêng của chất khí đó ở điều kiện tiêu chuẩn là: $\rho = 7,95 \cdot 10^{-4} \text{ g/cm}^3$.

Giải

Nhiệt dung riêng phân tử đẳng tích của chất khí là:

$$C_v = \frac{i}{2} R$$

Nhiệt dung riêng đẳng tích:

$$c_v = \frac{C_v}{\mu} = \frac{i}{2\mu} R$$

Từ phương trình trạng thái của khí lý tưởng: $pV = \frac{m}{\mu} RT$

Suy ra:

$$\mu = \frac{m}{V} \frac{RT}{p} = \rho \frac{RT}{p}$$

Từ đó ta tính được:

$$c_v = \frac{C_v}{\mu} = \frac{ip}{2\rho T} = \frac{6.1,013.10^6}{2.7,95.10^{-1}.273} \approx 1400(J/kg.K)$$

Ví dụ 2: Một bình chứa 14g khí nitơ ở áp suất 1at và nhiệt độ 27⁰C. Sau khi hơi nóng, áp suất trong bình lên tới 5at. Hỏi:

1. Nhiệt độ của khí sau khi hơi nóng?
2. Thể tích của bình?
3. Độ tăng nội năng của khí?

Giải

1. Vì bình kín và coi sự giãn nở của bình là không đáng kể thì quá trình hơi nóng khối khí trong bình là quá trình đẳng tích.

Ta có:
$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$$

suy ra
$$T_2 = \frac{p_2}{p_1} T_1 = \frac{5}{1} . 300 = 1500(K)$$

2. Thể tích của bình:

Từ phương trình trạng thái của khí lí tưởng :
$$pV = \frac{m}{\mu} RT$$

suy ra :
$$V = \frac{m}{\mu p_1} RT_1 = \frac{14.8,31.300}{28.9,81.10^4} = 12,72.10^{-3} (m^3)$$

3. Độ tăng nội năng của khí:

Áp dụng công thức:
$$\Delta U = \frac{m}{\mu} \frac{i}{2} R \Delta T = \frac{14}{28} \cdot \frac{5}{2} \cdot 8,31 \cdot (1500 - 300) = 12,46.10^3 (J)$$

Ví dụ 3: Có 6,5g hiđrô ở nhiệt độ 27⁰C, nhận được nhiệt nên thể tích giãn nở gấp đôi trong điều kiện áp suất không đổi. Tính:

1. Công do khí thực hiện.
2. Độ biến thiên nội năng của khối khí.
3. Nhiệt lượng truyền cho khí.

Giải

1. Vì quá trình giãn nở là đẳng áp nên ta có:

$$A' = p \Delta V = \frac{m}{\mu} RT_1 = \frac{6,5}{2} \cdot 8,31 \cdot 300 = 8,31.10^3 (J)$$

2. Ta có công thức:
$$\Delta U = \frac{m}{\mu} \frac{i}{2} R \Delta T$$

Trong đó T₂ được tính từ phương trình của quá trình đẳng áp:
$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

Suy ra:
$$T_2 = \frac{V_2}{V_1} T_1 = 2T_1$$

$$\Delta U = \frac{m}{\mu} \cdot \frac{i}{2} R T_1 = \frac{6,5}{2} \cdot \frac{5}{2} \cdot 8,31 \cdot 300 = 20,2 \cdot 10^3 \text{ (J)}$$

3. Theo nguyên lý thứ nhất của nhiệt động học:

$$Q = \Delta U + A' = 20,2 \cdot 10^3 + 8,1 \cdot 10^3 = 28,3 \cdot 10^3 \text{ (J)}$$

Ví dụ 4: Có 2m³ khí giãn nở đẳng nhiệt từ áp suất p₁ = 5at đến áp suất p₂ = 4at. Tính:

1. Công do khối khí sinh ra.
2. Nhiệt lượng truyền cho khối khí.

Giải

1. Vì quá trình là đẳng nhiệt nên ta áp dụng công thức:

$$\begin{aligned} A' = -A &= p_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1} = p_1 V_1 \ln \frac{p_1}{p_2} \\ &= 2 \cdot 5 \cdot 9,81 \cdot 10^4 \ln \frac{5}{4} = 2,2 \cdot 10^5 \text{ (J)} \end{aligned}$$

2. Nhiệt lượng truyền cho khối khí:

$$Q = A' = 2,2 \cdot 10^5 \text{ (J)}$$

BÀI TẬP

7.1 Một lượng khí ôxy khối lượng 160g được nung nóng từ nhiệt độ 50⁰C đến 60⁰C.

Tìm nhiệt lượng mà khí nhận được và độ biến thiên nội năng của khối khí trong hai quá trình:

- a. Đẳng tích.
- b. Đẳng áp.

