

Chương 1: CÁC KHÁI NIỆM VỀ MẠNG NHIỆT

1.1. Định nghĩa, ví dụ về mạng nhiệt (MN).

1.1.1. Hộ cấp và hộ tiêu dùng nhiệt - lạnh

- Trong thiết bị trao đổi nhiệt (TBTĐN), để nung nóng hay làm lạnh một sản phẩm (SP) nào đó, người ta cho nó TĐN với một chất trung gian nào đó. Ví dụ: hơi nước hay gas lạnh, gọi là tác nhân mang nhiệt hay lạnh.

- Hộ cấp nhiệt (lạnh) là thiết bị sản sinh ra tác nhân nhiệt (lạnh). Ví dụ hộ cấp nhiệt là lò hơi tạo ra hơi nước, buồng đốt tạo ra khí nóng (sản phẩm cháy – SPC) để cấp cho thiết bị sấy sản phẩm.

Ví dụ hộ cấp lạnh là tổ hợp máy nước - bình ngưng sản sinh ra gas lỏng cao áp để cấp cho thiết bị làm lạnh hoặc Water chiller cung cấp nước lạnh để điều hoà không khí.

- Hộ tiêu thụ nhiệt (lạnh) là TBTĐN sử dụng tác nhân nhiệt (lạnh) để gia nhiệt (hay làm lạnh) sản phẩm.

Ví dụ hộ tiêu thụ nhiệt là dàn caloripher sử dụng hơi để gia nhiệt không khí.

Ví dụ hộ tiêu thụ lạnh là tủ cấp đông sử dụng môi chất lạnh lỏng cao áp để làm đông lạnh thực phẩm.

1.1.2. Phụ tải nhiệt

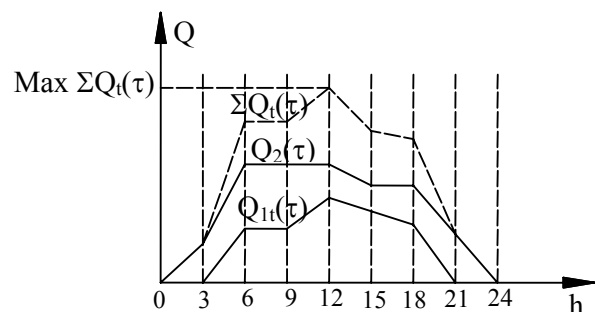
Phụ tải nhiệt $Q[W]$ là lượng nhiệt cần cấp vào hộ tiêu thụ hoặc sinh ra từ hộ cấp, trong một đơn vị thời gian.

Q là công suất do tác nhân nhiệt (lạnh) mang vào hoặc lấy ra từ thiết bị trao đổi nhiệt, còn gọi là công suất của thiết bị.

- Để xác định phụ tải nhiệt Q , ta dựa vào phương trình cân bằng nhiệt cho sản phẩm và môi chất trong TBTĐN, trên cơ sở yêu cầu của công nghệ sản xuất.

- Theo yêu cầu công nghệ sản xuất, thường phụ tải nhiệt Q thay đổi theo thời gian, $Q = Q(\tau)$.

Để tính chọn phụ tải Q cho một hộ cấp nhiệt cần cộng tất cả các phụ tải $Q_i(\tau)$ của các hộ tiêu thụ, rồi chọn Q theo nguyên tắc: $Q \geq \sum Q_i(\tau)$, như ví dụ trên hình 1.1



