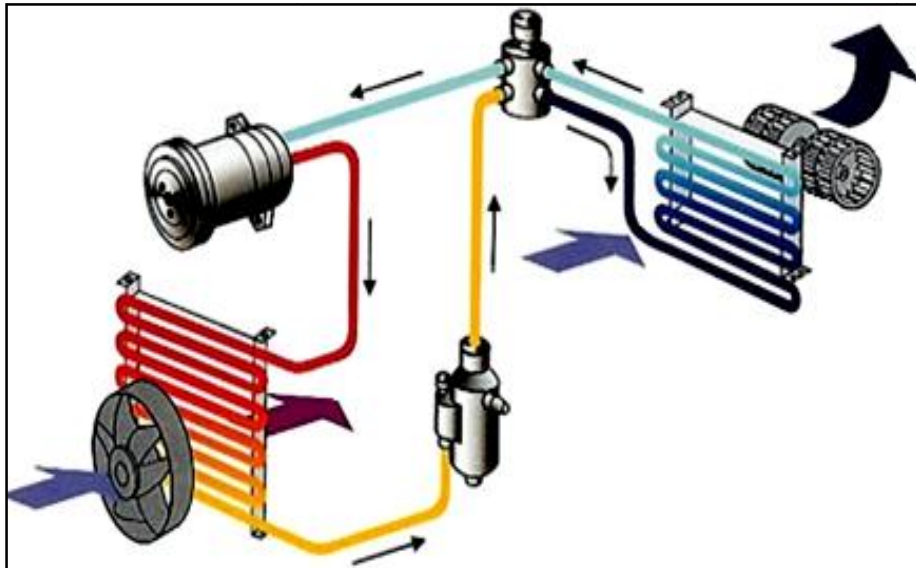


BỘ LAO ĐỘNG THƯỜNG BINH VÀ XÃ HỘI
TỔNG CỤC DẠY NGHỀ

GIÁO TRÌNH
Môn học: Nhiệt kỹ thuật
NGHỀ: CÔNG NGHỆ Ô TÔ
TRÌNH ĐỘ: CAO ĐẲNG
(Ban hành kèm theo Quyết định số:...)



HÀ NỘI 2012

TUYÊN BỐ BẢN QUYỀN:

Tài liệu này thuộc loại sách giáo trình nên các nguồn thông tin có thể được phép dùng nguyên bản hoặc trích dùng cho các mục đích về đào tạo và tham khảo.

Mọi mục đích khác mang tính lệch lạc hoặc sử dụng với mục đích kinh doanh thiếu lành mạnh sẽ bị nghiêm cấm.

MÃ TÀI LIỆU: MH 14.

MỤC LỤC

| | |
|--|-----------|
| CHƯƠNG 1. KHÁI NIỆM VÀ CÁC THÔNG SỐ CƠ BẢN..... | 10 |
| 1.1 CÁC KHÁI NIỆM CƠ BẢN.----- | 10 |
| 1.1.1 Nguồn nhiệt ----- | 10 |
| 1.1.2 Môi chất ----- | 10 |
| 1.1.3 Trạng thái----- | 10 |
| 1.1.4 Thông số trạng thái----- | 10 |
| 1.1.5 Máy nhiệt----- | 10 |
| 1.1.6 Động cơ nhiệt----- | 10 |
| 1.1.7 Máy lạnh----- | 10 |
| 1.1.8 Bơm nhiệt----- | 10 |
| 1.1.9 Quá trình nhiệt động ----- | 11 |
| 1.1.10 Nước sôi----- | 11 |
| 1.1.11 Hơi bão hòa khô----- | 11 |
| 1.1.12 Hơi bão hòa ẩm ----- | 11 |
| 1.1.13 Nước chưa sôi ----- | 11 |
| 1.1.14 Hơi quá nhiệt ----- | 11 |
| 1.1.15 Công ----- | 11 |
| 1.2 CÁC THÔNG SỐ CƠ BẢN.----- | 13 |
| 1.2.1 Thể tích riêng v ----- | 13 |
| 1.2.2 Áp suất p----- | 13 |
| 1.2.3 Nhiệt độ T ----- | 13 |
| 1.2.4 Entropy s----- | 13 |
| 1.3 HỆ NHIỆT ĐỘNG VÀ CÁC THÔNG SỐ TRẠNG THÁI.----- | 14 |
| 1.3.1 Hệ nhiệt động ----- | 14 |
| 1.3.2 Các thông số trạng thái.----- | 14 |
| 1.4 PHƯƠNG TRÌNH NHIỆT ĐỘNG.----- | 15 |
| 1.4.1 Phương trình nhiệt động I: ----- | 15 |
| 1.4.2 Phương trình nhiệt động II: ----- | 16 |
| 1.5 NHẬN DẠNG VÀ PHÂN BIỆT CÁC THÔNG SỐ VÀ TRẠNG THÁI. ----- | 17 |
| 1.5.1 Nhận dạng thông số trạng thái. ----- | 17 |
| 1.5.2 Nhận dạng trạng thái. ----- | 18 |
| CHƯƠNG 2. MÔI CHẤT VÀ SỰ TRUYỀN NHIỆT. | 19 |
| 2.1 KHÁI NIỆM KHÍ LÝ TƯỞNG VÀ KHÍ THỰC..... | 19 |
| 2.1.1 Khái niệm khí lý tưởng | 19 |
| 2.1.2 Khái niệm khí thực..... | 20 |
| 2.2 KHÁI NIỆM, PHÂN LOẠI SỰ TRUYỀN NHIỆT..... | 20 |
| 2.2.1 Khái niệm sự truyền nhiệt..... | 20 |

| | |
|---|-----------|
| 2.2.2 Phân loại sự truyền nhiệt..... | 20 |
| 2.3 KHÁI NIỆM, PHÂN LOẠI SỰ CHUYỂN PHA CỦA CÁC ĐƠN CHẤT. ---- | 22 |
| 2.3.1 Khái niệm sự chuyển pha ----- | 22 |
| 2.3.2 Phân loại sự chuyển pha----- | 22 |
| 2.4 NHẬN DẠNG VÀ PHÂN BIỆT SỰ CHUYỂN PHA, SỰ TRUYỀN NHIỆT CỦA MÔI CHẤT. ----- | 23 |
| 2.4.1 Nhận dạng và phân biệt quá trình chuyển pha. ----- | 23 |
| 2.4.1.1 Quá trình hóa hơi đẳng áp----- | 23 |
| 2.4.1.2 Bảng và đồ thị của hơi----- | 25 |
| 2.4.2 Nhận dạng và phân biệt sự truyền nhiệt. ----- | 27 |
| CHƯƠNG 3. CÁC QUÁ TRÌNH NHIỆT ĐỘNG CỦA MÔI CHẤT..... | 30 |
| 3.1 CƠ SỞ LÝ THUYẾT ĐỂ KHẢO SÁT MỘT QUÁ TRÌNH NHIỆT ĐỘNG. -- | 30 |
| 3.2 NỘI DUNG KHẢO SÁT. ----- | 31 |
| 3.3 CÁC QUÁ TRÌNH CÓ MỘT THÔNG SỐ BẤT BIẾN.----- | 31 |
| 3.3.1 Quá trình đẳng nhiệt.----- | 31 |
| 3.3.2 Quá trình đẳng áp. ----- | 33 |
| 3.3.3 Quá trình đẳng tích. ----- | 34 |
| 3.3.4 Quá trình đoạn nhiệt.----- | 35 |
| 3.3.5 Quá trình đa biến. ----- | 37 |
| 3.4 CÁC QUÁ TRÌNH NHIỆT ĐỘNG CỦA KHÍ THỰC. ----- | 39 |
| 3.4.1 Hơi nước là một khí thực. ----- | 39 |
| 3.4.2 Quá trình hóa hơi và ngưng tụ của nước. ----- | 40 |
| 3.4.3 Các quá trình nhiệt động thực tế.----- | 41 |
| 3.5 QUÁ TRÌNH HỖN HỢP CỦA KHÍ VÀ HƠI (KHÔNG KHÍ ẨM). ----- | 45 |
| 3.5.1 Khái niệm, tính chất và phân loại. ----- | 45 |
| 3.5.2 Các đại lượng đặc trưng. ----- | 47 |
| 3.5.3 Các quá trình của không khí ẩm. ----- | 48 |
| CHƯƠNG 4. CHU TRÌNH NHIỆT ĐỘNG CỦA ĐỘNG CƠ NHIỆT. | 50 |
| 4.1 KHÁI NIỆM VÀ YÊU CẦU. | 50 |
| 4.1.1 Khái niệm | 50 |
| 4.1.2 Yêu cầu. | 51 |
| 4.2 PHÂN LOẠI CHU TRÌNH NHIỆT ĐỘNG..... | 51 |
| 4.2.1 Chu trình động cơ đốt trong. | 51 |
| 4.2.2 Chu trình tua-bin khí..... | 55 |
| 4.2.3 Chu trình động cơ phản lực. | 58 |
| 4.2.4 Chu trình nhà máy nhiệt điện..... | 60 |
| 4.2.5 Chu trình thiết bị làm lạnh (chạy bằng Amoniac, Frêon)..... | 63 |

| | |
|---|-----------|
| 4.2 SƠ ĐỒ CẤU TẠO VÀ NGUYÊN LÝ HOẠT ĐỘNG CỦA ĐỘNG CƠ NHIỆT. | 66 |
| 4.2.1 Sơ đồ cấu tạo của động cơ nhiệt. ----- | 66 |
| 4.2.2 Nguyên lý hoạt động của động cơ nhiệt. ----- | 66 |

| | |
|--|----|
| Hình 2.1 Các phương thức trao đổi nhiệt..... | 21 |
| Hình 2.2 Quá trình hóa hơi đẳng áp..... | 24 |
| Hình 2.3 Đồ thị T - s của hơi nước..... | 26 |
| Hình 2.4 Đồ thị i - s của hơi nước..... | 26 |
| Hình 2.5 Các đại lượng đặc trưng cho bức xạ..... | 29 |
| Hình 3.1 Đồ thị p -v và T - s của quá trình đẳng nhiệt..... | 32 |
| Hình 3.2 Đồ thị p -v và T - s của quá trình đẳng áp..... | 34 |
| Hình 3.3 Đồ thị p -v và T - s của quá trình đẳng tích..... | 35 |
| Hình 3.4 Đồ thị p -v và T - s của quá trình đoạn nhiệt..... | 37 |
| Hình 3.5 Đồ thị p -v và T - s của quá trình đa biến..... | 39 |
| Hình 3.6 Quá trình tiết lưu. | 42 |
| Hình 3.7 Các quá trình trong máy nén khí một cấp lý tưởng..... | 44 |
| Hình 3.8 Đồ thị T-s của hơi nước..... | 46 |
| Hình 3.9 Quá trình sấy. | 48 |
| Hình 4.1 Chu trình cấp nhiệt hỗn hợp trên đồ thị p-V và T-s. | 52 |
| Hình 4.2 Chu trình cấp nhiệt đẳng tích | 53 |
| Hình 4.3 Chu trình cấp nhiệt đẳng áp..... | 54 |
| Hình 4.4 So sánh các chu trình khi có cùng ϵ và q_1 | 55 |
| Hình 4.5 So sánh các chu trình khi có cùng T_{max} và p_{max} | 55 |
| Hình 4.6 Sơ đồ nguyên lý tua-bin khí. | 56 |
| Hình 4.7 Đồ thị p-v và T-s của tua- bin khí cấp nhiệt đẳng áp. | 57 |
| Hình 4.8 Sơ đồ cấu tạo. | 58 |
| Hình 4.9 Đồ thị T-s..... | 58 |
| Hình 4.10 Sơ đồ nguyên lý..... | 59 |
| Hình 4.11 Đồ thị P-v. | 59 |
| Hình 4.12 Đồ thị T-s chu trình Các -nô hơi nước. | 60 |
| Hình 4.13 Sơ đồ nguyên lý..... | 61 |
| Hình 4.14 Đồ thị T-s..... | 61 |
| Hình 4.15 Sơ đồ nguyên lý và đồ thị T-s. | 62 |
| Hình 4.16 Sơ đồ nguyên lý..... | 64 |
| Hình 4.17 Đồ thị T-s của chu trình..... | 64 |
| Hình 4.18 Sơ đồ máy lạnh-bơm nhiệt. | 65 |
| Hình 4.19 Sơ đồ cấu tạo động cơ 4 kỳ. | 66 |
| Hình 4.20 Sơ đồ cấu tạo động cơ 2 kỳ. | 66 |
| Hình 4.21 Nguyên lý làm việc và các chu trình của động cơ đốt trong..... | 68 |

MÔN HỌC: NHIỆT KỸ THUẬT

Vị trí, ý nghĩa, vai trò của môn học:

- Vị trí:

Môn học được bố trí giảng dạy sau các môn học: MH 07, MH 08, MH 09, MH 10, MH 11, MH 12, MH13.

- Ý nghĩa:

Nhiệt kỹ thuật là tên một môn học trong Chương trình đào tạo, trong đó bao gồm các kiến thức về nhiệt động học (hoặc nhiệt động lực học). Sau khi học xong môn học này người học sẽ được cung cấp các kiến thức cơ bản về nhiệt và các động cơ nhiệt (nhiệt động học cổ điển) và về các hệ thống ở trạng thái cân bằng (nhiệt động học cân bằng).

Các nguyên lý nhiệt động học có thể áp dụng cho nhiều hệ vật lý, chỉ cần biết sự trao đổi năng lượng với môi trường mà không phụ thuộc vào chi tiết tương tác trong các hệ ấy. Do đó, người học có khả năng phân tích và giải thích được một số nguyên lý trên động cơ đốt trong và một số hiện tượng xảy ra trong tự nhiên.

- Vai trò:

Là môn học kỹ thuật cơ sở bắt buộc.

Mục tiêu của môn học:

- + Trình bày được các khái niệm, các thông số cơ bản, các quá trình nhiệt động của môi chất.
- + Giải thích được nguyên lý hoạt động và kể tên được các bộ phận, chi tiết trên sơ đồ cấu tạo của động cơ đốt trong.
- + Nhận dạng các chi tiết, bộ phận của động cơ nhiệt trên ô tô.
- + Tuân thủ đúng quy định, quy phạm về nhiệt kỹ thuật.
- + Rèn luyện tác phong làm việc nghiêm túc, cẩn thận.

| Mã bài | Tên chương, mục | Loại bài dạy | Địa điểm | Thời lượng | | | |
|----------------|---|--------------|----------|------------|-----------|----|----|
| | | | | T.số | LT | TH | KT |
| MH14-01 | Chương 1. Khái niệm và các thông số cơ bản. | | | 11 | 11 | | |
| | 1.1 Các khái niệm và thông số cơ bản. | | | 2 | 2 | | |
| | 1.2 Hệ nhiệt động và các thông số trạng thái. | | | 3 | 3 | | |
| | 1.3 Phương trình nhiệt động. | | | 3 | 3 | | |
| | 1.4 Nhận dạng phân biệt các thông số và trạng thái. | | | 3 | 3 | | |

| | | | | | | | |
|----------------|---|--|--|-----------|-----------|--|----------|
| MH14-02 | Chương 2. Môi chất và sự truyền nhiệt. | | | 12 | 11 | | 1 |
| | 2.1 Khái niệm, phân loại khí lý tưởng và khí thực. | | | 3 | 3 | | |
| | 2.2 Khái niệm, phân loại sự truyền nhiệt. | | | 3 | 2 | | 1 |
| | 2.3 Khái niệm về sự chuyển pha của các đơn chất. | | | 3 | 3 | | |
| | 2.4 Nhận dạng và phân biệt sự chuyển pha, sự truyền nhiệt của môi chất. | | | 3 | 3 | | |
| MH14-03 | Chương 3. Các quá trình nhiệt động của môi chất. | | | 12 | 11 | | 2 |
| | 3.1 Các quá trình nhiệt động cơ bản: Quá trình đa biến, đoạn nhiệt, đẳng nhiệt, đẳng áp và đẳng tích. | | | 4 | 4 | | |
| | 3.2 Các quá trình nhiệt động của khí thực. | | | 4 | 3 | | 1 |
| | 3.3 Quá trình hỗn hợp của khí và hơi. | | | 4 | 4 | | |
| MH14-04 | Chương 4. Chu trình nhiệt động của động cơ nhiệt. | | | 10 | 9 | | |
| | 4.1 Khái niệm, yêu cầu và phân loại chu trình nhiệt động. | | | 4 | 4 | | |
| | 4.2 Sơ đồ cấu tạo và nguyên lý hoạt động của động cơ nhiệt. | | | 6 | 5 | | 1 |
| | Cộng | | | 45 | 42 | | 3 |

YÊU CẦU VỀ ĐÁNH GIÁ HOÀN THÀNH MÔN HỌC

1. Phương pháp kiểm tra, đánh giá khi thực hiện:

Được đánh giá qua bài viết, kiểm tra, vấn đáp hoặc trắc nghiệm, tự luận trong quá trình thực hiện các bài học có trong môn học về kiến thức, kỹ năng và thái độ.

Có đầy đủ bài kiểm tra và hồ sơ học tập đạt yêu cầu.

2. Nội dung kiểm tra, đánh giá khi thực hiện:

- Về kiến thức:

+ Trình bày được đầy đủ các khái niệm, các thông số cơ bản, các quá trình nhiệt động của môi chất.

+ Giải thích được nguyên lý hoạt động và kể tên được các bộ phận, chi tiết trên sơ đồ cấu tạo của động cơ đốt trong.

+ Qua các bài kiểm tra viết hoặc trắc nghiệm đạt yêu cầu 60%.

- Về kỹ năng:

+ Nhận dạng các chi tiết, bộ phận của động cơ nhiệt trên ô tô.

- Về thái độ:

+ Chấp hành nghiêm túc các quy định về giờ học, nội qui và làm đầy đủ các bài tập về nhà.

+ Rèn luyện tính chính xác, chủ động và tác phong công nghiệp.

CHƯƠNG 1. KHÁI NIỆM VÀ CÁC THÔNG SỐ CƠ BẢN.

Mã số chương: MH 14 - 01

Mục tiêu:

- Trình bày được các khái niệm và thông số cơ bản của quá trình nhiệt động.
- Giải thích được ý nghĩa của các khái niệm và các thông số cơ bản.
- Tuân thủ đúng quy định, quy phạm về lĩnh vực nhiệt kỹ thuật.

Nội dung chính:

1.1 CÁC KHÁI NIỆM CƠ BẢN.

Trong phạm vi của chương trình môn học Kỹ thuật nhiệt, chúng ta sẽ nghiên cứu một số khái niệm cơ bản sau đây.

1.1.1 Nguồn nhiệt: là những vật trao đổi nhiệt với môi chất; nguồn nhiệt có nhiệt độ cao hơn gọi là nguồn nóng, nguồn nhiệt có nhiệt độ thấp hơn gọi là nguồn lạnh.

1.1.2 Môi chất: là những chất mà thiết bị dùng để truyền tải và chuyển hóa nhiệt năng với các dạng năng lượng khác. Môi chất có thể là vật chất ở bất cứ pha nào, nhưng thường dùng pha hơi (khí) vì nó có khả năng co giãn rất lớn. Môi chất có thể là đơn chất hoặc hỗn hợp.

1.1.3 Trạng thái: là một tập hợp các thông số xác định tính chất vật lý của môi chất hay hệ ở một thời điểm nào đó. Các đại lượng vật lý đó được gọi là thông số trạng thái.

1.1.4 Thông số trạng thái: là một đại lượng vật lý có một giá trị duy nhất ở một trạng thái. Thông số trạng thái là một hàm đơn trị của trạng thái. Nghĩa là độ biến thiên của thông số trạng thái trong quá trình chỉ phụ thuộc vào điểm đầu và điểm cuối quá trình mà không phụ thuộc vào quá trình (đường đi) đạt đến trạng thái đó.

1.1.5 Máy nhiệt: là hệ thống thiết bị thực hiện sự chuyển hoá giữa nhiệt và công nói chung.

1.1.6 Động cơ nhiệt: là các loại máy nhiệt tiêu thụ một nhiệt lượng nào đó để sản sinh cho chúng ta một cơ năng tương ứng.

VD: ô tô, xe máy, nhà máy nhiệt điện v.v.

1.1.7 Máy lạnh: là loại máy nhiệt sử dụng nhiệt lượng lấy được để làm lạnh một vật nào đó.

VD: tủ lạnh, điều hoà nhiệt độ v.v. là loại máy lạnh.

1.1.8 Bơm nhiệt: là loại máy nhiệt sử dụng nhiệt lượng toả ra nguồn nóng để đốt nóng hoặc sấy, sưởi một vật nào đó.

VD: tủ lạnh “hai chiều”: mùa hè làm việc theo chế độ máy lạnh, mùa đông làm việc theo chế độ bơm nhiệt.

1.1.9 Quá trình nhiệt động: là quá trình biến đổi một chuỗi liên tiếp các trạng thái của hệ do có sự trao đổi nhiệt và công với môi trường.

1.1.10 Nước sôi (nước bão hoà): là nước khi bắt đầu quá trình hóa hơi hoặc kết thúc ngưng tụ; cũng là phần nước cùng tồn tại với hơi.

1.1.11 Hơi bão hòa khô: là hơi ở trạng thái bắt đầu ngưng tụ hoặc khi vừa hóa hơi xong, mà cũng là phần hơi khi hai pha hơi và nước (hoặc là hơi và rắn) cùng tồn tại.

1.1.12 Hơi bão hòa ẩm: là hỗn hợp giữa hơi bão hòa khô và nước bão hòa (nước sôi).

1.1.13 Nước chưa sôi: là nước có nhiệt độ nhỏ hơn nhiệt độ bão hòa ở cùng áp suất hoặc là nước có áp suất lớn hơn áp suất bão hòa ở cùng nhiệt độ.

1.1.14 Hơi quá nhiệt: là hơi có nhiệt độ lớn hơn nhiệt độ bão hòa ở cùng áp suất hoặc là hơi có áp suất nhỏ hơn áp suất bão hòa ở cùng nhiệt độ.

1.1.15 Công: là đại lượng đặc trưng cho sự trao đổi năng lượng giữa môi chất với môi trường khi có chuyển động vĩ mô. Khi thực hiện một quá trình, nếu có sự thay đổi áp suất, thay đổi thể tích hoặc dịch chuyển trọng tâm khối môi chất thì một phần năng lượng nhiệt sẽ được chuyển hoá thành cơ năng. Lượng chuyển biến đó chính là công của quá trình.

Ký hiệu là: l nếu tính cho 1 kg, đơn vị đo là J/kg.

L nếu tính cho G kg, đơn vị đo là J.

Qui ước: Nếu $l > 0$ ta nói vật sinh công.

Nếu $l < 0$ ta nói vật nhận công.

Công không thể chứa trong một vật bất kỳ nào, mà nó chỉ xuất hiện khi có quá trình thay đổi trạng thái kèm theo chuyển động của vật.

Về mặt cơ học, công có trị số bằng tích giữa lực tác dụng với độ dời theo hướng của lực. Trong nhiệt kỹ thuật thường gặp các loại công sau: công thay đổi thể tích; công lưu động (công thay đổi vị trí); công kỹ thuật (công thay đổi áp suất) và công ngoài.

Trong nhiệt động kỹ thuật tồn tại các loại công sau: công thay đổi thể tích l (J/kg), công lưu động (thay đổi vị trí) công kỹ thuật l_{kt} (J/kg) và công ngoài l_n (J/kg).

a. Công thay đổi thể tích l (J/kg): là công do thể tích của hệ thay đổi mà có.

Công này có cả trong hệ kín và hệ hở. Khi môi chất giãn nở, $v_2 > v_1$ hệ sinh một công, theo quy ước, đây là công dương. Ngược lại, khi môi chất bị nén, $v_2 < v_1$ thì hệ nhận từ môi trường một công, theo quy ước, công này là công âm. Công thay đổi thể tích là một hàm của quá trình.

Với 1kg môi chất, khi tiến hành một quá trình ở áp suất p , thể tích thay đổi một lượng dv , thì môi chất thực hiện một công thay đổi thể tích là:

$$dl = p \cdot dv \quad (1-1)$$

Khi tiến hành quá trình, thể tích thay đổi từ v_1 đến v_2 thì công thay đổi thể tích được tính là:

$$l = \int_{v_1}^{v_2} p \, dv \quad (1-2)$$

Từ công thức (1-1) ta thấy dl và dv cùng dấu. Khi $dv > 0$ thì $dl > 0$, nghĩa là khi xảy ra quá trình mà thể tích tăng thì công có giá trị dương, ta nói môi chất sinh công (công do môi chất thực hiện).

Khi $dv < 0$ thì $dl < 0$, nghĩa là khi xảy ra quá trình mà thể tích giảm thì công có giá trị âm, ta nói môi chất nhận công (công do môi trường thực hiện). Công thay đổi thể tích không phải là thông số trạng thái, được biểu diễn trên đồ thị p - v .

b. Công kỹ thuật l_{kt} (J/kg): là công của dòng môi chất chuyển động thực hiện khi áp suất thay đổi. Do đó, công kỹ thuật chỉ có trong hệ hở. Môi chất sinh ra công này thông qua một thiết bị như tua- bin hay máy nén nên gọi là công kỹ thuật. Từ định nghĩa có thể thấy, khi dòng môi chất có áp suất giảm, công kỹ thuật sẽ lấy giá trị dương và ngược lại, nếu áp suất tăng công kỹ thuật sẽ âm.

