

Chương 3

CÁC QUÁ TRÌNH NHIỆT ĐỘNG THỰC TẾ

3.1. HƠI NƯỚC VÀ CÁC QUÁ TRÌNH CỦA NÓ

3.1.1. Hơi nước và ứng dụng

Hơi nước có rất nhiều ưu điểm so với các môi chất khác như: có nhiều trong thiên nhiên, rẻ tiền và đặc biệt là không độc hại đối với môi trường và không ăn mòn thiết bị, do đó nó được sử dụng rất nhiều trong các ngành công nghiệp.

Hơi nước thường được sử dụng trong thực tế ở trạng thái gần trạng thái bão hoà nên không thể bỏ qua thể tích bản thân phân tử và lực hút giữa chúng. Vì vậy không thể dùng phương trình trạng thái của khí lí tưởng cho hơi nước được.

Phương trình trạng thái cho hơi nước được dùng nhiều nhất hiện nay là phương trình Vukalovich-novikov:

$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT \left(1 - \frac{c}{T^{3/2+m}}\right) \quad (3-1)$$

Ở đây : a,b,m là các hệ số được xác định bằng thực nghiệm.

Từ công thức này người ta đã xây dựng bảng và đồ thị hơi nước .

3.1.2. Quá trình hoá hơi đẳng áp của nước

3.1.2.1. Khái niệm về quá trình hoá hơi và ngưng tụ

** Quá trình hoá hơi*

Quá trình hoá hơi là quá trình chuyển từ thể lỏng sang thể hơi ~~khí~~. Quá trình hoá hơi có thể là bay hơi hoặc sôi. ✓

+ Quá trình bay hơi:

Quá trình bay hơi là quá trình hoá hơi chỉ xảy ra trên bề mặt thoáng chất lỏng, ở nhiệt độ bất kì.

- Điều kiện để xảy ra quá trình bay hơi: Muốn xảy ra quá trình bay hơi thì cần phải có mặt thoáng.

- Đặc điểm của quá trình bay hơi: Quá trình bay hơi xảy ra do các phân tử nước trên bề mặt thoáng có động năng lớn hơn sức căng bề mặt và thoát ra ngoài, bởi vậy quá trình bay hơi xảy ra ở bất kì nhiệt độ nào.

- Cường độ bay hơi phụ thuộc vào bản chất và nhiệt độ của chất lỏng. Các chất lỏng khác nhau thì có cường độ bay hơi khác nhau và nhiệt độ càng cao thì tốc độ bay hơi càng lớn.

+ Quá trình sôi:

Quá trình sôi là quá trình hoá hơi xảy ra cả trong lòng thể tích chất lỏng.

- Khi cung cấp nhiệt cho chất lỏng thì nhiệt độ của nó tăng lên và cường độ bay hơi cũng tăng lên, đến một nhiệt độ xác định nào đó thì hiện tượng bay hơi xảy ra cả trong toàn bộ thể tích chất lỏng, khi đó các bọt hơi xuất hiện cả trên bề mặt nhận nhiệt lẫn trong lòng chất lỏng, ta nói chất lỏng sôi.

- Điều kiện để xảy ra quá trình sôi: Chất lỏng phải đạt đến nhiệt độ nhất định, nhiệt độ đó được gọi là nhiệt độ sôi hay nhiệt độ bão hoà.

- Đặc điểm của quá trình sôi: Nhiệt độ sôi phụ thuộc vào bản chất và áp suất của chất lỏng đó. Các chất lỏng khác nhau thì có nhiệt độ sôi khác nhau. Ở áp suất không đổi nào đó thì nhiệt độ sôi của chất lỏng không đổi, khi áp suất chất lỏng càng cao thì nhiệt độ sôi càng lớn và ngược lại.

*** Quá trình ngưng tụ :**

Quá trình ngưng tụ là quá trình ngược lại với quá trình hoá hơi, trong đó hơi nhả nhiệt và biến thành lỏng.

Nhiệt độ ngưng tụ luôn bằng nhiệt độ sôi ở cùng áp suất.

Trong quá trình ngưng tụ, nếu áp suất của môi chất không đổi ($p = \text{const}$) thì nhiệt độ ngưng tụ cũng không thay đổi suốt trong quá trình ($t_s = t_{nt}$).

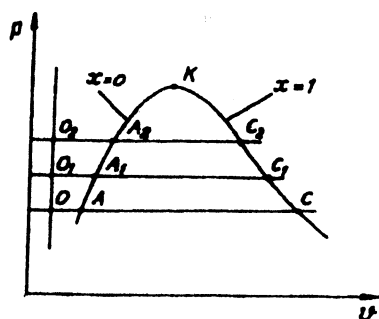
3.1.2.2. Quá trình hoá hơi đẳng áp của nước

*** Khảo sát quá trình hoá hơi đẳng áp của nước**

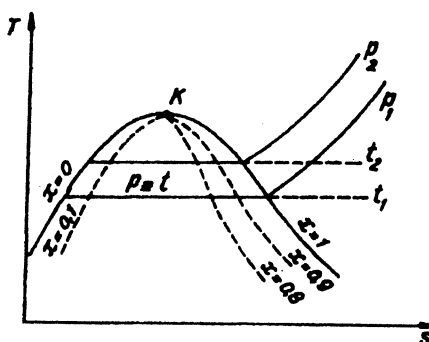
Giả thiết nước bắt đầu ở trạng thái O trên đồ thị $p-v$ và $T-s$ hình 3.1 và 3.2 có nhiệt độ t , thể tích riêng là v . Khi cung cấp nhiệt cho nước trong điều kiện áp suất không đổi $p = \text{const}$, nhiệt độ và thể tích riêng tăng lên. Đến nhiệt độ t_s nào đó thì nước bắt đầu sôi, t_s được gọi là nhiệt độ sôi hay nhiệt độ bão hoà ứng với áp suất p . Trạng thái sôi được biểu thị bằng điểm A, có các thông số trạng thái khác tương ứng là: v' , u' , i' và s' .

Nếu vẫn ở áp suất đó, tiếp tục cấp nhiệt thì cường độ bốc hơi càng tăng nhanh, nhiệt độ của hỗn hợp nước và hơi không thay đổi và bằng t_s . Đến một lúc nào đó thì toàn bộ nước sẽ biến hoàn toàn thành hơi trong khi nhiệt độ của hơi vẫn còn giữ ở nhiệt độ t_s . Hơi nước ở trạng thái này được gọi là hơi bão hoà khô, được biểu diễn bằng điểm C. Các thông số tương ứng tại điểm C là v'' , u'' , i'' và s'' . Nhiệt lượng cấp vào cho 1 kg nước từ khi bắt đầu sôi đến khi biến thành hơi hoàn toàn được gọi là nhiệt ẩn hoá hơi, kí hiệu là $r = i'' - i'$.

Nếu ta cung cấp nhiệt cho hơi bão hoà khô vẫn ở áp suất đó thì nhiệt độ của nó lại bắt đầu tiếp tục tăng lên. Hơi nước ở trạng thái này gọi là hơi quá nhiệt. Các thông số hơi quá nhiệt kí hiệu là v , p , t , u , i và s . Hiệu số nhiệt độ của hơi quá nhiệt và hơi bão hoà được gọi là độ quá nhiệt của hơi. Độ quá nhiệt càng cao thì hơi càng gần với khí lí tưởng.