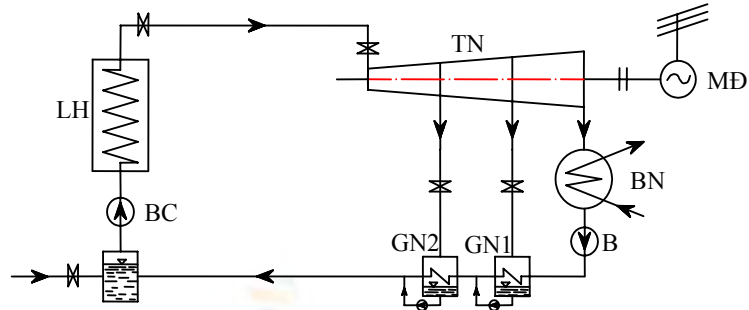
Hình 1.1: Đồ thị phụ tải $Q(\tau)$

- Đối với các thiết bị làm việc không liên tục, ví dụ làm việc theo mẻ, theo mùa, vụ người ta có thể tính phụ tải nhiệt theo đơn vị kJ/ mẻ, MJ/ mùa(vụ).

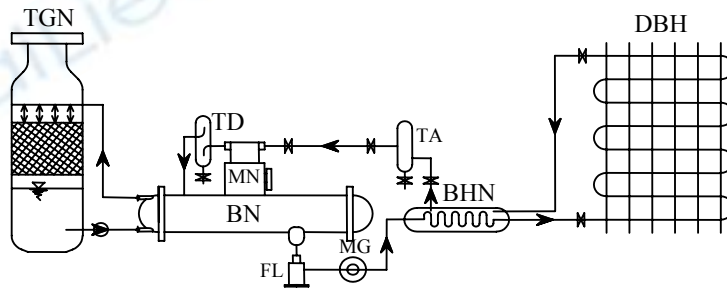
1.1.3. Mạng nhiệt.

- Định nghĩa: Mạng nhiệt là hệ thống đường ống và các phụ kiện dẫn môi chất lưu động giữa hộ cấp và hộ tiêu thụ nhiệt lạnh.

Các phụ kiện là các thiết bị dùng để duy trì và điều khiển sự lưu động của môi chất, như bình chứa, bình góp, bơm quạt, các loại van, thiết bị pha trộn, tê cút, giá treo đỡ ống, cơ cấu bù nở nhiệt, v v...



Hình 1.2: Sơ đồ mạng nhiệt trong nhà máy nhiệt điện



Hình 1.3: Sơ đồ mạng nhiệt trong hệ thống lạnh

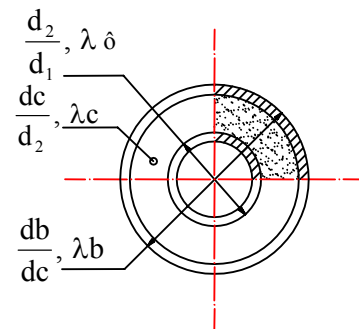
Ví dụ về mạng nhiệt trong nhà máy nhiệt điện và hệ thống lạnh được mô tả trên hình 1.2 và hình 1.3.

1.2. Kết cấu đường ống

1.2.1. Cấu tạo ống dẫn.

Mặt cắt ngang ống dẫn thường có cấu tạo như hình 1.4, gồm 3 lớp vật liệu: ống, lớp cách nhiệt, lớp bảo vệ.

Đường kính trong d_1 của ống được tính theo lưu lượng G , vận tốc ω và khối lượng riêng môi chất theo quan hệ:



Hình 1.4: Cấu tạo ống dẫn

$$G = \rho \omega f = \rho \omega \frac{\pi}{4} d_1^2 \text{ hay } d_1 = 2 \sqrt{\frac{G}{\pi \rho \omega}} \text{ với } \omega [\text{m/s}] \text{ chọn theo loại môi chất. Chất}$$

khí $\omega \in [4 \div 75] \text{ m/s}$ tăng theo áp suất và độ quá nhiệt.

1.2.2. Các yêu cầu về ống dẫn.

1) Chịu được nhiệt độ, áp suất và tính ăn mòn của môi chất khi làm việc. Khi t, p cao, phải dùng ống kim loại không hàn mép, nối ống bằng hàn hoặc bích.

2) Có lớp cách nhiệt bằng vật liệu có λ bé, chịu được nhiệt độ vỏ ống, ít hút ẩm, ít mao dẫn, bền lâu.