Công kỹ thuật cũng là một hàm của quá trình.

$$dl_{kt} = -v \, dp \quad (1-3)$$

Nếu quá trình được tiến hành từ áp suất p_1 đến áp suất p_2 thì công kỹ thuật được tính là:

$$l_{kt} = -\int_{p_1}^{p_2} v \, dp \quad (1-4)$$

Từ công thức (1-4) ta thấy dl_{kt} và dp ngược dấu nên khi $dp < 0$ thì $dl_{kt} > 0$, nghĩa là áp suất p giảm thì công kỹ thuật dương, ta nói môi chất sinh công và ngược lại.

c. Công ngoài l_n (J/kg) còn gọi là ngoại công: là công trao đổi giữa hệ và môi trường trong quá trình nhiệt động. Đây chính là công hữu ích chúng ta nhận được hoặc công chúng ta tiêu tốn cho hệ. Để có công trao đổi với môi trường hệ phải thay đổi thể tích, hoặc thay đổi năng lượng đẩy, hoặc thay đổi động năng, hoặc thay đổi cả ba dạng năng lượng đó:

$$dl_n = dl - dl_{ld} - d\left(\frac{w^2}{2}\right) - g \, dh \quad (1-5)$$

Vì trong hệ kín, trọng tâm khối khí không dịch chuyển do đó không có lực đẩy, không có ngoại động năng nên công ngoài trong hệ kín bằng chính công thay đổi thể tích. Nói cách khác, chỉ có thể nhận được công trong hệ kín khi cho môi chất giãn nở hay:

$$dl_n = dl = p \, dv \quad (1-6)$$

Đối với hệ hở, môi chất cần tiêu hao công để thay đổi vị trí gọi là công lưu động hay lực đẩy ($dl_n = d(pv)$), khi đó công ngoài bằng:

$$dl_n = dl - d(pv) - d\left(\frac{\omega^2}{2}\right) - gdh \quad (1-7a)$$

hay có thể viết:

$$dl_n = dl - pdv - vdp - d\left(\frac{\omega^2}{2}\right) - gdh = dl_{kt} - d\left(\frac{\omega^2}{2}\right) - gdh \quad (1-7b)$$

Trong thực tế, lượng biến đổi động năng và thế năng ngoài là rất nhỏ so với công kỹ thuật do đó có thể bỏ qua, từ (1-7b) ta có:

$$dl_n = dl_{kt} \quad (1-8)$$

Từ (1-8) ta thấy công kỹ thuật tính gần đúng là công có ích nhận được từ dòng môi chất (hệ hở) thông qua một thiết bị kỹ thuật (tua- bin):

Đối với một quá trình thì:

$$dl_n = dl_{kt} \neq dl \quad (1-8a)$$

Đối với một chu trình, vì $dl_{ld} = 0$ nên:

$$dl_n = dl_{kt} = dl \quad (1-8b)$$

1.2 CÁC THÔNG SỐ CƠ BẢN.

1.2.1 Thể tích riêng v (m^3/kg): thể tích riêng v là thể tích của 1kg môi chất.

Do đó, nếu gọi V (m^3) là thể tích của G (kg) môi chất thì thể tích riêng v được xác định bởi tỷ số:

$$v = \frac{V}{G} \quad (1-9)$$

Đại lượng nghịch đảo của thể tích riêng gọi là khối lượng riêng:

$$\rho = \frac{1}{v} = \frac{G}{V} \quad (1-10)$$

1.2.2 Áp suất p (N/m^2): là áp lực của các phần tử môi chất tác dụng tác dụng lên một đơn vị diện tích thành bình theo phương pháp tuyến.

1.2.3 Nhiệt độ T (K): theo thuyết động học phân tử nhiệt độ là thông số xác định động năng của các phân tử, hay nói đơn giản nhiệt độ là thông số trạng thái xác định mức độ nóng hay lạnh của vật. Nhiệt độ được đo bằng nhiệt độ tuyệt đối hay nhiệt độ Kelvin, kí hiệu là T (K) hoặc nhiệt độ Celcius hay nhiệt độ bách phân, kí hiệu là $t^{\circ}C$.

Quan hệ giữa nhiệt độ Kelvin và nhiệt độ Celcius:

$$t^{\circ}C = T(K) - 273 \quad (1-11)$$

1.2.4 Entropy s (J/kg): entropy là một thông số trạng thái được phát hiện nhờ toán học.

Khi nghiên cứu chu trình nhiệt động Clausius thấy rằng, nếu gọi dq (J/kg) là mật độ dòng nhiệt vô cùng nhỏ tham gia trong quá trình có nhiệt độ tuyệt đối T (K) nào đó thì tích phân vòng của tỷ số dq/T cũng bằng không:

$$\oint \frac{dq}{T} = 0 \quad (1-12)$$

Clausius cho rằng tỷ số dq/T đóng vai trò là một thông số trạng thái. Ông gọi đó là entropy và kí hiệu là s (J/kgK). Như vậy:

$$ds = \frac{dq}{T} \quad (1-13)$$

Chú ý rằng nhiệt lượng q hay vi phân của nó dq là một hàm số của quá trình nhưng tỷ số của nó với nhiệt độ tuyệt đối dq/T lại là vi phân toàn phần của hàm số.

1.3 HỆ NHIỆT ĐỘNG VÀ CÁC THÔNG SỐ TRẠNG THÁI.

1.3.1 Hệ nhiệt động(hệ thống nhiệt): là tập hợp những đối tượng được tách ra để nghiên cứu các hiện tượng về nhiệt, phần còn lại gọi là *môi trường*.

Gồm có 4 loại: hệ kín, hệ hở, hệ đoạn nhiệt và hệ cô lập.

a. Hệ kín và hệ hở:

Hệ nhiệt động kín, gọi tắt là hệ kín có 3 tính chất cơ bản sau đây:

- Trọng tâm của hệ không chuyển động (chuyển động vĩ mô) hay chuyển động với vận tốc không đáng kể để động năng của nó có thể bỏ qua.
- Khối lượng của môi chất trong hệ kín không đổi.
- Môi chất không đi qua ranh giới giữa hệ và môi trường.

Ngược với hệ kín là hệ hở. Hệ hở là hệ mà một hoặc cả ba tính chất trên đây không được thoả mãn. Trong hệ hở, trọng tâm của hệ chuyển động với một vận tốc nào đó nên trong hệ cân bằng của hệ hở luôn luôn có động năng.

Dựa vào định nghĩa trên đây có thể thấy nếu xem tủ lạnh gia đình gồm máy nén, giàn nóng, van tiết lưu và giàn lạnh là một hệ nhiệt động thì tủ lạnh là một hệ kín. Ngược lại, nếu chúng ta tách riêng máy nén ra và xem nó là một hệ nhiệt động thì máy nén là một hệ hở vì môi chất đi vào và đi ra khỏi máy nén, nghĩa là môi chất đi qua ranh giới giữa hệ và môi trường. Tương tự như vậy, nếu xem nhà máy nhiệt điện gồm lò hơi, bộ quá nhiệt, tua bin, bình ngưng và bơm nước là một hệ thì nhà máy nhiệt điện là một hệ kín. Trong khi đó, nếu xem riêng tua- bin hoặc tua- bin và bình ngưng là những hệ nhiệt động thì chúng là những hệ hở.

b. Hệ đoạn nhiệt và hệ cô lập: hệ đoạn nhiệt là hệ không tham gia trao đổi nhiệt lượng với môi trường, có thể có sự trao đổi công. Hệ cô lập là hệ không tham gia trao đổi cả nhiệt và công với môi trường. Tất nhiên trong thực tế không có hệ đoạn nhiệt và hệ cô lập tuyệt đối mà chỉ có các hệ đoạn nhiệt và cô lập gần đúng.

Vì vậy, khái niệm *hệ nhiệt động* mang tính tương đối, phụ thuộc vào quan điểm của người khảo sát.

1.3.2 Các thông số trạng thái.

Ngoài 4 thông số cơ bản (cũng là 4 thông số trạng thái) nêu ở mục 1.1.2, trạng thái của một môi chất còn được xác định bởi các thông số trạng thái sau:

1.3.2.1 Nội năng u (J/kg): nội năng là năng lượng bên trong của hệ. Nội năng gồm nội động năng và nội thế năng. Nội động năng do chuyển động của các nguyên tử, phân tử sinh ra nên nó là một hàm đơn trị của nhiệt độ. còn nội thế năng do lực tương tác giữa các nguyên tử, phân tử quyết định do đó phụ thuộc vào thể tích riêng hay áp suất. Nói chung, nội năng là một hàm của nhiệt độ và thể tích riêng hoặc là một hàm của nhiệt độ và áp suất.

$$u = u_1(T,v) = u_2(T,p) \quad (1-14)$$

1.3.2.2 Năng lượng đẩy d (J/kg): một dòng môi chất (khí hoặc lỏng) chuyển động có thể có các năng lượng sau: động năng, thế năng và năng lượng đẩy giúp dòng môi chất chuyển động. Năng lượng đẩy của một 1 kg môi chất bằng: $d = pv$

Vì p và v là các thông số trạng thái nên năng lượng đẩy cũng là một thông số trạng thái. *Năng lượng đẩy chỉ có trong hệ hở*, còn trong hệ kín trọng tâm của hệ không chuyển động nên năng lượng đẩy $d = 0$.

1.3.2.3 Entanpy i (J/kg): trong tính toán sự chuyển hóa giữa nhiệt và công ta thường gặp tổ hợp $(u + pv)$ hay $(u + d)$. Vì u và pv hoặc u và d đều là các thông số trạng thái nên tổ hợp này cũng là một thông số trạng thái và được gọi là Entanpy i :

$$\text{N như vậy:} \quad i = u + pv = u + d. \quad (1-15)$$

1.3.2.4 Execgy e (J/kg):

Kinh nghiệm cho thấy rằng trong quá trình thuận nghịch, các dạng năng lượng như cơ năng, điện năng v.v. có thể biến đổi hoàn toàn thành công nhưng nhiệt năng thì chỉ có một phần có thể biến thành công. *Phần nhiệt năng tối đa có thể chuyển hoá thành công trong quá trình thuận nghịch gọi là execfy e (J/kg)*. Phần nhiệt năng không thể biến thành công gọi là anergy a (J/kg). Execgy e và anergy a phụ thuộc vào môi trường xung quanh. Như vậy, nếu gọi q là nhiệt lượng thì:

$$q = e + a \quad (1-16)$$

Có thể tính execgy e theo biểu thức:

$$e = (i - i_0) - T_0(s - s_0) \quad (1-17)$$

Trong đó: i , s tương ứng là entanpy và entropy của trạng thái cần xác định execgy; T_0 , i_0 , s_0 tương ứng là nhiệt độ tuyệt đối, entanpy và entropy của môi trường.

1.4 PHƯƠNG TRÌNH NHIỆT ĐỘNG.

1.4.1 Phương trình nhiệt động I:

Định luật nhiệt động I là định luật bảo toàn và biến hoá năng lượng viết cho các quá trình nhiệt động. Theo định luật bảo toàn và biến hoá năng lượng thì năng lượng toàn phần của một vật hay một hệ ở cuối quá trình luôn luôn

bằng tổng đại số năng lượng toàn phần ở đầu quá trình và toàn bộ năng lượng nhận vào hay nhả ra trong quá trình đó.

Trong các quá trình nhiệt động, khi không xảy ra các phản ứng hoá học và phản ứng hạt nhân, nghĩa là năng lượng hoá học và năng lượng hạt nhân không thay đổi, khi đó năng lượng toàn phần của vật chất thay đổi chính là do thay đổi nội năng U , trao đổi nhiệt và công với môi trường.

Xét 1kg môi chất, khi cấp vào một lượng nhiệt dq thì nhiệt độ thay đổi một lượng dT và thể tích riêng thay đổi một lượng dv . Khi nhiệt độ T thay đổi chứng tỏ nội động năng thay đổi; khi thể tích v thay đổi chứng tỏ nội thế năng thay đổi và môi chất thực hiện một công thay đổi thể tích. Như vậy khi cấp vào một lượng nhiệt dq thì nội năng thay đổi một lượng là du và trao đổi một công là dl .

Định luật nhiệt động I: nhiệt lượng cấp vào cho hệ một phần dùng để thay đổi nội năng, một phần dùng để sinh công.

Nghĩa là: giữa nhiệt năng và các dạng năng lượng khác có thể biến hóa lẫn nhau và khi một lượng nhiệt năng xác định bị tiêu hao sẽ được một lượng xác định năng lượng khác tương ứng, còn tổng năng lượng hoặc năng lượng toàn phần của môi chất không thay đổi. Vì vậy, định luật nhiệt động I cho phép ta viết phương trình cân bằng năng lượng cho một quá trình nhiệt động.

Định luật nhiệt động I có thể được viết dưới nhiều dạng khác nhau như sau:

$$\text{Trường hợp tổng quát: } dq = du + dl \quad (1-18)$$

$$\text{Đối với 1 kg môi chất: } \Delta q = \Delta u + l \quad (1-18a)$$

$$\text{Đối với G kg môi chất: } \Delta Q = \Delta U + L \quad (1-18b)$$

Mặt khác theo định nghĩa entanpi, ta có: $i = u + pv$.

Lấy đạo hàm ta được: $di = du + d(pv)$ hay $du = di - pdv - vdp$; thay vào (1-18) và $dl = pdv$ (1-1) ta có dạng khác của biểu thức định luật nhiệt động I như sau:

$$dq = di - pdv - vdp + pdv \Rightarrow dq = di - vdp \quad (1-19)$$

$$\text{Hay: } dq = di + dl_{kt} \quad (1-20)$$

Đối với khí lý tưởng ta luôn có: $du = C_v dT$; $di = C_p dT$

thay giá trị của du và di vào (1-18) và (1-19) ta có dạng khác của biểu thức định luật nhiệt động I :

$$dq = C_v dT + pdv \quad (1-21)$$

$$dq = C_p dT - vdp \quad (1-22)$$

$$\text{đối với hệ hở: } dl_{kt} = dl_n + d\left(\frac{mv^2}{2}\right) + gdh \quad (1-23)$$

1.4.2 Phương trình nhiệt động II:

Định luật nhiệt động I chính là định luật bảo toàn và biến hoá năng lượng viết cho các quá trình nhiệt động, nó cho phép tính toán cân bằng năng

lượng trong các quá trình nhiệt động, xác định lượng nhiệt có thể chuyển hoá thành công hoặc công chuyển hoá thành nhiệt. Tuy nhiên nó không cho ta biết trong điều kiện nào thì nhiệt có thể biến đổi thành công và liệu toàn bộ nhiệt có thể biến đổi hoàn toàn thành công không.

Định luật nhiệt động II cho phép ta xác định trong điều kiện nào thì quá trình sẽ xảy ra, chiều hướng xảy ra và mức độ chuyển hoá năng lượng của quá trình. Định luật nhiệt động II là tiền đề để xây dựng lý thuyết động cơ nhiệt và thiết bị nhiệt.

Theo định luật nhiệt động II thì mọi quá trình tự phát trong tự nhiên đều xảy ra theo một hướng nhất định. Ví dụ nhiệt năng chỉ có thể truyền từ vật có nhiệt độ cao đến vật có nhiệt độ thấp hơn. Nếu muốn quá trình xảy ra ngược lại thì phải tiêu tốn năng lượng, ví dụ muốn tăng áp suất thì phải tiêu tốn công nén hoặc phải cấp nhiệt vào; muốn lấy nhiệt từ vật có nhiệt độ thấp hơn thả ra môi trường xung quanh có nhiệt độ cao hơn (như ở máy lạnh) thì phải tiêu tốn một năng lượng nhất định (tiêu tốn một điện năng chạy động cơ, kéo máy nén).

Định luật nhiệt động II: có hai cách phát biểu.

Cách thứ nhất do Thomson-Planck phát biểu: không thể có động cơ nhiệt có khả năng biến toàn bộ nhiệt lượng cấp cho nó thành công mà không mất một phần nhiệt lượng truyền cho các vật khác.

Biểu thức: $q_1 - |q_2| = l$ (1-24)

Trong đó: q_1 - lượng nhiệt nguồn nóng.

q_2 - lượng nhiệt nguồn lạnh.

l - công sinh ra.

Cách thứ hai do Các - nôt-clausius phát biểu: nhiệt lượng tự nó chỉ có thể truyền từ nơi có nhiệt độ cao tới nơi có nhiệt độ thấp. Muốn truyền ngược lại phải tiêu tốn thêm một năng lượng.

Biểu thức: $|q_1| = q_2 - |l|$ (1-25)

1.5 NHẬN DẠNG VÀ PHÂN BIỆT CÁC THÔNG SỐ VÀ TRẠNG THÁI.

1.5.1 Nhận dạng thông số trạng thái.

- Thông số trạng thái có vi phân toàn phần.
- Thông số trạng thái là hàm đơn trị của trạng thái, lượng biến thiên thông số trạng thái chỉ phụ thuộc vào điểm đầu và điểm cuối của quá trình mà không phụ thuộc vào đường đi của quá trình.

Nhiệt lượng và công trao đổi trong một quá trình chỉ phụ thuộc vào đường đi của quá trình nên không phải là thông số trạng thái, chúng là hàm của quá trình.

Trong nhiệt động, thường dùng 3 thông số trạng thái có thể đo được trực tiếp là nhiệt độ T , áp suất p và thể tích riêng v (hoặc khối lượng riêng ρ), còn gọi là các thông số trạng thái cơ bản. Ngoài ra, trong tính toán người ta còn dùng các thông số trạng thái khác như: nội năng U , entanpi E và entropi S , các thông số này không đo được trực tiếp mà được tính toán qua các thông số trạng thái cơ bản.

1.5.2 Nhận dạng trạng thái.

Trạng thái là một tập hợp các thông số xác định tính chất vật lý của môi chất hay của hệ ở một thời điểm nào đó. Các đại lượng vật lý đó được gọi là thông số trạng thái.

Trạng thái cân bằng của hệ đơn chất, một pha được xác định khi biết hai thông số trạng thái độc lập. Trên đồ thị trạng thái, trạng thái được biểu diễn bằng một điểm.

Khi thông số trạng thái tại mọi điểm trong toàn bộ thể tích của hệ có trị số đồng nhất và không thay đổi theo thời gian, ta nói hệ ở trạng thái cân bằng. Ngược lại khi không có sự đồng nhất này nghĩa là hệ ở trạng thái không cân bằng. Chỉ có trạng thái cân bằng mới biểu diễn được trên đồ thị bằng một điểm nào đó, còn trạng thái không cân bằng thì thông số trạng thái tại các điểm khác nhau sẽ khác nhau, do đó không biểu diễn được trên đồ thị. Trong giáo trình này ta chỉ nghiên cứu các trạng thái cân bằng.

Khi hệ *cân bằng ở một trạng thái* nào đó thì các *thông số trạng thái* sẽ có *giá trị xác định*. Khi môi chất hoặc hệ trao đổi nhiệt hoặc công với môi trường thì sẽ xảy ra sự *thay đổi trạng thái* và sẽ có *ít nhất một thông số trạng thái thay đổi*.

CHƯƠNG 2. MÔI CHẤT VÀ SỰ TRUYỀN NHIỆT.

Mã số chương: MH 14 - 02

Mục tiêu:

- Trình bày được khái niệm khí lý tưởng và khí thực.
- Giải thích được sự khác nhau giữa khí lý tưởng và khí thực.
- Tuân thủ đúng quy định, quy phạm về lĩnh vực nhiệt kỹ thuật.

Nội dung chính:

2.1 KHÁI NIỆM KHÍ LÝ TƯỞNG VÀ KHÍ THỰC.

2.1.1 Khái niệm khí lý tưởng: Khí lý tưởng là khí mà kích thước của các phân tử tạo thành khí đó vô cùng bé (có thể bỏ qua) và lực tương tác giữa các phân tử không đáng kể (coi như bằng 0). Trong thực tế không có khí lý tưởng.

Trong kỹ thuật, ở điều kiện nhiệt độ và áp suất bình thường có thể coi các chất như Hyđrô, Ôxy, Nitơ, không khí, v.v. là khí lý tưởng.

Tóm lại, khí lý tưởng là khí không có thể tích bản thân phân tử, không có lực tương tác giữa các phân tử và không có biến pha.

Hỗn hợp khí lý tưởng là hỗn hợp cơ học của hai hoặc nhiều chất khí lý tưởng khi không xảy ra phản ứng hóa học giữa các chất khí thành phần. Ví dụ: không khí có thể được xem như là hỗn hợp khí lý tưởng với các chất khí thành phần gồm nitơ (N_2), oxy (O_2), dioxyt carbon (CO_2), v.v. Hỗn hợp khí được sử dụng có thể có tỷ lệ các chất khí thành phần rất khác nhau nên việc xây dựng các bảng hoặc đồ thị cho chúng là không thực tế. Bởi vậy, người ta nghiên cứu phương pháp xác định các thông số nhiệt động và tính toán với hỗn hợp khí lý tưởng.

Khí được gọi là khí lý tưởng thì các hạt tạo thành khí đó phải tuân theo lý thuyết trong vật lý cổ điển và vật lý lượng tử, vì vậy có ba loại khí lý tưởng:

a. Khí lý tưởng cổ điển: tuân thủ thống kê Maxwell-Boltzmann.

Khí lý tưởng cổ điển có thể lại được chia làm hai loại: loại thứ nhất thuần túy cổ điển và entropy của chúng có thể cộng với một hằng số vô định; loại thứ hai là giới hạn ở nhiệt độ cao của hai loại khí lý tưởng lượng tử, và hằng số cộng thêm vào entropy được xác định.

b. Khí lý tưởng lượng tử: tuân thủ thống kê Bose (đặt tên theo nhà vật lý người Ấn Độ Satyendra Nath Bose).

Các hạt boson có spin nguyên, chúng có thể nằm cùng một trạng thái lượng tử và không tuân theo nguyên lý Wolfgang Pauly.

c. Khí lý tưởng lượng tử: tuân thủ thống kê Fermi.

Fermion là những hạt có spin bán nguyên và tuân thủ theo nguyên lý loại trừ của Wolfgang Pauly, nguyên lý cho rằng không có hai fermion nào có cùng trạng thái lượng tử với nhau.

Khái quát hóa, fermion là những hạt vật chất còn boson là những hạt truyền tương tác.

Trong đó, *Spin* là một đại lượng vật lý, có bản chất của mô men động lượng và là một khái niệm thuần túy lượng tử, không có sự tương ứng trong cơ học cổ điển. Trong cơ học cổ điển, mô men xung lượng được biểu diễn bằng công thức $L = r \times p$, còn mô men spin trong cơ học lượng tử vẫn tồn tại ở một hạt có khối lượng bằng 0, vì spin là bản chất nội tại của hạt đó.

Các hạt cơ bản như electron, quark đều có spin bằng $\frac{\hbar}{2}$ (gọi tắt là 1/2), ngay cả khi nó được coi là chất điểm và không có cấu trúc nội tại.

Khái niệm spin được Ralph Kronig đồng thời và độc lập với ông, là George Unlenbeck, Samuel Goudsmit đưa ra lần đầu vào năm 1925.

2.1.2 Khái niệm khí thực: khí thực là khí mà thể tích bản thân các phân tử khác không và tồn tại lực tương tác giữa các phân tử.

Các loại khí trong tự nhiên là khí thực, chúng được tạo nên từ các phân tử, mỗi phân tử chất khí đều có kích thước và khối lượng nhất định, các phân tử trong chất khí tương tác với nhau.

2.2 KHÁI NIỆM, PHÂN LOẠI SỰ TRUYỀN NHIỆT.

2.2.1 Khái niệm sự truyền nhiệt.

Truyền nhiệt là quá trình trao đổi nhiệt giữa các vật hoặc các phân tử của vật có nhiệt độ khác nhau.

2.2.2 Phân loại sự truyền nhiệt: có ba hình thức truyền nhiệt riêng rẽ là: dẫn nhiệt, đối lưu và bức xạ; được phân biệt theo phương thức truyền động năng giữa các phân tử thuộc hai vật.

a. Dẫn nhiệt:

Dẫn nhiệt là quá trình truyền nhiệt năng khi các vật hoặc các phân tử của vật có nhiệt độ khác nhau *tiếp xúc trực tiếp* với nhau.

Dẫn nhiệt xảy ra khi có sự chênh lệch nhiệt độ giữa các phần của một vật hoặc giữa hai vật tiếp xúc nhau. Dẫn nhiệt thuần túy xảy ra trong hệ gồm các vật rắn có sự tiếp xúc trực tiếp.

b. Trao đổi nhiệt đối lưu (tỏa nhiệt):

Trao đổi nhiệt đối lưu là quá trình trao đổi nhiệt xảy ra khi có sự dịch chuyển khối chất lỏng hoặc chất khí trong không gian từ vùng có nhiệt độ này đến vùng có nhiệt độ khác.