Hình 3.1. đồ thị $p-v$



Hình 3.2. đồ thị $T-s$

Vậy ở áp suất p không đổi, khi cấp nhiệt cho nước thì nước sẽ thay đổi trạng thái, ta sẽ có các trạng thái O, A, C tương ứng với nước chưa sôi, nước sôi và hơi bão hoà khô. Quá trình đó được gọi là quá trình hoá hơi đẳng áp.

Tương tự như vậy, nếu cấp nhiệt đẳng áp cho nước ở áp suất $p_1 = \text{const}$ thì ta có các trạng thái tương ứng kí hiệu O_1 , A_1 , C_1 và ở áp suất $p_2 = \text{const}$ ta cũng có các điểm tương ứng là O_2 , A_2 , C_2

* Các đường đặc tính của nước

Khi nối các điểm O, O_1 , O_2 , O_3 ta được một đường gọi là đường nước chưa sôi, đường này gần như thẳng đứng, chứng tỏ thể tích riêng của nước rất ít phụ thuộc vào áp suất.

Khi nối các điểm A, A_1 , A_2 , A_3ta được một đường cong biểu thị trạng thái nước sôi gọi là đường giới hạn dưới. Khi nhiệt độ sôi tăng thì thể tích riêng của nước sôi v' tăng, do đó đường cong này dịch dần về phía bên phải khi tăng áp suất.

Khi nối các điểm C, C_1 , C_2 , C_3ta được một đường cong biểu thị trạng thái hơi bão hoà khô, gọi là đường giới hạn trên. Khi áp suất tăng thì thể tích riêng của hơi bão hoà khô giảm nên đường cong này dịch về phía trái.

Đường giới hạn trên và đường giới hạn dưới gặp nhau tại điểm K, gọi là điểm tới hạn. Trạng thái tại điểm K gọi là trạng thái tới hạn, đó chính là trạng thái mà không còn sự khác nhau giữa chất lỏng sôi và hơi bão hoà khô. Các thông số tương ứng với trạng thái đó được gọi là thông số tới hạn, ví dụ nước có

$$p_k = 22,1 \text{ Mpa}, t_k = 374^\circ\text{C},$$

$$v_k = 0,00326 \text{ m}^3/\text{kg}, i_k = 2156,2 \text{ kJ/kg}, s_k = 4,43 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}.$$

Hai đường giới hạn trên và dưới chia đồ thị làm 3 vùng. Vùng bên trái đường giới hạn dưới là vùng nước chưa sôi, vùng bên phải đường giới hạn trên là vùng hơi quá nhiệt, còn vùng giữa hai đường giới hạn là vùng hơi bão hoà ẩm.

Trong vùng bão hoà ẩm thì nhiệt độ và áp suất không còn là thông số độc lập nữa. Ứng với nhiệt độ sôi, môi chất có áp suất nhất định và ngược lại ở một áp suất xác định, môi chất có nhiệt độ sôi tương ứng. Vì vậy, ở vùng này muốn xác định trạng thái của môi chất phải dùng thêm một thông số nữa gọi là độ khô x hay độ ẩm y của hơi, ($y = 1 - x$).

Nếu xét G kg hỗn hợp hơi và nước (hơi ẩm), trong đó gồm

$$x \frac{G''}{G' + G''} \quad (3-2)$$

hoặc độ ẩm:

$$y = \frac{G'}{G' + G''} \quad (3-3)$$

Như vậy ta thấy: Trên đường giới hạn dưới lượng hơi $G'' = 0$, do đó độ khô $x = 0$, độ ẩm $y = 1$. Còn trên đường giới hạn trên, lượng nước đã biến hoàn toàn thành hơi nên $G' = 0$ nghĩa là độ khô $x = 1$, độ ẩm $y = 0$ và giữa hai đường giới hạn có độ khô: $0 < x < 1$

3.1.2.3. Xác định các thông số trạng thái của nước và hơi bằng đồ thị hoặc bảng

Cũng như hơi của các chất lỏng khác, hơi nước là một khí thực, do đó không thể tính toán theo phương trình trạng thái của khí lí tưởng được. Muốn tính toán chúng cần phải sử dụng các đồ thị hoặc bảng số đã được lập sẵn cho từng loại hơi.

** Các bảng và xác định thông số trạng thái của nước*

+ Bảng nước chưa sôi và hơi quá nhiệt:

Để xác định trạng thái môi chất ta cần biết hai thông số trạng thái độc lập.

Trong vùng nước chưa sôi và vùng hơi quá nhiệt, nhiệt độ và áp suất là hai thông số độc lập, do đó bảng nước chưa sôi và hơi quá nhiệt được xây dựng theo hai thông số này. Bảng các thông số của nước chưa sôi và hơi nhiệt được trình bày ở phần phụ lục, bảng này cho phép xác định các thông số trạng thái v , i , s của nước chưa sôi và hơi quá nhiệt ứng với từng giá trị áp suất và nhiệt độ xác định nào đó.

Từ đó xác định được:

$$u = i - pv \quad (3-4)$$

+ Bảng nước sôi và hơi bão hòa khô:

Khi môi chất có trạng thái trong vùng giữa đường giới hạn dưới (đường nước sôi) và đường giới hạn trên (đường hơi bão hòa khô) thì nhiệt độ và áp suất không còn là hai thông số độc lập nữa, vì vậy muốn xác định trạng thái của môi chất thì cần biết thêm một thông số khác nữa.

Độ khô cũng là một thông số trạng thái. Nước sôi có độ khô $x = 0$, hơi bão hòa khô có độ khô $x = 1$, như vậy trạng thái của môi chất trên các đường giới hạn này sẽ được xác định khi biết thêm một thông số trạng thái nữa là áp suất p hoặc nhiệt độ t . Chính vì vậy các thông số trạng thái khác của nước sôi và hơi bão hòa khô có thể được xác định bằng bảng nước sôi và hơi bão hòa khô theo áp hoặc nhiệt độ.

Bảng “nước sôi và hơi bão hòa khô” có thể cho theo p hoặc t , được trình bày trong phần phụ lục, cho biết các thông số trạng thái của nước sôi (v' , i' , s'), hơi bão hòa khô (v'' , i'' , s'') và nhiệt ẩn hoá hơi r theo áp suất hoặc theo nhiệt độ.

Khi môi chất ở trong vùng hơi ẩm, các thông số trạng thái của nó có thể được tính theo các thông số trạng thái tương ứng trên các đường giới hạn và độ khô x ở cùng áp suất.

Vì dụ: Trong 1kg hơi ẩm có độ khô x , sẽ có x kg hơi bão hòa khô với thể tích v'' và $(1-x)$ kg nước sôi với thể tích v' . Vậy thể tích riêng của hơi ẩm sẽ là:

$$v_x = xv'' + (1-x)v' = v' + x(v'' - v') \quad (3-5)$$

Như vậy, muốn xác định các thông số trạng thái của hơi ẩm có độ khô x ở áp suất p , trước hết dựa vào bảng “nước sôi và hơi bão hòa khô” ta xác định các thông số v' , i' , s' của nước sôi và v'' , i'' , s'' của hơi bão hòa khô theo áp suất p , sau đó tính các thông số tương ứng của hơi ẩm theo công thức:

$$\Phi_x = \Phi' + x(\Phi'' - \Phi') \quad (3-6)$$

Trong đó:

Φ_x là thông số trạng thái của hơi bão hòa ẩm có độ khô x (ví dụ v_x , i_x , s_x),

Φ' là thông số trạng thái v' , i' , s' của nước sôi tương ứng trên đường $x=0$

Φ'' là thông số trạng thái v'' , i'' , s'' của hơi bão hòa khô tương ứng trên đường $x=1$ ở cùng áp suất.