3) Có lớp bảo vệ ngoài cùng để cách ẩm chỗ ướl lớp cách nhiệt, chịu được tác động của môi trường xung quanh (không khí, đất, nước...).

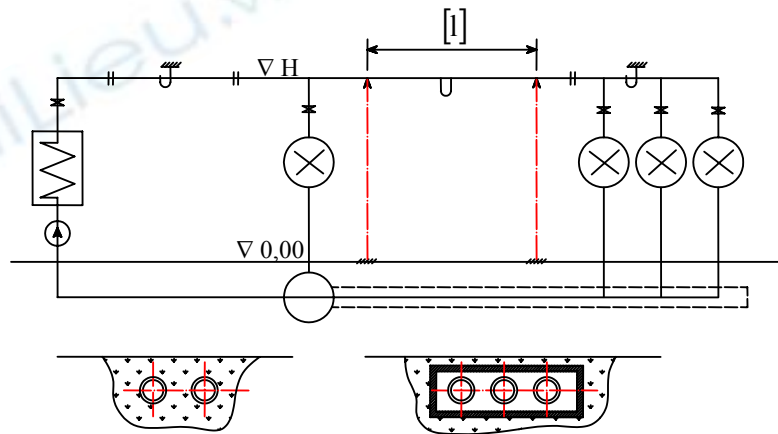
1.2.3. Lắp đặt đường ống.

- Tùy theo công nghệ sản xuất và địa bàn nhà máy, khi lựa chọn vị trí lắp đặt đường ống cần chú ý:

1) Bố trí hệ cấp, hệ tiêu thụ hợp lý.

2) Đường ống ngắn, gọn, ít tê cắt bảo đảm giảm tổn thất nhiệt và thủy lực.

3) Không cản trở không gian làm việc, ít ảnh hưởng môi trường.



Hình 1.5: Các vị trí lắp đặt đường ống

- Vị trí đặt đường ống có thể trong không khí (trong nhà, ngoài trời) dưới mặt đất (ngầm trong đất) hoặc dưới mặt nước (trong nước, trong ống ngầm).

Khi đặt ống ngoài trời cần chống ảnh hưởng của mưa gió. Khi đặt ống ngầm cần chống ảnh hưởng của nước ngầm và tác dụng ăn mòn của môi trường.

1.3. Vị trí treo đỡ ống.

1.3.1. Yêu cầu của việc treo đỡ ống

Khi đặt ống trong không khí cần sử dụng các móc treo, giá đỡ hoặc trụ đỡ nhằm giữ cho ống được an toàn và ổn định khi làm việc. Các kết cấu treo đỡ có cấu tạo theo quy phạm an toàn, cần bảo đảm yêu cầu sau:

- Giữ cho ống an toàn dưới tác dụng của trọng lực và gió bão
- Chống rung động và biến dạng đường ống.

1.3.2. Xác định vị trí cần treo đỡ ống.

Để bảo đảm yêu cầu trên, khoảng cách lớn nhất giữa 2 điểm treo đỡ ống là:

$$[l_t] = \sqrt{12\varphi\eta\delta_{cp}^* \frac{W}{q}}, \text{ (m)}$$

với : $\varphi = 0,8$; $\eta = (0,4 \div 0,5)$

$\delta_{cp}^*[\text{N/m}^2]$ là ứng suất định mức cho phép của vật liệu ống tại nhiệt độ làm việc cực đại.

$W = 0,1 \frac{d_2^4 - d_1^4}{d_1}$; $[\text{m}^3]$ là mô men bèn tương đương của ống.