Đáp số: a/ $\Delta U = Q = 1038,75 \text{ J}$

b/ $\Delta U = 1038,75 \text{ J}; Q = 1454,25 \text{ J}$

7.2 Một bình kín có thể tích 2 lít đựng khí nitơ ở nhiệt độ 10⁰C. Sau khi nhận được nhiệt lượng Q = 4,1.10³J, áp suất trung bình lên tới 10⁴ mmHg. Tìm khối lượng của khí nitơ trong bình. Cho biết bình giãn nở rất kém.

Đáp số: m = 9g

7.3 Có 40 gam khí ôxy, sau khi nhận được nhiệt lượng bằng 208,8cal nhiệt độ của nó tăng từ 20⁰C đến 44⁰C. Hỏi quá trình đó được tiến hành trong điều kiện nào?

Đáp số: Quá trình đẳng áp

7.4 Trong nhiệt lượng kế khối lượng m₁ = 0,8 kg nhiệt dung riêng c₁ = 460 J/kg.K chứa 4 lít nước ở 15⁰C. Người ta bỏ vào nhiệt lượng kế một miếng nhôm và một miếng thiếc có khối lượng tổng cộng là 1,2 kg ở nhiệt độ 100⁰C thì nhiệt độ của nước trong nhiệt lượng kế tăng thêm 2⁰C. Tìm khối lượng của nhôm và của thiếc. Biết

nhiệt dung riêng của nước là $c_2=4,2.10^3 \text{ J/kg.K}$; $c_3=920 \text{ J/kg.K}$; $c_4=210 \text{ J/kg.K}$. Bỏ qua sự trao đổi nhiệt với môi trường xung quanh.

Đáp số: $m_N = 0,24 \text{ kg}$; $m_T = 0,96 \text{ kg}$

7.5 Một khối khí hiđrô có khối lượng 1,3g thể tích 3 lít, ở nhiệt độ 27°C được nung nóng đẳng áp cho đến khi thể tích của tăng gấp đôi. Tính:

- Công do khí thực hiện.
- Nhiệt lượng truyền cho khí.
- Độ biến thiên nội năng của khối khí.

Đáp số: $a/ A \approx 1620 \text{ J}$

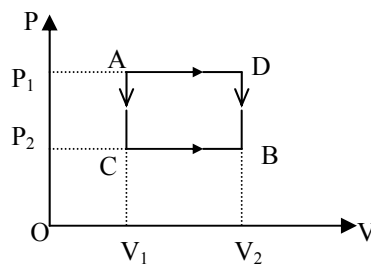
$b/ Q \approx 5577 \text{ J}$

$c/ \Delta U=3957 \text{ J}$

7.6 Một xi lanh tiết diện $S = 20\text{cm}^2$ được đặt thẳng đứng và chứa khí. Pít tông của xi lanh có trọng lượng $p = 20\text{N}$ và có thể chuyển động không ma sát đối với xi lanh. Thể tích và nhiệt độ ban đầu của khí trong xi lanh là $V_0 = 1,12 \text{ lít}$ và $t = 0^\circ\text{C}$. Hỏi phải cung cấp cho khí một nhiệt lượng bằng bao nhiêu để nhiệt độ của khí tăng lên 20°C trong khi áp suất của khí không đổi. Cho biết khi thể tích khí không đổi muốn nâng nhiệt độ của khí lên thêm 1°C cần một nhiệt lượng 5J. Coi áp suất của khí quyển là 10^5N/m^2 và quá trình giãn khí diễn ra chậm và đều.

Đáp số: $Q = 108,8 \text{ J}$

7.7 Một lượng khí ôxy có thể tích $V_1=3 \text{ lít}$, ở nhiệt độ 27°C và áp suất $p_1=8,2.10^5\text{N/m}^2$. Ở trạng thái thứ hai khí có các thông số $V_2=4,5 \text{ lít}$, $p_2=6.10^5 \text{ N/m}^2$ (hình 1). Tìm nhiệt lượng mà khối khí sinh ra sau khi giãn nở và độ biến thiên nội năng của khối khí trong trường hợp khối khí biến đổi từ trạng thái thứ nhất (A) sang trạng thái thứ hai (B) theo quá trình ACB và ADB.



Hình 1

Đáp số: $Q_{ACB} = 1,55 \text{ KJ}$; $Q_{ADB} = 1,88 \text{ KJ}$

$\Delta U_{ACB} = 1,55 \text{ KJ}$; $\Delta U_{ADB} = 1,88 \text{ KJ}$

7.8 Có một khối khí trong một xi lanh đặt nằm ngang nhận một nhiệt lượng 1,5J. Chất khí nở ra đẩy pittông đi một đoạn 5cm. Hỏi nội năng của khối khí biến thiên một lượng bằng bao nhiêu? Biết lực ma sát giữa pittông và xilanh có độ lớn bằng 20N.

Đáp số: $\Delta U = 0,5 \text{ J}$