** Đồ thị $T-s$ và $i-s$ của hơi nước*

Các bảng hơi nước cho phép tính toán các thông số trạng thái với độ chính xác cao, tuy nhiên việc tính toán phức tạp và mất nhiều thời giờ. Để đơn giản việc tính toán, ta có thể dùng đồ thị của hơi nước. Dựa vào đồ thị có thể xác định các thông số còn lại khi biết 2 thông số độc lập với nhau. Đối với hơi nước, thường dùng các đồ thị T-s, i-s.

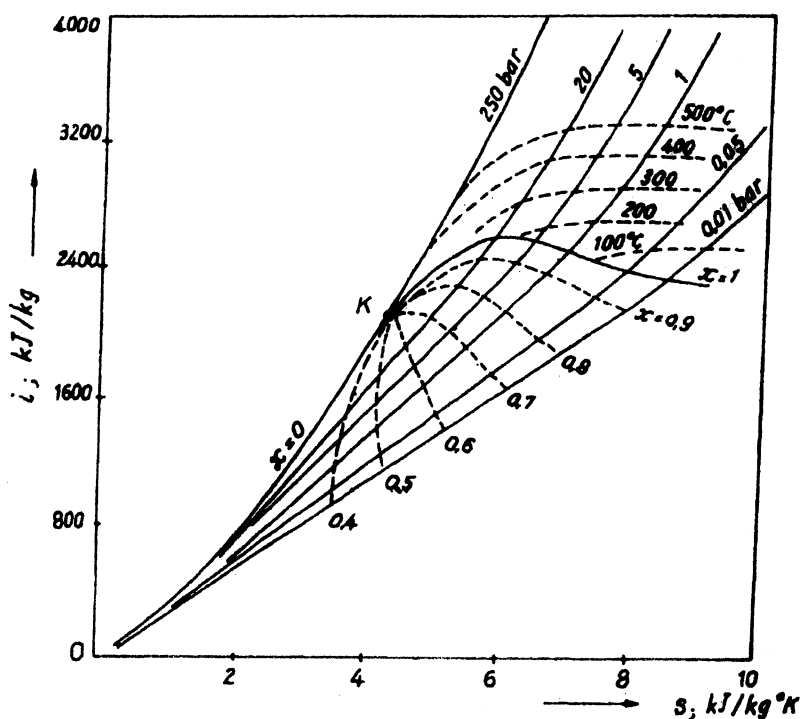
+ Đồ thị T—s của hơi nước:

Đồ thị T-s của hơi nước được biểu thị trên hình 3.2, trục tung của đồ thị biểu diễn nhiệt độ, trục hoành biểu diễn entropi. Ở đây các đường đẳng áp trong vùng nước chưa sôi gần như trùng với đường giới hạn giới $x = 0$ (thực tế nằm trên đường $x = 0$), trong vùng hơi bão hoà ẩm là các đường thẳng song song với trục hoành và trùng với đường đẳng nhiệt, trong vùng hơi quá nhiệt là các đường cong lõm đi lên. Các đường độ khô không đổi xuất phát từ điểm K đi tỏa xuống phía dưới.

Đồ thị T-s được xây dựng cho vùng hơi bão hòa và vùng hơi quá nhiệt.

+ Đồ thị i-s của hơi nước:

Theo định luật nhiệt động thứ nhất ta có $q = \Delta i - 1$, mà trong quá trình đẳng áp $dp = 0$ do đó $1 = 0$, vậy $q = \Delta i = i_2 - i_1$. Nghĩa là trong quá trình đẳng áp, nhiệt lượng q trao đổi bằng hiệu entanpi, vì vậy đồ thị i-s sử dụng rất thuận tiện khi tính nhiệt lượng trong quá trình đẳng áp.



Hình 3.3. đồ thị i-s của hơi nước

Đồ thị gồm các đường:

Đường đẳng áp ($p=\text{const}$) trong vùng hơi ẩm là các đường thẳng nghiêng đi lên, trùng với đường đẳng nhiệt tương ứng; trong vùng hơi quá nhiệt là các đường cong lõm đi lên.

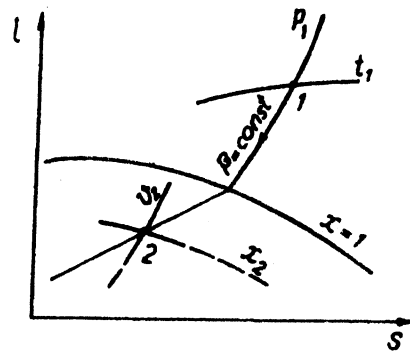
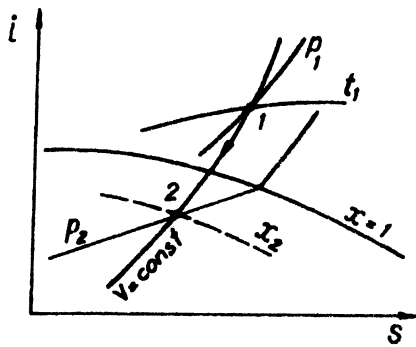
Đường đẳng nhiệt trong vùng hơi ẩm trùng với đường đẳng áp, là những đường thẳng nghiêng đi lên, trong vùng hơi quá nhiệt là những đường cong lõm đi lên và càng xa

đường $x = 1$ thì càng gần như song song với trục hoành. Đường đẳng tích dốc hơn đường đẳng áp một ít. Đường độ khô $x = \text{const}$ là chùm đường cong xuất phát từ điểm K đi xuống phía dưới.

3.1.3. Các quá trình nhiệt động cơ bản của hơi nước

3.1.3.1. Quá trình đẳng tích $v = \text{const}$

Quá trình đẳng tích của hơi nước được biểu diễn bằng đường 1-2 trên đồ thị $i-s$ hình 3.4. Trạng thái đầu được biểu diễn bằng điểm 1, là giao điểm của đường $p_1 = \text{const}$ với đường $t_1 = \text{const}$. Các thông số còn lại i_1, s_1, v_1 được xác định bằng cách đọc các đường i, s và v đi qua điểm 1.



Hình 3.4. đồ thị $T-s$ của QT đẳng tích

Hình 3.5. đồ thị $T-s$ của QT đẳng áp

Trạng thái cuối được biểu diễn bằng điểm 2, được xác định bằng giao điểm của đường $v_2 = v_1 = \text{const}$ và đường $p_2 = \text{const}$, từ đó xác định các thông số khác như đối với điểm 1

- Công của quá trình: $dl = pdv = 0$ vì $dv = 0$,

hay:

$$l = 0 \quad (3-7)$$

- Biến thiên nội năng:

$$\Delta u = (i_2 - p_2 v_2) - (i_1 - p_1 v_1)$$

$$\Delta u = i_2 - i_1 - v(p_2 - p_1) \quad (3-8)$$

- Nhiệt lượng trao đổi trong quá trình:

$$q = \Delta u + l = \Delta u \quad (3-9)$$

3.1.3.2. Quá trình đẳng áp

Quá trình đẳng áp của hơi nước được biểu diễn bằng đường 1-2 trên đồ thị $i-s$ hình 5.5. Trạng thái đầu được biểu diễn bằng điểm 1, là giao điểm của đường $p_1 = \text{const}$ với đường $t_1 = \text{const}$. Các thông số còn lại i_1, s_1, v_1 được xác định bằng cách đọc các đường i, s và v đi qua điểm 1.