Tỏa nhiệt là hiện tượng các phân tử trên bề mặt vật rắn và chạm vào các phân tử chuyển động có hướng của một chất lỏng tiếp xúc với nó để trao đổi động năng. Tỏa nhiệt xảy ra tại vùng chất lỏng hoặc khí tiếp xúc với mặt vật rắn, là sự kết hợp giữa dẫn nhiệt và đối lưu trong lớp chất lỏng gần bề mặt tiếp xúc.

Tùy theo nguyên nhân gây chuyển động chất lỏng, tỏa nhiệt được phân ra 2 loại:

- Tỏa nhiệt tự nhiên là hiện tượng dẫn nhiệt vào chất lỏng chuyển động tự nhiên, luôn xảy ra trong trường trọng lực khi nhiệt độ chất lỏng khác nhiệt độ bề mặt.
- Tỏa nhiệt cưỡng bức là hiện tượng dẫn nhiệt vào chất lỏng chuyển động cưỡng bức do tác dụng của bơm, quạt hoặc máy nén.

Cường độ tỏa nhiệt, tỷ lệ thuận với hệ số tỏa nhiệt α [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$], và được tính theo công thức Newton:

$$q = \alpha(t_w - t_f) = \alpha\Delta t \quad (2-1)$$

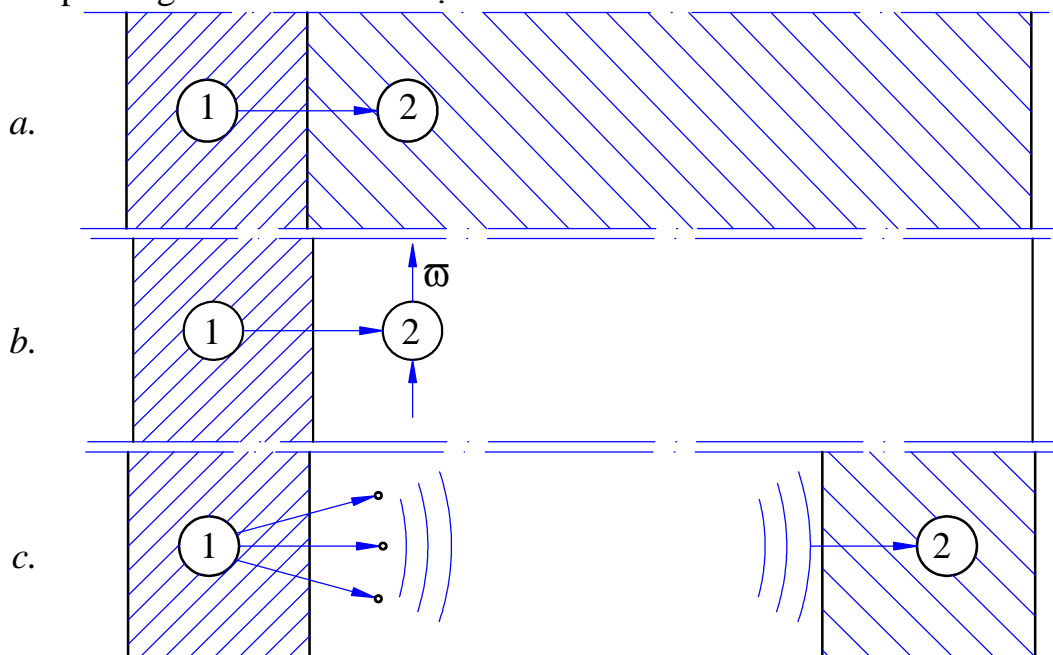
Trong đó Δt là hiệu số nhiệt độ bề mặt và chất lỏng.

c. Trao đổi nhiệt bằng bức xạ:

Trao đổi nhiệt bức xạ là một dạng trao đổi nhiệt cơ bản không cần có sự tiếp xúc (khác với đối lưu và dẫn nhiệt) giữa các vật tham gia trao đổi.

Trao đổi nhiệt bức xạ là hiện tượng các phân tử vật 1 bức xạ ra các hạt, truyền đi trong không gian dưới dạng sóng điện từ, mang năng lượng đến truyền cho các phân tử vật 2.

Khác với hai phương thức trên, trao đổi nhiệt bức xạ có thể xảy ra giữa hai vật ở cách nhau rất xa, không cần sự tiếp xúc trực tiếp hoặc thông qua môi trường chất lỏng và khí, và luôn xảy ra với sự chuyển hóa giữa năng lượng nhiệt và năng lượng điện từ. Đây là phương thức trao đổi nhiệt giữa các thiên thể trong vũ trụ, chẳng hạn giữa mặt trời và các hành tinh. Trên hình 2.1 minh họa các phương thức trao đổi nhiệt.



Hình 2.1 Các phương thức trao đổi nhiệt.

a. Dẫn nhiệt; b. Tỏa nhiệt; c. Trao đổi nhiệt bức xạ.

Quá trình trao đổi nhiệt thực tế có thể bao gồm 2 hoặc cả 3 phương thức nói trên, được gọi là quá trình trao đổi nhiệt phức hợp. Ví dụ, bề mặt vật rắn có thể trao đổi nhiệt với chất khí tiếp xúc nó theo phương thức tỏa nhiệt và trao đổi nhiệt bức xạ.

Mọi vật ở mọi nhiệt độ luôn phát ra các lượng tử năng lượng và truyền đi trong không gian dưới dạng sóng điện từ, có bước sóng λ từ 0 đến vô cùng. Theo độ dài bức sóng λ từ nhỏ đến lớn, sóng điện từ được chia ra các khoảng $\Delta\lambda$ ứng với các tia vũ trụ, tia gama γ , tia Roentgen hay tia X, tia tử ngoại, tia ánh sáng, tia hồng ngoại và các tia sóng vô tuyến. Thực nghiệm cho thấy, chỉ các tia ánh sáng và hồng ngoại mới mang năng lượng E_λ đủ lớn để vật có thể hấp thụ và biến thành nội năng một cách đáng kể, được gọi là tia nhiệt, có bước sóng $\lambda \in (0,4 \div 400) 10^{-6} \text{m}$.

Môi trường thuận lợi cho trao đổi nhiệt bức xạ giữa 2 vật là chân không hoặc khí loãng, ít hấp thụ bức xạ. Khác với dẫn nhiệt và trao đổi nhiệt đối lưu, trao đổi nhiệt bức xạ có các đặc điểm riêng là:

- Luôn có sự chuyển hóa năng lượng: từ nội năng thành năng lượng điện từ khi bức xạ và ngược lại khi hấp thụ. Không cần sự tiếp xúc trực tiếp hoặc gián tiếp qua môi trường chất trung gian, chỉ cần môi trường truyền sóng điện từ, tốt nhất là chân không.
- Có thể thực hiện trên khoảng cách lớn, cỡ khoảng cách giữa các thiên thể trong khoảng không vũ trụ.

2.3 KHÁI NIỆM, PHÂN LOẠI SỰ CHUYỂN PHA CỦA CÁC ĐƠN CHẤT.

2.3.1 Khái niệm sự chuyển pha: đó là sự chuyển trạng thái của một chất nào đó từ nhiệt độ t_1 , áp suất p_1 sang nhiệt độ t_2 , áp suất p_2 thì bắt đầu chuyển từ pha rắn sang pha hơi hay ngược lại; hoặc từ pha rắn sang pha lỏng và ngược lại; hoặc từ pha lỏng sang pha hơi và ngược lại.

2.3.2 Phân loại sự chuyển pha:

Môi chất công tác (MCCT) là chất có vai trò trung gian trong các quá trình biến đổi năng lượng trong các thiết bị nhiệt. Dạng đồng nhất về vật lý của MCCT được gọi là pha. Ví dụ, nước có thể tồn tại ở pha lỏng, pha rắn và pha hơi (khí). Thiết bị nhiệt thông dụng thường sử dụng MCCT ở pha khí vì chất khí có khả năng thay đổi thể tích rất lớn nên cũng có khả năng thực hiện công lớn.

a. Sự hóa hơi và ngưng tụ: Hóa hơi là quá trình chuyển từ pha lỏng sang pha hơi. Ngược lại, quá trình chuyển từ pha hơi sang pha lỏng gọi là ngưng tụ. Để hóa hơi, phải cấp nhiệt cho MCCT. Ngược lại, khi ngưng tụ MCCT sẽ nhả nhiệt. Nhiệt lượng cấp cho 1 kg MCCT lỏng hóa hơi hoàn toàn gọi là nhiệt hóa hơi (r_{hh}), nhiệt lượng tỏa ra khi 1 kg MCCT ngưng tụ gọi là nhiệt ngưng

tự (r_{nt}). Nhiệt hóa hơi và nhiệt ngưng tụ có trị số bằng nhau. Ở áp suất khí quyển, nhiệt hóa hơi của nước là 2258 kJ/kg.

b. Sự nóng chảy và đông đặc: Nóng chảy là quá trình chuyển từ pha rắn sang pha lỏng, quá trình ngược lại được gọi là đông đặc. Cần cung cấp nhiệt để làm nóng chảy MCCT. Ngược lại, khi đông đặc MCCT sẽ nhả nhiệt. Nhiệt lượng cần cung cấp để 1kg MCCT nóng chảy gọi là nhiệt nóng chảy (r_{nc}), nhiệt lượng tỏa ra khi 1 kg MCCT đông đặc gọi là nhiệt đông đặc (r_{dd}). Nhiệt nóng chảy và nhiệt đông đặc có trị số bằng nhau. Ở áp suất khí quyển, nhiệt nóng chảy của nước bằng 333 kJ/kg.

c. Sự thăng hoa và ngưng kết: thăng hoa là quá trình chuyển trực tiếp từ pha rắn sang pha hơi. Ngược lại với quá trình thăng hoa là ngưng kết. MCCT nhận nhiệt khi thăng hoa và nhả nhiệt khi ngưng kết. Nhiệt thăng hoa (r_{th}) và nhiệt ngưng kết (r_{nk}) có trị số bằng nhau. Ở áp suất $p = 0,006$ bar, nhiệt thăng hoa của nước bằng 2818 kJ/kg.

2.4 NHẬN DẠNG VÀ PHÂN BIỆT SỰ CHUYỂN PHA, SỰ TRUYỀN NHIỆT CỦA MÔI CHẤT.

2.4.1 Nhận dạng và phân biệt quá trình chuyển pha.

2.4.1.1 Quá trình hóa hơi đẳng áp.

Hơi của các chất lỏng được sử dụng nhiều trong kỹ thuật. Ví dụ hơi nước được sử dụng chạy turbine hơi nước trong các nhà máy nhiệt điện, để sấy nóng; hơi Amoniac, Freon được sử dụng trong các thiết bị lạnh, v.v.

- Hóa hơi là quá trình chuyển pha từ lỏng sang hơi. Hóa hơi có thể được thực hiện bằng cách bay hơi hoặc sôi.

- Bay hơi là quá trình hóa hơi chỉ diễn ra trên bề mặt thoáng của chất lỏng. Cường độ bay hơi phụ thuộc vào bản chất của chất lỏng, áp suất và nhiệt độ.

- Sôi là quá trình hóa hơi diễn ra trong toàn bộ thể tích chất lỏng. Sự sôi chỉ diễn ra ở một nhiệt độ xác định gọi là nhiệt độ sôi hay nhiệt độ bão hòa (t_s). Nhiệt độ sôi phụ thuộc vào bản chất của chất lỏng và áp suất. Ở áp suất khí quyển, nhiệt độ sôi của nước bằng 100°C.

Trong kỹ thuật, quá trình hóa hơi thường được tiến hành ở áp suất không đổi, đặc điểm quá trình hóa hơi của các chất lỏng là giống nhau.

Quá trình hóa hơi đẳng áp của nước và những đặc điểm của quá trình được trình bày dưới đây cũng sẽ được áp dụng cho các chất lỏng khác.

Giả sử có 1 kg nước trong xylanh, trên bề mặt nước có một pít tông có khối lượng không đổi. Như vậy, áp suất tác dụng lên nước sẽ không đổi trong quá trình hóa hơi. Giả sử nhiệt độ ban đầu của nước là t_0 , nếu ta cấp nhiệt cho nước, quá trình hóa hơi đẳng áp sẽ diễn ra. Hình 2.2 thể hiện quá trình hóa hơi đẳng áp, trong đó nhiệt độ phụ thuộc vào lượng nhiệt cấp: $t = f(q)$. Đoạn OA

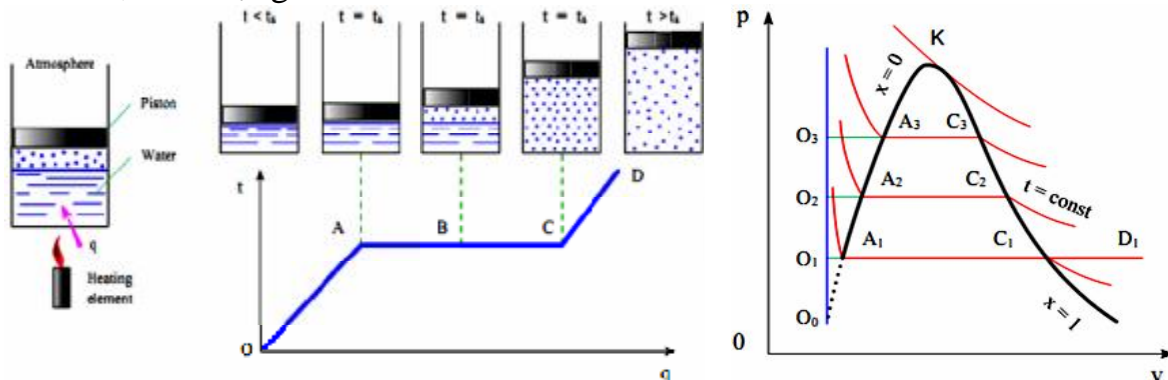
biểu diễn quá trình đốt nóng nước từ nhiệt độ ban đầu t_0 đến nhiệt độ sôi t_s . Nước ở nhiệt độ $t < t_s$ gọi là nước chưa sôi.

Khi chưa sôi, nhiệt độ của nước sẽ tăng khi tăng lượng nhiệt cấp vào. Đoạn AC thể hiện quá trình sôi. Trong quá trình sôi, nhiệt độ của nước không đổi ($t_s = \text{const}$), nhiệt được cấp vào được sử dụng để biến đổi pha mà không làm tăng nhiệt độ của chất lỏng. Thông số trạng thái của nước ở điểm A được ký hiệu là: $i', s', u', v', v.v.$ Hơi ở điểm C gọi là hơi bão hòa khô, các thông số trạng thái của nó được ký hiệu là: $i'', s'', u'', v'', v.v.$ Hơi ở trạng thái giữa A và C được gọi là hơi bão hòa ẩm, các thông số trạng thái của nó được ký hiệu là $i_x, s_x, u_x, v_x, v.v.$ Sau khi toàn bộ lượng nước được hóa hơi, nếu tiếp tục cấp nhiệt thì nhiệt độ của hơi sẽ tăng (đoạn CD). Hơi có nhiệt độ $t > t_s$ gọi là hơi quá nhiệt. Hơi bão hòa ẩm là hỗn hợp của nước sôi và hơi bão hòa khô. Hàm lượng hơi bão hòa khô trong hơi bão hòa ẩm được đánh giá bằng đại lượng độ khô (x) hoặc độ ẩm (y):

$$y = \frac{m_h}{m_n} \quad (2-2)$$

$$y = 1 - x \quad (2-3)$$

trong đó: x - độ khô; y - độ ẩm; m_x - lượng hơi bão hòa ẩm; m_h - lượng hơi bão hòa khô; m_n - lượng nước sôi.



Hình 2.2 Quá trình hóa hơi đẳng áp.

Tương tự, nếu tiến hành quá trình hóa hơi đẳng áp ở những áp suất khác nhau ($p_1, p_2, p_3, v.v.$) và cùng biểu diễn trên đồ thị trạng thái $p - v$, sẽ được các đường, các điểm và vùng đặc trưng biểu diễn trạng thái của nước như sau:

- Đường trạng thái của nước chưa sôi: đường nối các điểm O, O₁, O₂, O₃ v.v. gần như là thẳng đứng vì thể tích của nước thay đổi rất ít khi tăng hoặc giảm áp suất.
- Đường giới hạn dưới: đường nối các điểm A, A₁, A₂, A₃, v.v. biểu diễn trạng thái nước sôi độ khô $x = 0$.
- Đường giới hạn trên: đường nối các điểm C, C₁, C₂, C₃, v.v. biểu diễn trạng thái hơi bão hòa khô có độ khô $x = 1$.

- Điểm tới hạn K: điểm gặp nhau của đường giới hạn dưới và giới hạn trên.

Trạng thái tại K gọi là trạng thái tới hạn, ở đó không còn sự khác nhau giữa chất lỏng sôi và hơi bão hòa khô. Các thông số trạng thái tại K gọi là các thông số trạng thái tới hạn. Nước có các thông số trạng thái tới hạn: $p_K = 221\text{bar}$, $t_K = 374\text{ }^\circ\text{C}$, $v_K = 0,00326\text{ m}^3/\text{kg}$.

- Vùng chất lỏng chưa sôi ($x = 0$): vùng bên trái đường giới hạn dưới .

- Vùng hơi bão hòa ẩm ($0 < x < 1$): vùng giữa đường giới hạn dưới và trên.

- Vùng hơi quá nhiệt ($x = 1$): vùng bên phải đường giới hạn trên.

2.4.1.2 Bảng và đồ thị của hơi.

Hơi của các chất lỏng thường phải được xem như là khí thực, nếu sử dụng phương trình trạng thái của khí lý tưởng cho hơi thì sai số sẽ khá lớn. Trong tính toán kỹ thuật cho hơi người ta thường dùng các bảng số hoặc đồ thị đã được xây dựng sẵn cho từng loại hơi.

a. Bảng hơi nước.

Trạng thái của MCCT được xác định khi biết hai thông số trạng thái độc lập. Đối với nước sôi ($x = 0$) và hơi bão hòa khô ($x = 1$) chỉ cần biết áp suất (p) hoặc nhiệt độ (t) sẽ xác định được trạng thái vì đã biết trước độ khô. Đối với nước chưa sôi và hơi quá nhiệt người ta thường chọn áp suất (p) và nhiệt độ (t) là hai thông số độc lập để xây dựng bảng trạng thái.

Đối với hơi bão hòa ẩm, người ta không lập bảng trạng thái mà xác định trạng thái của nó trên cơ sở độ khô và các thông số trạng thái của nước sôi và hơi bão hòa khô như sau:

$$v_x = v' + x (v'' - v') \quad (2-4)$$

$$i_x = i' + x (i'' - i') \quad (2-5)$$

$$s_x = s' + x (s'' - s') \quad (2-6)$$

$$u_x = u' + x (u'' - u') \quad (2-7)$$

Nội năng không có trong các bảng và đồ thị. Nội năng được xác định theo enthalpy bằng công thức sau:

$$u = i - pv \quad (2-8)$$

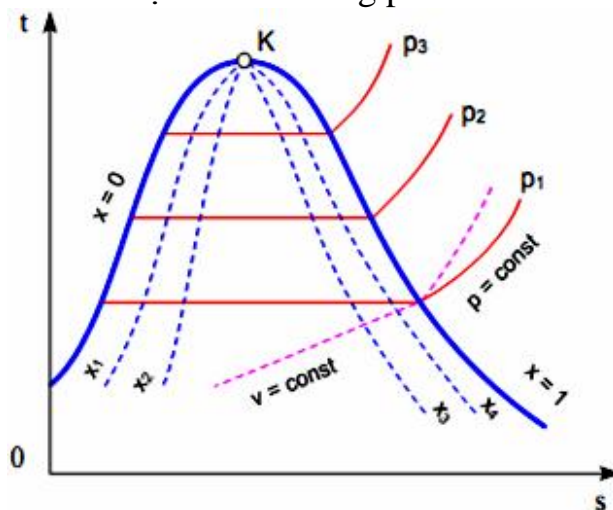
b. Đồ thị hơi nước

Bên cạnh việc dùng bảng, người ta có thể sử dụng các đồ thị trạng thái để tính toán cho hơi.

- Đồ thị T - s của hơi nước.

Trên đồ thị T-s (Hình 2.3), các đường đẳng áp $p = \text{const}$ trong vùng nước chưa sôi hầu như trùng với đường giới hạn dưới ($x = 0$), trong vùng hơi bão hòa ẩm là các đoạn thẳng nằm ngang và trùng với đường đẳng nhiệt ($T = \text{const}$), trong vùng hơi quá nhiệt là các đường cong đi lên. Chiều tăng của áp

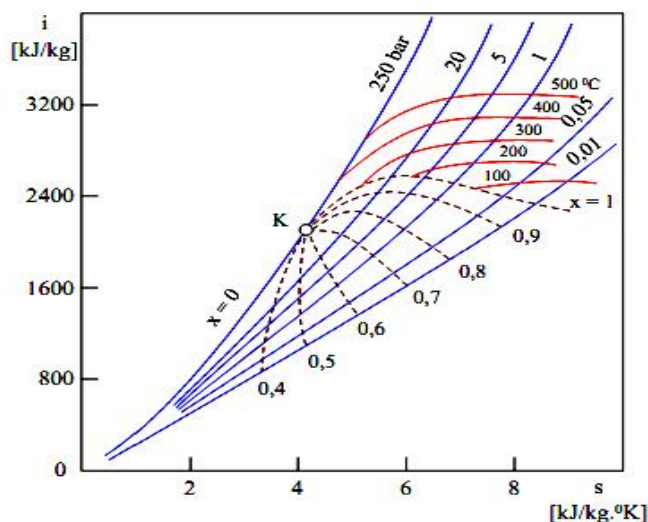
suất cùng với chiều tăng của nhiệt độ. Các đường có độ khô không đổi ($x = \text{const}$) xuất phát từ điểm tới hạn K tỏa xuống phía dưới.



Hình 2.3 Đồ thị T - s của hơi nước.

- Đồ thị $i - s$ của hơi nước.

Đồ thị $i - s$ của hơi nước (Hình 2.4) do Mollier xây dựng lần đầu tiên vào năm 1904 trên cơ sở các số liệu thực nghiệm. Đồ thị $i - s$ rất thuận tiện cho việc tính toán đối với hơi nước, vì trong quá trình đẳng áp thì ta có: $dq = di - v \cdot dp$ hay $q = i_2 - i_1$. Như vậy, nhiệt trong quá trình đẳng áp bằng hiệu của enthalpy.



Hình 2.4 Đồ thị $i - s$ của hơi nước.

Trên đồ thị $i - s$, đường đẳng áp ($p = \text{const}$) trong vùng hơi bão hòa ẩm trùng với đường đẳng nhiệt tương ứng và là các đường thẳng xuyên, trong vùng hơi quá nhiệt là các đường cong đi lên có bề lõm quay về phía dưới.

Đường đẳng nhiệt ($T = \text{const}$) trong vùng hơi bão hòa ẩm trùng với đường đẳng áp tương ứng, trong vùng hơi quá nhiệt là các đường cong đi lên. Càng xa đường $x = 1$, đường đẳng nhiệt càng gần như song song với trục hoành. Đường đẳng tích ($v = \text{const}$) đều là các đường cong đi lên dốc hơn

đường đẳng áp, chúng thường được vẽ bằng đường nét đứt hoặc màu đỏ. Trong thực tế kỹ thuật, các quá trình nhiệt động thường chỉ diễn ra trong vùng hơi quá nhiệt và một phần vùng hơi bão hòa ẩm có độ khô cao. Vì vậy, để đơn giản người ta thường chỉ vẽ một phần của nó.

2.4.2 Nhận dạng và phân biệt sự truyền nhiệt.

2.4.2.1 Dẫn nhiệt.

a. Định luật fourier và hệ số dẫn nhiệt.

Dựa vào thuyết động học phân tử, Fourier đã chứng minh định luật cơ bản của dẫn nhiệt như sau:

Vec tơ dòng nhiệt tỷ lệ thuận với vectơ gradient nhiệt độ.

Biểu thức của định luật có dạng vectơ là:

$$\vec{q} = -\lambda \text{grad}t \quad (2-9)$$

dạng vô hướng là:

$$q = -\lambda \text{grad}t = -\lambda \frac{dt}{dn} \quad (2-10)$$

Theo định luật này, nhiệt lượng Q được dẫn qua diện tích F của mặt đẳng nhiệt trong 1 giây được tính theo công thức:

$$Q = -\int \lambda \frac{\partial t}{\partial n} \cdot dF \quad (2-11)$$

Khi gradt không đổi trên bề mặt F, công thức có dạng:

$$Q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} \cdot dF \quad (2-12)$$

Định luật Fourier là định luật cơ bản để tính lượng nhiệt trao đổi bằng phương thức dẫn nhiệt.

b. Hệ số dẫn nhiệt.

Hệ số của định luật Fourier: $\lambda = \left| \frac{q}{\text{grad}t} \right|$, W/mK gọi là hệ số dẫn nhiệt.

Hệ số dẫn nhiệt λ đặc trưng cho khả năng dẫn nhiệt của vật. Giá trị của λ phụ thuộc vào bản chất và kết cấu của vật liệu, vào độ ẩm và nhiệt độ, được xác định bằng thực nghiệm với từng vật liệu và cho sẵn theo quan hệ với nhiệt độ tại bảng các thông số vật lý của vật liệu.

c. Phương trình vi phân dẫn nhiệt.

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{\rho \cdot C_v} \nabla^2 t + \frac{q_v}{\rho \cdot C_v} = a \left(\nabla^2 t + \frac{q_v}{\lambda} \right) \quad (2-13)$$

Với $a = \frac{\lambda}{\rho \cdot C_v}$, m²/s, được gọi là hệ số khuếch tán nhiệt, đặc trưng cho mức độ khuếch tán nhiệt trong vật.

2.4.2.2 Trao đổi nhiệt đối lưu.

a. Công thức tính nhiệt cơ bản.

Thực nghiệm cho hay lượng nhiệt Q trao đổi bằng đối lưu giữa mặt F có nhiệt độ t_w với chất lỏng có nhiệt độ t_f luôn tỷ lệ với F và:

$$\Delta t = t_w - t_f. \quad (2-14)$$

Do đó, nhiệt lượng Q được đề nghị tính theo 1 công thức quy ước, được gọi là công thức Newton, có dạng sau:

$$Q = \alpha F \Delta t \text{ [W]} \text{ hay } q = \alpha \Delta t \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (2-15)$$

b. Hệ số tỏa nhiệt α .

Hệ số α của công thức Newton nói trên, được gọi là hệ số tỏa nhiệt:

$$\alpha = \frac{Q}{F \Delta t} = \frac{q}{\Delta t} \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

Hệ số α đặc trưng cho cường độ tỏa nhiệt, bằng lượng nhiệt truyền từ 1m^2 bề mặt đến chất lỏng có nhiệt độ khác nhiệt độ bề mặt 1 độ

Giá trị của α được coi là ẩn số chính của bài toán tỏa nhiệt, phụ thuộc vào các thông số khác của môi trường chất lỏng và bề mặt, được xác định chủ yếu bằng các công thức thực nghiệm.

c. Phương trình tỏa nhiệt tiêu chuẩn.

$$\text{Nu} = f(\text{Pr}, \text{Gr}, \text{Re}) \quad (2-16)$$

Trong đó:

+ $\text{Nu} = \frac{\alpha l}{\lambda}$ là hệ số tỏa nhiệt không thứ nguyên chưa biết, được gọi là tiêu chuẩn Nusselt, đặc trưng cho cường độ tỏa nhiệt.

+ $\text{Pr} = \frac{\gamma}{a}$ là độ nhớt không thứ nguyên, cho trước trong điều kiện vật lý, được gọi là tiêu chuẩn Prandtl, đặc trưng cho tính chất vật lý của chất lỏng.

+ $\text{Re} = \frac{v l}{\nu}$ là vận tốc không thứ nguyên, được gọi là tiêu chuẩn Reynolds, đặc trưng cho chế độ chuyển động. Trong tỏa nhiệt cưỡng bức Re là tiêu chuẩn xác định. Trong tỏa nhiệt tự nhiên, Re là tiêu chuẩn chưa xác định phụ thuộc vào Gr và Pr .

+ $\text{Gr} = \frac{g \beta l^3 \Delta t}{\nu^2}$ là lực nâng không thứ nguyên, cho trước theo điều kiện đơn trị, gọi là tiêu chuẩn Grashof, đặc trưng cho cường độ đối lưu tự nhiên.

2.4.2.3 Trao đổi nhiệt bức xạ.

a. Công suất bức xạ toàn phần Q .

Công suất bức xạ toàn phần của mặt F là tổng năng lượng bức xạ phát ra từ F trong 1 giây, tính theo mọi phương trên mặt F với mọi bước sóng $\lambda \in (0, \infty)$. Q đặc trưng cho công suất bức xạ của mặt F hay của vật, phụ thuộc vào diện tích F và nhiệt độ T trên F :

$$Q = Q(F, T), \text{ [W]}. \quad (2-17)$$

b. Cường độ bức xạ toàn phần E .

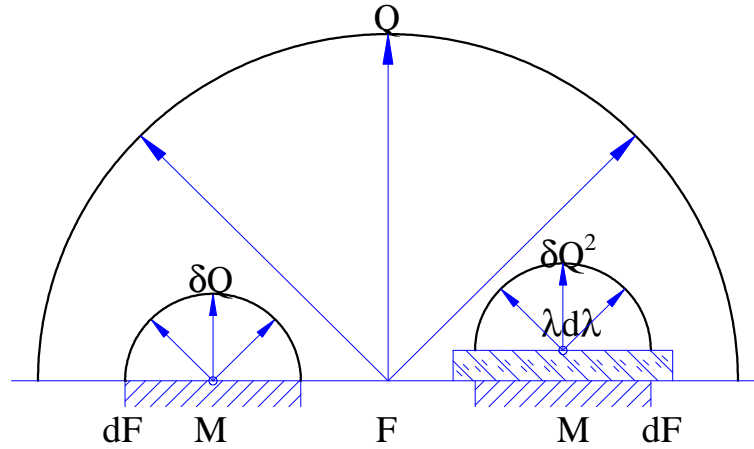
Cường độ bức xạ toàn phần E của điểm M trên mặt F là công suất bức xạ toàn phần δQ của diện tích dF bao quanh M , ứng với 1 đơn vị diện tích dF :

$$E = \frac{\delta Q}{dF} \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (2-18)$$

E đặc trưng cho cường độ BX toàn phần của điểm M trên F , phụ thuộc vào nhiệt độ T tại M , $E = E(T)$. Nếu biết phân bố E tại $\forall M \in F$ thì tìm được:

$$Q = \int_F \mathbf{E}d\mathbf{F} \quad (2-19)$$

khi $E = \text{const}$, $\forall M \in F$ thì: $Q = EF$; [W].



Hình 2.5 Các đại lượng đặc trưng cho bức xạ.

c. Cường độ bức xạ đơn sắc.

Cường độ bức xạ đơn sắc E_λ tại bước sóng ở, của điểm $M \in F$ là phần năng lượng $\delta^2 Q$ phát từ dF quanh M , truyền theo mọi phương xuyên qua kính lọc sóng có $\lambda \in [\lambda + d\lambda]$ ứng với 1 đơn vị của dF và $d\lambda$:

$$E_\lambda = \frac{\delta^2 Q}{dF d\lambda}, \quad [\text{W}/\text{m}^3] \quad (2-20)$$

E_λ đặc trưng cho cường độ tia bức xạ có bước sóng ở phát từ điểm $M \in F$, phụ thuộc vào bước sóng λ và nhiệt độ T tại điểm M , $E_\lambda = E_\lambda(\lambda, T)$.

Nếu biết phân bố E_λ theo λ thì tính được $E = \int_{\lambda=0}^{\infty} \mathbf{E}_\lambda d\lambda$. Quan hệ giữa E_λ , E và Q có dạng:

$$Q = \int_F \mathbf{E}d\mathbf{F} = \int_F \int_{\lambda=0}^{\infty} \mathbf{E}_\lambda d\lambda d\mathbf{F} \quad (2-21)$$

Để phân biệt sự chuyển pha và sự truyền nhiệt ta nhận thấy rằng:

- Sự chuyển pha xảy ra đối với một chất.
- Sự truyền nhiệt xảy ra giữa hai hoặc nhiều vật khác nhau.

Tuy nhiên, quá trình chuyển pha và quá trình truyền nhiệt đều là các quá trình nhiệt động.

CHƯƠNG 3. CÁC QUÁ TRÌNH NHIỆT ĐỘNG CỦA MÔI CHẤT

Mã số chương: MH 14 - 03

Mục tiêu:

- Phát biểu được các khái niệm, phân loại của các quá trình nhiệt động cơ bản.
- Giải thích được các quá trình nhiệt động cơ bản trong máy nén khí.
- Nhận dạng được quá trình nhiệt động trong máy nén khí và của môi chất.
- Tuân thủ đúng quy định, quy phạm về lĩnh vực nhiệt kỹ thuật.

Nội dung chính:

3.1 CƠ SỞ LÝ THUYẾT ĐỂ KHẢO SÁT MỘT QUÁ TRÌNH NHIỆT ĐỘNG.

Khảo sát một quá trình nhiệt động là nghiên cứu những đặc tính của quá trình, quan hệ giữa các thông số cơ bản khi trạng thái thay đổi, tính toán độ biến thiên các thông số u , i , s , công và nhiệt trao đổi trong quá trình, biểu diễn các quá trình trên đồ thị p - v và T - s .

Để khảo sát một quá trình nhiệt động của khí lý tưởng ta dựa trên những qui luật cơ bản sau đây:

- Đặc điểm quá trình.
- Phương trình trạng thái,.
- Phương trình định luật nhiệt động I.

Từ đặc điểm quá trình, ta xác lập được phương trình của quá trình. Phương trình trạng thái cho phép xác định quan hệ giữa các thông số trạng thái trong quá trình, còn phương trình định luật nhiệt động I cho phép ta tính toán công và nhiệt lượng trao đổi giữa khí lý tưởng với môi trường và độ biến thiên Δu , Δi và Δs trong quá trình.

Ngoài ra, đối với quá trình lưu động (sự chuyển động của môi chất) thì khi khảo sát, ngoài các thông số trạng thái như áp suất, nhiệt độ v.v. ta còn phải xét một thông số nữa là tốc độ, kí hiệu là ϖ . Khi khảo sát dòng lưu động 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 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:

$$G = \varpi \cdot \rho \cdot f = \text{const} \quad (3-1)$$

Ở đây:

- + G là lưu lượng khối lượng [kg/s];
- + ϖ là vận tốc của dòng [m/s];

+ f là diện tích tiết diện ngang của dòng tại nơi khảo sát [m^2];

+ ρ là khối lượng riêng của mỗi chất [kg/m^3];

3.2 NỘI DUNG KHẢO SÁT.

- Định nghĩa quá trình và lập phương trình biểu diễn quá trình $f(p,v) = 0$.

- Dựa vào phương trình trạng thái $p v = RT$ và phương trình của quá trình để xác định quan hệ giữa các thông số trạng thái cơ bản ở trạng thái đầu và cuối quá trình.

- Tính lượng thay đổi nội năng Δu , entanpi Δi và entropi Δs trong quá trình. Đối với khí lý tưởng, trong mọi trường hợp nội năng và entanpi đều được tính theo các công thức:

$$\Delta u = C_v(T_2 - T_1) \quad (3-2)$$

$$\Delta i = C_p(T_2 - T_1) \quad (3-3)$$

- Tính công thay đổi thể tích l , nhiệt lượng q trao đổi trong quá trình và hệ số biến hoá năng lượng: $\alpha = \frac{\Delta u}{q}$

- Biểu diễn quá trình trên đồ thị $p-v$, $T-s$ và nhận xét.

3.3 CÁC QUÁ TRÌNH CÓ MỘT THÔNG SỐ BẤT BIẾN.

3.3.1 Quá trình đẳng nhiệt.

a. Định nghĩa quá trình.

Quá trình đẳng nhiệt là quá trình nhiệt động được tiến hành trong điều kiện nhiệt độ không đổi.

$$T = \text{const}, dt = 0. \quad (3-4)$$

b. Quan hệ giữa các thông số.

Từ phương trình trạng thái của khí lý tưởng $p v = RT$, mà $R = \text{const}$ và $T = \text{const}$, do đó suy ra: $p v = RT = \text{const}$ (3-5)

hay: $p_1 v_1 = p_2 v_2$ (3-6)

nghĩa là trong quá trình đẳng nhiệt, thể tích thay đổi tỷ lệ nghịch với áp suất,

suy ra: $\frac{p_1}{p_2} = \frac{v_2}{v_1}$ (3-7)

c. Công thay đổi thể tích của quá trình.

Vì quá trình đẳng nhiệt có $T = \text{const}$, nên công thay đổi thể tích:

$$l = \int_1^2 p dv = \int_{v_1}^{v_2} RT \frac{dv}{v} = RT \ln \frac{v_2}{v_1} \quad (3-8)$$

$$l = RT \ln \frac{v_2}{v_1} = p_1 v_1 \ln \frac{v_2}{v_1} = p_2 v_2 \ln \frac{v_2}{v_1} \quad (3-9)$$

hay:

$$l = RT \ln \frac{p_1}{p_2} = p_1 v_1 \ln \frac{p_2}{p_1} = p_2 v_2 \ln \frac{p_1}{p_2} \quad (3-10)$$

d. Công kỹ thuật của quá trình.

$$l_{kt} = \int_1^2 -v dp = \int_{p_1}^{p_2} RT \frac{dp}{p} = RT \ln \frac{p_1}{p_2} = RT \ln \frac{v_2}{v_1} = l \quad (3-11)$$

Trong quá trình đẳng nhiệt công thay đổi thể tích bằng công kỹ thuật.

e. Nhiệt lượng trao đổi với môi trường.

Lượng nhiệt tham gia vào quá trình được xác định theo định luật nhiệt động I là: $dq = du + dl = di + dl_{kt}$, mà trong quá trình đẳng nhiệt $dT = 0$ nên $du = 0$ và $di = 0$, do đó có thể viết:

$$dq = dl = dl_{kt} \text{ hoặc } q = l = l_{kt}. \quad (3-12)$$

Hay:

$$q = \text{---} \text{---} \quad (3-13)$$

hoặc có thể tính: $dq = Tds \Rightarrow q = T(s_2 - s_1) \quad (3-14)$

g. Biến thiên entropi của quá trình.

Độ biến thiên entropi của quá trình được xác định bằng biểu thức:

$$ds = \text{---} \text{---} \text{---} \quad (3-15)$$

mà theo phương trình trạng thái ta có: --- thay vào (3-15) ta được:

$$ds = R \text{---} \quad (3-16)$$

Lấy tích phân (3-16) ta có:

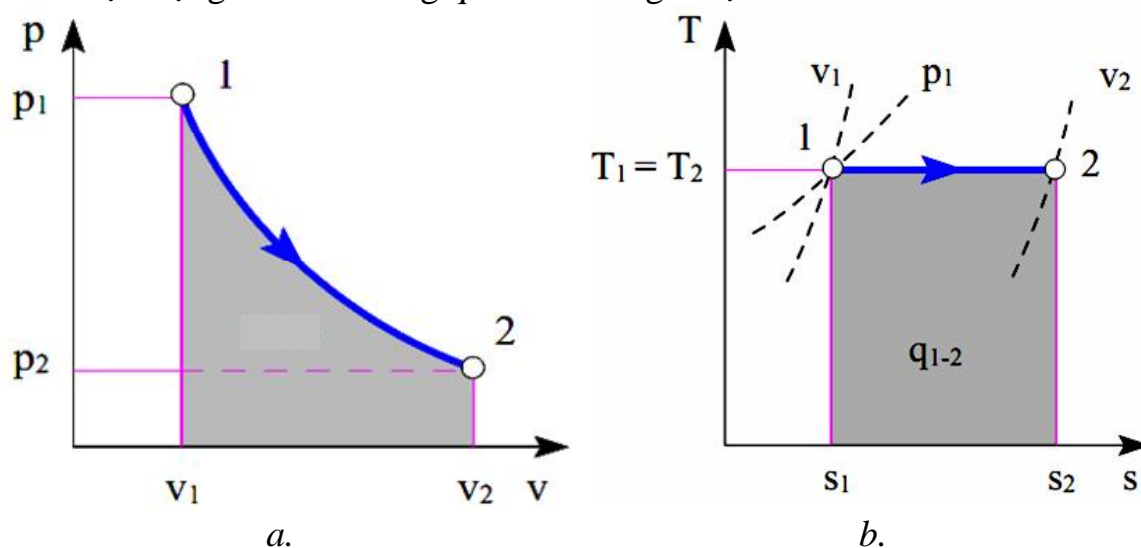
$$\Delta s = \text{---} = \text{---} = R \ln \text{---} = R \ln \text{---} \quad (3-17)$$

h. Hệ số biến đổi năng lượng của quá trình.

$$\alpha = \text{---} = 0 \quad (3-18)$$

k. Biểu diễn trên đồ thị.

Quá trình đẳng nhiệt được biểu thị bằng đường cong hypecbôn cân 1-2 trên đồ thị p-v (hình 3.1a) và đường thẳng nằm ngang 1-2 trên đồ thị T-s (hình 3.1b). Trên đồ thị p-v, diện tích $12p_2p_1$ biểu diễn công kỹ thuật, còn diện tích $12v_2v_1$ biểu diễn công thay đổi thể tích. Trên đồ thị T-s diện tích $12s_2s_1$ biểu diễn nhiệt lượng trao đổi trong quá trình đẳng nhiệt.



Hình 3.1 Đồ thị p - v và T - s của quá trình đẳng nhiệt.

3.3.2 Quá trình đẳng áp.

a. Định nghĩa quá trình.

Quá trình đẳng áp là quá trình nhiệt động được tiến hành trong điều kiện áp suất không đổi.

$$p = \text{const}, \quad dp = 0. \quad (3-19)$$

b. Quan hệ giữa các thông số.

Từ phương trình trạng thái của khí lý tưởng $pV = RT$, ta có: $\frac{V}{T} = \frac{R}{p}$; mà $R = \text{const}$ và $p = \text{const}$, do đó suy ra:

$$\frac{V}{T} = \frac{R}{p} = \text{const} \quad (3-20)$$

nghĩa là trong quá trình đẳng áp, thể tích thay đổi tỷ lệ thuận với nhiệt độ, suy ra:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \text{ hay } \frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad (3-21)$$

c. Công thay đổi thể tích của quá trình.

Vì quá trình đẳng áp có $p = \text{const}$, nên công thay đổi thể tích:

$$l = \int_1^2 p \, dv = p(v_2 - v_1) = R(T_2 - T_1) \quad (3-22)$$

d. Công kỹ thuật của quá trình.

$$l_{kt} = \int_1^2 -v \, dp = 0 \text{ vì } dp = 0 \quad (3-23)$$

Trong quá trình đẳng áp công kỹ thuật bằng 0.

e. Nhiệt lượng trao đổi với môi trường.

Lượng nhiệt tham gia vào quá trình được xác định theo định luật nhiệt động I là: $q = \Delta i + l_{kt}$, mà $l_{kt} = 0$ nên:

$$q = \Delta i = C_p(T_2 - T_1) \quad (3-24)$$

g. Biến thiên entropi của quá trình.

Độ biến thiên entropi của quá trình được xác định bằng biểu thức:

$$dq = di - v \, dp = di \text{ (vì } dp = 0), \text{ do đó ta có: } ds = \frac{dq}{T} = \frac{di}{T}$$

Lấy tích phân ta có:

$$\Delta s = \int_1^2 \frac{dq}{T} = \int_1^2 \frac{C_p \, dT}{T} = C_p \ln \frac{T_2}{T_1} = C_p \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (3-25)$$

h. Hệ số biến đổi năng lượng của quá trình.

$$\alpha = \frac{\Delta u}{q} = \frac{C_v(T_2 - T_1)}{C_p(T_2 - T_1)} = \frac{1}{k} \quad (3-26)$$

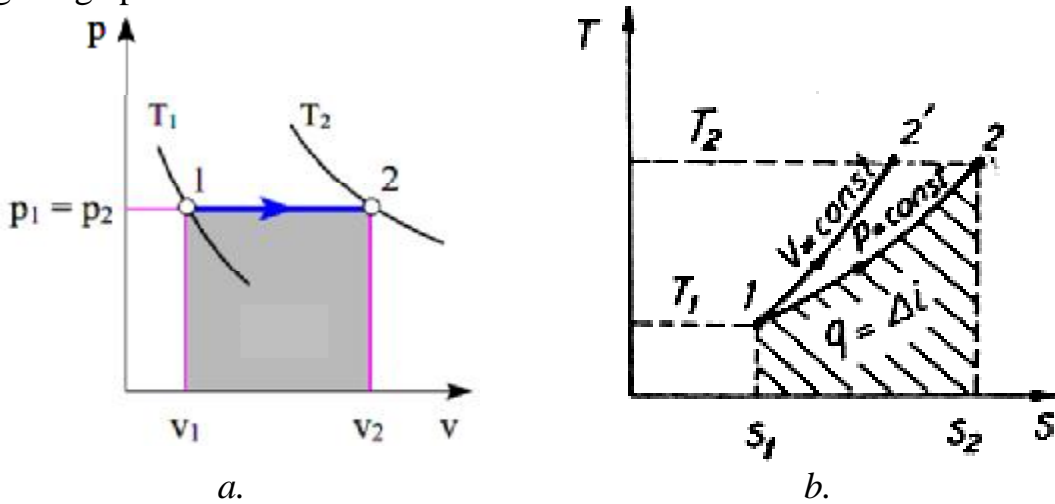
k. Biểu diễn trên đồ thị.

Quá trình đẳng áp được biểu thị bằng đoạn thẳng nằm ngang 1-2 trên đồ thị p-v (hình 3.2a) và đường cong lôgarit 1-2 trên đồ thị T-s (hình 3.2b). Diện tích $12v_2v_1$ trên đồ thị p-v biểu diễn công thay đổi thể tích, còn diện tích $12s_2s_1$ trên đồ thị T-s biểu diễn nhiệt lượng trao đổi trong quá trình đẳng áp.

Để so sánh độ dốc của đường đẳng tích và đường đẳng áp trên đồ thị p-v, ta dựa vào quan hệ:

$ds_v = \frac{C_v}{T}dT$ và $ds_p = \frac{C_p}{T}dT$, từ đó suy ra: $\frac{ds_p}{ds_v} = \frac{C_p}{C_v} > 1$ vì $C_p > C_v$.

Từ đó ta thấy: trên đồ thị T - s, đường cong đẳng tích dốc hơn đường cong đẳng áp.



Hình 3.2 Đồ thị p - v và T - s của quá trình đẳng áp.

3.3.3 Quá trình đẳng tích.

a. Định nghĩa quá trình.

Quá trình đẳng tích là quá trình nhiệt động được tiến hành trong điều kiện thể tích không đổi.

$$v = \text{const}, \quad dv = 0. \tag{3-27}$$

b. Quan hệ giữa các thông số.

Từ phương trình trạng thái của khí lý tưởng $pv = RT$, ta có: $p = \frac{RT}{v}$; mà $R = \text{const}$ và $v = \text{const}$, do đó suy ra:

$$p = \text{const} \cdot T \tag{3-28}$$

nghĩa là trong quá trình đẳng tích, thể tích thay đổi tỷ lệ thuận với nhiệt độ, suy ra: $\frac{p}{T} = \text{const}$ hay $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$ $\tag{3-29}$

c. Công thay đổi thể tích của quá trình.

Vì quá trình đẳng tích có $v = \text{const}$, nghĩa là $dv = 0$ nên công thay đổi thể tích: $l = \int p \, dv = 0$ $\tag{3-30}$

d. Nhiệt lượng trao đổi với môi trường.

Lượng nhiệt tham gia vào quá trình được xác định theo định luật nhiệt động I là: $q = l + \Delta u$, mà $l = 0$ nên: $q = \Delta u = C_v(T_2 - T_1)$ $\tag{3-31}$

g. Biến thiên entropi của quá trình.

Độ biến thiên entropi của quá trình được xác định bằng biểu thức:

$$ds = \frac{C_v}{T}dT$$

Lấy tích phân ta có: $\Delta s = s_2 - s_1 = \text{---}$ (3-32)

hay $\Delta s = C_v \ln \text{---} = C_v \ln \text{---}$ (3-33)

h. Hệ số biến đổi năng lượng của quá trình.

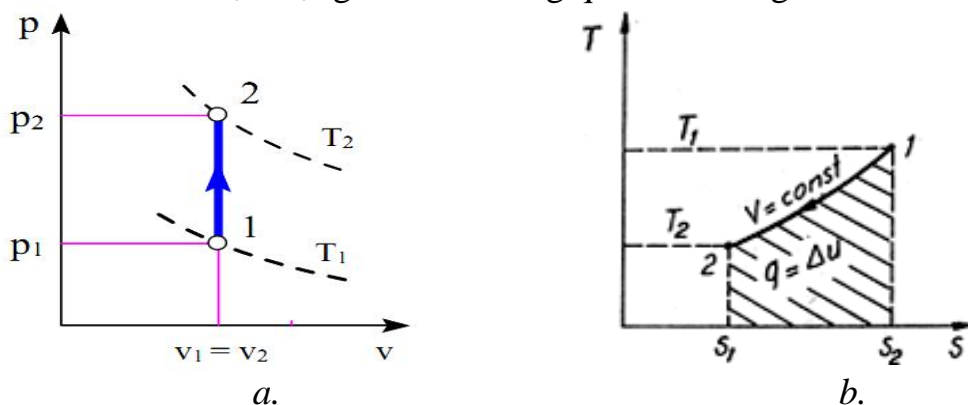
$$\alpha = \text{---} = 1 \quad (3-34)$$

Như vậy trong quá trình đẳng tích, nhiệt lượng tham gia vào quá trình chỉ để làm thay đổi nội năng của chất khí.

k. Biểu diễn trên đồ thị.

Trạng thái nhiệt động của môi chất hoàn toàn xác định khi biết hai thông số độc lập bất kỳ của nó. Bởi vậy ta có thể chọn hai thông số độc lập nào đó để lập ra đồ thị biểu diễn trạng thái của môi chất, đồ thị đó được gọi là đồ thị trạng thái.

Quá trình đẳng tích được biểu thị bằng đoạn thẳng đứng 1-2 trên đồ thị p-v (hình 3.3a) và đường cong lôgarit trên đồ thị T-s (hình 3.3b). Diện tích $12p_2p_1$ trên đồ thị p-v biểu diễn công kỹ thuật, còn diện tích $12s_2s_1$ trên đồ thị T-s biểu diễn nhiệt lượng trao đổi trong quá trình đẳng tích.



Hình 3.3 Đồ thị p - v và T - s của quá trình đẳng tích.

3.3.4 Quá trình đoạn nhiệt.

a. Định nghĩa quá trình.

Quá trình đoạn nhiệt là quá trình nhiệt động được tiến hành trong điều kiện không trao đổi nhiệt với môi trường.

$$q = \text{const}, \quad dq = 0. \quad (3-35)$$

b. Phương trình của quá trình.

Từ các dạng phương trình định luật nhiệt động I ta có:

$$dq = C_p dT - v dp = 0$$

$$dq = C_v dT + p dv = 0$$

suy ra: $C_p dT = v dp$ (3-36)

$$C_v dT = - p dv \quad (3-37)$$

Chia (3-35) cho (3-36) ta được:

$$\frac{C_p}{C_v} = -\frac{vdp}{pdv} = k \quad (3-38)$$

hay:
$$\frac{dp}{p} + k \frac{dv}{v} = 0 \quad (3-39)$$

Lấy tích phân 2 vế (3-39) ta được:

$$\ln p + k \cdot \ln v = \text{const}$$

hay:
$$pv^k = \text{const} \quad (3-40)$$

Đây là phương trình của quá trình đoạn nhiệt với số mũ đoạn nhiệt là k.

c. *Quan hệ giữa các thông số.*

Từ (3-40) ta có:
$$p_1 v_1^k = p_2 v_2^k$$

hay:
$$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^k \quad (3-41)$$

Từ phương trình trạng thái ta có: $p = \frac{RT}{v}$, thay vào (3-41) ta được:

$$\frac{RT_1}{v_1} \cdot \frac{v_2}{RT_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^k \Rightarrow \frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{k-1} \quad (3-42)$$

Từ (3-41) và (3-42) ta suy ra:

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (3-43)$$

d. *Công thay đổi thể tích của quá trình.*

Có thể tính công thay đổi thể tích theo định luật nhiệt động I:

$$q = \Delta u + l = 0; \text{ suy ra: } l = \Delta u = C_v(T_1 - T_2) \quad (3-44)$$

hoặc cũng có thể tính công thay đổi thể tích theo định nghĩa: $dl = pdv$, hay:

$$l = \int_1^2 pdv \quad (3-45)$$

Từ (3-40) ta có: $p_1 v_1^k = p v^k$, suy ra: $p = \frac{p_1 v_1^k}{v^k}$, thay giá trị của p vào biểu thức (3-45) ta được công thay đổi thể tích:

$$l = p_1 v_1^k \int_1^2 \frac{dv}{v^k} \quad (3-46)$$

Từ công thức (3-38) ta có: $k = -\frac{vdp}{pdv} = \frac{dl_{kt}}{dl}$ (3-47)

Từ đó suy ra quan hệ giữa công thay đổi thể tích và công kỹ thuật trong quá trình đoạn nhiệt là: $l_{kt} = k \cdot l$ (3-48)

g. *Biến thiên entropi của quá trình.*

Độ biến thiên entropi của quá trình đoạn nhiệt:

$$ds = \frac{dq}{T} = 0 \text{ hay } s_1 = s_2 \quad (3-49)$$

nghĩa là trong quá trình đoạn nhiệt entropi không thay đổi.

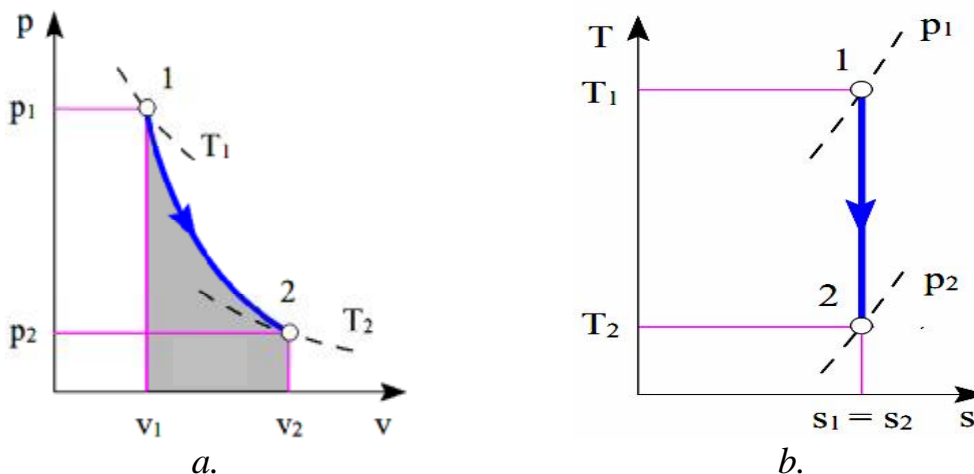
h. *Hệ số biến đổi năng lượng của quá trình.*

Vì $q = 0$ nên:

$$\alpha = \frac{\Delta u}{q} = \infty \quad (3-50)$$

k. *Biểu diễn trên đồ thị.*

Quá trình đoạn nhiệt được biểu thị bằng đường cong hypecbôn 1-2 trên đồ thị p-v (hình 3.4a) và đường thẳng đứng 1-2 trên đồ thị T-s (hình 3.4b). Trên đồ thị p-v, diện tích $12p_2p_1$ biểu diễn công kỹ thuật, còn diện tích $12v_2v_1$ biểu diễn công thay đổi thể tích, đường biểu diễn quá trình đoạn nhiệt dốc hơn đường đẳng nhiệt vì $l_{kt} = k.l$ mà $k > 1$.



Hình 3.4 Đồ thị p - v và T - s của quá trình đoạn nhiệt.

3.3.5 Quá trình đa biến.

a. *Định nghĩa quá trình:* quá trình đa biến là quá trình nhiệt động được tiến hành trong điều kiện nhiệt dung riêng của quá trình không đổi.

$$C_n = \text{const} \quad (3-51)$$

Trong quá trình đa biến, mọi thông số trạng thái đều có thể thay đổi và hệ có thể trao đổi nhiệt và công với môi trường.

b. *Quan hệ giữa các thông số.*

Để xây dựng phương trình của quá trình đa biến ta sử dụng các dạng công thức của định luật nhiệt động I và chú ý rằng nhiệt lượng trao đổi trong quá trình đa biến có thể tính theo nhiệt dung riêng đa biến là $dq = C_n dT$, ta có:

$$dq = C_p dT - v dp = C_n dT \quad (a)$$

$$dq = C_v dT + p dv = C_n dT \quad (b)$$

Từ đó suy ra:

$$(C_n - C_p) dT = -v dp \quad (c)$$

$$(C_n - C_v) dT = p dv \quad (d)$$

Chia vế theo vế phương trình (c) cho (d) ta được:

$$\frac{C_n - C_p}{C_n - C_v} = \frac{-v dp}{p dv} \quad (3-52)$$

Ký hiệu:

$$n = \frac{C_n - C_p}{C_n - C_v} \quad (3-53)$$

Ta thấy n là một hằng số vì C_n , C_p và C_v đều là các hằng số. Từ (3-52) và (3-53) ta có:

$$n = - \frac{vdp}{pdv} \quad (3-54)$$

hay $npdv + vdp = 0$, chia cả hai về phương trình cho pv ta được:

$$\frac{dp}{p} + n \frac{dv}{v} = 0$$

Lấy tích phân ta được: $n \cdot \ln v + \ln p = 0$.

Tiếp tục biến đổi ta được phương trình của quá trình đa biến:

$$pv^n = \text{const} \quad (3-55)$$

trong đó n là số mũ đa biến.

So sánh biểu thức (3-39) với (3-55) ta thấy: phương trình của quá trình đa biến giống hệt như dạng phương trình của quá trình đoạn nhiệt. Từ đó bằng các biến đổi tương tự như khi khảo sát quá trình đoạn nhiệt và chú ý thay số mũ đoạn nhiệt k bằng số mũ đa biến n , ta sẽ được các biểu thức của quá trình đa biến.

c. Công thay đổi thể tích của quá trình.

Có thể tính công thay đổi thể tích theo định luật nhiệt động I, hoặc cũng có thể tính theo định nghĩa $dl = pdv$, tương tự như ở quá trình đoạn nhiệt.

$$l = \int_1^2 p dv = \frac{RT_1}{n-1} \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right) \quad (3-56)$$

Công kỹ thuật của quá trình:

$$l_{kt} = k \cdot l \quad (3-57)$$

d. Nhiệt lượng trao đổi với môi trường.

Lượng nhiệt trao đổi với môi trường của quá trình được xác định theo nhiệt dung riêng của quá trình đa biến là:

$$dq = C_n dT = C_n (T_2 - T_1) \quad (3-58)$$

Tính cho G kg môi chất:

$$Q = GC_n (T_2 - T_1) \quad (3-60)$$

g. Biến thiên entropi của quá trình.

Độ biến thiên entropi của quá trình được xác định bằng biểu thức:

$$ds = \frac{dq}{T} = \frac{C_n dT}{T}$$

Lấy tích phân ta có:

$$\Delta s = \int_1^2 \frac{C_n dT}{T} = C_n \ln \frac{T_2}{T_1} \quad (3-61)$$

h. Hệ số biến đổi năng lượng của quá trình.

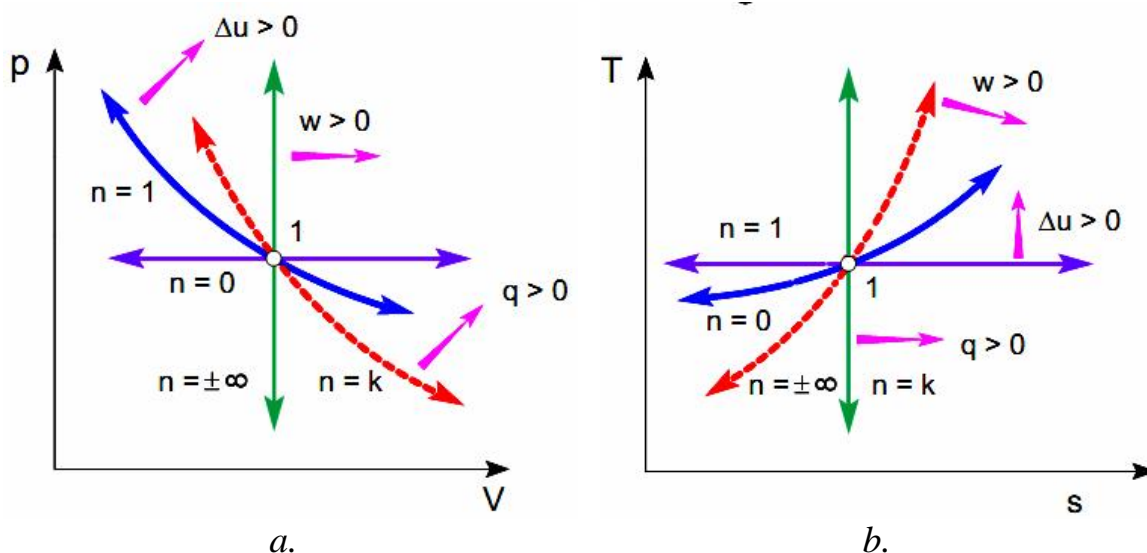
$$\alpha = \frac{\Delta u}{q} = \frac{n-1}{n-k} \quad (3-62)$$

Như vậy trong quá trình đẳng tích, nhiệt lượng tham gia vào quá trình chỉ để làm thay đổi nội năng của chất khí.

k. Biểu diễn trên đồ thị.

Quá trình đa biến 1-2 bất kỳ với $n = -\infty \div +\infty$ được biểu diễn trên đồ thị p-v và T-s hình 3.5. Số mũ đa biến thay đổi từ $-\infty$ theo chiều kim đồng hồ tăng dần lên đến 0, 1 rồi k ($k > 0$) và cuối cùng bằng $+\infty$.

Trên đồ thị p-v, đường cong biểu diễn quá trình đa biến dốc hơn đường cong của quá trình, vì quá trình đẳng nhiệt có $n = 1$, còn quá trình đoạn nhiệt có $n = k$, ($k > 1$).



Hình 3.5 Đồ thị p - v và T - s của quá trình đa biến.

Tính tổng quát của quá trình:

Quá trình đa biến là quá trình tổng quát với số mũ đa biến $n = -\infty \div +\infty$, các quá trình nhiệt động cơ bản còn lại chỉ là các trường hợp riêng của nó. Thật vậy, từ phương trình $pv^n = \text{const}$ ta thấy:

- Khi $n = 0$, phương trình của quá trình là $pv^0 = \text{const}$, hay $p = \text{const}$ với nhiệt dung riêng $C_n = C_p$, quá trình là đẳng áp.
- Khi $n = 1$, phương trình của quá trình là $pv^1 = \text{const}$, hay $T = \text{const}$ với nhiệt dung riêng $C_T = \pm\infty$, quá trình là đẳng nhiệt.
- Khi $n = k$, phương trình của quá trình là $pv^k = \text{const}$, hay $q = 0$ với nhiệt dung riêng $C_n = 0$, quá trình là đoạn nhiệt.
- Khi $n = \pm\infty$, phương trình của quá trình là $pv^{\pm\infty} = \text{const}$, hay $v = \text{const}$ với nhiệt dung riêng $C_n = C_v$, quá trình là đẳng tích.

Như vậy các quá trình đoạn nhiệt ($C = 0$), đẳng nhiệt ($C = \pm\infty$), đẳng tích ($C = C_v$), đẳng áp ($C = C_p$) là các trường hợp riêng của quá trình đa biến.

3.4 CÁC QUÁ TRÌNH NHIỆT ĐỘNG CỦA KHÍ THỰC.

3.4.1 Hơi nước là một khí thực.

Hơi nước có rất nhiều ưu điểm so với các môi chất khác: có nhiều trong thiên nhiên, rẻ tiền, 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 lý tưởng cho hơi nước được.

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

$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT\left(1 - \frac{c}{T^{3/2+m}}\right) = 0 \quad (3-63)$$

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.

3.4.2 Quá trình hóa hơi và ngưng tụ của nước.

3.4.2.1 Quá trình hóa hơi.

Nước có thể chuyển từ thể lỏng sang thể hơi nhờ quá trình hoá hơi. Quá trình hoá hơi có thể là bay hơi hoặc sôi.

a. *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. Nhiệt độ càng cao thì tốc độ bay hơi càng lớn.

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

- Điều kiện để xảy ra quá trình sôi: 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. 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. 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.

3.4.2.2 Quá trình ngưng tụ.

Quá trình ngược lại với quá trình sôi là quá trình ngưng tụ, trong đó hơi nhả nhiệt và biến thành chất lỏng. Nhiệt độ của chất lỏng không thay đổi suốt trong quá trình ngưng tụ.

3.4.3 Các quá trình nhiệt động thực tế.

3.4.3.1 Quá trình lưu động.

a. *Khái niệm:* quá trình lưu động là sự chuyển động của môi chất. Khi khảo sát dòng lưu động, ngoài các thông số trạng thái như áp suất, nhiệt độ v.v. ta còn phải xét một thông số nữa là tốc độ, kí hiệu là ϖ .

b. *Các điều kiện khảo sát.*

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:

$$G = \varpi \cdot \rho \cdot f = \text{const} \quad (3-64)$$

Ở đây:

G -lưu lượng khối lượng [kg/s];

ϖ - vận tốc của dòng [m/s];

f -diện tích tiết diện ngang của dòng tại nơi khảo sát [m²];

ρ - khối lượng riêng của mỗi chất [kg/m³];

c. *Các qui luật chung của quá trình lưu động.*

- 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:

$$a = \sqrt{kpv} = \sqrt{kRT} \quad (3-65)$$

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 (3-65) ta thấy tốc độ âm thanh phụ thuộc vào bản chất và các thông số trạng thái của môi chất.

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

$$M = \frac{\varpi}{a} \quad (3-66)$$

Khi:

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

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

$+M > a$ 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 ta theo định luật nhiệt động ta có thể viết:

$$dq = di - vdp \quad (3-67)$$

$$dq = di + d\text{—} \quad (3-68)$$

- Quan hệ giữa tốc độ và hình dáng ống.

Vì dòng đoạn nhiệt có $dq = 0$, nên từ (3-67) và (3-68) ta suy ra:

$$\begin{aligned} d\text{—} &= -vdp \\ \omega d\omega &= -vdp \end{aligned} \quad (3-69)$$

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.

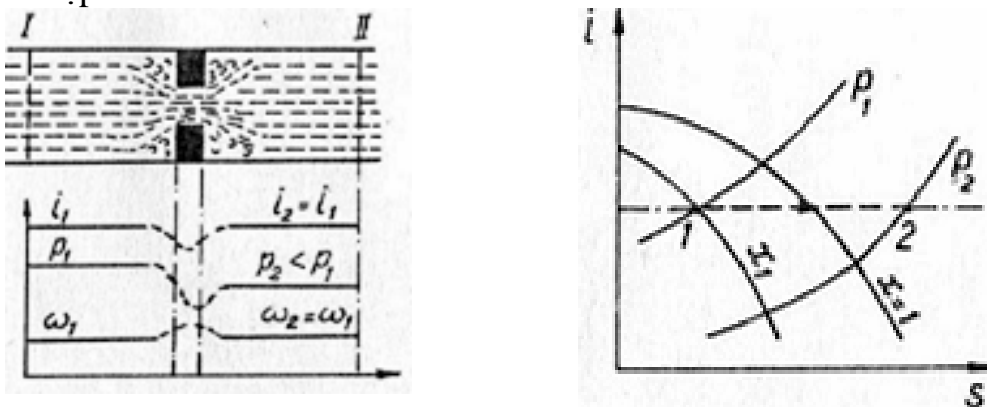
- Khi tốc độ tăng ($d\omega < 0$) thì áp suất tăng ($dp > 0$), ống loại này là ống tăng áp. Ống tăng áp được dùng để tăng áp suất của chất khí trong máy nén ly tâm, động cơ phản lực.

3.4.3.2 Quá trình tiết lưu.

a. Khái niệm.

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 v.v. những chỗ có tiết diện thu hẹp đột ngột, trở lực sẽ tăng đột ngột, 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 ở sau tiết diện thu hẹp.



Hình 3.6 Quá trình tiết lưu.

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, nhưng không thuận nghịch nên Entropi tăng.

Độ giảm áp suất trong quá trình tiết lưu phụ thuộc vào tính chất và các thông số của môi chất, tốc độ chuyển động của dòng và cấu trúc của vật cản.

b. Tính chất của quá trình tiết lưu.

Khi tiết diện 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:

$$\Delta p = p_2 - p_1 < 0. \quad (3-70)$$

- Entropi tăng:

$$\Delta s = s_2 - s_1 > 0. \quad (3-71)$$

- Entanpi không đổi:

$$\Delta i = i_2 - i_1 = 0. \quad (3-72)$$

- Tốc độ dòng không đổi:

$$\Delta \omega = \omega_2 - \omega_1 = 0. \quad (3-73)$$

3.4.3.3 Quá trình nén khí.

a. Các loại máy nén.

Máy nén khí là máy để nén khí hoặc hơi đến áp suất cao theo yêu cầu. Máy nén tiêu tốn công để nâng áp suất của môi chất lên.

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

- Nhóm thứ nhất gồm máy nén pít tông, máy nén bánh răng, máy nén cánh gạt. Ở máy nén pít tông, khí được hút vào xy lanh và được nén đến áp suất cần thiết rồi được đẩy vào bình chứa (máy nén rôto thuộc loại này), quá trình nén xảy ra theo từng chu kỳ. Máy nén loại này còn được gọi là máy nén tĩnh vì tốc độ của dòng khí không lớn. Máy nén pít tông đạt được áp suất lớn nhưng năng suất nhỏ.

- Nhóm thứ hai gồm máy nén ly tâm, máy nén hướng trục. Đối với các máy nén nhóm này, để tăng áp suất của môi chất, đầu tiên phải tăng tốc độ của dòng khí nhờ lực ly tâm, sau đó thực hiện quá trình hãm dòng để biến động năng của dòng thành thế năng. 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 pít tông.

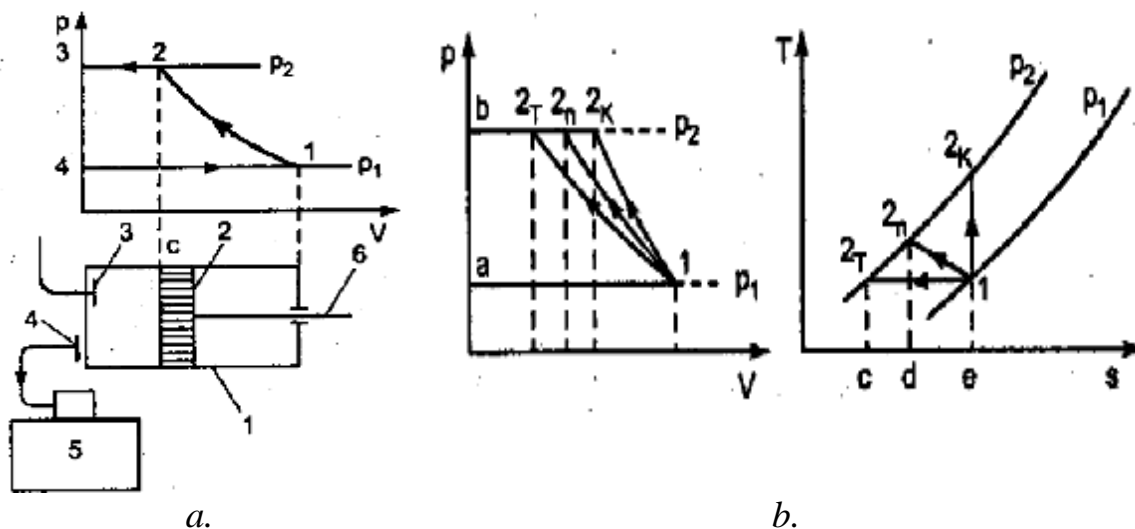
b. Máy nén pít tông một cấp lý tưởng.

Khi phân tích quá trình nhiệt động trong máy nén pít tông một cấp lý tưởng, ta giả thiết:

- Toàn bộ thể tích xy lanh là thể tích có ích, nghĩa là đỉnh pít tông có thể áp sát nắp xy lanh.

- Dòng khí chuyển động không có ma sát, nghĩa là áp suất hút khí vào xy lanh luôn bằng áp suất môi trường p_1 và áp suất đẩy khí vào bình chứa luôn bằng áp suất khí trong bình chứa p_2 .

Nguyên lý cấu tạo của máy nén pít tông một cấp được biểu diễn trên hình 3.7, gồm các bộ phận chính: Xylanh 1, pít tông 2, van hút 3, van xả 4, bình chứa 5.



Hình 3.7 Các quá trình trong máy nén khí một cấp lý tưởng.

- Những quá trình trong máy nén pít tông một cấp lý tưởng.

+ Quá trình nạp khí 4-1:

Khi pít tông từ điểm tận cùng của đáy xy lanh phía trái 4 bắt đầu dịch chuyển sang phải thì van nạp mở và khí có trạng thái (p_1, t_1) được hút vào xy lanh. Quá trình hút kết thúc khi pít tông đến điểm 1 (điểm chết). Trong quá trình nạp 4-1 trạng thái của khí không đổi mà chỉ thay đổi đồng thời khối lượng G và thể tích V . Trạng thái đó trên đồ thị chỉ thị p - V được biểu diễn bằng điểm 1. Như vậy, quá trình nạp không phải là quá trình nhiệt động.

+ Quá trình nén 1-2:

Từ điểm chết phải 1 pít tông bắt đầu dịch chuyển sang trái. Khi đó cả van nạp và van đẩy đều đóng nên thể tích khí giảm và áp suất khí tăng từ p_1 đến p_2 . Quá trình nén có thể thực hiện theo đường đẳng nhiệt 1-2_T, đoạn nhiệt 1-2_k hay đa biến 1-2_n.

Quá trình nén đẳng nhiệt 1-2_T ($n = 1$): từ đồ thị p - V trên hình 3.7 có thể thấy công nén trong quá trình đẳng nhiệt là công nhỏ nhất (bằng diện tích phần a12_Tb). Tuy nhiên để thực hiện được quá trình nén đẳng nhiệt ta phải làm mát hệ thống vì khi nén nhiệt độ khí tăng lên. Vì vậy, trong thực tế, để giảm công

tiêu hao máy nén bao giờ cũng được làm mát để *quá trình nén là đẳng nhiệt* hay chính xác hơn là gần với đẳng nhiệt.

Quá trình nén đoạn nhiệt 1-2_k (n = k): trường hợp này *công tiêu hao là lớn nhất* và trên đồ thị p-V biểu diễn bởi diện tích a12_kb. Vì vậy trong kỹ thuật, máy nén không bao giờ cách nhiệt mà ngược lại luôn cố gắng làm mát tối đa.

Quá trình nén đa biến 1-2_n (1 < n < k): đây là quá trình nén trong thực tế, công tiêu hao trong trường hợp này biểu diễn bởi diện tích a12_nb.

+ Quá trình đẩy khí nén vào bình chứa.

Khi khí đạt đến trạng thái 2 có áp suất p₂ theo yêu cầu thì van đẩy mở và pít tông tiếp tục dịch chuyển sang trái, khí được đưa vào bình chứa 5. Tương tự quá trình nạp, quá trình đẩy khí 2-3 không phải là quá trình nhiệt động, trạng thái của nó không đổi và được biểu diễn bởi điểm 2 với cặp thông số (p₂, t₂).

c. *Máy nén pít tông một cấp thực.*

Trong máy nén thực không thể cho đỉnh pít tông dịch chuyển đến tận cùng của đáy xy lanh như trong máy nén lý tưởng mà giữa đáy xy lanh và đỉnh pít tông phải có một khoảng cách nhất định để pít tông không đập vỡ đáy xy lanh. *Thể tích khoảng này gọi là thể tích thừa V_t.*

Do có thể tích thừa nên sau khi quá trình đẩy khí nén vào bình chứa kết thúc ở áp suất p₂ và pít tông bắt đầu dịch chuyển từ điểm chết trái sang điểm chết phải thì trước hết, lượng khí trong thể tích thừa ở trạng thái 3 giãn nở từ áp suất p₂ xuống áp suất p₁ đến trạng thái 4 theo quá trình 3-4. Khi áp suất trong xy lanh bằng p₁ van nạp mới mở và khí ngoài môi trường mới được hút vào trong xy lanh theo quá trình 4-1. Do đó lượng khí hút được V của một hành trình pít tông không phải bằng V₁ như trong máy nén lý tưởng nữa mà V = V₁ - V₄. Rõ ràng V < V₁ nên năng suất của máy nén thực nhỏ hơn năng suất của máy nén lý tưởng, nói cách khác, thể tích thừa đã làm giảm lượng khí hút vào của máy nén.

Hiệu suất thể tích I_t: để đánh giá ảnh hưởng của thể tích thừa người ta đưa ra khái niệm hiệu suất thể tích λ_t: *hiệu suất thể tích là tỷ số giữa thể tích khí hút được V và thể tích ứng với một hành trình của pít tông V_h*, hay:

$$\lambda_t = \frac{V}{V_h} \quad (3-74)$$

3.5 QUÁ TRÌNH HỖN HỢP CỦA KHÍ VÀ HƠI (KHÔNG KHÍ ẨM).

3.5.1 Khái niệm, tính chất và phân loại.

a. *Khái niệm*: không khí ẩm (khí quyển) là một hỗn hợp gồm không khí khô và hơi nước.

b. *Tính chất*:

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 20mmHg), do đó ở nhiệt độ bình thường thì hơi nước trong không 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:

$$T = T_{kk} = T_h \quad (3-75)$$

Áp suất không khí ẩm:

$$p = p_{kk} = p_h \quad (3-76)$$

Thể tích V:

$$V = V_{kk} + V_h \quad (3-77)$$

Khối lượng G:

$$G = G_{kk} + G_h \quad (3-78)$$

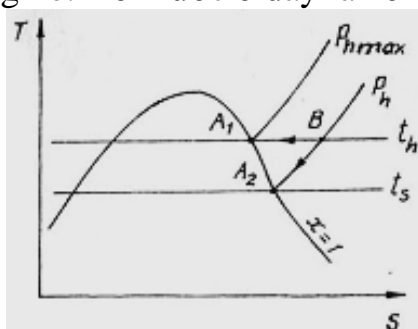
c. Phân loại không khí ẩm.

Tùy theo lượng hơi nước chứa trong không khí ẩm, ta chia chúng ra 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.

- 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.



Hình 3.8 Đồ thị T-s của hơi nước.

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 $p_{h\text{max}}$ (quá trình BA₁). áp suất $p_{h\text{max}}$ 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 BA₂). Nhiệt độ đọng sương t_s là nhiệt độ tại đó hơi ngưng tụ lại thành nước.

3.5.2 Các đại lượng đặc trưng.

a. *Độ ẩm tuyệt đối*: độ ẩm tuyệt đối là khối lượng hơi nước chứa trong 1m³ không khí ẩm. Đây cũng chính là khối lượng riêng của hơi nước trong không khí ẩm.

$$\rho_h = \frac{G_h}{V}, [\text{kg/m}^3] \quad (3-79)$$

b. *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 $\rho_{h\text{max}}$ ở cùng nhiệt độ.

$$\phi = \frac{\rho_h}{\rho_{h\text{max}}} \quad (3-80)$$

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

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

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

Chia (a) cho (b) ta được:

$$\phi = \frac{\rho_h}{\rho_{h\text{max}}} = \frac{p_h}{p_{h\text{max}}} \quad (3-81)$$

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

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

c. *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.

$$d = \frac{G_h}{G_k}, [\text{kg hơi nước/kg không khí khô}] \quad (3-82)$$

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

$$G_h = \text{---} \quad \text{và} \quad G_k = \text{---}$$

thay thế các giá trị G vào (3-82) ta được:

$$d = \text{---} = \text{---} \quad \text{---}; \quad [\text{kg hơi nước/kg không khí khô}] \quad (3-83)$$

d. 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 kỹ 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 :

$$i = i_k + d \cdot i_h; \quad [\text{kJ/kgK}] \quad (3-84)$$

Trong đó:

i_k - entanpi của 1kg không khí khô; $i_k = C_{pk}t$, mà $C_{pk} = 1\text{kJ/kgK}$ vì 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 $i_h = 2500 + C_{ph}t = 2500 + 1,9t$;

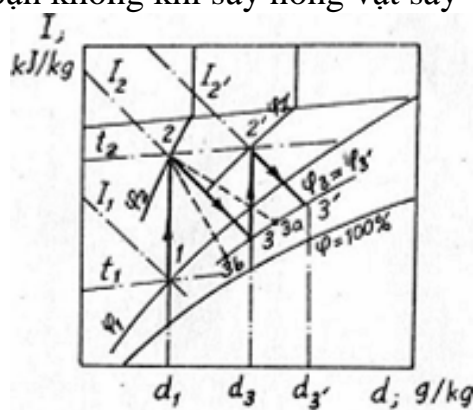
Cuối cùng ta có: $I = t + d(2500 + 1,9t)$; (kJ/kgK).

3.5.3 Các quá trình của không khí ẩm.

a. 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 hoà 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.

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.



Hình 3.9 Quá trình sấy.

Quá trình sấy được biểu diễn trên hình 3.9. 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 :

$$G_n = d_3 - d_1; [\text{kgH/kgK}] \quad (3-85)$$

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

$$G_k = 1/(d_3 - d_1); [\text{kgH/kgK}] \quad (3-86)$$

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

$$G = (1 + d_1)G_k \quad (3-87)$$

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

$$q = i_2 - i_1; [\text{kJ/kgK}] \quad (3-88)$$

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

$$Q = g_k q = (i_2 - i_1)/(d_3 - d_2); [\text{kJ/kgH}] \quad (3-89)$$

b. Quá trình điều hòa không khí.

Thực chất của quá trình điều hòa không khí là sấy nóng và làm lạnh không khí, đồng thời điều chỉnh độ ẩm của nó đến một giá trị nào đó trước khi đưa không khí vào phòng.

Điều hòa không khí gồm các quá trình lọc bụi, hỗn hợp không khí mới với không khí trong phòng, tăng hoặc giảm độ ẩm, nhiệt độ cho phù hợp với yêu cầu của môi trường sống hoặc để bảo quản vật tư, thiết bị.

CHƯƠNG 4. CHU TRÌNH NHIỆT ĐỘNG CỦA ĐỘNG CƠ NHIỆT.

Mã số chương: MH 14 - 04

Giới thiệu:

Chu trình nhiệt động của động cơ nhiệt (động cơ ô tô) là chu trình thuận chiều. Vì vậy, các kiến thức chương này sẽ giúp người học giải thích và phân tích sâu hơn về quá trình hoạt động trong động cơ của xe ô tô.

Mục tiêu:

- Phát biểu đúng khái niệm, yêu cầu và phân loại của chu trình nhiệt động.
- Giải thích được sơ đồ cấu tạo và nguyên lý hoạt động của chu trình thuận chiều (động cơ nhiệt).
- Nhận dạng được cấu tạo và nguyên lý hoạt động của động cơ nhiệt dùng trên xe ô tô.
- Tuân thủ đúng quy định, quy phạm về lĩnh vực nhiệt kỹ thuật.

Nội dung chính:

4.1 KHÁI NIỆM VÀ YÊU CẦU.

4.1.1 Khái niệm: chu trình nhiệt động là các quá trình khép kín.

- Quá trình nhiệt động: là quá trình biến đổi trạng thái của hệ nhiệt động. Trong quá trình nhiệt động phải có ít nhất một thông số trạng thái thay đổi.

Điều kiện để có sự thay đổi trạng thái nhiệt động là có sự trao đổi nhiệt hoặc công với môi trường xung quanh.

- Quá trình nhiệt động cơ bản: là quá trình nhiệt động, trong đó có ít nhất một thông số trạng thái hoặc thông số nhiệt động của môi chất công tác không thay đổi.

- Quá trình cân bằng: là quá trình trong đó môi chất công tác biến đổi qua các thông số trạng thái cân bằng. Quá trình cân bằng được biểu diễn bằng một đường cong trên các hệ trục tọa độ trạng thái, trong đó các trục thể hiện các thông số trạng thái độc lập.

- Quá trình thuận nghịch: là quá trình cân bằng và có thể biến đổi ngược lại để trở về trạng thái ban đầu mà hệ nhiệt động và môi trường xung quanh không có sự thay đổi gì. Ngược lại, khi các điều kiện trên không đạt được thì đó là quá trình không thuận nghịch. Mọi quá trình thực trong tự nhiên đều là những quá trình không thuận nghịch. Trong kỹ thuật, nếu một quá trình được thực hiện càng gần với quá trình thuận nghịch thì càng có lợi về công và nhiệt.

Biểu diễn chu trình nhiệt động: chu trình nhiệt động thường được biểu diễn trên các hệ trục tọa độ trạng thái. Tùy thuộc mục đích nghiên cứu, các trục của hệ trục tọa độ trạng thái là các thông số trạng thái khác nhau. Đường biểu diễn chu trình nhiệt động trên hệ trục $p - V$ được gọi là *đồ thị công*, đường biểu diễn trên hệ trục $T - s$ được gọi là *đồ thị nhiệt*.

4.1.2 Yêu cầu.

Để nghiên cứu các quá trình của chu trình nhiệt động, ta giả thiết:

- Môi chất là khí lý tưởng và đồng nhất.
- Các quá trình xảy ra đều là thuận nghịch.
- Quá trình cháy là quá trình cấp nhiệt, quá trình thải sản phẩm cháy là quá trình nhả nhiệt.
- Công trong quá trình nạp môi chất và quá trình thải sản phẩm cháy triệt tiêu lẫn nhau và biến hệ ở đây thành hệ kín.

4.2 PHÂN LOẠI CHU TRÌNH NHIỆT ĐỘNG.

Dựa vào các khái niệm các quá trình nêu trên chu trình nhiệt động được phân loại thành:

- Chu trình nhiệt động thuận nghịch: là chu trình mà trong đó tất cả các quá trình đều thuận nghịch.
- Chu trình thuận chiều: là chu trình biến đổi nhiệt thành công.
- Chu trình ngược chiều: là chu trình biến đổi công thành nhiệt.

Sau đây sẽ nghiên cứu một số chu trình nhiệt động cơ bản trong thực tế.

4.2.1 Chu trình động cơ đốt trong.

a. Chu trình cấp nhiệt hỗn hợp.

Trong chu trình cấp nhiệt hỗn hợp, nhiên liệu sẽ được bơm cao áp nén đến áp suất cao, phun vào xy lanh ở dạng sương mù. Trong xy lanh không khí sẽ đã được nén đến áp suất và nhiệt độ cao, vào xy lanh gặp không khí nhiên liệu sẽ tự bốc cháy ngay. Quá trình cháy gồm hai giai đoạn: giai đoạn đầu cháy đẳng tích, giai đoạn sau cháy đẳng áp. Chu trình cháy lý tưởng của động cơ đốt trong cấp nhiệt hỗn hợp được trình bày trên hình 4.1. Chu trình gồm:

1-2 là quá trình nén đoạn nhiệt.

2-2' là quá trình cấp nhiệt đẳng tích, môi chất nhận nhiệt lượng q_1' .

2'-3 là quá trình cấp nhiệt đẳng áp, môi chất nhận nhiệt lượng q_1'' .

3-4 là quá trình giãn nở đoạn nhiệt.

4-1 là quá trình nhả nhiệt đẳng tích, nhả nhiệt lượng q_2 .

+ Các đại lượng đặc trưng cho chu trình:

- Thông số trạng thái đầu: p_1, T_1 .

- Tỷ số nén: $\epsilon = \frac{v_1}{v_2}$ (4-1)

- Tỷ số tăng áp: $\lambda = \frac{p_3}{p_2}$ (4-2)

- Hệ số giãn nở sớm: $\rho = \frac{v_3}{v_2'}$ (4-3)

+ Hiệu suất của chu trình: $\eta_{ct} = \frac{q_1 - |q_2|}{q_1}$ (4-4)

Trong đó:

q_1 là nhiệt lượng chu trình nhận được từ quá trình cháy nhiên liệu, gồm:

q_1' là nhiệt lượng nhận được từ quá trình cháy đẳng tích 2-2',

q_1'' là nhiệt lượng nhận được từ quá trình cháy đẳng áp 2'-3,

vậy: $q_1 = q_1' + q_1''$,

q_2 là nhiệt lượng cho nguồn lạnh trong quá trình nở nhiệt đẳng tích 4-1, Từ đó ta có hiệu suất của chu trình là:

$$\eta_{ct} = \frac{q_1 - q_2}{q_1} \quad (4-5)$$

vì 2-2' là quá trình cấp nhiệt đẳng tích, nên $q_1' = C_v(T_2' - T_2)$.

vì 2'-3 là quá trình cấp nhiệt đẳng áp, $q_1'' = C_p(T_3 - T_2')$.

vì 4-1 là quá trình nở nhiệt đẳng tích, nên $q_2 = C_v(T_4 - T_1)$.

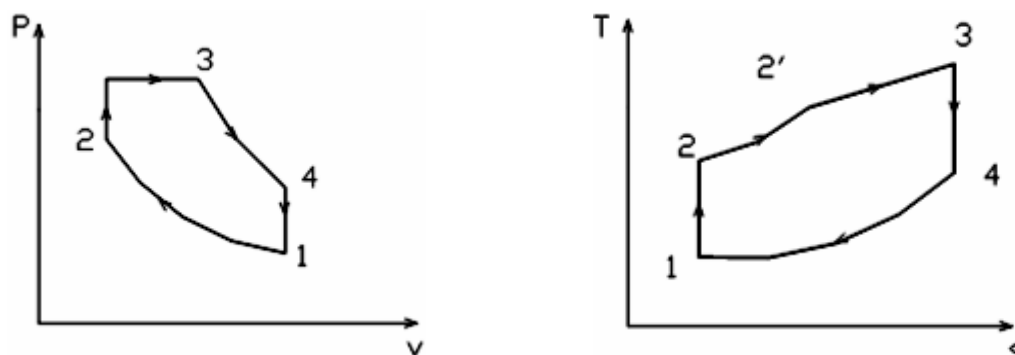
Thay các giá trị của q_1' , q_1'' và q_2 vào (4-5) ta được:

$$\eta_{ct} = 1 - \frac{C_v(T_4 - T_1)}{C_v(T_2' - T_2) + C_p(T_3 - T_2')} \quad (4-6a)$$

$$\eta_{ct} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_2' - T_2 + \gamma(T_3 - T_2')} \quad (4-6b)$$

Dựa vào đặc điểm quá trình của các chu trình, ta tiếp tục biến đổi để có thể tính hiệu suất của chu trình theo nhiệt độ đầu T_1 và các đại lượng đặc trưng cho chu trình ta có:

$$\eta_{ct} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_2' - T_2 + \gamma(T_3 - T_2')} \quad (4-7)$$

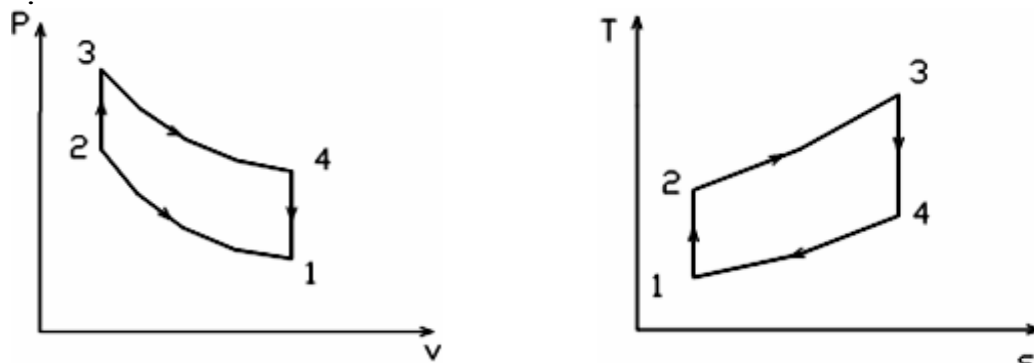


Hình 4.1 Chu trình cấp nhiệt hỗn hợp trên đồ thị p-V và T-s.

b. Chu trình cấp nhiệt đẳng tích.

Ở chu trình cấp nhiệt đẳng tích, nhiên liệu (xăng) và không khí được hỗn hợp trước ở ngoài xy lanh. Sau đó hỗn hợp nhiên liệu và không khí được nạp vào xy lanh và nén đoạn nhiệt đến áp suất và nhiệt độ cao (được biểu diễn bằng đoạn 1-2) nhưng vẫn thấp hơn nhiệt độ tự bốc cháy của nó nên nó không tự bốc cháy được. Quá trình cháy xảy ra nhờ bugi bật tia lửa điện, quá trình cháy (được biểu diễn bằng đoạn 2-3) xảy ra rất nhanh làm cho áp suất trong xy lanh tăng vọt lên trong khi xy lanh chưa kịp dịch chuyển, thể tích hỗn hợp khí trong xy lanh không đổi, vì vậy quá trình này có thể coi là quá trình cháy đẳng tích. Sau đó sản phẩm cháy giãn nở, đẩy piston dịch chuyển và sinh công. Quá trình giãn nở này được coi là đoạn nhiệt, (được biểu diễn bằng đoạn 3-4). Cuối cùng là quá trình thải sản phẩm cháy ra ngoài (được biểu diễn bằng

đoạn 4-1), đây cũng là quá trình đẳng tích. Các quá trình lặp lại như cũ, thực hiện chu trình mới.



Hình 4.2 Chu trình cấp nhiệt đẳng tích.

Đây chính là chu trình động cơ ô tô chạy xăng hay còn gọi là động cơ cháy cưỡng bức nhờ bugi đánh lửa. Đồ thị thay đổi trạng thái của môi chất được biểu diễn trên hình 4.2.

Từ công thức tính hiệu suất của chu trình cấp nhiệt hỗn hợp (4-7), ta thấy:

Nếu chu trình cấp nhiệt hỗn hợp có $\rho = 1$, tức là $v_2' = v_2 = v_3$, như vậy quá trình cấp nhiệt chỉ còn giai đoạn cháy đẳng tích 2-3, khi đó chu trình cấp nhiệt hỗn hợp trở thành chu trình cấp nhiệt đẳng tích.

Khi đó thay $\rho = 1$ vào công thức (4-7) ta được hiệu suất chu trình cấp nhiệt đẳng tích:

$$\eta_{ct} = 1 - \frac{v_1}{v_2} \left(\frac{v_3}{v_2} \right)^\epsilon \quad (4-8)$$

Như vậy hiệu suất nhiệt chu trình cấp nhiệt đẳng tích chỉ phụ thuộc vào tỷ số nén ϵ .

c. Chu trình cấp nhiệt đẳng áp.

Nếu chu trình cấp nhiệt hỗn hợp có $\lambda = 1$, tức là $p_2' = p_2 = p_3$, nghĩa là quá trình cấp nhiệt chỉ còn giai đoạn cháy đẳng áp 2-3, khi đó chu trình cấp nhiệt hỗn hợp trở thành chu trình cấp nhiệt đẳng áp. Ở chu trình này, không khí được nén đoạn nhiệt đến áp suất và nhiệt độ cao, đến cuối quá trình nén nhiên liệu được phun vào xy lanh dưới dạng sương mù, pha trộn với không khí tạo nên hỗn hợp cháy và sẽ tự bốc cháy.

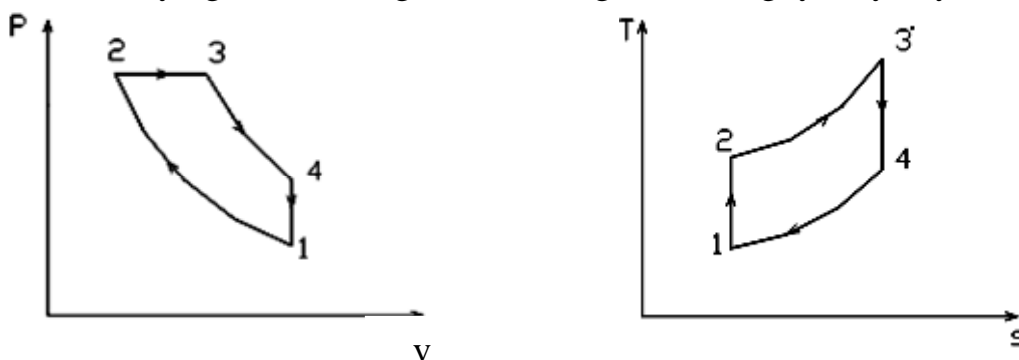
Khi đó thay $\lambda = 1$ vào công thức (4-7) ta được hiệu suất chu trình cấp nhiệt đẳng áp:

$$\eta_{ct} = 1 - \frac{v_1}{v_2} \left(\frac{v_3}{v_2} \right)^\epsilon \quad (4-9)$$

Như vậy hiệu suất nhiệt chu trình cấp nhiệt đẳng tích chỉ phụ thuộc vào tỷ số nén ϵ và tỷ số giãn nở sớm ρ .

Quá trình thay đổi trạng thái của môi chất trong chu trình được biểu diễn trên đồ thị p-v và T-s hình 4.3.

Hiện nay người ta không chế tạo động cơ theo nguyên lý này nữa.



Hình 4.3 Chu trình cấp nhiệt đẳng áp.

d. Nhận xét.

- Hiệu suất nhiệt của chu trình động cơ cấp nhiệt hỗn hợp phụ thuộc vào k .
- Động cơ cấp nhiệt đẳng áp và cấp nhiệt hỗn hợp có thể làm việc với tỷ số nén rất cao. Tuy nhiên khi đó chiều dài xy lanh cũng sẽ phải tăng lên và gặp khó khăn trong vấn đề chế tạo, đồng thời tổn thất ma sát của động cơ sẽ tăng và làm giảm hiệu suất của nó.
- Trong động cơ cấp nhiệt đẳng tích quá trình cháy là cưỡng bức (nhờ bugi), nếu ϵ tăng cao quá trị số giới hạn thì hỗn hợp cháy sẽ tự bốc cháy khi bugi chưa đánh lửa, sẽ ảnh hưởng xấu đến chế độ làm việc bình thường của động cơ. Ngoài ra khi tỷ số nén lớn thì tốc độ cháy có thể tăng lên một cách đột ngột gây ra hiện tượng kích nổ (vì hỗn hợp nén là hỗn hợp cháy) phá hỏng các chi tiết động cơ. Vì vậy tỷ số nén cần được lựa chọn phù hợp với từng loại nhiên liệu.

e. So sánh hiệu suất nhiệt của chu trình động cơ đốt trong.

Để đánh giá hiệu suất nhiệt của động cơ đốt trong làm việc theo các chu trình khác nhau, ta so sánh các chu trình với các điều kiện sau:

- Khi có cùng tỉ số nén ϵ và nhiệt lượng q_1 cấp vào cho chu trình:

Trên đồ thị $T-s$ hình 4.4 biểu diễn 3 chu trình: $123v_4v_1$ là chu trình cấp nhiệt đẳng tích, $122'341$ là chu trình cấp nhiệt hỗn hợp và $123p_4p_1$ chu trình cấp nhiệt đẳng áp. Ba chu trình này có cùng tỷ số nén ϵ và nhiệt lượng q_1 , nghĩa là cùng v_1, v_2 và các diện tích $a23_vd$; $a22'3c$ và $a23_p b$ bằng nhau. Từ (4-4) ta thấy: các chu trình có cùng q_1 , chu trình nào có q_2 nhỏ hơn sẽ có hiệu suất nhiệt cao hơn.

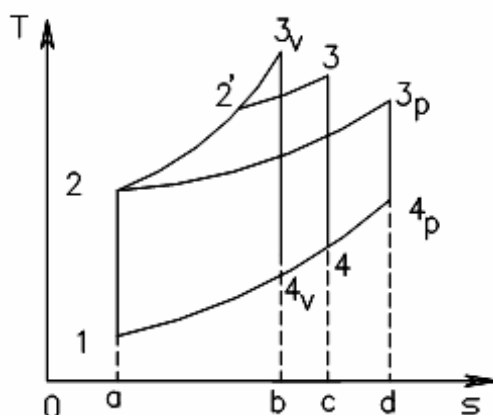
q_2 của chu trình cấp nhiệt đẳng tích bằng diện tích $a14_v b$ là nhỏ nhất.

q_2 của chu trình cấp nhiệt đẳng áp bằng diện tích $a14_p d$ là lớn nhất.

q_2 của chu trình cấp nhiệt hỗn hợp bằng diện tích $a14_c$ có giá trị trung gian so với hai chu trình kia.

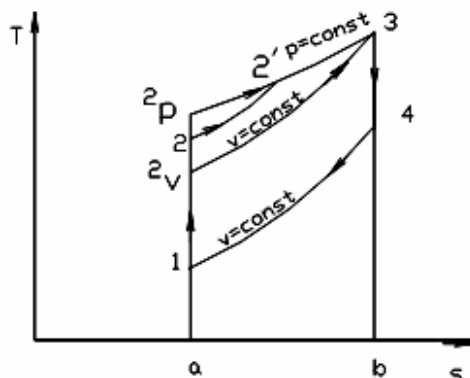
Vậy hiệu suất của chu trình cấp nhiệt đẳng tích là lớn nhất và hiệu suất của chu trình cấp nhiệt đẳng áp là nhỏ nhất:

$$\eta_{ctv} > \eta_{ct} > \eta_{ctp} \quad (4-10)$$



Hình 4.4 So sánh các chu trình khí có cùng e và q_1 .

-Khi có cùng áp suất và nhiệt độ lớn nhất và nhỏ nhất:



Hình 4.5 So sánh các chu trình khí có cùng T_{max} và p_{max} .

Ở đây ta so sánh hiệu suất nhiệt của chu trình cùng nhận một nhiệt lượng q_2 giống nhau, cùng làm việc với ứng suất nhiệt như nhau (cùng T_{max} và p_{max}). Với cùng điều kiện đó, các chu trình được biểu diễn trên đồ thị T-s hình 4.5. 12_p34 là chu trình cấp nhiệt đẳng áp; $122'341$ là chu trình cấp nhiệt hỗn hợp và 12_v34 chu trình cấp nhiệt đẳng tích. Trên đồ thị, ba chu trình này có cùng p_1 , T_1 và cùng p_3 , T_3 nghĩa là cùng nhận ra một lượng nhiệt q_2 (diện tích $14ab$) trong đó: nhiệt lượng q_1 cấp vào cho chu trình cấp nhiệt đẳng áp bằng diện tích $a2_p3b$ là lớn nhất, nhiệt lượng q_1 cấp vào cho chu trình cấp nhiệt đẳng tích bằng diện tích $a2_v3b$ là nhỏ nhất.

Vậy theo (4-4) ta thấy hiệu suất của chu trình cấp nhiệt đẳng áp là lớn nhất và hiệu suất của chu trình cấp nhiệt đẳng tích là nhỏ nhất:

$$\eta_{ctp} > \eta_{ct} > \eta_{ctv} \quad (4-11)$$

Giới hạn trên của p_3 , T_3 phụ thuộc vào sức bền các chi tiết của động cơ.

4.2.2 Chu trình tua-bin khí.

Ưu điểm của động cơ đốt trong là có hiệu suất cao. Tuy nhiên, động cơ đốt trong có cấu tạo phức tạp vì phải có cơ cấu để biến chuyển động thẳng

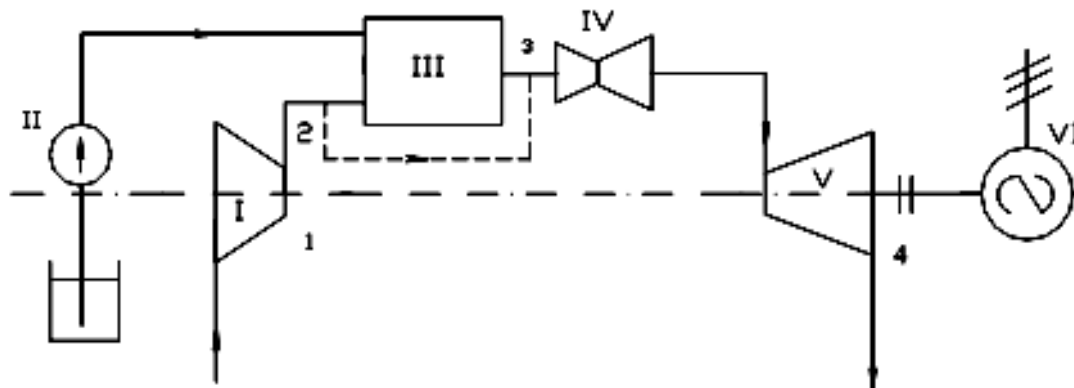
thành chuyển động quay, nên công suất bị hạn chế. Để khắc phục các nhược điểm trên, người ta dùng tua- bin khí. Tua- bin khí cho phép chế tạo với công suất lớn, sinh công liên tục, thiết bị gọn nhẹ nên được sử dụng rộng rãi để kéo máy phát điện, sử dụng trong giao thông vận tải. Dựa vào quá trình cháy của nhiên liệu, có thể chia thành hai loại: tua- bin khí cháy đẳng áp và tua- bin khí cháy đẳng tích.

a. Sơ đồ nguyên lý và nguyên tắc hoạt động của tua- bin khí.

Sơ đồ thiết bị và nguyên lý hoạt động của tua- bin khí được biểu diễn trên hình 4.6. Không khí được nén đoạn nhiệt trong máy nén khí I, phần lớn được đưa vào buồng đốt III, một phần nhỏ được đưa ra phía sau buồng đốt để hoà trộn với sản phẩm cháy nhằm làm giảm nhiệt độ sản phẩm cháy trước khi vào tua- bin.

Nhiên liệu được bơm hoặc máy nén II đưa vào buồng đốt III.

Nhiên liệu và không khí được sẽ tạo thành hỗn hợp cháy và cháy trong buồng đốt III. Sản phẩm cháy có áp suất và nhiệt độ cao (khoảng 1300-1500⁰C) được pha trộn với không khí trích từ máy nén, tạo thành hỗn hợp có nhiệt độ có nhiệt độ khoảng 900-1100⁰C. Sau đó, sản phẩm cháy được đưa qua ống tăng tốc IV, tốc độ sẽ tăng lên và đi vào tua- bin, biến động năng thành cơ năng trên cánh tua- bin, làm quay tuốc bin kéo máy phát quay theo. Sản phẩm cháy sau khi ra khỏi tua- bin được thải ra môi trường.



Hình 4.6 Sơ đồ nguyên lý tua- bin khí.

Quá trình cháy có thể là:

- Cháy đẳng áp $p = \text{const}$. ở đây môi chất vào và ra khỏi buồng đốt một cách liên tục, cấu tạo buồng đốt đơn giản.
- Cháy đẳng tích $v = \text{const}$. Ở đây khi cháy, các van của buồng đốt phải đóng lại để tích hỗn hợp không đổi, nhằm thực hiện quá trình cháy đẳng tích, do đó sản phẩm cháy ra khỏi buồng đốt không liên tục. Muốn sản phẩm cháy vào và ra khỏi buồng đốt một cách liên tục thì cần có nhiều buồng đốt, do đó cấu tạo phức tạp và tổn thất qua các van cũng lớn. Vì vậy, trong thực tế người ta thường chế tạo tua- bin cháy đẳng áp.

b. Chu trình tua- bin khí cấp nhiệt đẳng áp.

Chu trình tua - bin khí cấp nhiệt đẳng áp được biểu diễn trên đồ thị p-v và T-s hình 4.7.

+ 1 - 2 là quá trình nén đoạn nhiệt môi chất trong buồng đốt.

+ 2 - 3 là quá trình cấp nhiệt đẳng áp trong buồng đốt.

+ 3 - 4 là quá trình giãn nở đoạn nhiệt trong ống tăng tốc (trong tua- bin)

+ 4 - 1 là quá trình nhả nhiệt đẳng áp (thải sản phẩm cháy).

- Tỷ số nén:

$$\beta = \frac{p_3}{p_2} = \frac{p_4}{p_1} \quad (4-12)$$

- Hệ số giãn nở sớm trong quá trình cấp nhiệt:

$$\rho = \frac{v_3}{v_2} = \frac{v_4}{v_1} \quad (4-13)$$

- Hiệu suất của chu trình:

$$\eta_{ct} = \frac{q_1 - q_2}{q_1} \quad (4-14)$$

Trong đó:

q_1 là nhiệt lượng sinh ra trong quá trình cháy đẳng áp;

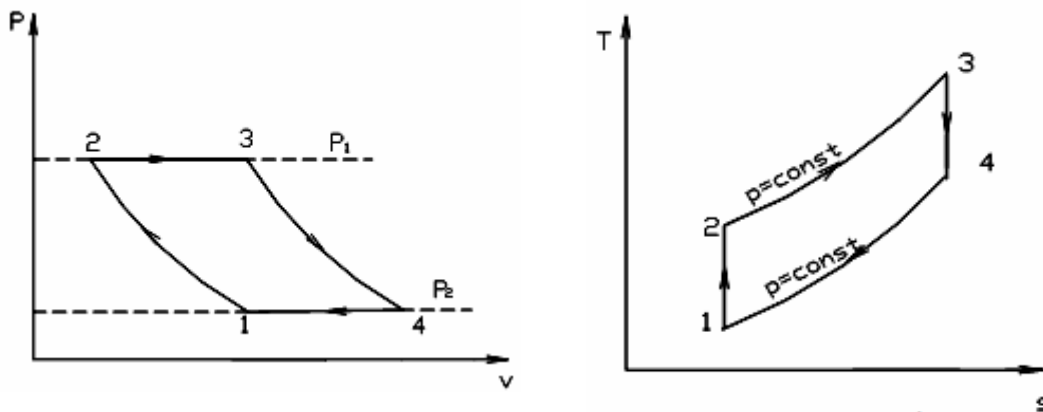
$$q_1 = q_{23} = C_p(T_3 - T_2).$$

q_2 là nhiệt lượng thải ra môi trường trong quá trình 41;

$$q_2 = C_p(T_4 - T_1).$$

Từ đó ta có hiệu suất của chu trình là:

$$\eta_{ct} = \frac{T_3 - T_2}{T_3 - T_2 - T_4 + T_1}$$



Hình 4.7 Đồ thị p-v và T-s của tua- bin khí cấp nhiệt đẳng áp.

Tương tự như đối với chu trình động cơ đốt trong, thay các giá trị vào ta được:

$$\eta_{ct} = \frac{\beta^k - 1}{\beta^k - \rho^k} \quad (4-15)$$

Ta thấy hiệu suất nhiệt của chu trình tua bin khí cấp nhiệt đẳng áp phụ thuộc vào β và k . Khi tăng β và k thì hiệu suất nhiệt của chu trình sẽ tăng và ngược lại.

4.2.3 Chu trình động cơ phản lực.

Đối với động cơ đốt trong, muốn có công suất lớn thì kích thước và trọng lượng rất lớn, do đó không thể sử dụng trong kỹ thuật hàng không được. Động cơ phản lực có thể đạt được công suất và tốc độ lớn mà kích thước và trọng lượng thiết bị lại nhỏ, do đó được sử dụng rất nhiều trong kỹ thuật hàng không, trong các tên lửa vũ trụ.

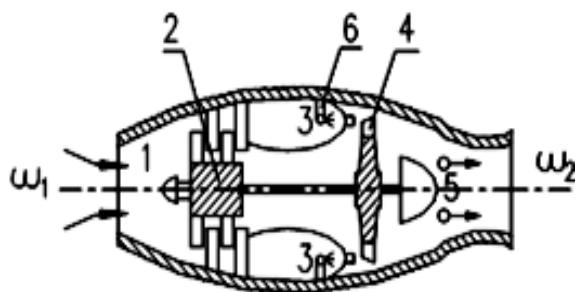
Nguyên lý của động cơ phản lực là: nhiên liệu được đốt cháy, nhiệt năng biến thành động năng của dòng khí, phun qua ống phun ra ngoài với vận tốc lớn, tạo ra phản lực mạnh đẩy thiết bị chuyển động về phía trước.

Động cơ phản lực được chia thành hai loại: động cơ máy bay và động cơ tên lửa.

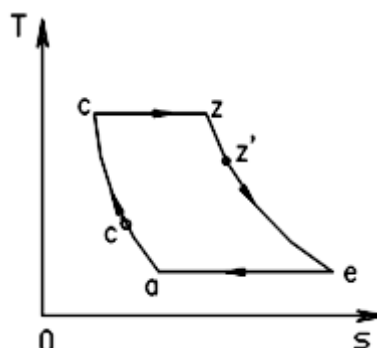
Động cơ máy bay và động cơ tên lửa chỉ khác nhau ở chỗ: Oxy cấp cho máy bay lấy từ không khí xung quanh, còn ở động cơ tên lửa oxy được chứa sẵn dưới dạng lỏng ngay trong động cơ, vì vậy tên lửa có tốc độ lớn hơn và có thể bay trong chân không.

a. Động cơ máy bay.

Việc tăng áp suất không khí trong động cơ máy bay có thể nhờ ống tăng áp, có thể nhờ máy nén. Hiện nay máy bay được chế tạo theo kiểu tăng áp một phần nhờ ống tăng áp, nhưng phần chủ yếu là nhờ máy nén, do đó dưới đây ta chỉ khảo sát loại này.



Hình 4.8 Sơ đồ cấu tạo.



Hình 4.9 Đồ thị T-s.

Sơ đồ cấu tạo của động cơ máy bay có máy nén được biểu diễn trên hình 4.8. Cấu tạo của động cơ gồm các bộ phận chính như sau: ống tăng áp 1, máy nén 2, vòi phun nhiên liệu 3, tua- bin khí 4, ống tăng tốc 5 và buồng đốt 6.

Chu trình của động cơ máy bay được biểu diễn trên hình 4.9, gồm các quá trình:

- + 1-2 là quá trình nén đoạn nhiệt không khí trong ống tăng áp.
- + 2-3 là quá trình nén đoạn nhiệt không khí trong máy nén.
- + 3-4 là quá trình cháy đẳng áp hỗn hợp Không khí-nhiên liệu trong buồng đốt, cấp cho chu trình một lượng nhiệt q_1 .

+ 4-5 là quá trình sản phẩm cháy giãn nở đoạn nhiệt trong tuốc bin khí, sinh công để chạy máy nén,

+ 5-6 là quá trình giãn nở đoạn nhiệt sản phẩm cháy trong ống tăng tốc,

+ 6-1 là quá trình thải sản phẩm cháy đẳng áp, nhả ra môi trường lượng nhiệt q_2 .

Chu trình của động cơ máy bay có máy nén cháy đẳng áp hoàn toàn giống như chu trình tua- bin khí cấp nhiệt đẳng áp. Hiệu suất của chu trình được xác định theo (7-15):

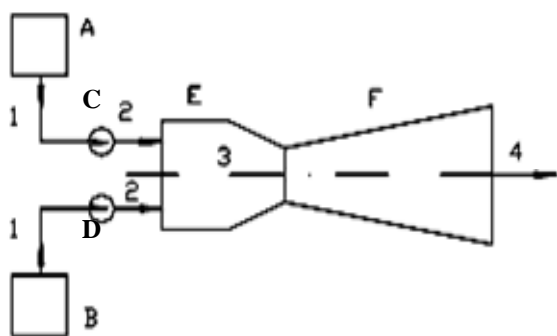
$$\eta_{ct} = \frac{q_1 - q_2}{q_1} \quad (1-16)$$

Ta thấy hiệu suất nhiệt η_{ct} tăng khi β tăng (β là tỷ số tăng áp trong quá trình nén 1-2 cả trong ống tăng tốc lẫn trong máy nén). Rõ ràng là tỷ số β ở đây lớn hơn β ở chu trình động cơ máy bay không có máy nén, động cơ này có hiệu suất so với các động cơ không có máy nén.

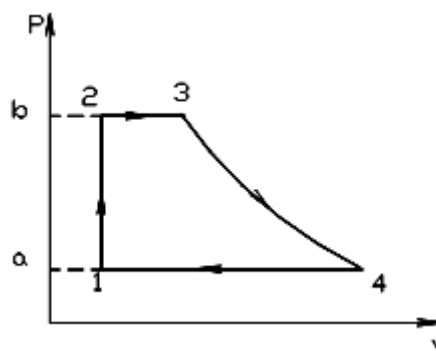
b. Động cơ tên lửa.

Sơ đồ cấu tạo của động cơ tên lửa được biểu diễn trên hình 4.10. Cấu tạo của động cơ gồm các bộ phận chính như sau: Bình chứa nhiên liệu A, bình chứa oxy lỏng B, bơm nhiên liệu C, bơm oxy lỏng D, buồng đốt E và ống tăng tốc F.

Chu trình của động cơ máy bay được biểu diễn trên đồ thị p-v hình 4.11, gồm các quá trình:



Hình 4.10 Sơ đồ nguyên lý.



Hình 4.11 Đồ thị P-v.

+ 1-2 là quá trình nén đoạn nhiệt nhiên liệu và oxy trong bơm (vì chất lỏng không chịu nén nên có thể coi là quá trình đẳng tích).

+ 2-3 là quá trình cháy đẳng áp hỗn hợp Không khí-nhiên liệu trong buồng đốt, cấp cho chu trình một lượng nhiệt q_1 .

+ 3-4 là quá trình giãn nở đoạn nhiệt sản phẩm cháy trong ống tăng tốc.

+ 4-1 là quá trình thải sản phẩm cháy đẳng áp ra môi trường, nhả lượng nhiệt q_2 .

Hiệu suất của chu trình được xác định:

$$\eta_{ct} = \frac{q_1 - q_2}{q_1} \quad (4-17)$$

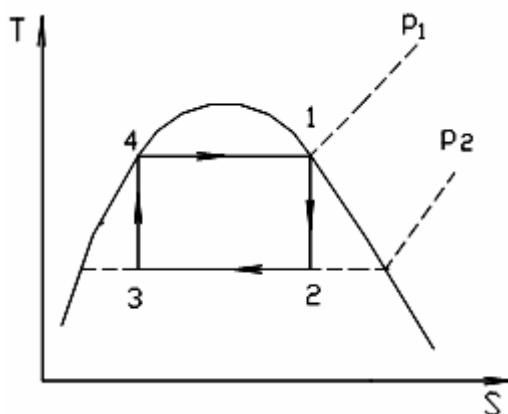
Ở đây công kỹ thuật của quá trình giãn nở đoạn nhiệt 3-4 (bỏ qua công bơm trong quá trình 1-2).

4.2.4 Chu trình nhà máy nhiệt điện.

a. Chu trình các-nô hơi nước.

Chu trình Các - nô thuận chiều là chu trình có hiệu suất nhiệt cao nhất. Về mặt kỹ thuật, dùng khí thực trong phạm vi bão hòa có thể thực hiện được chu trình Các - nô và vẫn đạt được hiệu suất nhiệt lớn nhất khi ở cùng phạm vi nhiệt độ. Chu trình Các - nô áp dụng cho khí thực trong vùng hơi bão hòa được biểu diễn trên hình 4.12. Tuy nhiên, đối với khí thực và hơi nước thì việc thực hiện chu trình Các - nô rất khó khăn, vì những lý do sau đây:

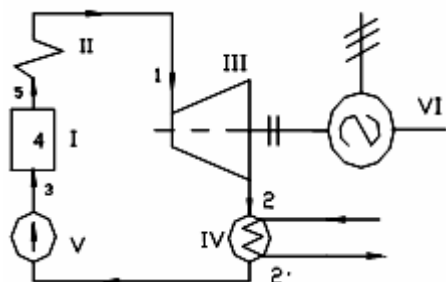
- Quá trình hơi nở nhiệt đẳng áp, ngưng tụ thành nước (quá trình 2-3) sẽ thực hiện không hoàn toàn. Muốn nén đoạn nhiệt hơi ẩm theo quá trình 3-4, cần phải có máy nén kích thước rất lớn và tiêu hao công rất lớn.
- Nhiệt độ tới hạn của nước thấp ($374,15^{\circ}\text{C}$) nên độ chênh nhiệt độ giữa nguồn nóng và nguồn lạnh của chu trình không lớn lắm, do đó công của chu trình nhỏ.
- Các giọt ẩm của hơi sẽ va đập vào cánh tua- bin gây tổn thất năng lượng và ăn mòn và mài mòn nhanh cánh tua- bin.



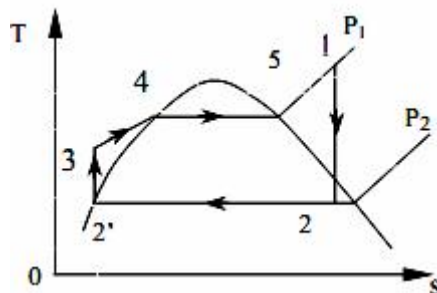
Hình 4.12 Đồ thị T-s chu trình Các - nô hơi nước.

b. Chu trình Rankin (chu trình nhà máy điện).

Như đã phân tích ở trên, tuy có hiệu suất nhiệt cao nhưng chu trình Các - nô có một số nhược điểm khi áp dụng cho khí thực, nên trong thực tế người ta không áp dụng chu trình này mà áp dụng một chu trình cải tiến gần với chu trình này gọi là chu trình Rankin. Chu trình Rankin là chu trình thuận chiều, biến nhiệt thành công.



Hình 4.13 Sơ đồ nguyên lý.



Hình 4.14 Đồ thị T-s.

Chu trình Renkin là chu trình nhiệt được áp dụng trong tất cả các loại nhà máy nhiệt điện, môi chất là nước. Tất cả các thiết bị của các nhà máy nhiệt điện đều giống nhau trừ thiết bị sinh hơi I. Trong thiết bị sinh hơi, nước nhận nhiệt để biến thành hơi.

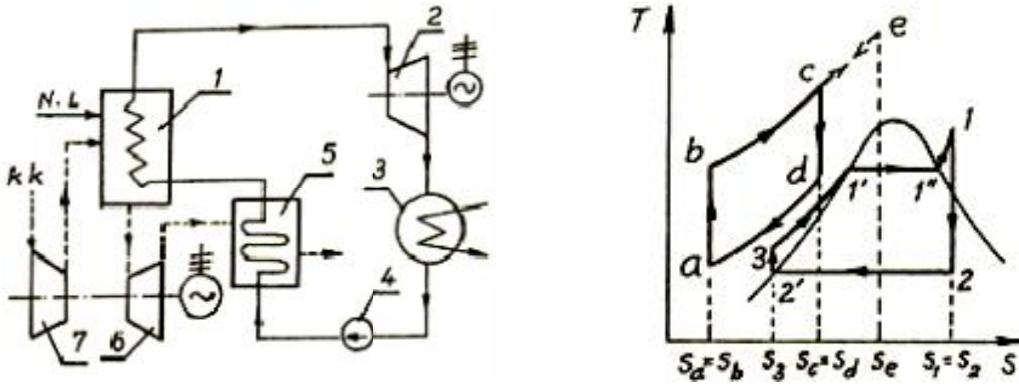
Đối với nhà máy nhiệt điện thiết bị sinh hơi là lò hơi, trong đó nước nhận nhiệt từ quá trình đốt cháy nhiên liệu. Đối với nhà máy điện mặt trời hoặc địa nhiệt, nước nhận nhiệt từ năng lượng mặt trời hoặc từ nhiệt năng trong lòng đất.

Đối với nhà máy điện nguyên tử, thiết bị sinh hơi là thiết bị trao đổi nhiệt, trong đó nước nhận nhiệt từ chất tải nhiệt trong lò phản ứng hạt nhân ra. Sơ đồ thiết bị của chu trình Renkin được trình bày trên hình 4.13. Đồ thị T-s của chu trình được biểu diễn trên hình 4.14.

Nước ngưng trong bình ngưng IV (ở trạng thái 2' trên đồ thị) có thông số p_2, t_2, i_2 , được bơm V bơm vào thiết bị sinh hơi I với áp suất p_1 (quá trình 2'-3). Trong thiết bị sinh hơi, nước trong các ống sinh hơi nhận nhiệt đẳng áp đến sôi (quá trình 3-4), hoá hơi (quá trình 4-5) và thành hơi quá nhiệt trong bộ quá nhiệt II (quá trình 5-1). Quá trình 3-4-5-1 là quá trình hóa hơi đẳng áp ở áp suất $p_1 = \text{const}$. Hơi ra khỏi bộ quá nhiệt II (ở trạng thái 1) có thông số p_1, t_1 đi vào tuốc bin III, ở đây hơi giãn nở đoạn nhiệt đến trạng thái 2 (quá trình 1-2) và sinh công trong tuốc bin. Hơi ra khỏi tuốc bin có thông số p_2, t_2 , đi vào bình ng-ng IV, ngưng tụ thành nước (quá trình 2-2'), rồi lại được bơm V bơm trở về lò. Quá trình nén đoạn nhiệt trong bơm có thể xem là quá trình nén đẳng tích vì nước không chịu nén (thể tích ít thay đổi).

c. Chu trình hỗn hợp tua- bin khí - hơi.

Chu trình hỗn hợp là một chu trình ghép, gồm chu trình Renkin hơi nước và chu trình Tua- bin khí. Sơ đồ thiết bị và đồ thị T-s của chu trình được thể hiện trên hình 4.15. Hệ thống thiết bị bao gồm: thiết bị sinh hơi 1 (buồng đốt); tua- bin hơi nước 2; bình ngưng hơi 3; bơm nước cấp 4; bộ hâm nước 5; tua- bin khí 6 máy nén không khí 7.



Hình 4.15 Sơ đồ nguyên lý và đồ thị T-s.

Nguyên lý làm việc của chu trình thiết bị như sau: Không khí được nén đoạn nhiệt trong máy nén 7 đến áp suất và nhiệt độ cao, được đưa vào buồng đốt 1 cùng với nhiên liệu và cháy trong buồng đốt dưới áp suất cao, không đổi. Sau khi nhả một phần nhiệt cho nước trong dàn ống của buồng đốt 1, sản phẩm cháy đi vào tuốc bin khí 6, giãn nở sinh công. Ra khỏi tuốc bin khí, sản phẩm cháy có nhiệt độ còn cao, tiếp tục đi qua bộ hâm nước 5, gia nhiệt cho nước rồi thải ra ngoài.

Nước được bơm 4 bơm qua bộ hâm nước 5, vào dàn ống của buồng đốt 1. Ở đây nước nhận nhiệt và biến thành hơi quá nhiệt. Hơi quá nhiệt đi vào tuốc bin hơi 2, giãn nở đoạn nhiệt và sinh công. Ra khỏi tuốc bin, hơi đi vào bình ngưng 3 nhả nhiệt đẳng áp, ngưng tụ thành nước rồi được bơm 4 bơm trở về lò, lặp lại chu trình cũ.

Đồ thị T-s của chu trình nhiệt được biểu diễn trên hình 4.15. Nhiệt lượng do nhiên liệu cháy tỏa ra trong quá trình b-e chia thành hai phần: một phần dùng để sản xuất hơi nước trong thiết bị sinh hơi 1, một phần cấp cho tuốc bin khí 6.

- + a-b: quá trình nén đoạn nhiệt không khí trong máy nén khí 7;
- + b-c: quá trình cấp nhiệt (cháy) đẳng áp trong buồng đốt 1;
- + c-d: quá trình giãn nở đoạn nhiệt sinh công trong tuốc bin khí 6;
- + d-a: quá trình nhả nhiệt đẳng áp trong bộ hâm nước 5;
- + 3-1'-1''-1: quá trình nước nhận nhiệt đẳng áp trong bộ hâm 5 và buồng đốt 1;
- + 1-2; 2-2'; 2'-3 là các quá trình giãn nở đoạn nhiệt trong tuốc bin, ngưng đẳng áp trong bình ngưng, nén đoạn nhiệt trong bơm nh- ở chu trình Renkin.

Hiệu suất chu trình là:

$$\eta_{ct} = \frac{L}{Q_{in}} \quad (4-17)$$

Trong đó:

l : công của tua-bin hơi nước và tua-bin khí, $l = l_h + l_k$.

q_1 : nhiệt lượng nhiên liệu tỏa ra khi cháy trong buồng đốt 1.

4.2.5 Chu trình thiết bị làm lạnh (chạy bằng Amoniac, Frêon).

Chu trình thiết bị lạnh chạy là chu trình ngược chiều, nhận nhiệt từ nguồn có nhiệt độ thấp, nhả nhiệt cho nguồn có nhiệt độ cao. Môi chất sử dụng trong các làm thiết bị lạnh thực tế thường là hơi của một số chất lỏng có nhiệt độ sôi thấp ở áp suất bình thường, hệ số tỏa nhiệt lớn, rẻ tiền, không độc hại. Tùy theo phương pháp tăng áp suất của môi chất ta chia ra hai loại: chu trình thiết bị lạnh có máy nén và chu trình thiết bị lạnh hấp thụ (không có máy nén).

a. Chu trình thiết bị lạnh có máy nén.

Môi chất thường dùng trong máy lạnh có máy nén là Amoniac (NH_3) hay Frêon F_{12} , F_{22} (có công thức: $\text{C}_m\text{H}_x\text{F}_y\text{Cl}_z$). Amôniac thường dùng trong máy lạnh công nghiệp để sản xuất nước đá hoặc làm lạnh thực phẩm, vì nhiệt ẩn hoá hơi lớn nên có thể chế tạo với công suất lớn. Frêon thường dùng trong máy lạnh gia đình như tủ kem, tủ lạnh gia đình vì không đòi hỏi công suất lớn, không mùi và không độc hại.

Sơ đồ nguyên lý của máy lạnh có máy nén được thể hiện trên hình 4-16. Hơi môi chất ở trạng thái bão hoà khô từ buồng lạnh IV có áp suất p_1 được máy nén hút vào và nén đoạn nhiệt đến áp suất p_2 , nhiệt độ t_2 . Sau đó đi vào bình ngưng II ngưng tụ đẳng áp ở áp suất p_2 , nhả lượng nhiệt q_1 cho không khí hay nước làm mát. Chất lỏng ngưng tụ từ dàn ngưng II đi qua van tiết lưu III, giảm áp suất từ p_2 xuống p_1 và chuyển từ dạng lỏng sang dạng hơi ẩm. Hơi ẩm tiếp tục đi vào buồng lạnh IV nhận nhiệt lượng q_2 của vật cần làm lạnh ở áp suất $p_1 = \text{const}$ biến thành hơi bão hoà khô và chu trình lặp lại như cũ.

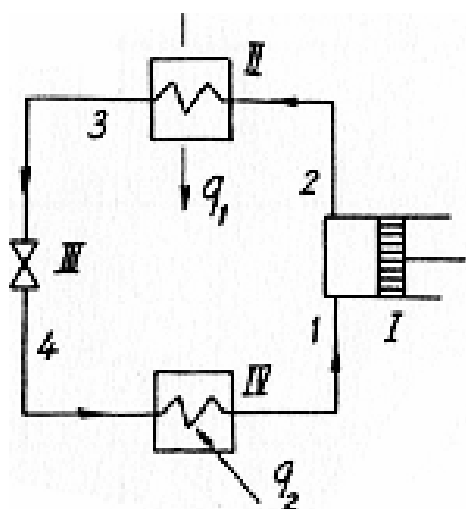
Các quá trình của máy lạnh dùng hơi có máy nén được biểu thị trên đồ thị hình 4-17.

+ 1-2 là quá trình nén đoạn nhiệt trong máy nén, ở quá trình này áp suất tăng từ p_1 đến p_2 .

+ 2-3 là quá trình ngưng tụ đẳng áp ở áp suất $p_2 = \text{const}$, nhả lượng nhiệt q_1 cho không khí hay nước làm mát.

+ 3-4 là quá trình tiết lưu trong van tiết lưu, ở quá trình này áp suất giảm từ p_2 xuống p_1 .

+ 4-1 là quá trình bốc hơi ở dàn bốc hơi trong buồng lạnh, môi chất nhiệt lượng q_2 ở áp suất $p_1 = \text{const}$.



Hình 4.16 Sơ đồ nguyên lý.

- Hệ số làm lạnh:

$$\eta_{ct} = \frac{q_2}{l} = \frac{q_2}{|q_1| - q_2} = \frac{i_1 - i_4}{(i_2 - i_4) - (i_1 - i_5)} \quad (4-36)$$

Vì trong quá trình tiết lưu $i_4 = i_3$, do đó:

Năng suất của máy lạnh:

$$Q_0 = G \cdot q_2 \quad (4-37)$$

Công suất của máy nén:

$$N = G \cdot |l| \quad (4-38)$$

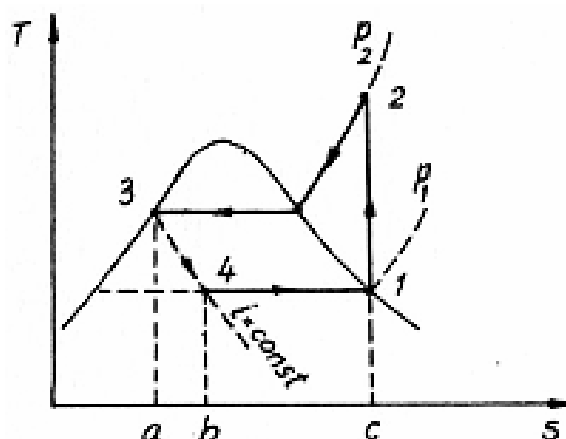
Ở đây: G là lưu lượng môi chất trong chu trình, kg/s.

b. Bơm nhiệt.

Bơm nhiệt còn được gọi là máy điều hoà hai chiều. Bơm nhiệt có thể làm lạnh, hút ẩm và cũng có thể sưởi ấm, hiện được dùng khá phổ biến ở miền Bắc nước ta. Khi dùng với chức năng sưởi ấm, bơm nhiệt sẽ tiết kiệm được điện năng rất nhiều so với dùng lò sưởi điện trở.

Nguyên lý làm việc của bơm nhiệt như sau: Môi chất ở trạng thái bão hoà khô từ buồng lạnh IV được máy nén hút vào và nén đoạn nhiệt từ áp suất p_1 đến áp suất p_2 , nhiệt độ t_2 . Sau đó đi vào dàn ngưng II ngưng tụ đẳng áp ở áp suất p_2 , nhả lượng nhiệt q_1 biến thành lỏng. Chất lỏng từ dàn ngưng II đi qua van tiết lưu III, giảm áp suất từ p_2 xuống p_1 và chuyển từ dạng lỏng sang dạng hơi ẩm, rồi vào dàn bay hơi để nhận nhiệt lượng q_2 . Nếu sử dụng năng lượng hữu ích từ dàn bay hơi (dàn lạnh, được bố trí trong phòng) thì máy làm việc theo chế độ làm lạnh; Nếu sử dụng năng lượng hữu ích từ dàn ngưng (dàn nóng, được bố trí trong phòng) thì máy làm việc theo chế độ sưởi ấm (bơm nhiệt). Trong thực tế các dàn được bố trí cố định, chỉ cần đổi chiều chuyển động của dòng môi chất nhờ van đổi chiều.

Sơ đồ nguyên lý của bơm nhiệt được thể hiện trên hình 4-18. Chỉ cần thay đổi vai trò đóng, mở của các van, thiết bị có thể làm lạnh hoặc sưởi

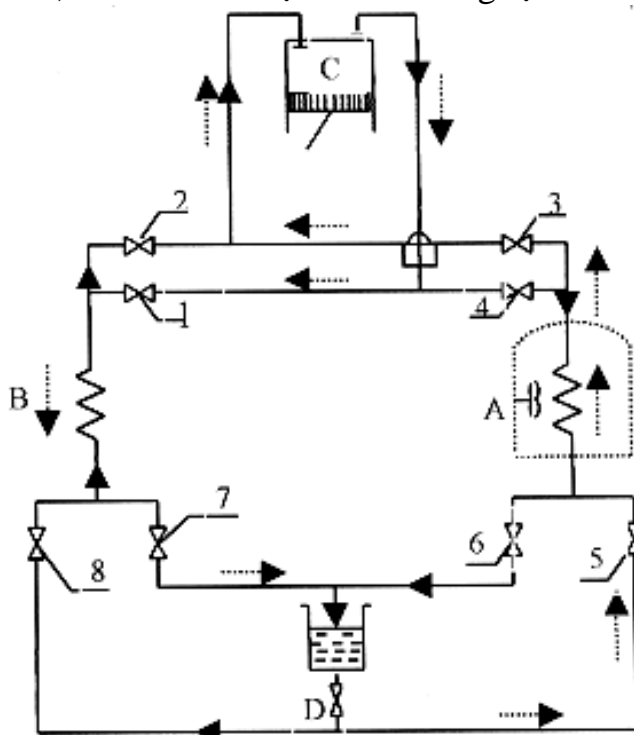


Hình 4.17 Đồ thị T-s của chu trình.

ấm. Thiết bị chính gồm máy nén C, hai dàn trao đổi nhiệt A và B, hai dàn này thay nhau làm dàn lạnh (dàn bốc hơi) hoặc dàn nóng (dàn ngưng tụ); van tiết lưu D và các van đóng mở từ 1-8 để thay đổi chức năng làm việc của máy. Môi chất có thể là Frêon hoặc Amôniac. Để xét nguyên lý vận hành của thiết bị, ta coi dàn A đặt trong phòng.

+ Máy làm việc với chức năng sưởi ấm:

Mở các van 2, 4, 6, 8 và đóng các van 1, 3, 5, 7, môi chất từ máy nén C đi theo chiều C4A6D8B2C. Môi chất được máy nén hút vào và nén đến áp suất và nhiệt độ cao, qua van 4 vào dàn ngưng A, nhả lượng nhiệt cho không khí trong phòng. Bản thân môi chất mất nhiệt, sẽ ngưng tụ, đi qua van 6 và van tiết lưu D, biến thành hơi bão hoà ẩm ở nhiệt độ và áp suất thấp, qua van 8 vào dàn bay hơi B để nhận nhiệt từ môi trường xung quanh, bốc hơi và được hút về máy nén, hoàn chỉnh một chu trình ngược chiều.



Hình 4.18 Sơ đồ máy lạnh-bơm nhiệt.

+ Máy làm việc với chức năng làm mát.

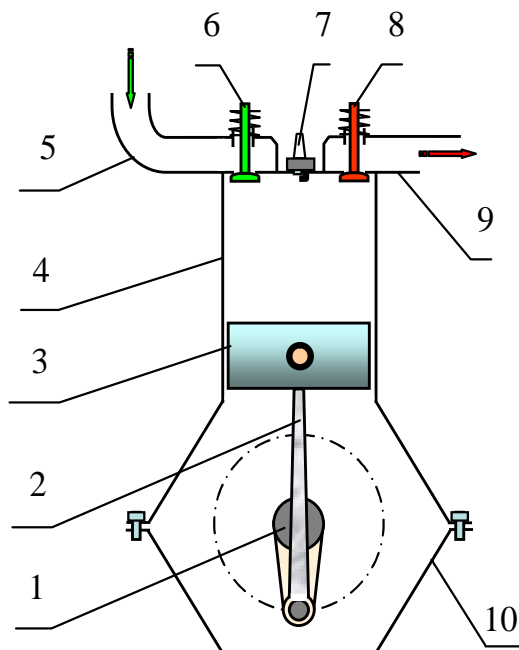
Đóng các van 2, 4, 6, 8 và mở các van 1, 3, 5, 7, môi chất từ máy nén C đi theo chiều C1B7D5A3C. Môi chất được máy nén hút vào và nén đến áp suất và nhiệt độ cao, qua van 1 vào dàn ngưng B, nhả lượng nhiệt cho môi trường xung quanh. Bản thân môi chất mất nhiệt, sẽ ngưng tụ, đi qua van 7 và van tiết lưu D, biến thành hơi bão hoà ẩm ở nhiệt độ và áp suất thấp, qua van 5 vào dàn bay hơi A để nhận nhiệt từ không khí trong phòng, làm cho nhiệt độ trong phòng giảm xuống, môi chất bốc hơi và được hút về máy nén, hoàn chỉnh một chu trình ngược chiều để làm mát phòng.

4.2 SƠ ĐỒ CẤU TẠO VÀ NGUYÊN LÝ HOẠT ĐỘNG CỦA ĐỘNG CƠ NHIỆT.

4.2.1 Sơ đồ cấu tạo của động cơ nhiệt.

a. Sơ đồ cấu tạo của động cơ 4 kỳ.

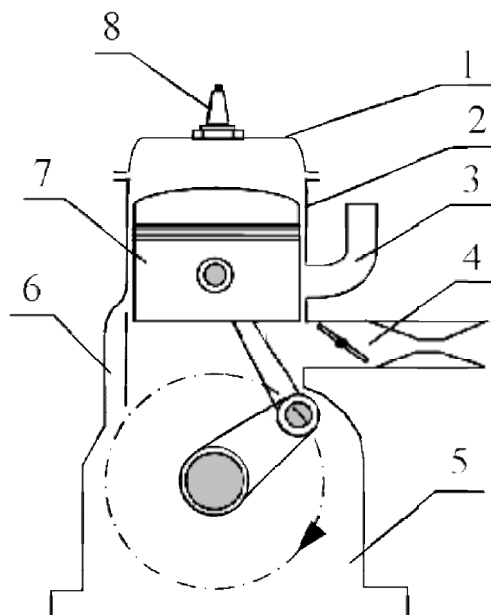
1. Trục cơ (trục khuỷu).
2. Thanh truyền (tay biên).
3. Pittông.
4. Xy lanh.
5. Đường hút.
6. Xupáp hút.
7. Bugi.
8. Xupáp xả.
9. Đường xả.
10. Các-te (đáy máy).



Hình 4.19 Sơ đồ cấu tạo động cơ 4 kỳ.

b. Sơ đồ cấu tạo của động cơ 2 kỳ.

1. Mặt máy.
2. Thân máy.
3. Cửa xả.
4. Chế hòa khí.
5. Buồng trục cơ.
6. Cửa thổi.
7. Piston.
8. Bugi.



Hình 4.20 Sơ đồ cấu tạo động cơ 2 kỳ.

4.2.2 Nguyên lý hoạt động của động cơ nhiệt.

Do hạn chế về thời gian nên sau đây ta chỉ nghiên cứu nguyên lý hoạt động trong một chu trình làm việc của động cơ nhiệt 4 kỳ một xy lanh.

Để nghiên cứu nguyên lý hoạt động của động cơ nhiệt theo quan điểm nhiệt động kỹ thuật, trong phần này chúng ta xem xét môi chất trong các động cơ nhiệt trước hết là nhiên liệu và không khí. Nhiên liệu và ôxy trong không khí thực hiện quá trình cháy, sau đó là sản phẩm cháy thực hiện các quá trình nhiệt động để cuối cùng thải sản phẩm cháy vào môi trường. Để thiết lập được chu trình động cơ nhiệt ta giả thiết:

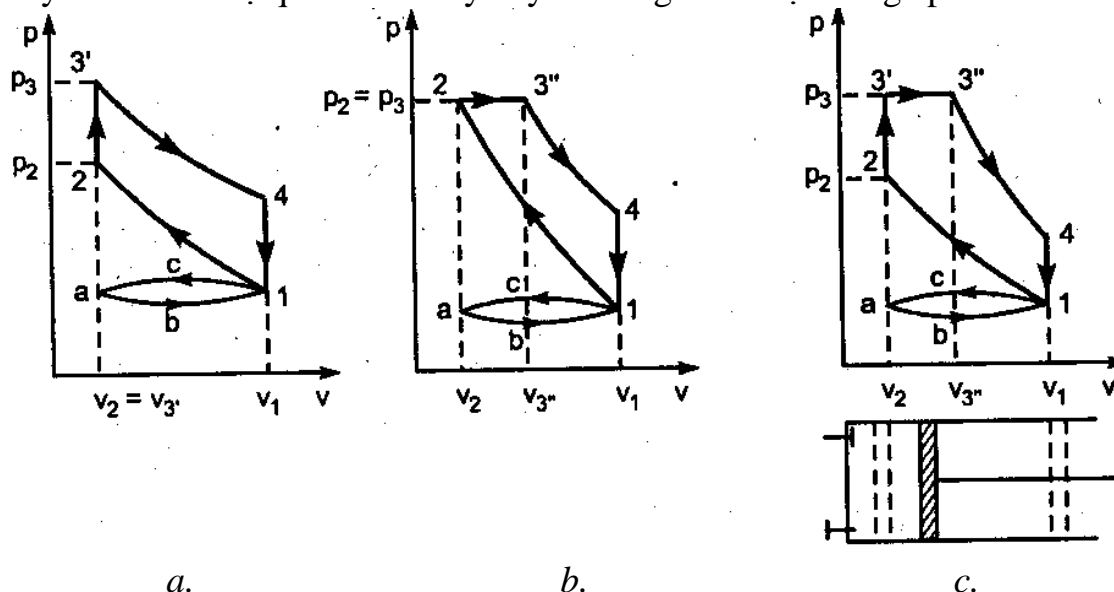
- Coi nhiên liệu, không khí, hỗn hợp nhiên liệu với không khí và sản phẩm cháy đồng nhất với nhau và đồng nhất với chất khí lý tưởng hai nguyên tử ($k = 1,4$).
- Coi chu trình là thuận nghịch, trong đó các quá trình giãn nở và nén là những quá trình đoạn nhiệt thuận nghịch.
- Thay quá trình cháy bằng quá trình cung cấp nhiệt và quá trình thải sản phẩm cháy vào môi trường là quá trình nhả nhiệt.
- Coi quá trình nạp nhiên liệu và không khí (hoặc ôxy) và quá trình thải sản phẩm cháy triệt tiêu nhau về mặt công để biến hệ hở thành hệ kín.

Do đó:

Khi pít tông từ điểm chết trên bắt đầu dịch chuyển xuống dưới thì van nạp mở, van xả vẫn đóng (kỳ 1). Khi đó, hỗn hợp nhiên liệu và không khí được đưa vào xi lanh theo quá trình a-b-1. Khi pít tông quay lại từ điểm chết dưới bắt đầu dịch chuyển lên trên thì cả van nạp và van xả đều đóng nên hỗn hợp nhiên liệu và không khí được nén đoạn nhiệt thuận nghịch theo đường 1-2 (kỳ 2). Giả sử khi pít tông đến điểm chết trên ở trạng thái 2 thì hỗn hợp nhiên liệu và không khí bắt đầu bốc cháy. Quá trình cháy xảy ra một đoạn đẳng tích 2-3' (vì pít tông chưa kịp dịch chuyển xuống dưới) và một đoạn đẳng áp 3'-3'' (lúc này pít tông đã kịp dịch chuyển xuống dưới). Sản phẩm cháy ở trạng thái 3'' có áp suất và nhiệt độ cao tiếp tục giãn nở đến điểm chết dưới theo đường đoạn nhiệt sinh công 3''-4 (kỳ 3). Khi pít tông đến điểm chết dưới tương ứng với trạng thái 4 thì van xả mở và áp suất giảm đột ngột. Khi đó pít tông chưa kịp dịch chuyển lên trên nên xem quá trình giảm áp đột ngột của sản phẩm cháy xảy ra theo quá trình đẳng tích 4-1. Sau đó, pít tông dịch chuyển từ điểm chết dưới lên điểm chết trên, van nạp vẫn đóng nhưng van xả mở và sản phẩm cháy bị thải vào môi trường theo đường 1-c-a (kỳ 4). Đến đây van xả đóng, van nạp mở và pít tông lại tiếp tục dịch chuyển từ điểm chết trên xuống dưới, nhiên liệu và không khí được hút vào xi lanh và một chu trình mới lại bắt đầu.

Quá trình cháy có thể xảy ra nhanh khi pít tông chưa kịp dịch chuyển. Khi đó toàn bộ quá trình cháy chỉ xảy ra trong quá trình đẳng tích 2-3'.

Ngược lại, nếu quá trình cháy xảy ra rất chậm thì pít tông đủ thời gian để dịch chuyển và toàn bộ quá trình cháy xảy ra trong điều kiện đẳng áp 2-3''.



Hình 4.21 Nguyên lý làm việc và các chu trình của động cơ đốt trong.

a. Chu trình cấp nhiệt đẳng tích; b. Chu trình cấp nhiệt đẳng áp;

c. Chu trình cấp nhiệt hỗn hợp.

Với giả thiết trên ta thấy quá trình hút nhiên liệu và không khí a-b-1 và quá trình thải sản phẩm cháy 1-c-a tự triệt tiêu nhau về mặt công. Do đó, động cơ đốt trong được xem như máy nhiệt làm việc với các chu trình thuận đi từ trạng thái 1 qua các trạng thái 2, 3', 3'', 4 và khép kín ở trạng thái 1.

Trong đó:

- + Quá trình 1-2 là quá trình nén đoạn nhiệt thuận nghịch (mất công).
- + Quá trình 2-3' là quá trình cấp nhiệt đẳng tích q_{1v} (cháy đẳng tích).
- + Quá trình 3'-3'' là quá trình cấp nhiệt đẳng áp q_{1p} (cháy đẳng áp).
- + Quá trình 3''-4 là quá trình giãn nở đoạn nhiệt thuận nghịch (đây là quá trình sinh công).
- + Quá trình 4-1 là quá trình thải nhiệt lượng vào môi trường q_2 (thải sản phẩm cháy).