$q = \sqrt{q_1^2 + q_2^2}$, $[\text{N/m}]$ là lực tác động trên 1m ống,

Trong đó:

q_1 là trọng lượng trên một mét ống (ống, môi chất, vật liệu cách nhiệt)

$$q_1 = g[\rho_{\text{ô}} \frac{\pi}{4}(d_2^2 - d_1^2) + \rho_{\text{MC}} \frac{\pi}{4} d_1^2 + \rho_c \frac{\pi}{4}(d_c^2 - d_2^2)], \text{ [N/m]}$$

$q_1 = kd_c \frac{\rho\omega^2}{2}$, $[\text{N/m}]$ là lực đẩy 1m ống do gió có vận tốc lấy bằng $\omega = 30$

m/s, khối lượng riêng $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$, với hệ số khí động $k = (1,4 \div 1,5)$.

$d_c(\text{m})$ là đường kính ngoài lớp bảo vệ hay cách nhiệt.

Tóm lại, nếu đường ống dài $l \geq l_t$ hay $l \geq \left[\frac{12\varphi\eta\delta_{cp}^*(d_2^4 - d_1^4)}{5d_1\sqrt{4q_1^2 + k^2d_c^2\rho^2\omega^4}} \right]^{\frac{1}{2}}$, $[\text{m}]$

thì cần chọn thêm một điểm treo đỡ ống.

1.3.3. Ví dụ: Tính $[l_t]$ cho ống thép C10 có $\delta_{cp}^*(t = 250^\circ\text{C}) = 11,2 \text{ kG/mm}^2 = 11,2 \cdot 9,81 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 = 1,1 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$ với $d_2/d_1 = 60/50 \text{ mm}$, $d_c = 70 \text{ mm}$, $\rho_{\text{ô}} = 7850 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{\text{MC}} = 4,16 \text{ kg/m}^3$ đặt trong không khí. Ta có :

$$W = 0,1 \frac{d_2^4 - d_1^4}{d_1} = 0,1 \frac{(60^4 - 50^4) \cdot 10^{-3 \times 4}}{50 \cdot 10^{-3}} = 1,34 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3.$$

$$q_1 = 67,8 \text{ N/m}.$$

$$q_2 = kd_c \frac{\rho\omega^2}{2} = 1,5 \cdot 0,07 \cdot \frac{1,2 \cdot 30^2}{2} = 56,7 \text{ N/m}.$$

$$q = \sqrt{67,8^2 + 56,7^2} = 88,4 \text{ N/m}.$$

$$[l] = (12 \cdot \varphi \cdot \eta \cdot \delta_{cp}^* \cdot \frac{w}{q})^{\frac{1}{2}} = (1,2 \cdot 0,8 \cdot 0,45 \cdot 1,1 \cdot 10^8 \cdot \frac{1,34 \cdot 10^{-5}}{88,4})^{\frac{1}{2}} = 8,49 \text{ m.}$$

Thực tế nếu $l > 8 \text{ m}$ thì cần có giá treo đỡ.

1.4. Tính bù nở nhiệt.

1.1.4. Hiện tượng nở đều và ứng suất nhiệt.

Một ống dài l , khi nhiệt độ tăng lên Δt thì nở dài thêm đoạn $\Delta l = l\alpha\Delta t$, với hệ số nở dài $\alpha = \frac{\Delta l}{l\Delta t}$ [1/K] phụ thuộc loại vật liệu. Với thép các bon thì $\alpha = 12 \cdot 10^{-6} 1/K$.

Khi đó trong ống phát sinh ứng suất nhiệt δ tính theo định luật Hook

$$\delta = E\varepsilon = E \cdot \frac{\Delta x}{l} = E\alpha\Delta t. \text{ Với thép các bon thì } \delta = 2,35\Delta t \text{ Mpa} = 24\Delta t \text{ kG/cm}^2.$$

Lực nén sinh ra khi có ứng suất nhiệt là:

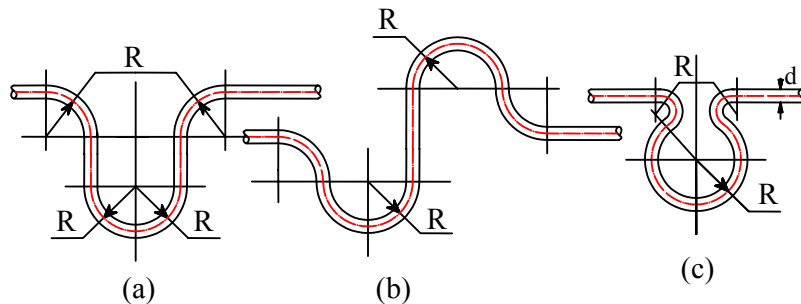
$$p = \delta f = \delta \frac{\pi}{4} (d_2^2 - d_1^2) = \frac{\pi \Delta l}{4 l} (d_2^2 - d_1^2), [\text{N}].$$

Ứng suất nhiệt khi quá giới hạn cho phép có thể gây ra nứt, gãy ống, làm hư hỏng thiết bị và gây sự cố nguy hiểm.

Để khắc phục tình trạng này ta dùng cơ cấu bù nhiệt.

1.4.2. Các cơ cấu bù nhiệt cho ống

Để bù nở nhiệt đường ống ta dùng cơ cấu bù nhiệt hàn vào giữa đường ống. Cơ cấu này gồm một ống liền được uốn cong hình chữ U, chữ S hoặc chữ Ω với các bán kính cong R xác định



Hình 1.6: Các cơ cấu bù nhiệt: chữ U (a), chữ S (b), chữ Ω (c) theo qui phạm, phụ thuộc đường ống và vật liệu.

Khoảng cách cần đặt bù nhiệt là:

$$l > [l_b] = \frac{\delta}{\mu q} \left[\sqrt{(\varphi \delta_{cp}^*)^2 - \frac{3}{4} \left(p \frac{d_2}{2\delta} \right)^2} - \frac{p d_2}{4\delta} \right], [\text{m}].$$

với $\delta = \frac{1}{2}(d_2 - d_1)$ [m] là chiều dài ống

q là áp suất trên mặt kê ống, $q = \text{trọng lượng ống} / \text{diện tích kê} = \frac{q_1[l_t]}{d_2 b}$, [N/m²].

$\varphi \delta_{cp}^*$ [N/m²] là ứng suất cho phép của vật liệu ống, $\varphi = 0,8$.

p [N/m²] là áp suất môi chất trong ống.

d_2 [m] là đường kính ngoài ống dẫn môi chất.

1.4.3. Ví dụ:

Tính $[l_b]$ cho đường ống như ở ví dụ 1.3.3 nói trên, khi chọn mặt kê có diện tích $d_2.b = (0,06.0,1)$ m² với hệ số ma sát μ thép = 0,18 sẽ có:

$$\delta = \frac{1}{2}(d_2 - d_1) = \frac{1}{2}(60 - 50).10^{-3} = 0,005\text{m.}$$

$$q = \frac{q_1[l_t]}{d_2 b} = \frac{67,8.8,49}{0,06.0,1} = 95937 \text{ N/m}^2$$

$$\begin{aligned} [l_b] &= \frac{\delta}{\mu q} \left[\sqrt{(\varphi \delta_{cp}^*)^2 - \frac{3}{4} \left(p \frac{d_2}{2\delta} \right)^2} - \frac{p d_2}{4\delta} \right] \\ &= \frac{0,005}{0,18.95937} \left[\sqrt{(0,8.1,1.10^8)^2 - \frac{3}{4} \left(\frac{8.10^5.0,06}{2.0,005} \right)^2} - \frac{8.10^5.0,06}{4.0,005} \right] \\ &= 24,8 \text{ m} \end{aligned}$$

Chú ý: - Các mặt kê đặt, treo đỡ cần tiếp xúc mặt ống d_2 để khỏi làm móp vỏ bảo ôn.

- Phần thấp của cơ cấu bù nhiệt cần lắp van xả nước ngưng.

Chương 2

TÍNH NHIỆT CHO MẠNG NHIỆT

2.1. Mục đích và cơ sở tính nhiệt cho mạng nhiệt.

2.1.1. Mục đích tính nhiệt cho mạng nhiệt:

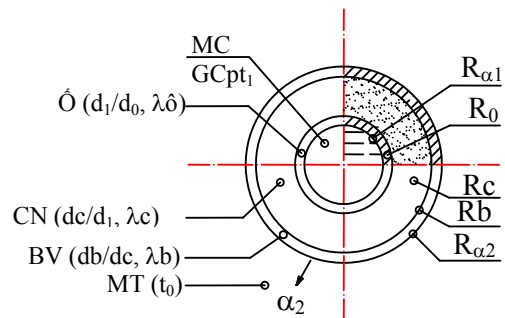
- 1) Xác định tổn thất nhiệt, tức lượng nhiệt truyền qua ống ra môi trường, qua từng ống và toàn mạng nhiệt.
- 2) Xác định phân bố nhiệt độ trên mặt cắt ngang ống, trong môi chất nhiệt và trong môi trường quanh ống.
- 3) Xác định luật thay đổi nhiệt độ môi chất dọc ống, tính nhiệt độ môi chất ra khỏi ống.
- 4) Xác định sự chuyển pha của môi chất dọc ống tức là tìm vị trí xảy ra sự ngưng tụ hay sôi hoá hơi, lượng môi chất đã chuyển pha.
- 5) Để chọn kết cấu cách nhiệt thích hợp.

2.1.2. Cơ sở để tính nhiệt cho mạng nhiệt

Để tính nhiệt cho mạng nhiệt, người ta dựa vào phương trình truyền nhiệt, phương trình cân bằng nhiệt, kết cấu đường ống cùng môi chất và môi trường.

2.1.2.1. Kết cấu đường ống, môi chất và môi trường.

Mặt cắt ngang đường ống thường có kết cấu như hình 2.1: Bên trong là môi chất có thông số cho trước GC_{pt1} , tiếp theo là ống dẫn có d_1/d_0 , λ_0 , ngoài ống là lớp cách nhiệt có λ_c , δ_c , ngoài cùng là lớp bảo vệ có λ_b , δ_b , môi trường xung quanh có nhiệt độ t_0 .



Hình 2.1: Mặt cắt ống dẫn

2.1.2.2. Phương trình truyền nhiệt.

* Để tính tổn thất nhiệt trên một mét ống dùng công thức:

$$q_l = \frac{t_1 - t_0}{R_l} ; [W/m] \text{ với}$$

t_1 là nhiệt độ môi chất, $[^{\circ}C]$.

t_0 là nhiệt độ môi trường, $[^{\circ}C]$.

R_l là tổng nhiệt trở truyền nhiệt qua một mét ống, $[mK/W]$.

$R_l = \Sigma R_{li} = R_{\alpha 1} + R_o + R_c + R_b + R_{\alpha 2}$ hay:

$$R_l = \frac{1}{\pi d_o \alpha_1} + \frac{1}{2\pi \pi_o} \ln \frac{d_1}{d_o} + \frac{1}{2\pi \pi_c} \ln \frac{d_c}{d_1} + \frac{1}{2\pi \pi_b} \ln \frac{d_b}{d_c} + \frac{1}{\pi d_b \alpha_2}.$$

* Trong tổng trên, R_c và $R_{\alpha 2}$ luôn có trị số đáng kể không thể bỏ qua. Các nhiệt trở khác có thể bỏ qua khi đáp ứng điều kiện sau:

1) Khi môi chất là chất lỏng hay chất khí có vận tốc $\omega \geq 5\text{m/s}$, thì α_1 khá lớn cho phép coi $R_{\alpha 1} = 0$.

2) Khi ống bằng kim loại mỏng, với $d_1/d_o \leq 2$ và $\lambda_o \geq 30\text{W/mK}$, thì $R_c \leq \frac{1}{2\pi \cdot 30} \ln 2 = 0,0037 \text{ mK/W}$, có thể coi $R_o = 0$.

3) Khi lớp bảo vệ bằng vật liệu mỏng, coi $d_b = d_c$ và $R_b = 0$.

* Tính tổn thất nhiệt trên một ống dài $l[\text{m}]$, có thể tính theo:

$Q = lq_l$; $[\text{W}]$, khi $q_l = \text{const}$, $\forall x \in [0, l]$.

$Q = \int_0^l q_l(x) dx$ khi q_l thay đổi trên trục x của ống, (do nhiệt độ môi chất thay đổi

dọc ống).

2.1.2.3. Phương trình cân bằng nhiệt

Phương trình cân bằng nhiệt cho môi chất chảy trong ống ổn định nhiệt là

(Biến thiên Entanpy môi chất qua ống)

= (tổn thất nhiệt qua ống do truyền nhiệt).

* Phương trình cân bằng nhiệt và tích phân cho môi chất trong đoạn ống dx là:

$dI = \delta Q$ hay $G di = q_l dx$ (dạng tổng quát).

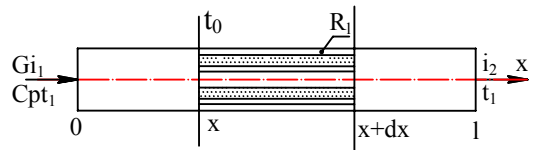
Nếu môi chất không chuyển pha, bị làm nguội do toả nhiệt thì phương trình cân bằng

nhiệt có dạng: $-GC_p dt = \frac{t - t_o}{R_l} dx$.

* Phương trình cân bằng nhiệt tích phân cho đoạn ống dài $l(\text{m})$ là:

$$\Delta I = Q \text{ hay } G(i_1 - i_2) = \int_0^l \frac{t(x) - t_o}{R_l} dx = l \overline{q_l}$$

Nếu môi chất không đổi pha thì: $GC_p(t_1 - t_2) = \int_0^l q_l(x) dx$, $[\text{W}]$.

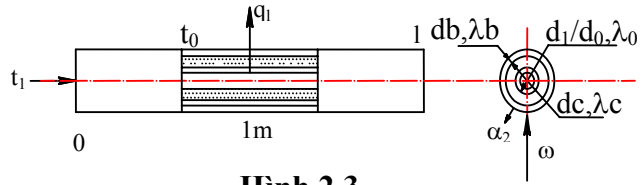


Hình 2.2

2.2. Tính nhiệt đường ống đặt trong không khí ngoài trời.

2.2.1. Mô tả bài toán.

Xét môi chất một pha
nhiệt độ t_1 chảy qua ống chiều
dài l có các thông số của ống:
 d_1/d_0 , λ_0 , của lớp cách nhiệt d_c ,



Hình 2.3

λ_c , của lớp bảo vệ d_b , λ_b đặt trong không khí nhiệt độ t_0 .

2.2.2. Tính các hệ số toả nhiệt với môi chất và môi trường

* Trong trường hợp tổng quát, hệ số trao đổi nhiệt α_1 với môi chất là chất khí, và với môi trường là α_2 sẽ được tính theo phương pháp lặp. Các bước tính lặp gồm:

1) Chọn nhiệt độ mặt trong ống tw_1 .

Tính α_1 theo công thức TN toả nhiệt cường bức $\alpha_1 = \frac{\lambda_1}{d_0} Nu_1(ReGrPr)_1$.

Tính $\alpha_{1\varepsilon} = \varepsilon_w \delta_0 (T_1^4 - Tw^4) / (T_1 - Tw)$ với ε_w = độ đen ống.

Tính $q_{l_1} = (\alpha_1 + \alpha_{1\varepsilon})(t_1 - tw_1)\pi d_0$, [W/m].

2) Tính nhiệt độ ngoài vỏ bảo vệ t_b theo phương trình:

$$q_{li} = q_{\lambda l} = \frac{t_{w1} - t_b}{\sum \frac{1}{2\pi\pi_i \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}}} \quad \text{tức } t_b = tw_1 = \frac{t_{w1} - t_b}{\sum \frac{1}{2\pi\pi_i \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}}}$$

Tính $\alpha_2 = \frac{\lambda_2}{db} Nu_2(GrPrRe)_2$ theo công thức TN toả nhiệt môi trường.

Tính $q_{l_2} = \alpha_2(t_b - t_0)\pi d_b$, [W/m].

3) So sánh sai số $\varepsilon_q = \left| 1 - \frac{q_{l_2}}{q_{l_1}} \right|$ với $[\varepsilon] = 5\%$ chọn trước, tức là xét:

$$\varepsilon_q - [\varepsilon] = \begin{cases} > 0 \rightarrow \text{Thay đổi } t_{w1} \text{ và lặp lại (1 ÷ 3)} \\ \leq 0 \rightarrow \text{lấy } \alpha_1, \alpha_2 \text{ như trên} \end{cases}$$

Nếu môi chất là pha lỏng, có thể coi $\alpha_1 \rightarrow \infty$ hay $t_{w1} = t_1$, và tính một lần t_b , α_2 theo công thức ở bước 2.

* Tính toán thực tế có thể dùng các công thức kinh nghiệm tính α_2 ra môi

trường không khí theo:
$$\alpha_2 = \begin{cases} 1,16 \left(\frac{t_1 - t_0}{d_b} \right)^{0,25} \\ 11,6 + 7\sqrt{\omega} \end{cases}$$

với t_1, t_0 là nhiệt độ môi chất, môi trường [$^{\circ}\text{C}$]

d_b là đường kính ngoài lớp bảo vệ, [m]

ω là tốc độ gió, [m/s]

α là hệ số toả nhiệt, [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]

2.2.3. Tính các nhiệt trở:

$$R_{\alpha 1} = \frac{1}{\pi d_0 \alpha_1}, [\text{mK}/\text{W}]$$

$$R_{\delta} = \frac{1}{2\pi\pi_0} \ln \frac{d_1}{d_0}, \quad R_c = \frac{1}{2\pi\pi_c} \ln \frac{d_c}{d_1}, [\text{mK}/\text{W}]$$

$$R_b = \frac{1}{2\pi\pi_b} \ln \frac{d_b}{d_c}, \quad R_{\alpha 2} = \frac{1}{\pi d_b \lambda_2}, \quad R_l = \Sigma R_{bi}, [\text{mK}/\text{W}].$$

Trong thực hành, cho phép bỏ qua $R_{\alpha 1}, R_{\delta}, R_b$ theo các điều kiện nói trên và tính α_2 theo công thức kinh nghiệm.

2.2.4. Tính tổn thất nhiệt:

Tổn thất nhiệt trên 1m dài đường ống là: $q_l = \frac{\overline{t_{Mc}} - t_0}{R_l}$, khi tính gần đúng, coi

nhiệt độ trung bình của môi chất trong ống là t_1 ở đầu vào tức là $q_l = \frac{t_1 - t_0}{R_l}$, [W/m].

- Tổn thất nhiệt trên ống dài l:

$$Q = l q_l = l \frac{t_1 - t_0}{R_l}, [\text{W}].$$

2.2.5. Phân bố nhiệt độ trong vách ống:

* Nhiệt độ mặt ngoài lớp cách nhiệt t_c , khi coi $R_b = R_{\delta} = R_{\alpha 1} = 0$ xác định theo phương trình cân bằng nhiệt:

$$q_l = \frac{t_1 - t_c}{R_c} = \frac{t_c - t_0}{R_{\alpha 2}} \rightarrow t_c = \frac{\frac{t_1}{R_c} + \frac{t_0}{R_{\alpha 2}}}{\frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_{\alpha 2}}}.$$