Trạng thái cuối được biểu diễn bằng điểm 2, được xác định bằng giao điểm của đường $p_2 = p_1 = \text{const}$ với đường $x_2 = \text{const}$, từ đó xác định các thông số khác như đối với điểm 1.

- Công của quá trình:

$$l = \int_{v_1}^{v_2} p dv = p(v_2 - v_1) \quad (3-10)$$

- Biến thiên nội năng:

$$\Delta u = i_2 - i_1 - p(v_2 - v_1) \quad (3-11)$$

- Nhiệt lượng trao đổi:

$$q = \Delta u + l = i_2 - i_1 \quad (3-12)$$

3.1.3.3. Quá trình đẳng nhiệt

Quá trình đẳng nhiệt của hơi nước được biểu diễn bằng đường 1-2 trên đồ thị $i-s$ hình 5.6. Trạng thái đầu được biểu diễn bằng điểm 1, là giao điểm của đường t_1 và x_1 . Các thông số còn lại v_1, i_1, s_1 được xác định bằng cách đọc các đường v, i, s đi qua điểm 1.

Trạng thái cuối được biểu diễn bằng điểm 2, là giao điểm của đường p_2 với đường $t_2 = t_1 = \text{const}$, từ đó xác định các thông số khác như đối với điểm 1.

- Biến thiên nội năng:

$$\Delta u = i_2 - i_1 - (p_2 v_2 - p_1 v_1) \quad (3-13)$$

- Nhiệt lượng trao đổi trong quá trình:

$$q = \int_{s_1}^{s_2} T ds = T(s_2 - s_1) \quad (3-14)$$

- Công của quá trình:

$$l = q - \Delta u \quad (3-15)$$

3.1.3.4. Quá trình đoạn nhiệt

Quá trình đoạn nhiệt của hơi nước được biểu diễn bằng đường 1-2 trên đồ thị i-s hình 3-7. Trong quá trình này, $dq = 0$ nếu $ds = 0$. Trên đồ thị T-s và i-s quá trình đoạn nhiệt là một đoạn thẳng song song với trục tung có $s = \text{const}$.

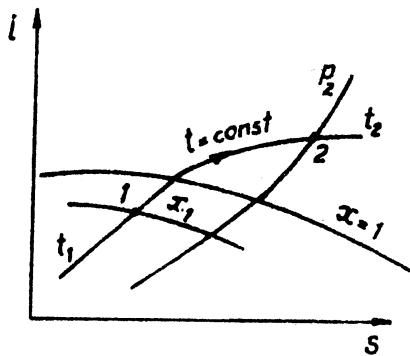
- Nhiệt lượng trao đổi :

$dq = 0$ hay $q = 0$, do đó:

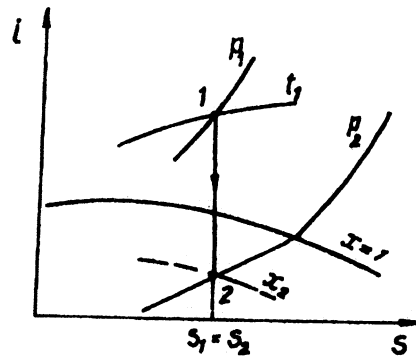
$$ds = \frac{dq}{T} = 0 \quad (3-16)$$

- Công và biến thiên nội năng:

$$-l = \Delta u = i_2 - i_1 - (p_2 v_2 - p_1 v_1) \quad (3-17)$$



Hình 3.6. quá trình đẳng nhiệt của hơi



Hình 3.7. quá trình đoạn nhiệt của hơi

3.2. KHÔNG KHÍ ẨM

3.2.1. Định nghĩa, tính chất và phân loại không khí ẩm

3.2.1.1. Định nghĩa, tính chất của không khí ẩm

Không khí ẩm là một hỗn hợp gồm không khí khô và hơi nước.

Không khí khô là hỗn hợp các khí có thành phần thể tích: Nitơ khoảng 78%; Oxy: 20,93%; Carbonic và các khí trơ khác chiếm khoảng 1%.

Hơi nước trong không khí ẩm có phân áp suất rất nhỏ (khoảng 15 đến 20 mmHg), do đó ở nhiệt độ bình thường thì hơi nước trong khí quyển là hơi quá nhiệt, ta coi nó là khí lý tưởng. Như vậy, có thể coi không khí ẩm là một hỗn hợp khí lý tưởng, có thể sử dụng các công thức của hỗn hợp khí lý tưởng để tính toán không khí ẩm, nghĩa là:

Nhiệt độ không khí ẩm :

$$T = T_{kk} = T_h, \quad (3-18)$$

Áp suất không khí ẩm:

$$p = p_{kk} + p_h, \quad (3-19)$$

Thể tích V:

$$V = V_{kk} + V_h, \quad (3-20)$$

Khối lượng G:

$$G = G_{kk} + G_h, \quad (3-21)$$

3.2.1.2. Phân loại không khí ẩm

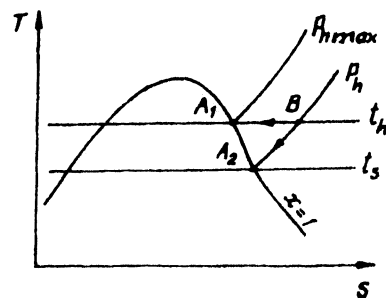
Tuỳ theo lượng hơi nước chứa trong không khí ẩm, chúng được chia thành 3 loại:

*** không khí ẩm bão hòa:**

Không khí ẩm bão hòa là không khí ẩm mà trong đó lượng hơi nước đạt tới giá trị lớn nhất $G = G_{max}$. Hơi nước ở đây là hơi bão hòa khô, được biểu diễn bằng điểm A trên đồ thị T-s hình 3.8.

*** Không khí ẩm chưa bão hòa:**

Không khí ẩm chưa bão hòa là không khí ẩm mà trong đó lượng hơi nước chưa đạt tới giá trị lớn nhất $G < G_{max}$, nghĩa là còn có thể nhận thêm một lượng hơi nước nữa mới trở thành không khí ẩm bão hòa. Hơi nước ở đây là hơi quá nhiệt, được biểu diễn bằng điểm B trên đồ thị T-s hình 3.8.



Hình 3.8. Đồ thị T-s của hơi nước

*** Không khí ẩm quá bão hòa:**

Không khí ẩm quá bão hòa là không khí ẩm mà trong đó ngoài lượng hơi nước lớn nhất G_{max} , còn có thêm một lượng nước ngưng nữa chứa trong nó. Hơi nước ở đây là hơi bão hòa ẩm.

Nếu cho thêm một lượng hơi nước nữa vào không khí ẩm bão hòa thì sẽ có một lượng chừng đó hơi nước ngưng tụ lại thành nước, khi đó không khí ẩm bão hòa trở thành không khí quá bão hòa. Ví dụ sương mù là không khí ẩm quá bão hòa vì trong đó có các giọt nước ngưng tụ.

Từ đồ thị hình 3.8 ta thấy, có thể biến không khí ẩm chưa bão hòa thành không khí ẩm bão hòa bằng hai cách:

+ Giữ nguyên nhiệt độ không khí ẩm $t_h = \text{const}$, tăng phân áp suất của hơi nước từ p_h đến $p_{h\max}$ (quá trình BA_1). áp suất $p_{h\max}$ là áp suất lớn nhất hay còn gọi là áp suất bão hòa. Nghĩa là tăng lượng nước trong không khí ẩm chưa bão hòa để nó trở thành không khí ẩm bão hòa.

+ Giữ nguyên áp suất hơi $p_h = \text{const}$, giảm nhiệt độ không khí ẩm từ t_h đến nhiệt độ đọng sương t_s (quá trình BA_2). Nhiệt độ đọng sương t_s là nhiệt độ tại đó hơi ngưng tụ lại thành nước.

3.2.2. Các đại lượng đặc trưng cho không khí ẩm

* Độ ẩm tuyệt đối:

Độ ẩm tuyệt đối là khối lượng hơi nước chứa trong 1m^3 không khí ẩm. Đây cũng chính là khối lượng riêng của hơi nước trong không khí ẩm.

$$\rho_h = \frac{G_h}{V}, \text{ kg/m}^3; \quad (3-22)$$

* Độ ẩm tương đối:

Độ ẩm tương đối φ là tỷ số giữa độ ẩm tuyệt đối của không khí chưa bão hòa ρ_h và độ ẩm tuyệt đối của không khí ẩm bão hòa $\rho_{h\max}$ ở cùng nhiệt độ.

$$\varphi = \rho_h / \rho_{h\max} \quad (3-23)$$

Từ phương trình trạng thái của không khí ẩm chưa bão hòa: $p_h V = G_h R_h T$ và bão hòa: $p_{h\max} V = G_{h\max} R_h T$, suy ra:

$$\rho_h = \frac{G_h}{V} = \frac{p_h}{R_h T} \quad (a)$$

và
$$\rho_{h\max} = \frac{G_{h\max}}{V} = \frac{p_{h\max}}{R_h T} \quad (b)$$

Chia (a) cho (b) ta được:

$$\varphi = \frac{\rho_h}{\rho_{h\max}} = \frac{p_h}{p_{h\max}} \quad (3-24)$$

vì $0 \leq p_h \leq p_{h\max}$ nên $0 \leq \varphi \leq 100\%$. Không khí khô có $\varphi = 0$, không khí ẩm bão hòa có $\varphi = 100\%$.

Độ ẩm thích hợp nhất cho sức khỏe động vật là $\varphi = (40 \div 75)\%$, cho bảo quản lạnh thực phẩm là 90% .

* Độ chứa hơi d:

Độ chứa hơi d là lượng hơi chứa trong 1kg không khí khô hoặc trong $(1+d)$ kg không khí ẩm.

$$d = G_h / G_k; [\text{kg} / \text{kgK}] \quad (3-25)$$

Từ phương trình trạng thái khí lí tưởng viết cho hơi nước và không khí khô ta có:

$$G_h = \frac{p_h V}{R_h T} \text{ và } G_k = \frac{p_k V}{R_k T};$$

thay thế các giá trị G vào (3-45) ta được:

$$d = \frac{p_h R_k}{p_k R_h} = \frac{8314.18.p_h}{29.8314.p_k} = 0,622 \frac{p_h}{p - p_h}; [\text{kg} / \text{kgk}] \quad (3-26)$$

* Entanpi của không khí ẩm

Entanpi của không khí ẩm bằng tổng entanpi của không khí khô và entanpi của hơi nước chứa trong đó. Trong kĩ thuật thường tính entanpi của 1kg không khí khô và d kg hơi nước chứa trong $(1+d)$ kg không khí ẩm, kí hiệu là i :

$$i = i_k + d.i_h; [\text{kJ} / \text{kg}] \quad (3-27)$$

trong đó:

i_k - entanpi của 1kg không khí khô, $i_k = C_{pk}t$, mà $C_{pk} = 1 \text{ kJ} / \text{kg}^\circ\text{C}$ vậy $i_k = t$;

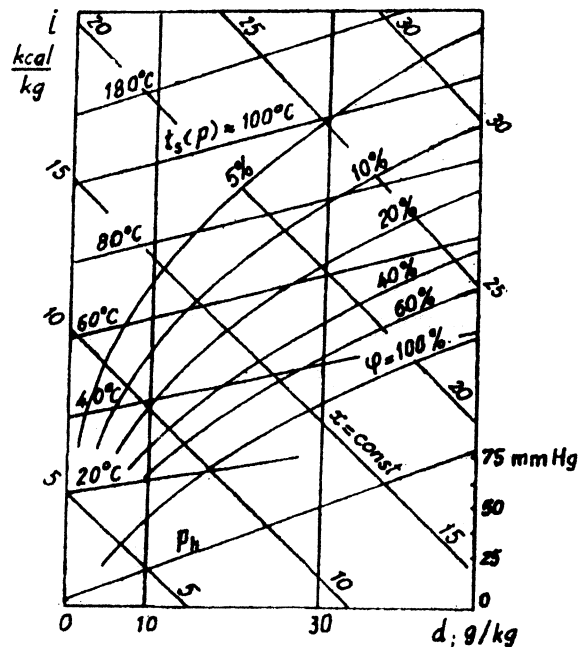
i_h - entanpi của hơi nước, nếu không khí ẩm chưa bão hoà thì hơi nước là hơi quá nhiệt có $i_h = 2500 + C_{ph}t = 2500 + 1,9t$;

Cuối cùng ta có:

$$I = t + d(2500 + 1,9t); [\text{kJ} / \text{kg}].$$

3.2.3. Đồ thị i - d và ứng dụng

Để giải các bài toán về không khí ẩm, ngoài việc tính toán theo các công thức, chúng ta có thể giải bằng đồ thị i - d .



Hình 3.9. đồ thị i - d của hơi nước

Đồ thị i - d được biểu diễn trên hình 3.9, có trục tung là entanpi của không khí ẩm $[\text{kJ} / \text{kgK}]$, trục hoành là độ chứa hơi $d [\text{g} / \text{kgK}]$. Trục i và d không vuông góc với nhau mà tạo với nhau một góc 135° , đồ thị gồm các đường sau:

Đường $i = \text{const}$ là đường thẳng nghiêng đi xuống với góc nghiêng 135° ;

Đường $d = \text{const}$ là đường thẳng đứng;

Đường $t = \text{const}$ trong vùng không khí ẩm chưa bão hòa là các đường thẳng nghiêng đi lên.

Đường $\varphi = \text{const}$ trong vùng không khí ẩm chưa bão hòa ở nhiệt độ $t < t_s(p)$ là các đường cong lồi, trong vùng nhiệt độ $t > t_s(p)$ là đường thẳng đi lên.

Đường $\varphi = 100\%$ chia đồ thị thành hai vùng phía trên là không khí ẩm chưa bão hòa, vùng phía dưới là không khí ẩm quá bão hòa.

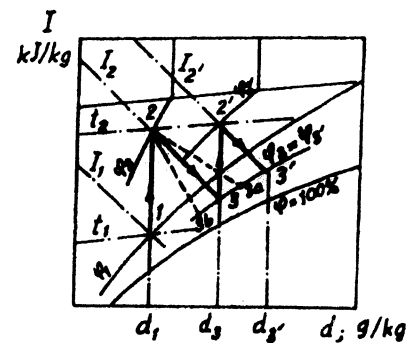
Đường phân áp suất hơi nước $p_h = \text{const}$ là đường thẳng nghiêng đi lên được dựng theo quan hệ (3-26), đơn vị đo p_h là mmHg.

Trạng thái không khí ẩm được xác định khi biết hai trong các thông số i , d , t , $\varphi \dots$. Khi đã xác định được trạng thái của không khí ẩm trên đồ thị i - d , ta có thể xác định được các thông số còn lại.

3.3. CÁC QUÁ TRÌNH NHIỆT ĐỘNG THỰC TẾ

3.3.1. Quá trình sấy

Quá trình sấy là quá trình làm giảm độ ẩm của vật muốn sấy. Môi chất dùng để sấy thường là không khí ẩm chưa bão hòa hoặc sản phẩm cháy của nhiên liệu, về nguyên tắc hoàn toàn giống nhau, ở đây ta khảo sát quá trình sấy dùng không khí làm môi chất sấy.



Hình 3.10. đồ thị quá trình sấy

Quá trình sấy được chia làm hai giai đoạn: Giai đoạn cấp nhiệt cho không khí và giai đoạn không khí sấy nóng vật sấy và hút ẩm từ vật sấy.

Quá trình sấy được biểu diễn trên hình 3.10. Không khí từ trạng thái 1 được cấp nhiệt theo quá trình 1-2 nhiệt độ tăng từ t_1 đến t_2 , entanpi tăng từ i_1 đến i_2 , độ ẩm tương đối giảm từ φ_1 đến φ_2 nhưng độ chứa hơi không thay đổi $d_1 = \text{const}$. Không khí sau khi được sấy nóng đi vào buồng sấy, tiếp xúc với vật sấy, sấy nóng vật sấy và làm cho nước trong vật sấy bay hơi. Quá trình sấy 2 — 3 có entanpi không đổi ($i_2 = i_3$), độ ẩm tương đối của không khí tăng từ φ_2 đến φ_3 và độ chứa hơi tăng từ d_1 đến d_3 , nghĩa là độ chứa hơi trong vật sấy bốc giảm.

- Không khí nhận một lượng hơi nước từ vật sấy bốc ra G_n :

$$g_n = d_3 - d_1; [\text{kg}/\text{kgkk}] \quad (3-28)$$

- Lượng không khí khô cần thiết làm bay hơi 1kg nước:

$$g_k = 1/(d_3 - d_1); [\text{kgkk}/\text{kghe}] \quad (3-29)$$

- lượng không khí ẩm ở trạng thái ban đầu cần để làm bay hơi 1kg nước trong vật sấy:

$$g_a = (1 + d_1) \cdot g_k, [\text{kgkk/kgk}] \quad (3-30)$$

- Lượng nhiệt cần để đốt nóng 1kg không khí khô chứa trong $(1+d)$ kg không khí ẩm là:

$$q = i_2 - i_1; [\text{kJ/kgkk}] \quad (3-31)$$

- Lượng nhiệt cần thiết để làm bay hơi 1kg nước trong vật sấy:

$$Q = g_k q = (i_2 - i_1)/(d_3 - d_2); [\text{kJ/kg}] \quad (3-32)$$

3.3.2. Quá trình lưu động

Sự chuyển động của môi chất gọi là quá trình lưu động. Khi khảo sát dòng lưu động, ngoài các thông số trạng thái như áp suất, nhiệt độ . . . ta còn phải xét một thông số nữa là tốc độ, kí hiệu là ω .

3.3.2.1 Các điều kiện khảo sát

* Các giả thiết:

Để đơn giản, khi khảo sát ta giả thiết :

- *Dòng lưu động là ổn định*: nghĩa là các thông số của môi chất không thay đổi theo thời gian .

- *Dòng lưu động một chiều*: vận tốc dòng không thay đổi trong tiết diện ngang.

- *Quá trình lưu động là đoạn nhiệt*: bỏ qua nhiệt do ma sát và dòng không trao đổi nhiệt với môi trường.

- *Quá trình lưu động là liên tục*: các thông số của dòng thay đổi một cách liên tục, không bị ngắt quãng và tuân theo phương trình liên tục:

$$G = \omega \cdot \rho \cdot f = \text{const} \quad (3-33)$$

ở đây:

G — lưu lượng khối lượng $[\text{kg/s}]$;

ω - vận tốc của dòng $[\text{m/s}]$;

f — diện tích tiết diện ngang của dòng tại nơi khảo sát $[\text{m}^2]$;

ρ - khối lượng riêng của môi chất $[\text{kg/m}^3]$;

* Tốc độ âm thanh

Tốc độ âm thanh là tốc độ lan truyền sóng chấn động trong một môi trường nào đó.

Tốc độ âm thanh trong môi trường khí hoặc hơi được xác định theo công thức:

$$a = \sqrt{k p v} = \sqrt{k R T} \quad (3-34)$$

ở đây:

a — tốc độ âm thanh [m/s];

k — số mũ đoạn nhiệt;

p - áp suất môi chất [N/m²];

v — thể tích riêng [m³/kg];

R — Hằng số chất khí [J/kg⁰K];

T — nhiệt độ tuyệt đối của môi chất [⁰K];

Từ (3-34) ta thấy tốc độ âm thanh phụ thuộc vào bản chất và các thông số trạng thái của môi chất.

Tỉ số giữa tốc độ của dòng với tốc độ âm thanh được gọi là số Mach, ký hiệu là M .

$$\frac{\omega}{a} = M \quad (3-35)$$

Khi:

- $\omega < a$ nghĩa là $M < 1$, ta nói dòng lưu động dưới âm thanh,

- $\omega = a$ nghĩa là $M = 1$, ta nói dòng lưu động bằng âm thanh,

- $\omega > a$ nghĩa là $M > 1$, ta nói dòng lưu động trên âm thanh (vượt âm thanh).

Dòng lưu động trong ống là một hệ hở, do đó theo định luật nhiệt động I ta có thể viết:

$$dq = di - vdp \quad (3-36)$$

$$dq = di + d \frac{\omega^2}{2} \quad (3-37).$$

3.3.2.2. Các qui luật chung của quá trình lưu động

* Quan hệ giữa tốc độ và áp suất

Vì dòng đoạn nhiệt có $dq = 0$, nên từ (3-37) ta suy ra:

$$d \frac{\omega^2}{2} = -vdp \quad (3-38).$$

$$\omega d\omega = -vdp \quad (3-39)$$

Các đại lượng ω , v , p luôn dương, do đó ω ngược dấu với p , nghĩa là:

- Khi tốc độ tăng ($d\omega > 0$) thì áp suất giảm ($dp < 0$), ống loại này là ống tăng tốc.

Ống tăng tốc được dùng để tăng động năng của dòng môi chất trong tuốc bin hơi, tuốc bin khí.

- Khi tốc độ giảm ($d\omega < 0$) thì áp suất tăng ($dp > 0$), ống loại này là ống tăng áp. Ống tăng áp được dùng để tăng áp suất của chất khí trong máy nén li tâm, động cơ phản lực.

*** Quan hệ giữa tốc độ và hình dáng ống**

Từ (3-33) ta có: $Gv = \omega f$, lấy vi phân ta được: $Gdv = fd\omega + \omega df$, chia 2 vế của phương trình cho ωf ta được:

$$\frac{df}{f} = \frac{dv}{v} - \frac{d\omega}{\omega} \quad (3-40).$$

Mặt khác, quá trình lưu động là đoạn nhiệt nên $\frac{dv}{v} = -\frac{dp}{kp}$, thay vào (3-40) ta được:

$$\frac{df}{f} = -\frac{dp}{kp} - \frac{d\omega}{\omega} \quad (3-41)$$

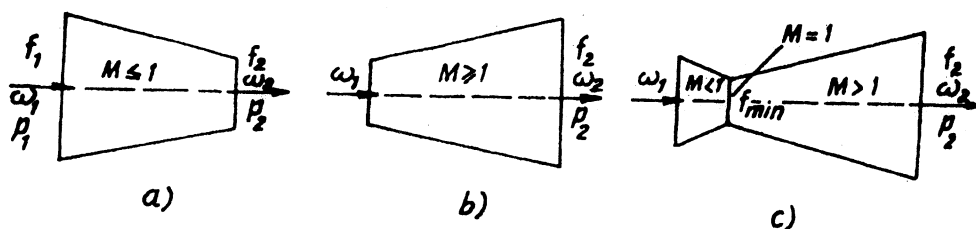
Đồng thời từ (3-6) ta có: $dp = -\frac{\omega d\omega}{v}$, thay vào (3-41) ta được:

$$\frac{df}{f} = -\frac{\omega d\omega}{kp v} - \frac{d\omega}{\omega} \quad \text{hay} \quad \frac{df}{f} = -\frac{\omega^2}{a^2} \frac{d\omega}{\omega} - \frac{d\omega}{\omega}, \quad \text{từ đó suy ra:}$$

$$\frac{df}{f} = (M^2 - 1) \frac{d\omega}{\omega}, \quad (3-42)$$

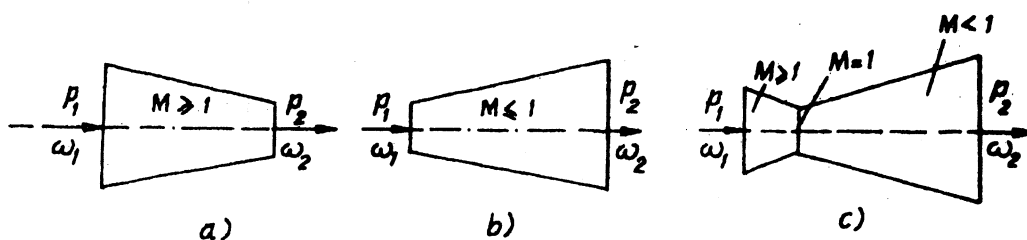
Đối với ống tăng tốc, vì F , ω , M luôn dương và $d\omega > 0$, nên df sẽ cùng dấu với $(M^2 - 1)$, từ đây ta có 3 trường hợp sau:

- Khi dòng vào có $\omega < a$ nghĩa là $(M < 1)$ thì $(M^2 - 1) < 0$, hay $df < 0$ (tiết diện giảm), ống tăng tốc có tiết diện nhỏ dần (hình 2.22a),
- Khi dòng vào có $\omega > a$ nghĩa là $(M > 1)$ thì $(M^2 - 1) > 0$ hay $df > 0$ (tiết diện tăng), ống tăng tốc có tiết diện lớn dần (hình 2.22b),
- Khi dòng vào có tốc độ nhỏ hơn âm thanh $\omega < a$, muốn tốc độ ra lớn hơn âm thanh $\omega > a$ thì ống phải có dạng đặc biệt, đoạn đầu nhỏ dần và đoạn sau lớn dần (hình 2.22c), gọi là ống tăng tốc Lavan. Tốc độ dòng tăng và đạt giá trị bằng âm thanh ($\omega = a$) tại tiết diện nhỏ nhất.



Hình 3.11. Ống tăng tốc

Đối với ống tăng áp, vì $d\omega < 0$, nên df sẽ ngược dấu với (M^2-1) , các kết quả thu được sẽ ngược lại với ống tăng tốc, nghĩa là khi $M > 1$ thì $df < 0$, ống tăng áp có tiết diện nhỏ dần (hình 3.12a); khi $M < 1$ thì $df > 0$, ống tăng áp có tiết diện lớn dần (hình 3.12b).



Hình 3.12. Ống tăng áp

Qua phân tích ta thấy: đối với một ống phun nhất định (lớn dần hay nhỏ dần) thì tùy theo tốc độ ở đầu vào mà ống có thể làm việc như ống tăng tốc hay ống tăng áp.

*** Tốc độ dòng khí tại tiết diện ra của ống tăng tốc**

Dòng lưu động đoạn nhiệt có $dq = 0$ nên theo (3-37) ta có: $-di = dl_{kt} = d \frac{\omega^2}{2}$, tích phân lên ta được:

$$i_1 - i_2 = l_{kt} = \frac{\omega_2^2 - \omega_1^2}{2} \quad (3-43)$$

Với ống tăng tốc thì thông thường $\omega_2 \gg \omega_1$ nên có thể coi $i_1 - i_2 = l_{kt} = \frac{\omega_2^2}{2}$, khi đó tốc độ tại tiết diện ra là:

$$\omega_2 = \sqrt{2l_{kt}} = \sqrt{2(i_1 - i_2)} \quad (3-44a)$$

Vì quá trình là đoạn nhiệt nên thay công l_{kt} của quá trình đoạn nhiệt vào ta có:

$$\omega_2 = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} RT_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} \quad (3-44b)$$

*** Tốc độ tới hạn và áp suất tới hạn**

Khi lưu động qua ống tăng tốc nhỏ dần với tốc độ đầu vào nhỏ hơn âm thanh, tốc độ dòng sẽ tăng dần, còn áp suất và nhiệt độ giảm dần đến tiết diện nào đó, tốc độ dòng bằng tốc độ âm thanh ($\omega_k = a_k$), ta nói dòng đạt trạng thái tới hạn, các thông số tại đó gọi là thông số tới hạn, ký hiệu là $v_k, p_k, \omega_k \dots$

Tỷ số giữa áp suất tới hạn và áp suất ở tiết diện vào gọi là tỉ số áp suất tới hạn, ký hiệu $\beta_k = p_k/p_1$.

Khi dòng đạt trạng thái tới hạn $\omega_k = a_k$, theo (3-34a) và (3-44b) ta có:

$$\omega_k = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} p_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{p_k}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} = a_k = \sqrt{k p_k v_k},$$

suy ra:

$$\beta_k = \frac{p_k}{p_1} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (3-45)$$

Từ (3-45) ta thấy tỉ số áp suất tới hạn chỉ phụ thuộc vào số mũ đoạn nhiệt k , tức là vào bản chất của chất khí. Với khí 2 nguyên tử $k = 1,4$ thì $\beta_k = 0,528$. Với khí 3 nguyên tử $k = 1,3$ thì $\beta_k = 0,55$.

Khi thay β bởi β_k thì tốc độ tới hạn được xác định theo (3-44b) là:

$$\omega_k = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} R T_1 \left[1 - \beta_k^{\frac{k-1}{k}} \right]}, \quad (3-46)$$

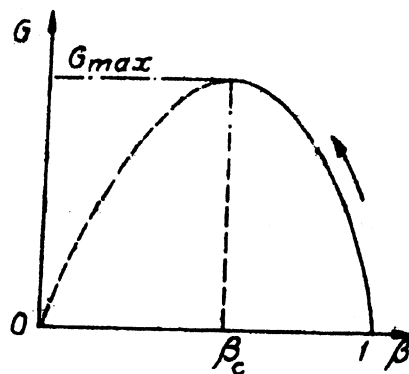
$$\omega_k = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} R T_1 \left[1 - \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k-1}{k} \frac{k}{k+1}} \right]} = \sqrt{\frac{2k}{k+1} R T_1},$$

* Lưu lượng cực đại

Lưu lượng của dòng lưu động được xác định theo công thức (3-33) tại tiết diện ra f_2 của ống:

$$G = \frac{f_2 \omega_2}{v_2} \quad (3-47)$$

Khi áp suất tại tiết diện ra thay đổi thì lưu lượng cũng thay đổi và chỉ phụ thuộc vào tỉ số áp suất $\beta = p_2/p_1$. Để tính lưu lượng lớn nhất $G_{\max}$ ta lấy đạo hàm của G theo β và xác định được lưu lượng lớn nhất khi $\beta = \beta_k$. Nghĩa là khi tốc độ dòng đạt tới tốc độ âm thanh thì lưu lượng cũng đạt giá trị cực đại.



Hình 3.13. đồ thị thay đổi lưu lượng

Thực nghiệm cho thấy:

Nếu tiếp tục giảm β , thì lưu lượng sẽ không tăng lên mà vẫn giữ nguyên ở giá trị $G_{\max}$, khi đó lưu lượng cực đại được tính theo các thông số tới hạn;

$$G_{\max} = \frac{f_{\min} \omega_k}{v_k} \quad (3-48)$$

3.3.2.3. Ống tăng tốc nhỏ dần và ống tăng tốc hỗn hợp

* Ống tăng tốc nhỏ dần

Như đã biết trong mục 3.3.2.2, đối với ống tăng tốc nhỏ dần, nếu dòng vào có tốc độ nhỏ hơn âm thanh thì tốc độ của dòng tăng dần và cùng lắm thì bằng tốc độ âm thanh. Vì vậy, trước khi tính toán cần so sánh tỉ số áp suất $\beta = p_2/p_1$ với $\beta_k = p_k/p_1$.

+ Nếu $\beta > \beta_k$, trạng thái dòng khí trong ống phun chưa đạt đến trạng thái tới hạn, tốc độ $\omega_2 < \omega_k$ được tính theo (3-44) và lưu lượng $G < G_{\max}$ được tính theo (3-47).

+ Nếu $\beta \leq \beta_k$, dòng khí trong ống phun đạt đến trạng thái tới hạn, tốc độ $\omega_2 = \omega_k$ được tính theo (3-46) và lưu lượng $G = G_{\max}$ được tính theo (3-48).

* Ống tăng tốc hỗn hợp (ống Lavan)

Ống tăng tốc nhỏ dần không thể đạt được tốc độ lớn hơn âm thanh, do đó để đạt được tốc độ trên âm thanh người ta ghép ống tăng tốc nhỏ dần với ống tăng tốc lớn dần gọi là ống tăng tốc Lavan (hình 3.12c).

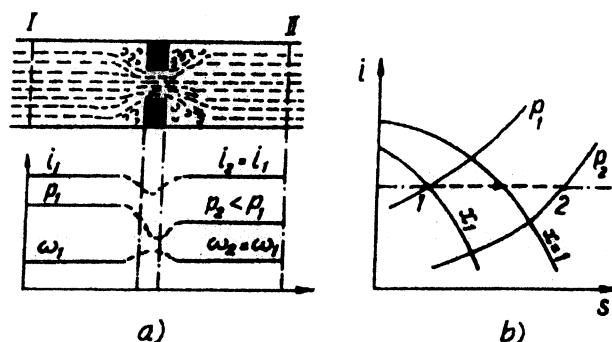
Đối với ống Lavan, khi ở tiết diện vào tỉ số áp suất $\beta > \beta_k$ thì tốc độ vào nhỏ hơn tốc độ âm thanh, nếu ở tiết diện ra đạt được điều kiện $\beta < \beta_k$, thì tại tiết diện cực tiểu $\beta = \beta_k$, tốc độ $\omega_{\min} = \omega_k$ và tại tiết diện ra tốc độ $\omega_2 > \omega_k$.

3.3.3. Quá trình tiết lưu

3.3.3.1. Định nghĩa

Quá trình tiết lưu là quá trình giảm áp suất mà không sinh công khi môi chất chuyển động qua chỗ tiết diện bị giảm đột ngột.

Trong thực tế, khi dòng môi chất chuyển động qua van, lá chắn những chỗ có tiết diện thu hẹp đột ngột, trở lực sẽ tăng đột ngột,



Hình 3.13. Quá trình tiết lưu

áp suất của dòng phía sau tiết diện sẽ nhỏ hơn trước tiết diện, sự giảm áp suất này không sinh công mà nhằm khắc phục trở lực ma sát do dòng xoáy sinh ra sau tiết diện.

Thực tế quá trình tiết lưu xảy ra rất nhanh nên nhiệt lượng trao đổi với môi trường rất bé, vì vậy có thể coi quá trình là đoạn nhiệt, không thuận nghịch nên Entropi tăng.

3.3.3.2. Tính chất của quá trình tiết lưu

Khi tiết diện 1-1 cách xa tiết diện 2-2, qua quá trình tiết lưu các thông số của môi chất sẽ thay đổi như sau:

- Áp suất giảm:

$$\Delta p = p_2 - p_1 < 0, \quad (3-49)$$

- Entropi tăng:

$$\Delta s = s_2 - s_1 > 0, \quad (3-50)$$

- Entanpi không đổi:

$$\Delta i = i_2 - i_1 = 0, \quad (3-51)$$

- Tốc độ dòng không đổi:

$$\Delta \omega = \omega_2 - \omega_1 = 0. \quad (3-52)$$

3.3.4. Quá trình nén

3.3.4.1. Các loại máy nén

Quá trình nén là quá trình làm tăng áp suất của môi chất lên. Quá trình nén là quá trình tiêu tốn công và được thực hiện trong máy nén để nén khí hoặc hơi đến áp suất cao.

Theo nguyên lý làm việc, có thể chia máy nén thành hai nhóm:

Nhóm thứ nhất gồm máy nén piston, máy nén bánh răng, máy nén cánh gạt. Máy nén loại này còn được gọi là máy nén tĩnh vì tốc độ của dòng khí không lớn. Máy nén piston đạt được áp suất lớn nhưng năng suất nhỏ.

Nhóm thứ hai gồm máy nén li tâm, máy nén hướng trục và máy nén ejector. Loại này có thể đạt được năng suất lớn nhưng áp suất thấp.

Tuy khác nhau về cấu tạo và đặc tính kỹ thuật, nhưng về quan điểm nhiệt động thì các quá trình tiến hành trong máy nén hoàn toàn như nhau. Sau đây ta nghiên cứu máy nén piston.

3.3.4.2. Máy nén piston một cấp

** Nguyên lý làm việc của máy nén piston một cấp lý tưởng*

Để đơn giản, khi phân tích quá trình nhiệt động trong máy nén, ta giả thiết: