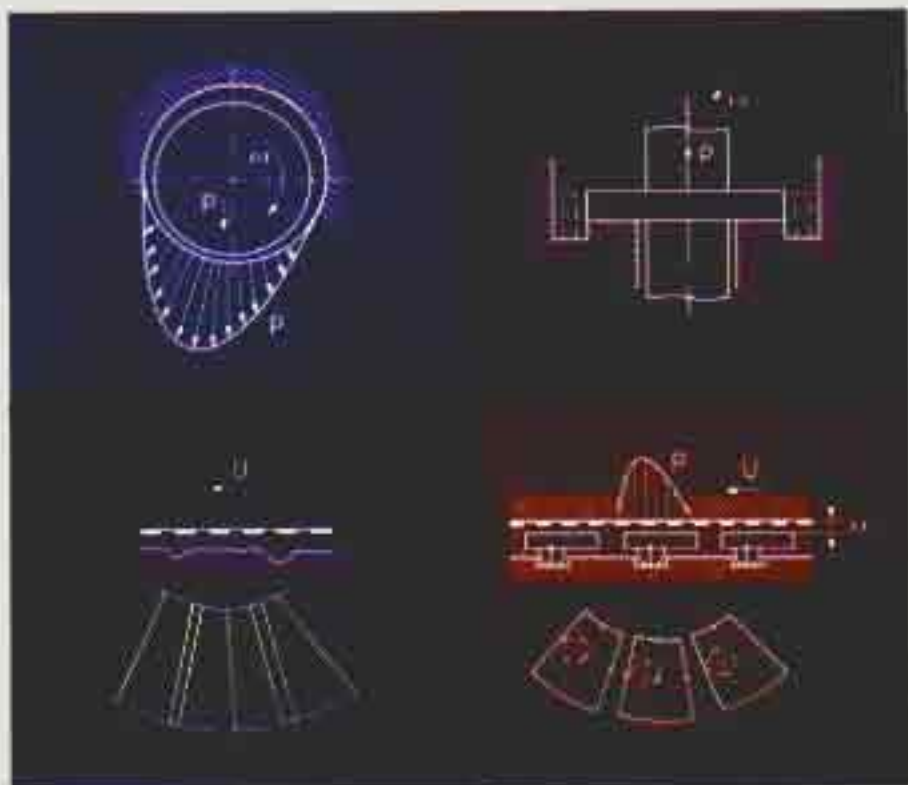


TSKH NGUYỄN ANH TUẤN  
ThS. BÙI VĂN GÔN

# LÝ THUYẾT BÔI TRƠN ƯỚT



XÂY DỰNG



**VS.GS.TSKH NGUYỄN ANH TUẤN**  
**GVC. ThS BÙI VĂN GÔN**

**LÝ THUYẾT**  
**BÔI TRƠN ƯỚT**

**NHÀ XUẤT BẢN XÂY DỰNG**  
**HÀ NỘI - 2006**



## LỜI NÓI ĐẦU

*Ma sát- hiện tượng kỳ lạ của thiên nhiên đã mang lại cho con người nhiệt và lửa, cho phép hãm con tàu, ô tô đang chạy với tốc độ cao trong khoảnh khắc, tăng tốc độ của phản ứng hóa học hàng ngàn lần, ghi giọng nói của con người lên đĩa, nghe âm thanh của cây vĩ cầm và còn rất nhiều việc khác.*

*Nhưng hiện nay gắn liền với ma sát là một trong những vấn đề cấp thiết nhất của thời đại - sự hao mòn của máy móc và thiết bị. Chi phí cho việc sửa chữa máy móc do mòn rất lớn và tăng lên hàng năm. Phần lớn máy móc thiết bị (85-90%) không tiếp tục làm việc vì nguyên nhân hao mòn các chi tiết. Chi phí cho việc sửa chữa máy móc thiết bị và các phương tiện vận tải ở Liên Xô cũ là 40 tỷ rúp (một năm), ở Cộng hòa Liên bang Đức lên đến 100 tỷ Mác - chiếm trên 1% ngân sách...*

*Theo báo cáo của Jost Peter (tại Chính phủ Hoàng gia Anh), hiệu quả kinh tế do kỹ thuật ma sát mang lại cho Vương quốc là 0,5 tỷ bảng Anh tương đương với 2% thu nhập của nền kinh tế quốc dân. Hiệu quả này hàng năm ở Mỹ là 12 đến 16 tỷ ĐôLa và ở Liên Xô cũ là 12 tỷ Rúp.*

*Việc kéo dài tuổi thọ của máy dù ở mức độ không lớn cũng ngang việc đưa vào một lực lượng sản xuất đáng kể. Vấn đề này đã được sự chú ý của đông đảo các nhà thiết kế, công nghệ, những người sử dụng và các nhà bác học nhiều ngành nhằm đưa ra những biện pháp về thiết kế, công nghệ, sử dụng để nâng cao tuổi thọ - độ tin cậy của máy móc thiết bị, đồng thời phát triển học thuyết về ma sát - bôi trơn.*

*Nội dung ma sát khi bôi trơn ướt hiện rất được quan tâm, vì chế độ ma sát ướt đang góp phần quan trọng nâng cao tuổi thọ và độ tin cậy cho các thiết bị cơ khí. Để đáp ứng yêu cầu học tập - nghiên cứu - tham khảo của sinh viên, học viên cao học và kỹ sư, chúng tôi biên soạn giáo trình "**Lý thuyết bôi trơn ướt**". Giáo trình đã được PGS.TS Đỗ Xuân Đình, chủ nhiệm bộ môn Cơ sở kỹ thuật cơ khí - trường Đại học Xây Dựng đọc - góp ý và được xuất bản nhân dịp kỉ niệm 50 năm thành lập trường Đại học Bách Khoa Hà Nội, 50 năm đào tạo - 40 năm thành lập trường Đại học Xây Dựng.*

*Chúng tôi trân trọng cảm ơn và đón nhận những ý kiến đóng góp của bạn đọc và các đồng nghiệp.*

**Các tác giả**



## Chương 1

# ĐẠI CƯƠNG VỀ BÔI TRƠN ƯỚT

### 1.1. HIỆN TƯỢNG MA SÁT KHI BÔI TRƠN ƯỚT

Khi sôi trơn ướt, bề mặt ma sát được phân chia bởi lớp sôi trơn lỏng (dầu). Áp suất của dầu sôi trơn sẽ cân bằng với ngoại lực và lớp dầu được gọi là *lớp tải*.

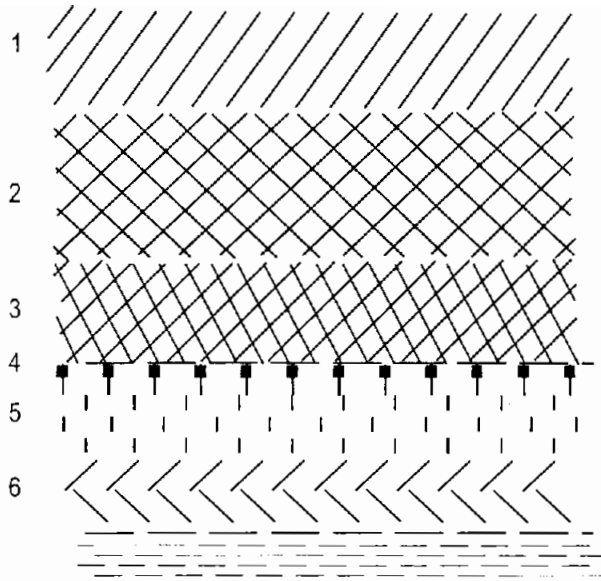
Chiều dày lớp dầu lớn hạn chế ảnh hưởng của bề mặt ma sát tới các phần tử dầu ở xa. Các lớp cách bề mặt  $0,5\mu\text{m}$  sẽ chuyển động tự do với nhau, lực ma sát phụ thuộc vào độ nhớt của dầu bằng tổng lực cản trượt của các lớp dầu theo chiều dày màng dầu.

Chế độ ma sát này với hệ số ma sát nhỏ là tối ưu với kết cấu ma sát về phương diện mất mát năng lượng, độ bền và tuổi thọ. Trong sôi trơn ướt, ma sát không phụ thuộc vào bản chất của bề mặt ma sát.

Hiện tượng ma sát sôi trơn ướt đã được phát hiện bởi Pêtrov- người sáng lập cơ sở lý thuyết sôi trơn thủy động. Lý thuyết sôi trơn thủy động được xây dựng trên cơ sở một số giả thiết đơn giản hóa ảnh hưởng của các nhân tố cho ta phương pháp xác định khả năng tải và chiều dày tối thiểu của lớp sôi trơn.

Tuy nhiên, hiện tượng ma sát khi sôi trơn ướt phức tạp hơn so với kết luận rút ra từ lý thuyết sôi trơn thủy động (mới chỉ bao gồm mặt cơ học thuần túy của quá trình). Những nghiên cứu gần đây cho thấy trong mặt cắt của bề mặt kim loại và lớp vật liệu sôi trơn lỏng: "*các phần tử của chất hoạt tính bề mặt có trong dầu được hấp thụ trên bề mặt trong lớp phân tử mỏng trên đó tạo thành lớp giới hạn liên lớp giới hạn là vùng chuyển động rối vi mô và cuối cùng mới là dòng dầu chảy tầng*" (hình 1.1).

Theo xác định của N.V. Chiabin và Nguyễn Anh Tuấn: "*Trong dòng dầu luôn tồn tại vùng không có sự trượt theo lớp vật liệu sôi trơn so với thành*".

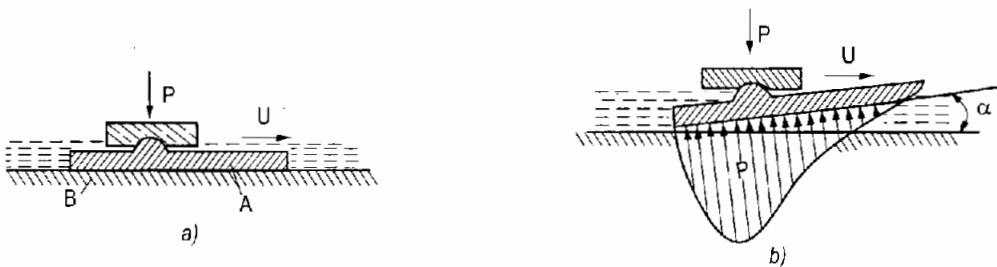


**Hình 1.1.** Sơ đồ mặt cắt của bề mặt kim loại và lớp vật liệu bôi trơn lỏng  
 1- cấu trúc kim loại ban đầu; 2- tinh thể bị biến dạng có hướng; 3- tinh thể bị phá hủy, bị ô xy hóa và lớp hấp thụ bề mặt; 4- lớp phân tử mônô; 5- lớp giới hạn; 6- vùng chuyển động rối vi mô; 7- dòng dầu chảy tầng.

## 1.2. PHƯƠNG PHÁP BÔI TRƠN ƯỚT

### 1.2.1. Phương pháp bôi trơn thủy động

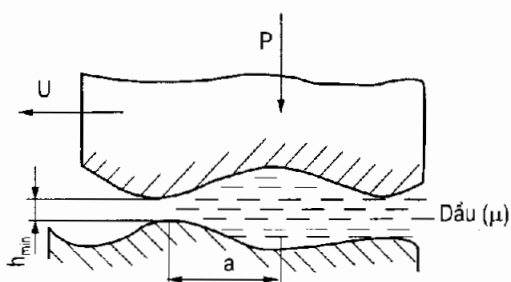
Giả sử có hai tấm phẳng A và B ngâm trong dầu và chịu một lực P (hình 1.2). Tấm A chuyển động với vận tốc U, nếu U nhỏ: hai tấm vẫn tiếp xúc với nhau - chế độ ma sát giữa chúng là nửa ướt (hình 1.2a). Khi vận tốc U tăng lên đủ lớn tấm A sẽ được nâng lên trong dầu tạo nên khe hở hình chêm giống như trường hợp lướt ván (hình 1.2b).



**Hình 1.2**

Nhờ có độ nhớt các lớp dầu sẽ liên tục chuyển động cùng với tấm A và dồn vào khe hẹp, bị nén lại, do đó tạo nên áp suất đủ cân bằng với tải trọng P. Lúc này chuyển động được thực hiện trong chế độ ma sát ướt và áp suất p được hình thành trong khe hở hình chêm thay đổi theo phương trình Rây-nô-l.

Trong trường hợp độ nhấp nhô tự nhiên giữa các khu vực tiếp xúc tạo ra những chỗ thu hẹp mở rộng theo chiều cao và hướng chuyển động tương đối. Khi lượng dầu đủ lớn thì sự thu hẹp sẽ đóng vai trò những nêm vi mô thủy động, có tác dụng tạo lực nâng ngay cả khi vận tốc U khá nhỏ (hình 1.3). Tuy nhiên trong trường hợp này lực nâng thường không đủ tiếp nhận toàn bộ tải trọng P nên giữa hai bề mặt chỉ tồn tại ma sát nửa ướt.



**Hình 1.3.** Sơ đồ nêm thủy động do bề mặt làm việc không phẳng tạo nên:  
 $h_{min}$  - Khe hở nhỏ nhất; a - Chiều dài nêm dầu.

Như vậy điều kiện để hình thành chế độ ma sát ướt bằng phương pháp bôi trơn thủy động là:

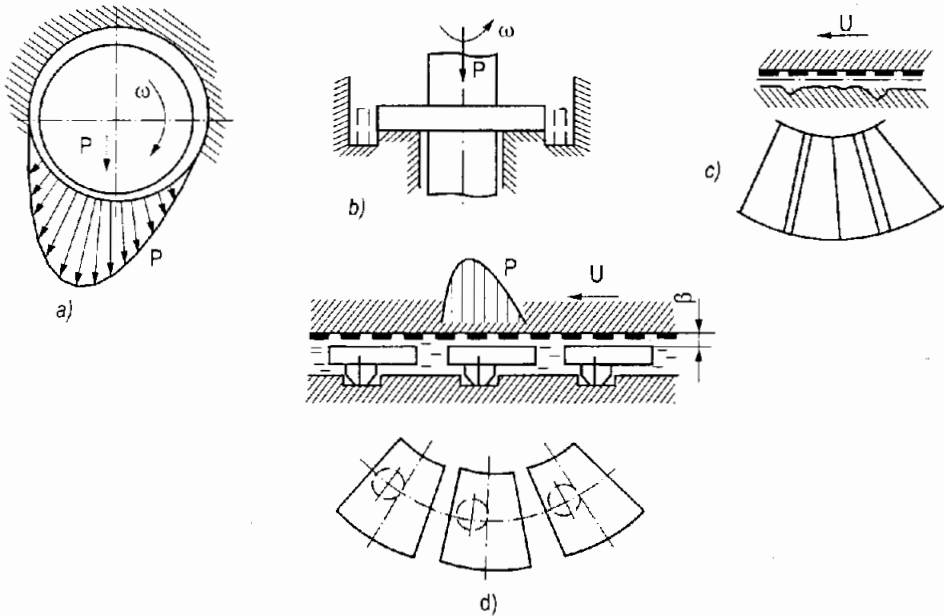
- + Giữa hai bề mặt phải tạo được khe hở hình chêm;
- + Dầu có độ nhớt nhất định và liên tục chảy vào khe hở đó;
- + Vận tốc tương đối giữa hai bề mặt phải có phương chiều thích hợp và trị số đủ lớn.

Phương pháp bôi trơn thủy động có những ưu - nhược điểm sau:

- + Không cần bộ phận cung cấp dầu riêng;
- + Không đòi hỏi độ chính xác chế tạo quá cao;
- + Giá thành thấp;
- + Không hoàn toàn đảm bảo được chế độ bôi trơn ướt (khi  $U = 0$ , giai đoạn khởi động và dừng máy) nên hệ số ma sát lớn.



Bôi trơn thủy động thường được sử dụng đối với ổ trượt đỡ vì nó luôn có khe hở hình chêm tự nhiên (hình 1.4a). Đối với ổ trượt chặn, mặt mút của ngõng trục tỳ vào đệm lót của ổ, mặt tựa của đệm thường có hình vành khăn (hình 1.4b): khi ổ quay một chiều, khe hở hình chêm được tạo ra bằng các mặt nghiêng vát theo một hướng (hình 1.4c) còn khi ổ quay hai chiều có thể dùng kết cấu đệm lắc tự lựa vị trí (hình 1.4d).



Hình 1.4

### 1.2.2. Phương pháp bôi trơn thủy tĩnh

Hai bề mặt cần bôi trơn: một mặt nhẵn, mặt kia được tạo một hoặc nhiều hốc chứa dầu và trong hốc có lỗ dẫn dầu (kiểu trực tiếp không tạo hốc mà chỉ gồm các lỗ và rãnh thoát).

Bơm dầu có áp suất cao vào hốc (lỗ) sẽ hình thành màng dầu bôi trơn giữa hai bề mặt với chiều dày  $h$  không đổi ngay cả khi  $U = 0$  (hình 1.5a, b).

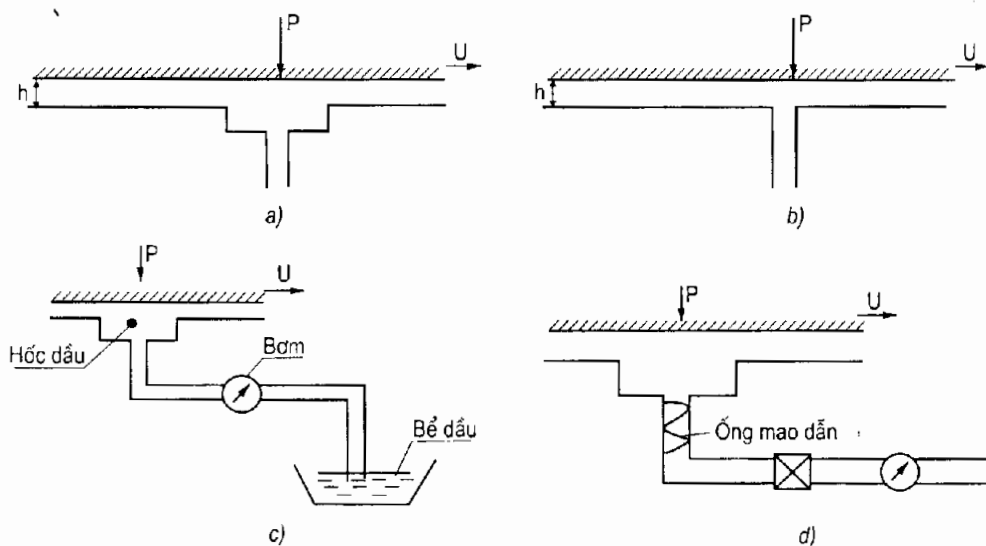
Có hai phương pháp cấp chất lỏng vào bề mặt bôi trơn:

- Cấp bằng lưu lượng không đổi: đặt một bơm có lưu lượng không đổi giữa bề dầu và hốc (hình 1.5c). Nếu trên bề mặt gồm nhiều hốc cần có thêm một bộ van phân phối để chia dầu từ một bơm đến các hốc (cũng có thể dùng riêng mỗi hốc một bơm). Phương pháp này phức tạp nên ít dùng.

- Cấp dưới áp suất không đổi:

+ Trường hợp tạo hốc chứa dầu (hình 1.5d): trên đường dầu ngay trước hốc lắp một trở thủy lực (thường có dạng ống mao dẫn - kiểu mao dẫn). Trong điều kiện phòng thí nghiệm có thể lắp các trở tự điều chỉnh.

+ Trường hợp không tạo hốc (kiểu trực tiếp): dầu được bơm qua lỗ không có trở thủy lực (hình 1.5b).



**Hình 1.5**

Phương pháp cấp bằng áp suất không đổi (áp suất trong hốc hoặc lỗ luôn không đổi) cho độ cứng nêm dầu thấp hơn phương pháp cấp bằng lưu lượng không đổi. Tuy nhiên, hệ thống ít phức tạp, làm việc ổn định hơn nên được sử dụng rộng rãi.

Phương pháp bôi trơn thủy tĩnh có những ưu điểm đặc biệt:

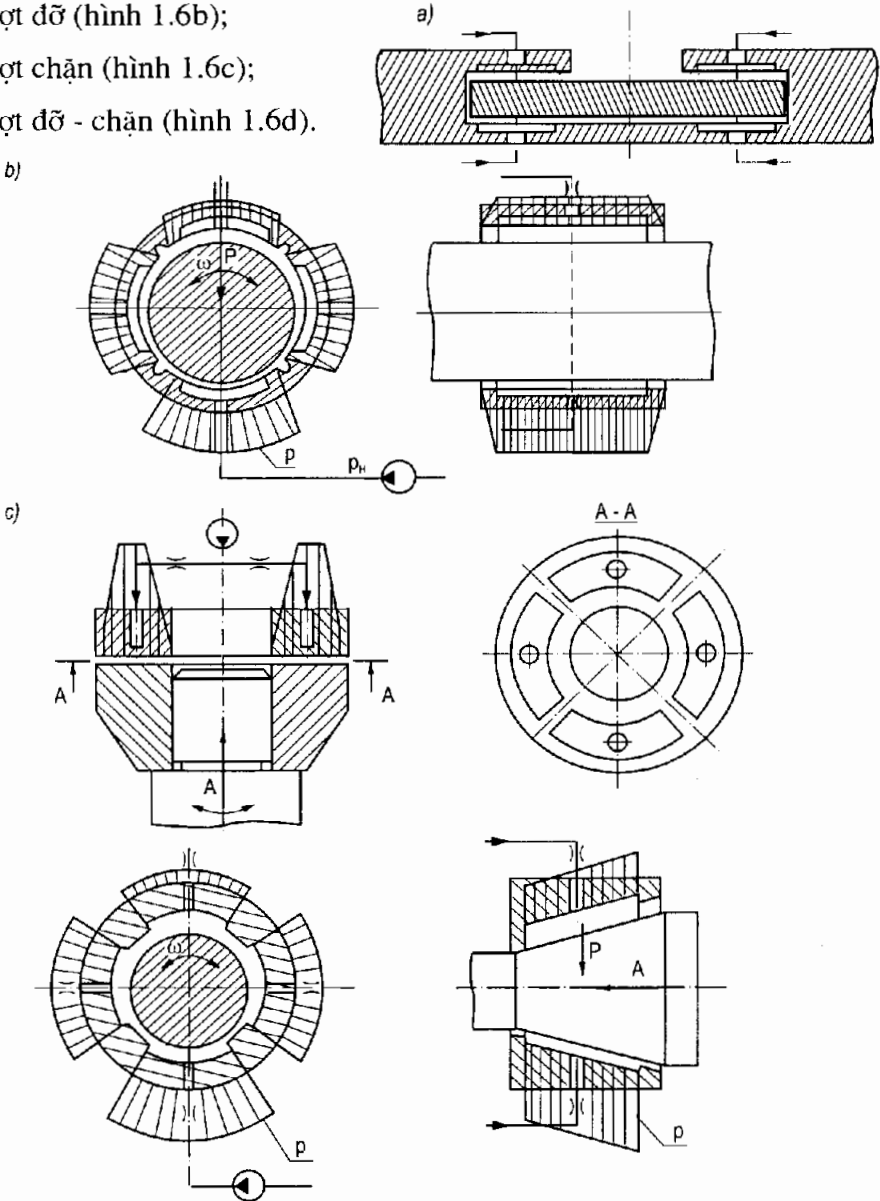
- Hệ số ma sát rất nhỏ ( $10^{-5} \div 6.10^{-5}$ );
- Chiều dày lớp dầu cho phép lớn, giảm chấn tốt;
- Không xảy ra ma sát nửa ướt hoặc ma sát giật cục bộ;
- Không sinh lực nâng khi các bề mặt dịch chuyển tương đối với nhau;
- Giảm nhẹ ảnh hưởng do sự thiếu chính xác của bề mặt ma sát;
- Tuổi thọ và độ tin cậy của hệ thống cao, thích hợp với tự động hóa.

Về nhược điểm:

- Kết cấu bề mặt bôi trơn phức tạp, yêu cầu chế tạo và lắp ráp chính xác;
- Hệ thống cấp dầu cao áp công kênh;
- Giá thành cao.

Bôi trơn thủy tĩnh thích hợp với:

- Sóng trượt trong các máy cắt kim loại (hình 1.6a);
- Ổ trượt đỡ (hình 1.6b);
- Ổ trượt chặn (hình 1.6c);
- Ổ trượt đỡ - chặn (hình 1.6d).



Hình 1.6

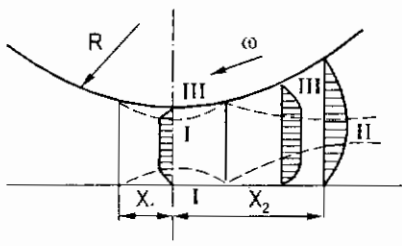
Phương pháp bôi trơn thủy tĩnh được đề cập đầu tiên trong từ điển tổng hợp Larousse năm 1865 - "Một ổ thủy tĩnh bôi trơn bằng nước do Gerard thiết kế". Tuy nhiên, sáng chế này không được áp dụng vì những bất tiện khi tìm cách đưa nước vào cơ cấu gây trở ngại đáng kể cho khả năng kỹ thuật đương thời.

Vào những năm 1930 - 1960 đã phát triển một hướng nghiên cứu mới về phương pháp tạo áp suất trong lớp dầu bôi trơn bằng một bộ phận cung cấp riêng và hình thành lý thuyết bôi trơn thủy tĩnh.

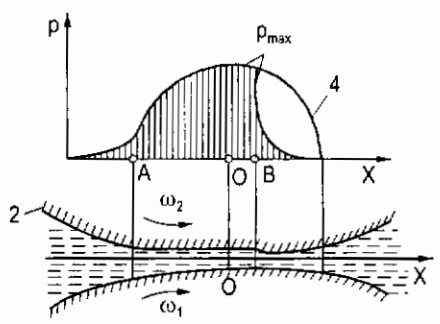
Từ năm 1949 các dạng ổ thủy tĩnh của Gerard đã được sử dụng cho trục chính của máy doa, máy mài, trục đỡ kính thiên văn, trục động cơ bơm cấp lò phản ứng hạt nhân,... và đạt được độ chính xác cao. Ngày nay, các kết cấu ổ vận hành trên nguyên lý thủy tĩnh - thủy động được sử dụng khá rộng rãi cho trường hợp ổ có vận tốc U lớn (ổ thủy tĩnh - thủy động).

**1.2.3. Bôi trơn nhớt dẻo và thủy động tiếp xúc**

Bôi trơn ướt có thể xảy ra với các chất bôi trơn dẻo, trong dòng chảy của chất bôi trơn bị kéo theo bề mặt chuyển động có những vùng không có sự trượt theo lớp. Ngoài vùng này là sự chảy nhớt, có thể có sự trượt của vật liệu bôi trơn so với thành. Trên hình 1.7 là biểu đồ vận tốc dòng chảy của chất bôi trơn nhớt dẻo khi lăn xilanh trên mặt phẳng: vùng I và III gradient vận tốc khác không theo chiều cao lớp dầu và dòng chảy (sự chảy như trong môi trường dẻo lý tưởng), vùng II - ứng suất tiếp nhỏ hơn vùng ứng suất trượt giới hạn nên không có sự dịch chuyển tương đối theo lớp (dòng chảy giống như sự chảy của vật liệu dẻo).



**Hình 1.7.** Biểu đồ vận tốc trong dòng nhớt dẻo khi lăn hình trụ trên mặt phẳng.



**Hình 1.8.** Hình dạng khe hở và biểu đồ áp suất đối với các xilanh lăn trên nhau

Ma sát ướt không chỉ tồn tại giữa các bề mặt trượt mà còn tồn tại giữa các bề mặt lăn trên nhau (bôi trơn thủy động tiếp xúc). Lúc này lớp dầu giữa khe hở của chúng sẽ có chiều dày thay đổi. Dầu chuyển động theo phương chuyển động của bề mặt tiếp xúc. Khả năng chịu tải của lớp dầu sẽ cân bằng với lực nén vào bề mặt tiếp xúc. Trên hình 1.8 biểu diễn hình dạng khe hở và biểu đồ áp suất đối với các xilanh lăn trên nhau.

### 1.3. CHẤT BÔI TRƠN - QUÁ TRÌNH CẢI THIỆN VÀ SỬ DỤNG

#### 1.3.1. Chất lỏng Niuton

Theo trạng thái vật lý, có thể chia các vật liệu bôi trơn ra làm 3 loại: dầu bôi trơn, mỡ bôi trơn và chất rắn bôi trơn.

Dầu bôi trơn là vật liệu bôi trơn chủ yếu và gồm các loại:

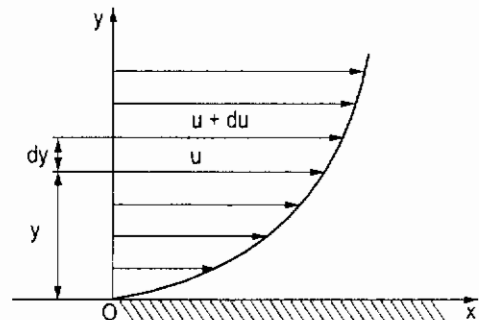
- Dầu thực vật (dầu gai, dầu thầu dầu...);
- Dầu động vật (dầu xương, dầu cá...);
- Dầu khoáng và các loại dầu tổng hợp.

Dầu bôi trơn có hai tính chất quan trọng đáng lưu ý là độ nhớt và tính năng bôi trơn.

##### 1.3.1.1. Độ nhớt

Độ nhớt là khả năng cản trượt của các lớp chất bôi trơn đối với nhau trong quá trình có sự chuyển động tương đối giữa các lớp ấy. Độ nhớt có ý nghĩa quan trọng đối với khả năng tải của lớp dầu.

Khảo sát lớp chất lỏng gần tường rắn, ngay trên mặt tường các phân tử chất lỏng sẽ bám chặt vào tường và có vận tốc bằng 0 còn ở vị trí cách tường một đoạn  $y$  sẽ có vận tốc  $u$  (hình 1.9). Như vậy, giữa các lớp mỏng của chất lỏng ở sát tường có sự cản trở chuyển động làm cho vận tốc giữa hai lớp chất lỏng cách nhau một đoạn  $dy$  có sự sai khác vận tốc  $du$ . Nguyên nhân của hiện tượng cản trở chuyển động là sự xuất hiện ứng suất tiếp giữa các lớp chất lỏng.



**Hình 1.9.** Khảo sát lớp chất lỏng chảy gần tường chắn.

Theo giả thuyết Niuton năm 1686 (được Petrov kiểm tra năm 1883) thì: "Ứng suất tiếp gây ra do sự ma sát bên trong các lớp chất lỏng tỷ lệ với gradien vận tốc":

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1.1)$$

Trong đó:

$\tau$ - ứng suất tiếp giữa các lớp của chất lỏng;

$\mu$  - hệ số tỷ lệ phụ thuộc loại chất lỏng gọi là *độ nhớt động lực của chất lỏng*.

Đơn vị của độ nhớt động lực là Pa.s (1/10 Ns/m<sup>2</sup>) gọi là Poise; thường dùng đơn vị centi Poise (cP):

$$1\text{cPa.s} = \frac{1}{100} \text{Pa.s} = 10^{-3} \text{Ns/m}^2$$

Ngoài ra, còn dùng độ nhớt động học:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad \text{hay} \quad \mu = \nu \cdot \rho \quad (1.2)$$

Trong đó:

$\rho$ - khối lượng riêng của dầu (kg/m<sup>3</sup>);

$\nu$ - có đơn vị là m<sup>2</sup>/s, thực tế thường dùng đơn vị nhỏ nhất là Stốc và cetistốc, ký hiệu là St và cSt:

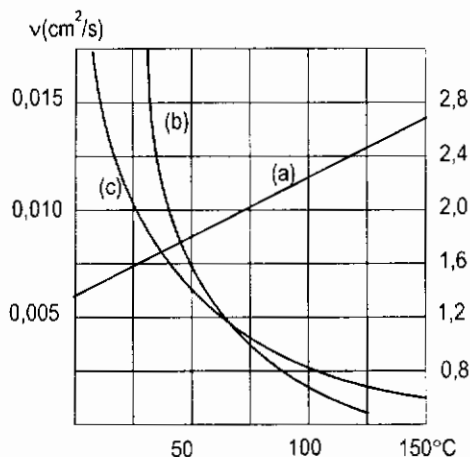
$$1\text{cSt} = \frac{1}{100} \text{St} = 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}.$$

Các loại dầu tuân theo công thức (1.1) được gọi là dầu Niuton (chất lỏng Niuton). Phần lớn dầu bôi trơn tổng hợp hiện nay có cấu trúc không đồng nhất nên có ảnh hưởng phi tuyến đến độ nhớt (được gọi là chất lỏng phi Niuton).

Khi nhiệt độ thay đổi, độ nhớt cũng thay đổi theo. Đối với các chất lỏng: độ nhớt thường giảm khi nhiệt độ tăng còn đối với chất khí thì ngược lại. Có thể giải thích điều này bằng sự cấu tạo thiên nhiên của vật chất:

"Trong các chất lỏng do khoảng cách giữa các phân tử nhỏ hơn rất nhiều so với chất khí nên lực nhớt được gây bởi lực hút phân tử của chúng lớn. Các

lực hút đó sẽ giảm khi nhiệt độ tăng và làm độ nhớt giảm theo. Riêng với chất khí, độ nhớt phụ thuộc vào chuyển động hỗn loạn của các phân tử - lực nhớt sẽ tăng khi nhiệt độ môi trường tăng" (hình 1.10). Trong lý thuyết bôi trơn khí thì chất khí được coi như chất lỏng nén được.



**Hình 1.10.** Sự phụ thuộc độ nhớt động học của không khí, dầu máy và nước vào nhiệt độ.

a) Không khí ( $v_k$ ); b) Dầu máy ( $v_d$ ); c) Nước ( $v_n$ ).

Có thể tính gần đúng độ nhớt  $\mu_t$  của dầu ở nhiệt độ  $t$  khi biết độ nhớt ở nhiệt độ  $t_0$ . Trong trường hợp  $t$  thay đổi không nhiều so với  $t_0$  thì  $\mu_t$  xác định theo công thức:

$$\mu_t = \mu_{t_0} \left( \frac{t_0}{t} \right)^m ; \text{ số mũ } m = 2,6 \div 3 \quad (1.3)$$

Độ nhớt của các loại dầu ứng với nhiệt độ khác nhau được cho trong các sổ tay (bảng 1.1).

Trong trường hợp có sự thay đổi lớn về áp suất (ví dụ hàng trăm áp métphê) độ nhớt của chất lỏng cũng thay đổi đáng kể. Thông thường, độ nhớt tăng khi áp suất tăng và được biểu diễn bởi công thức Basuc:

$$\mu_p = \mu_{p_0} \cdot e^{\alpha(p-p_0)} \quad (1.4)$$

Trong đó:

$\mu_p$  và  $\mu_{p_0}$  - trị số độ nhớt động lực ở các áp suất  $p$  và  $p_0$ ;

$\alpha = 0,002 \div 0,003$  (hai cận giá trị ứng với dầu nhẹ và dầu nặng).

**Bảng 1.1. Giá trị độ nhớt động lực của một số loại dầu công nghiệp ở các nhiệt độ khác nhau**

Tên dầu (Dầu tương đương của Shell)	Khối lượng riêng $\rho$ của dầu ở 20°C (g/cm <sup>3</sup> )	Độ nhớt động lực (Pa.s) ở các nhiệt độ °C						
		30	40	50	60	70	80	90
Dầu Veloxit	0.87	80.082	0.058	0.045	0.035	0.028	-	-
Dầu CN 12 (Vitrea 22)	0.89	0.250	0.165	0.118	0.085	0.063	0.048	-
Dầu CN 20 (Vitrea 32)	0.89	0.410	0.260	0.170	0.130	0.092	0.069	0.051
Dầu CN 30 (Vitrea 46)	0.89	0.750	0.400	0.260	0.185	0.130	0.094	0.071
Dầu CN 12 (Vitrea 68)	0.89	1.180	0.700	0.400	0.230	0.190	0.135	0.098

### 1.3.1.2. Tính năng bôi trơn

Tính năng bôi trơn của dầu có ý nghĩa quyết định trong trường hợp không thể thực hiện được bôi trơn ma sát ướt nhưng dầu có thể tạo ra màng bôi trơn có sức cản thấp và hấp thụ vũng chắc vào các bề mặt ma sát.

### 1.3.2. Dầu phi Niuton

Đối với loại dầu phi Niuton, ta có:

$$\tau = K \left( \frac{du}{dy} \right)^n \quad (1-5)$$

Trong đó:

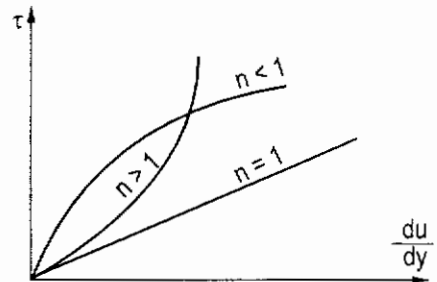
$n$  - chỉ số đậm đặc của dầu;

- Nếu  $n = 1$  thì  $K = \mu$  và trở lại giả thiết của Niuton;

- Nếu  $n < 1$ , dầu phi Niuton có tính chất "đẻo giả";

- Nếu  $n > 1$ , dầu phi Niuton mang tính chất dilatan.

Trên hình 1.11 là đồ thị phân loại dầu theo chỉ số đậm đặc  $n$ .



**Hình 1.11.** Đồ thị phân loại dầu theo chỉ số đậm đặc

Trong thực tế, các nhà khoa học đã tìm ra các loại dầu đặc trưng bởi các phương trình trạng thái sau đây:



- Phương trình Ostvald:

$$\tau = K \left| \frac{du}{dy} \right|^{n-1} \frac{du}{dy} \quad (n < 1) \quad (1-6)$$

- Phương trình Ellis:

$$\tau = \left( A + B \left| \frac{du}{dy} \right|^{n-1} \right) \frac{du}{dy} \quad (n > 0) \quad (1-7)$$

- Phương trình Prandtl:

$$\tau = A \left| \frac{du}{dy} \right| \arcsin \left( \frac{1}{C} \cdot \frac{du}{dy} \right) \quad (1-8)$$

- Phương trình Bingham-Svedov:

$$\tau = \tau_0 + \mu_0 \frac{du}{dy} \quad (1-9)$$

$\tau_0, \mu_0$  - ứng suất trượt và độ nhớt của dầu ở thời điểm ban đầu  $t_0$ .

$$\tau = \tau_0 A \frac{du}{dy} n \quad (1-10)$$

- Phương trình Hershel-Bulkley:

$$\tau = \tau_0 A \frac{du}{dy} n \quad (1-11)$$

- Phương trình Shulman:

$$\tau = \left[ \tau_0^n + \left( \mu_0 \frac{du}{dy} \right)^m \right]^n \quad (1-12)$$

$m$  và  $n$  là những hằng số.

Ngoài ra còn có các phương trình khác như: Sisco, Williamson,...

### 1.3.3. Quá trình cải thiện và sử dụng chất bôi trơn

#### 1.3.3.1. Quá trình cải thiện chất bôi trơn

Lịch sử kỹ thuật bôi trơn gắn liền với sự cải thiện và sử dụng chúng.

Theo V.V.Panov, K.K.Pafov có thể chia lịch sử các loại chất bôi trơn thành những thời kỳ sau:

I - Từ thời đại đồ đồng đến năm 1880: sử dụng các loại mỡ và dầu thực vật

II- 1880 ÷ 1900: bắt đầu sử dụng dầu khoáng.

III - 1990 ÷ 1930: dầu khoáng thay thế dần các loại dầu động - thực vật.

IV- 1930 ÷ 1950: dầu khoáng thuần túy tổng trị.

V - 1950 ÷ 1970: dầu khoáng có chất pha tổng trị

VI - 1970 đến nay: sử dụng các loại dầu tổng hợp.

### ***1.3.3.2. Quá trình sử dụng chất bôi trơn***

Quá trình sử dụng chất bôi trơn gắn liền quá trình nghiên cứu về cơ chế, ảnh hưởng của chất bôi trơn đến các quá trình ma sát và hao mòn của các bề mặt ma sát trong máy móc thiết bị.

1) Năm 1883: N. P. Pétrov cho công bố công trình "Ma sát trong máy và ảnh hưởng của chất bôi trơn lỏng đến chúng". Ông là người đầu tiên trên thế giới đã giải thích rõ ràng cơ chế giữa các bề mặt được bôi trơn và chứng minh rằng trị số của lực ma sát không chỉ phụ thuộc vào tính chất của chất lỏng bôi trơn mà còn phụ thuộc vào chiều dày của lớp bôi trơn.

Năm 1886: Rây nol đã hoàn thiện về mặt toán học lý thuyết thủy động lực học với những giả thuyết riêng.

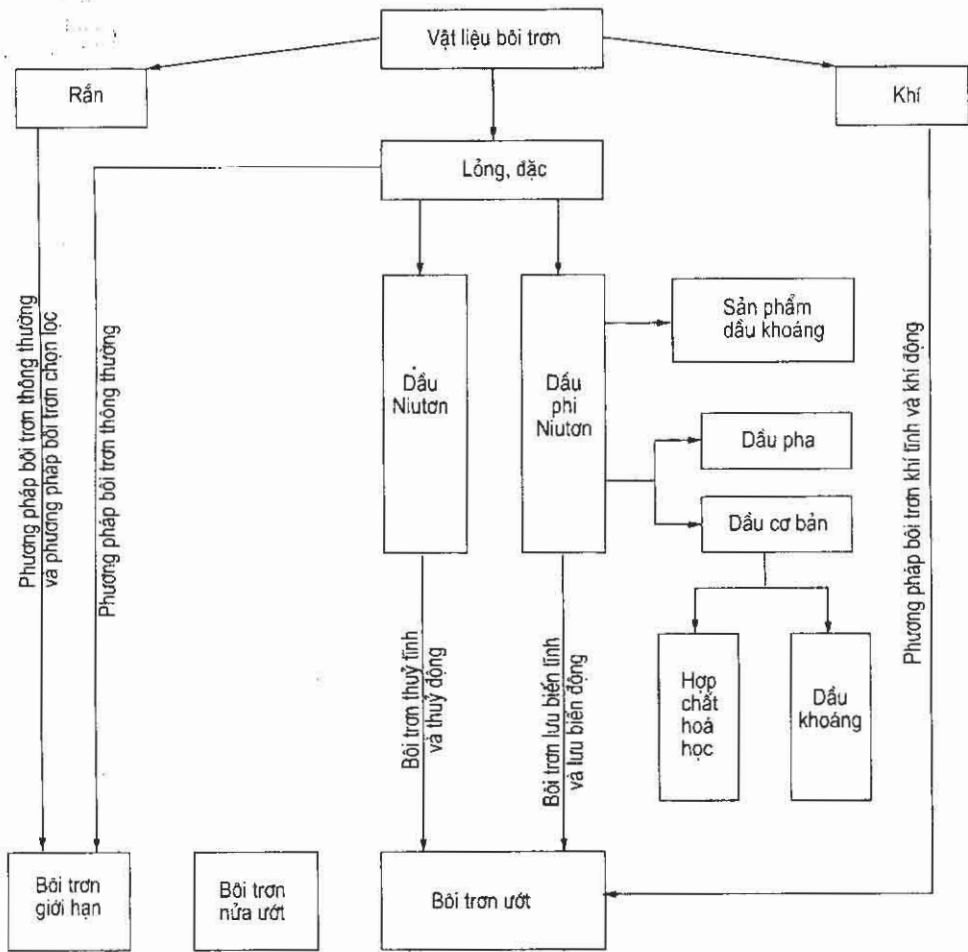
Sau đó, sự phát triển khoa học về bôi trơn gắn liền với việc phân hóa, kết luận và đào sâu các vấn đề được nghiên cứu. F.O.Bouden và D. Teybor đã chỉ ra mô hình đơn giản của Rây nol chưa đề cập đến hàng loạt nhân tố quan trọng như: sự lọt dầu ở mặt bên, sự xói mòn trong các lớp dầu; độ nhớt nhỏ bề mặt; sự thay đổi của độ nhớt dưới tác dụng của áp suất hoặc vận tốc trượt lớn...

2) Năm 1916: G.M.Martin và sau đó là V.Peppler, A.M.Ertel, P.L.Kapista, A.I.Ptruxévit, A.N.Grubin, M.V.M.Kôrocvinsky, Đ.X.Kodnir, A.Kameron đã đề xuất lý thuyết bôi trơn thủy động đàn hồi (thủy động tiếp xúc).

3) Năm 1930: Ra đời lý thuyết bôi trơn thủy tĩnh.

4) Từ năm 1950 trở lại đây với sự ra đời của các loại dầu tổng hợp mang tính chất nhớt, đàn hồi, dẻo (dầu phi Niuton). Chiabin và Nguyễn Anh Tuấn đã xây dựng nên lý thuyết bôi trơn lưu biến.

Dưới đây là sơ đồ phân loại các vật liệu bôi trơn và kỹ thuật sử dụng chúng (hình 1.12).



**Hình 1.12.** Sơ đồ phân loại vật liệu bôi trơn và kỹ thuật sử dụng chúng.

## Chương 2

# CÁC PHƯƠNG TRÌNH THỦY ĐỘNG LỰC HỌC VIẾT CHO MÀNG MỎNG NHỚT

### 2.1. PHƯƠNG TRÌNH TỔNG QUÁT

Các phương trình tổng quát của cơ học màng mỏng nhớt cho phép tính đến các điều kiện hình học và chuyển động, xác định các đặc trưng dòng chảy trong màng mỏng, đặc biệt là lực nâng của nó. Chúng được suy ra từ các phương trình cơ bản của môi trường liên tục, áp dụng cho chất lỏng Newton và được viết dưới dạng sau:

- Định luật bảo toàn khối lượng:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (2.1)$$

- Định luật cơ bản của động học:

$$\rho \left( \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_i \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) = \rho f_i + \frac{\partial \sigma_y}{\partial x_j} \quad (2.2)$$

- Định luật lưu biến với chất lỏng Newton:

$$\sigma_{ij} = (-p + \lambda \theta) \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij} \quad (2.3)$$

- Định luật bảo toàn năng lượng cho chất lỏng Newton:

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} = \alpha T \frac{dp}{dt} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( K \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \lambda \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right)^2 + \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.4)$$

Trong đó:  $x_i$  và  $t$  - các biến không gian và thời gian;

$u_i$  - thành phần vận tốc;

$\rho$  - khối lượng riêng của chất lỏng;

$f_i$  - ngoại lực;

$\sigma_{ij}$ - tenxơ ứng suất;

K- hệ số dẫn nhiệt của chất lỏng;

T- nhiệt độ của chất lỏng;

p- áp suất;

$\varepsilon_{ij}$ - tenxơ biến dạng;

$\theta$ - hệ số giãn nở khối;

$\delta_{ij}$ - ký hiệu Kronecker;

$\lambda$  và  $\mu$ - hệ số Navier và độ nhớt;

$C_p$ - nhiệt dung riêng ở áp suất không đổi:

$\alpha = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial t} \right)_p$  - hệ số giãn nở ở áp suất không đổi.

Lắp ghép phương trình (2.3) vào phương trình (2.2) ta nhận được phương trình Navier:

$$\rho \left( \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)^2 = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \lambda \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_i \partial x_j} + \mu \left( \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_i \partial x_j} \right) + \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \frac{\partial \lambda}{\partial x_i} + \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \mu}{\partial x_j} \quad (2.5)$$

Sử dụng các đại lượng không thứ nguyên:

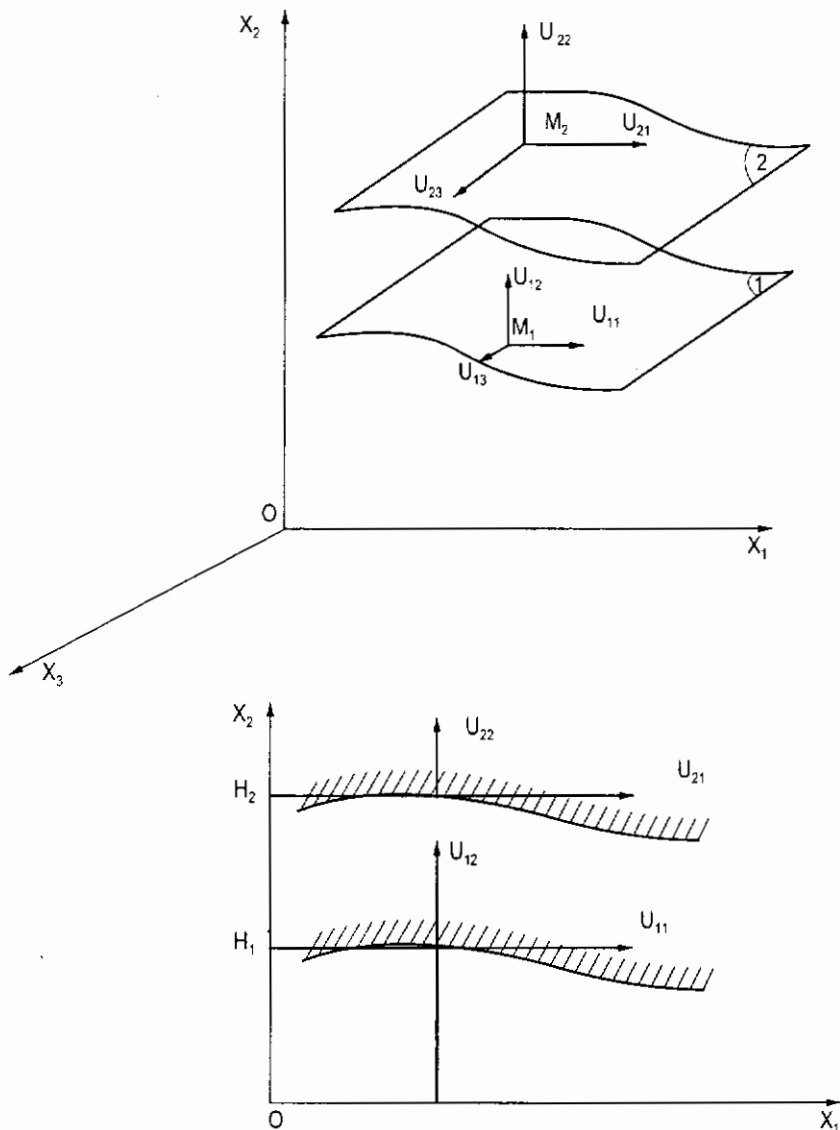
$$\begin{aligned} \bar{X}_1 &= \frac{x_1}{L}; & \bar{X}_2 &= \frac{x_2}{L}; & \bar{X}_3 &= \frac{x_3}{L}; & \bar{t} &= \frac{tV}{L}; \\ \bar{u}_1 &= \frac{u_1}{V}; & \bar{u}_2 &= \frac{u_2 L}{VH}; & \bar{u}_3 &= \frac{u_3}{V}; \\ \bar{\mu} &= \frac{\mu}{\mu_0}; & \bar{\lambda} &= \frac{\lambda}{\lambda_0} & \text{và} & \bar{p} &= p \frac{H^2}{\mu_0 VL} \end{aligned}$$

Trong đó:

L và V - kích thước và vận tốc các trục  $(0, \bar{x}_1)$  và  $(0, \bar{x}_3)$ ;

H và  $\frac{VH}{L} \sim (0, \bar{x}_2)$ ;  $\frac{V}{L}$  - thời gian đặc trưng;

$\lambda_0$  và  $\mu_0$  - hệ số Navier và độ nhớt của chất lỏng.



*Hình 2.1. Hệ thống các trục và ký hiệu*

Trong thủy động lực học:  $V$  là vận tốc của một trong hai bề mặt ma sát (thành tiếp xúc). Nếu cả hai bề mặt không chuyển động - tiếp xúc mang tính thủy lực, thì  $\bar{p} = \frac{P}{P_s}$  với  $p_s$  là áp suất cấp. Do đó, vận tốc đặc trưng là:

$$V = \frac{p_s H^2}{\mu_0 L}$$

Sau khi biến đổi, phương trình (2.5) viết cho các biến:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{x}_1} &= \varepsilon \left[ -\Re \left( \frac{\partial \bar{u}_1}{\partial \bar{t}} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_1}{\partial \bar{x}_j} \right) + \varepsilon \left( \bar{\mu} + \bar{\lambda} \frac{\lambda_0}{\mu_0} \right) \frac{\partial}{\partial \bar{x}_1} \left( \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial \bar{x}_j} \right) + \varepsilon \bar{\mu} \left( \frac{\partial^2 \bar{u}_1}{\partial \bar{x}_1^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}_1}{\partial \bar{x}_3^2} \right) \right] \\
 &+ \bar{\mu} \frac{\partial^2 \bar{u}_1}{\partial \bar{x}_2^2} + \varepsilon^2 \left[ \frac{\lambda_0}{\mu_0} \frac{\partial \bar{\lambda}}{\partial \bar{x}_1} \left( \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial \bar{x}_j} \right) + 2 \frac{\partial \bar{\mu}}{\partial \bar{x}_1} \frac{\partial \bar{u}_1}{\partial \bar{x}_1} + \frac{\partial \bar{\mu}}{\partial \bar{x}_3} \left( \frac{\partial \bar{u}_1}{\partial \bar{x}_3} + \frac{\partial \bar{u}_3}{\partial \bar{x}_1} \right) \right] + \\
 &+ \frac{\partial \bar{\mu}}{\partial \bar{x}_2} \left( \frac{\partial \bar{u}_1}{\partial \bar{x}_2} + \varepsilon^2 \frac{\partial \bar{u}_2}{\partial \bar{x}_1} \right) \\
 \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{x}_2} &= \varepsilon^2 \left\{ \varepsilon \left[ -\Re \left( \frac{\partial \bar{u}_2}{\partial \bar{t}} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_2}{\partial \bar{x}_j} \right) + \varepsilon \bar{\mu} \left( \frac{\partial^2 \bar{u}_2}{\partial \bar{x}_1^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}_2}{\partial \bar{x}_3^2} \right) \right] + \right. \\
 &+ \left( \bar{\mu} + \bar{\lambda} \frac{\lambda_0}{\mu_0} \right) \frac{\partial}{\partial \bar{x}_2} \left( \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial \bar{x}_j} \right) + \bar{\mu} \frac{\partial^2 \bar{u}_2}{\partial \bar{x}_2^2} + \frac{\lambda_0}{\mu_0} \frac{\partial \bar{\lambda}}{\partial \bar{x}_2} \left( \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial \bar{x}_j} \right) \\
 &+ \left. 2 \frac{\partial \bar{\mu}}{\partial \bar{x}_2} \frac{\partial \bar{u}_2}{\partial \bar{x}_2} + \frac{\partial \bar{\mu}}{\partial \bar{x}_1} \left( \frac{\partial \bar{u}_1}{\partial \bar{x}_2} + \varepsilon^2 \frac{\partial \bar{u}_2}{\partial \bar{x}_1} \right) + \frac{\partial \bar{\mu}}{\partial \bar{x}_3} \left( \frac{\partial \bar{u}_3}{\partial \bar{x}_2} + \varepsilon^2 \frac{\partial \bar{u}_2}{\partial \bar{x}_3} \right) \right\} \quad (2.6) \\
 \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{x}_3} &= \varepsilon \left[ -\Re \left( \frac{\partial \bar{u}_3}{\partial \bar{t}} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_3}{\partial \bar{x}_j} \right) + \varepsilon \left( \bar{\mu} + \bar{\lambda} \frac{\lambda_0}{\mu_0} \right) \frac{\partial}{\partial \bar{x}_3} \left( \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial \bar{x}_j} \right) + \varepsilon \bar{\mu} \left( \frac{\partial^2 \bar{u}_3}{\partial \bar{x}_1^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}_3}{\partial \bar{x}_3^2} \right) \right] \\
 &+ \bar{\mu} \frac{\partial^2 \bar{u}_3}{\partial \bar{x}_3^2} + \varepsilon^2 \left[ \frac{\lambda_0}{\mu_0} \frac{\partial \bar{\lambda}}{\partial \bar{x}_3} \left( \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial \bar{x}_j} \right) + 2 \frac{\partial \bar{\mu}}{\partial \bar{x}_3} \frac{\partial \bar{u}_3}{\partial \bar{x}_3} + \frac{\partial \bar{\mu}}{\partial \bar{x}_1} \left( \frac{\partial \bar{u}_3}{\partial \bar{x}_1} + \frac{\partial \bar{u}_1}{\partial \bar{x}_3} \right) \right] \\
 &+ \frac{\partial \bar{\mu}}{\partial \bar{x}_2} \left( \frac{\partial \bar{u}_3}{\partial \bar{x}_2} + \varepsilon^2 \frac{\partial \bar{u}_2}{\partial \bar{x}_3} \right)
 \end{aligned}$$

Trong đó:

$$\Re = \rho_0 \frac{VH}{\mu_0} \text{ - số Rây-nôl; } \quad \varepsilon = \frac{H}{L} \text{ - thông số tỷ lệ.}$$

Bỏ qua các thừa số bậc cao  $\varepsilon^2$ ,  $\varepsilon^3$  phương trình (2.6) còn là:

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{x}_i} = -\varepsilon \Re \left[ \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial \bar{t}} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial \bar{x}_j} \right] + \bar{\mu} \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial \bar{x}_2^2} + \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial \bar{x}_2} \frac{\partial \bar{\mu}}{\partial \bar{x}_2} \quad (i = 1 \text{ và } 3) \\ \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{x}_2} = 0 \end{cases} \quad (2.7)$$

Các tích số  $\varepsilon \mathfrak{R}$  đối với phần lớn các dòng chảy gặp trong bôi trơn có thể bỏ qua (vì  $\varepsilon \mathfrak{R} \ll 1$ ). Tuy nhiên, trường hợp ngoại lệ khi độ nhớt của chất lỏng nhỏ ( $\varepsilon \mathfrak{R} \approx 1$ ) thành phần lực quán tính trong (2.7) lớn nên cần được giữ lại.

Nếu bỏ qua các lực quán tính ( $\varepsilon \mathfrak{R} = 0$ ):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{x}_1} = \bar{\mu} \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial \bar{x}_2^2} + \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial \bar{x}_2} \frac{\partial \bar{\mu}}{\partial \bar{x}_2} \quad (i = 1 \text{ và } 3) \\ \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{x}_2} = 0 \end{array} \right. \quad (2.8)$$

Đưa trở lại các biến kích thước:

$$\left. \begin{array}{l} \frac{\partial p}{\partial x_1} = \frac{\partial p}{\partial x_2} \left( \mu \frac{\partial u_1}{\partial x_2} \right) \\ \frac{\partial p}{\partial x_2} = 0 \\ \frac{\partial p}{\partial x_3} = \frac{\partial p}{\partial x_2} \left( \mu \frac{\partial u_3}{\partial x_2} \right) \end{array} \right\} \quad (2.9)$$

Các phương trình này cùng với phương trình bảo toàn khối lượng (2.1), phương trình bảo toàn năng lượng (2.4) có kể đến các điều kiện biên và sau khi tích phân cho ta biết được trường tốc độ, áp suất và ứng suất trong màng mỏng nhớt.

Để lấy tích phân các phương trình (2.9), cần thiết lập các điều kiện giới hạn của vận tốc (hình 2.1). Nếu giả thiết không có sự trượt giữa chất lỏng và các thành tiếp xúc, các điều kiện được viết:

$$\left. \begin{array}{l} u_1 = U_{11}, u_2 = U_{12}, u_3 = U_{13} \text{ với } x_2 = H_1(x_1, x_3, t) \\ u_1 = U_{21}, u_2 = U_{22}, u_3 = U_{23} \text{ với } x_2 = H_2(x_1, x_3, t) \end{array} \right\} \quad (2.10)$$

Với hệ trục hình 2.1, chiều dày màng được đo theo  $(0, \bar{x}_2)$ , bỏ qua độ cong của màng và đặt:

$$\left. \begin{array}{l} I = \int_{H_1}^{x_2} \frac{\zeta}{\mu(x_1, \zeta, x_3, t)} d\zeta \\ J = \int_{H_1}^{x_2} \frac{\zeta}{\mu(x_1, \zeta, x_3, t)} d\zeta \end{array} \right\} \quad (2.11)$$



Trong đó:

$\xi$ - biến tích phân:

Với  $x_2 = H_1$ ;  $I = J = 0$

Với  $x_2 = H_2$ :

$$\left. \begin{aligned} I &= \int_{H_1}^{H_2} \frac{x_2}{\mu(x_i, t)} dx_2 \\ J &= \int_{H_1}^{H_2} \frac{1}{\mu(x_i, t)} dx_2 \end{aligned} \right\} \quad (2.12)$$

Các thành phần vận tốc:

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= \frac{\partial p}{\partial x_1} \left( I - \frac{J I_2}{J_2} \right) + \frac{U_{21} - U_{11}}{J_2} J + U_{11} \\ u_3 &= \frac{\partial p}{\partial x_3} \left( I - \frac{J I_2}{J_2} \right) + \frac{U_{23} - U_{13}}{J_2} J + U_{13} \end{aligned} \right\} \quad (2.13)$$

Tích phân phương trình bảo toàn khối lượng (2.1) theo chiều dày màng:

$$\int_{H_1}^{H_2} \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_i} dx_2 + \int_{H_1}^{H_2} \frac{\partial \rho}{\partial t} dx_2 = 0 \quad (2.14)$$

Thay đổi ký hiệu tích phân và đạo hàm với chú ý:

$$\int_{H_1(x_1, x_3, t)}^{H_2(x_1, x_3, t)} \frac{\partial F(x_1, x_2, x_3, t)}{\partial x_i} dx_2 = \frac{\partial}{\partial x_i} \int_{H_1}^{H_2} F dx_2 - F(x_1, H_2, x_3, t) \frac{\partial H_2}{\partial x_i} + F(x_1, H_1, x_3, t) \frac{\partial H_1}{\partial x_i} \quad (2.15)$$

$$\text{Mặt khác: } \int_{H_1}^{H_2} \frac{\partial \rho u_2}{\partial x_2} dx_2 = \rho_2 U_{22} - \rho_1 U_{12} \quad (2.16)$$

Trong đó:  $\rho_1, \rho_2$  - khối lượng riêng của chất lỏng trên thành 1 và 2.

Xét các công thức (2.10) đến (2.16), nhận được:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x_1} \int_{H_1}^{H_2} \rho u_1 dx_2 + \frac{\partial}{\partial x_3} \int_{H_1}^{H_2} \rho u_3 dx_2 - \rho_2 U_{21} \frac{\partial H_2}{\partial x_1} - \rho_2 U_{23} \frac{\partial H_2}{\partial x_3} + \rho_1 U_{11} \frac{\partial H_1}{\partial x_1} + \\ & + \rho_1 U_{13} \frac{\partial H_1}{\partial x_3} + \rho_2 U_{22} - \rho_1 U_{12} + \frac{\partial}{\partial t} \int_{H_1}^{H_2} \rho dx_2 - \rho_2 \frac{\partial H_2}{\partial t} + \rho_1 \frac{\partial H_1}{\partial t} = 0 \end{aligned} \quad (2.17)$$

Hai đại lượng đầu có thể được làm rõ bằng cách tích phân từng phần và đặt:

$$\left. \begin{aligned} R &= \int_{H_1}^{x_2} \rho(x_1, \zeta, x_3, t) d\zeta \\ F &= \frac{1}{J_2} \int_{H_1}^{H_2} \frac{R}{\mu} dx_2 \\ G &= \int_{H_1}^{H_2} \frac{R}{\mu} \left( x_2 - \frac{I_2}{J_2} \right) dx_2 = \int_{H_1}^{H_2} \frac{R x_2}{\mu} dx_2 - I_2 F \end{aligned} \right\} \quad (2.18)$$

Do đó:

$$\left. \begin{aligned} \int_{H_1}^{H_2} \rho u_1 dx_2 &= R_2 U_{21} - \frac{\partial p}{\partial x_1} G - (U_{21} - U_{11}) F \\ \int_{H_1}^{H_2} \rho u_3 dx_2 &= R_2 U_{23} - \frac{\partial p}{\partial x_3} G - (U_{23} - U_{13}) F \end{aligned} \right\} \quad (2.19)$$

Trong đó:  $R_2$  - giá trị của R trên thành 2.

Sau khi nhóm các đại lượng ta nhận được phương trình cơ học màng mỏng nhất tổng quát:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x_1} \left( G \frac{\partial p}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_3} \left( G \frac{\partial p}{\partial x_3} \right) = \frac{\partial}{\partial x_1} [U_{21}(R_2 - F) + U_{11}F] - \rho_2 U_{21} \frac{\partial H_2}{\partial x_1} + \\ & + \rho_1 U_{11} \frac{\partial H_1}{\partial x_1} + \frac{\partial}{\partial x_3} [U_{23}(R_2 - F) + U_{13}F] - \rho_2 U_{23} \frac{\partial H_2}{\partial x_3} + \\ & + \rho_1 U_{13} \frac{\partial H_1}{\partial x_3} + \frac{\partial R_2}{\partial t} - \rho_2 \frac{\partial H_2}{\partial t} + \rho_1 \frac{\partial H_1}{\partial t} + \rho_2 U_{22} - \rho_1 U_{12} \end{aligned} \quad (2.20)$$

Các ứng suất được đưa về:

$$\sigma_{12} = \mu \frac{\partial u_1}{\partial x_2} \quad \text{và} \quad \sigma_{32} = \mu \frac{\partial u_3}{\partial x_2} \quad (2.21)$$

Sử dụng các biểu thức (2.13):

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{12} &= \left( x_2 - \frac{I_2}{J_2} \right) \frac{\partial p}{\partial x_1} + \frac{U_{21} - U_{11}}{J_2} \\ \sigma_{32} &= \left( x_2 - \frac{I_2}{J_2} \right) \frac{\partial p}{\partial x_3} + \frac{U_{23} - U_{13}}{J_2} \end{aligned} \right\} \quad (2.22)$$

## 2.2. Ý NGHĨA VẬT LÝ

Để xây dựng phương trình Raynol từ phương trình tổng quát, có thể xuất phát từ các giả thiết cơ bản sau:

- Môi trường là liên tục;
- Chất lỏng Niuton;
- Dòng dầu chảy tầng;
- Bỏ qua trọng lượng dầu;
- Bỏ qua lực quán tính;
- Không có sự trượt giữa lớp chất lỏng và thành tiếp xúc;
- Độ cong của các thành không đáng kể;
- Chiều dày màng dầu đo theo  $o\bar{x}_2$  là nhỏ so với các kích thước khác.
- Trong phương trình (2.20):

+ Biểu thức  $\frac{\partial}{\partial x_1} [U_{21}(R_2 - F) + U_{11}F] - \frac{\partial}{\partial x_1} \left( G \frac{\partial p}{\partial x_1} \right) \rightarrow$  biểu diễn biến

thiên lưu lượng khối theo chiều  $x_1$  cho mặt cắt kích thước  $H_2 - H_1$  và  $x_2$  ( $x_3$  là đơn vị).

+ Biểu thức  $\frac{\partial}{\partial x_3} [U_{23}(R_2 - F) + U_{13}F] - \frac{\partial}{\partial x_3} \left( G \frac{\partial p}{\partial x_3} \right) \rightarrow$  biểu diễn biến

thiên lưu lượng khối theo chiều  $x_3$  cho mặt cắt kích thước  $H_2 - H_1$  và  $x_2$  ( $x_1$  là đơn vị).

+ Biểu thức:

$$\underbrace{\rho_1 \left( U_{11} \frac{\partial H_1}{\partial x_1} + U_{13} \frac{\partial H_1}{\partial x_3} - U_{12} \right)}_{(a)} - \underbrace{\rho_2 \left( U_{21} \frac{\partial H_2}{\partial x_1} + U_{23} \frac{\partial H_2}{\partial x_3} - U_{22} \right)}_{(b)} \rightarrow \text{biểu}$$

diễn biến thiên lưu lượng khối theo chiều  $x_3$  cho mặt cắt đơn vị: 3 đại lượng

dấu của biểu thức này đặc trưng cho ảnh hưởng của sự nghiêng theo chiều  $x_1$ , sự nghiêng theo chiều  $x_3$  và vận tốc theo phương  $x_2$  của bề mặt  $S_1$ ; 3 đại lượng sau của bề mặt  $S_2$ ; đồng thời:

- a) Tương ứng với lưu lượng do sự dịch chuyển của thành;
- b) Tương ứng với lưu lượng do gradien áp suất.

+ Biểu thức:  $\frac{\partial R_2}{\partial t} - \rho_2 \frac{\partial H_2}{\partial t} + \rho_1 \frac{\partial H_1}{\partial t} \rightarrow$  đặc trưng cho ảnh hưởng nhất thời do khả năng nén được của chất lỏng.

Phương trình cơ học của màng mỏng nhớt tổng quát được áp dụng cho các chất bôi trơn khác nhau và cho các kiểu tiếp xúc. Có thể phân biệt:

- Chất lỏng không nén được ( $\rho = \text{const}$ ), đơn giản phương trình (2.20).
- Chất lỏng có độ nhớt không đổi, đơn giản hóa phương trình (2.20).
- Bôi trơn thủy tĩnh, phương trình (2.20) được viết là:

$$\frac{\partial}{\partial x_1} \left( G \frac{\partial p}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_3} \left( G \frac{\partial}{\partial x_3} \right) = 0 \quad (2.23)$$

- Chế độ vĩnh cửu: trong cơ học màng mỏng nhớt được xem như chế độ vận hành gồm một mốt đặc biệt (chuyển động hoặc không), các thông số hình học của tiếp xúc và vận tốc thành không phụ thuộc vào thời gian.

### 2.3. PHƯƠNG TRÌNH NĂNG LƯỢNG CHO MÀNG MỎNG NHỚT

Trong màng mỏng nhớt, phương trình năng lượng được đơn giản hóa rất nhiều vì chiều dày của màng rất nhỏ. Để thuận tiện, phương trình được viết dưới dạng không thứ nguyên, với:

$$\bar{T} = \frac{T}{T_0}, \quad \bar{\rho} = \frac{\rho}{\rho_0}, \quad \bar{C} = \frac{C_p}{C_{p_0}}, \quad \bar{\alpha} = \frac{\alpha}{\alpha_0}, \quad \bar{K} = \frac{K}{K_0}$$

Trong đó:

$T_0, \rho_0, C_{p_0}, \alpha_0, K_0$  - giá trị của nhiệt độ, khối lượng riêng, nhiệt dung, hệ số giãn nở nhiệt và hệ số độ dẫn nhiệt của chất lỏng (các giá trị này thông thường là các giá trị đầu vào của tiếp xúc).

Do vậy phương trình năng lượng (2.4) được viết:

$$\begin{aligned}
 P_c \bar{\rho} \bar{C}_p \left( \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{x}_j} \right) &= \alpha_o T_o N_d \bar{\alpha} \bar{T} \left( \frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{x}_j} \right) + \frac{\partial}{\partial \bar{x}_2} \left( \bar{K} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{x}_2} \right) + \\
 + \varepsilon^2 \left[ \frac{\partial}{\partial \bar{x}_1} \left( \bar{K} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{x}_1} \right) + \frac{\partial}{\partial \bar{x}_3} \left( \bar{K} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{x}_3} \right) \right] &+ \frac{\lambda_o}{\mu_o} N_d \varepsilon^2 \left( \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial \bar{x}_j} \right) + \\
 + N_d \bar{\mu} \left\{ \left( \frac{\partial \bar{u}_1}{\partial \bar{x}_2} \right)^2 + \left( \frac{\partial \bar{u}_3}{\partial \bar{x}_2} \right)^2 + 2 \varepsilon^2 \left[ \left( \frac{\partial \bar{u}_1}{\partial \bar{x}_1} \right)^2 + \left( \frac{\partial \bar{u}_2}{\partial \bar{x}_2} \right)^2 + \left( \frac{\partial \bar{u}_3}{\partial \bar{x}_3} \right)^2 \right] \right\} &+ \\
 + N_d \bar{\mu} \varepsilon^2 \left[ \left( \frac{\partial \bar{u}_1}{\partial \bar{x}_3} \right)^2 + \left( \frac{\partial \bar{u}_3}{\partial \bar{x}_1} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial \bar{u}_1}{\partial \bar{x}_3} \frac{\partial \bar{u}_3}{\partial \bar{x}_1} + \frac{\partial \bar{u}_1}{\partial \bar{x}_2} \frac{\partial \bar{u}_2}{\partial \bar{x}_1} + \frac{\partial \bar{u}_2}{\partial \bar{x}_3} \frac{\partial \bar{u}_3}{\partial \bar{x}_2} \right) \right] &+ \\
 + N_d \bar{\mu} \varepsilon^4 \left[ \left( \frac{\partial \bar{u}_2}{\partial \bar{x}_1} \right)^2 + \left( \frac{\partial \bar{u}_2}{\partial \bar{x}_3} \right)^2 \right] &
 \end{aligned} \tag{2.24}$$

Trong biểu thức này số Peclet  $P_c$  và số Tan  $N_d$ :

$$\left. \begin{aligned}
 P_c &= \rho_o \frac{C_{p_o} V H^2}{K_o L} \\
 N_d &= \frac{\mu_o V^2}{T_o K_o}
 \end{aligned} \right\} \tag{2.25}$$

Nếu bỏ qua tất cả các số hạng nhân với  $\varepsilon^2$  và  $\varepsilon^4$ , kết hợp với (2.8):  $\frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{x}_2} = 0$ ,

phương trình (2.24), còn lại:

$$\begin{aligned}
 P_c \bar{\rho} \bar{C}_p \left( \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{x}_j} \right) &= \alpha_o T_o N_d \bar{\alpha} \bar{T} \left( \frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \bar{u}_1 \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{x}_1} + \bar{u}_3 \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{x}_3} \right) + \\
 + \frac{\partial}{\partial \bar{x}_2} \left( \bar{K} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{x}_2} \right) &+ N_d \bar{\mu} \left[ \left( \frac{\partial \bar{u}_1}{\partial \bar{x}_2} \right)^2 + \left( \frac{\partial \bar{u}_3}{\partial \bar{x}_2} \right)^2 \right]
 \end{aligned} \tag{2.26}$$

Với các biến thứ nguyên, phương trình (2.26):

$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u_j \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) = \alpha T \left( \frac{\partial p}{\partial t} + u_1 \frac{\partial p}{\partial x_1} + u_3 \frac{\partial p}{\partial x_3} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left( K \frac{\partial T}{\partial x_2} \right) + \mu \left[ \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_2} \right)^2 + \left( \frac{\partial u_3}{\partial x_2} \right)^2 \right] \quad (2.27)$$

Phương trình (2.27) là phương trình năng lượng ứng dụng cho màng mỏng nhớt. Số hạng trái của phương trình đặc trưng cho dòng nhiệt tỏa ra do đối lưu; số hạng đầu tiên của vế phải phương trình tương ứng với sự giãn nở của chất lỏng; số hạng thứ hai là dòng nhiệt tỏa ra do truyền dẫn và số hạng cuối cùng là sự tan (giảm) nhớt.

Trường hợp chất lỏng không nén được, hệ số giãn nở nhiệt do áp suất không đổi  $\alpha = 0$ .

## 2.4. DẠNG ĐẶC BIỆT CỦA PHƯƠNG TRÌNH MÀNG MỎNG NHỚT TỔNG QUÁT

### 2.4.1. Phương trình màng mỏng nhớt

Trong trường hợp nhiệt độ không thay đổi theo chiều dày màng, nếu giả thiết độ nhớt  $\mu$  và khối lượng riêng của  $\rho$  của chất lỏng là hàm của nhiệt độ và áp suất:

$$\begin{aligned} \mu &= \mu(T, p) \text{ và } \rho = \rho(t, p) \\ T &= T(x_1, x_3, t) \text{ và } p = p(x_1, x_3, t) \\ \text{Do đó: } \left. \begin{aligned} \mu &= \mu(x_1, x_3, t) \\ \rho &= \rho(x_1, x_3, t) \end{aligned} \right\} \quad (2.28) \end{aligned}$$

Phương trình (2.20) - "phương trình màng mỏng nhớt" được viết:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_1} \left( \rho \frac{(H_2 - H_1)^3}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_3} \left( \rho \frac{(H_2 - H_1)^3}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x_3} \right) = \\ 6 \frac{\partial}{\partial x_1} \left[ \rho (U_{11} + U_{21})(H_2 - H_1) \right] - 2\rho U_{21} \frac{\partial H_2}{\partial x_1} + 12\rho U_{11} \frac{\partial H_1}{\partial x_1} + \\ 6 \frac{\partial}{\partial x_3} \left[ \rho (U_{13} + U_{23})(H_2 - H_1) \right] - 12\rho U_{23} \frac{\partial H_2}{\partial x_3} + 12\rho U_{13} \frac{\partial H_1}{\partial x_3} + \\ + 12\rho (U_{22} - U_{12}) + 12(H_2 - H_1) \frac{\partial \rho}{\partial t} \end{aligned} \quad (2.29)$$

Các vận tốc  $u_1$  và  $u_3$ :

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x_1} \left[ x_2^2 - x_2(H_1 + H_2) + H_1 H_2 \right] + \frac{U_{11} - U_{21}}{H_1 - H_2} (x_2 - H_1) + U_{11} \\ u_3 &= \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x_3} \left[ x_2^2 - x_2(H_1 + H_2) + H_1 H_2 \right] + \frac{U_{13} - U_{23}}{H_1 - H_2} (x_2 - H_1) + U_{13} \end{aligned} \right\} (2.30)$$

Ứng suất tiếp xúc trong màng:

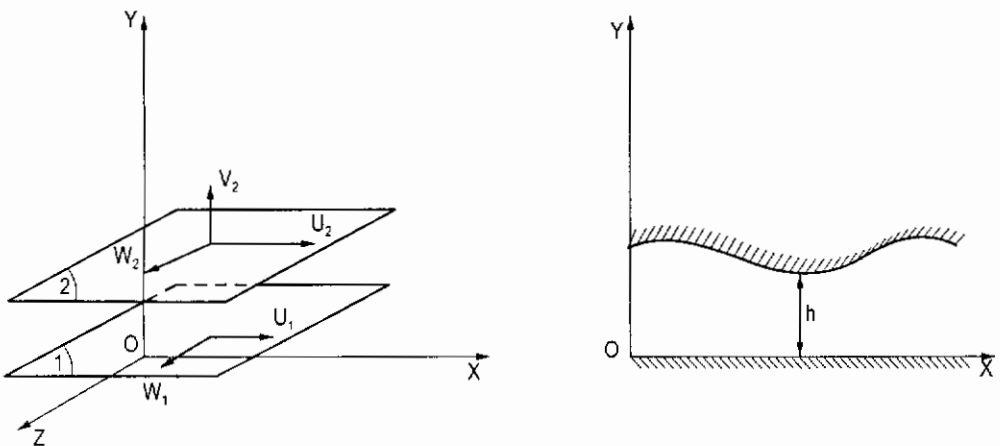
$$\left. \begin{aligned} \sigma_{12} &= \frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial x_1} (2x_2 - H_1 - H_2) + \mu \frac{U_{11} - U_{21}}{H_1 - H_2} \\ \sigma_{23} &= \frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial x_3} (2x_2 - H_1 - H_2) + \mu \frac{U_{13} - U_{23}}{H_1 - H_2} \end{aligned} \right\} (2.31)$$

Phương trình (2.29) sẽ được sử dụng chung cho việc nghiên cứu ảnh hưởng khuyết tật hình dạng và độ sần sùi trong đặc trưng vận hành của cơ hệ.

Độ nhớt và khối lượng riêng có thể thay đổi theo chiều dài và chiều rộng của tiếp xúc ( $x_1$  và  $x_3$ ) hơn là hàm của thời gian.

### 2.4.2. Phương trình Râynl tổng quát

Thường trong bôi trơn ướt, vận tốc tiếp xúc thành là tiếp tuyến với nó trên mọi điểm của thành. Phương trình màng mỏng nhớt tổng quát được đơn giản bằng cách gắn gốc hệ trục tọa độ với một thành:  $H_1 = 0$ ;  $H_2 = h$  (hình 2.2).



Hình 2.2. Hệ trục tọa độ

Sử dụng hệ trục tọa độ Đề - Các với các điều kiện giới hạn:

- Trên thành 1 với  $y = 0$ ;  $u = U_1$ ;  $v = 0$ ;  $w = W_1$ .

- Trên thành 2 với  $y = h$ ;  $u = U_2$ ;  $v = 0$ ;  $w = W_2$ .

Việc lựa chọn hệ trục làm vận tốc  $V_1$  của thành theo chiều  $y$  bằng 0. Các vận tốc  $u$  và  $w$  của chất lỏng:

$$\left. \begin{aligned} u &= \frac{\partial p}{\partial x} \left( I - \frac{I_2 J}{J_2} \right) + \frac{U_2 - U_1}{J_2} J + U_1 \\ w &= \frac{\partial p}{\partial z} \left( I - \frac{I_2 J}{J_2} \right) + \frac{W_2 - W_1}{J_2} J + W_1 \end{aligned} \right\} \quad (2.32)$$

Trong đó:

$$\left. \begin{aligned} I &= \int_0^y \frac{\zeta}{\mu} d\zeta; \quad J = \int_0^y \frac{1}{\mu} d\zeta \\ I_2 &= \int_0^y \frac{y}{\mu} dy; \quad J_2 = \int_0^y \frac{1}{\mu} dy \end{aligned} \right\} \quad (2.33)$$

Từ các biểu thức trên, ta có ứng suất tiếp xúc trong chất lỏng:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{yz} &= \left( y - \frac{I_2}{J_2} \right) \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{U_2 - U_1}{J_2} \\ \sigma_{xy} &= \left( y - \frac{I_2}{J_2} \right) \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{W_2 - W_1}{J_2} \end{aligned} \right\} \quad (2.34)$$

Phương trình (2.20) viết lại và được gọi là *phương trình Râynoł tổng quát*:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left( G \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( G \frac{\partial}{\partial z} \right) &= \frac{\partial}{\partial x} [U_2(R_2 - F) + U_1 F] - \\ - \rho_2 U_2 \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} [W_2(R_2 - F) + W_1 F] - \\ - \rho_2 W_2 \frac{\partial h}{\partial z} + \frac{\partial R_2}{\partial t} - \rho_2 \frac{\partial h}{\partial t} + \rho_2 V_2 \end{aligned} \quad (2.35)$$

Với hàm  $R$ ,  $F$ ,  $G$ ,  $R_2$  như sau:



$$\left. \begin{aligned}
 R &= \int_0^y \rho(x, \zeta, z, t) d\zeta \\
 F &= \frac{1}{J_2} \int_0^y \frac{R}{\mu} dy \\
 G &= \frac{1}{J_2} \int_0^y \frac{Ry}{\mu} dy - I_2 F \\
 R_2 &= \int_0^y \rho dy
 \end{aligned} \right\} \quad (2.36)$$

Các biểu thức này được sử dụng để nghiên cứu các tiếp xúc trong đó có tính đến ảnh hưởng của nhiệt.

### 2.4.3. Phương trình Rây-nôl

Với giả thiết độ nhớt và khối lượng riêng chất lỏng không đổi theo chiều dày màng và đặt gốc tọa độ trên một trong các thành tiếp xúc (hình 2.2.). Ta nhận được phương trình Rây-nôl viết trong hệ tọa độ Đề - Các.

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\rho h^3}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\rho h^3}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \right) &= 6\rho(U_1 - U_2) \frac{\partial h}{\partial x} + 6\rho(W_1 - W_2) \frac{\partial h}{\partial z} \\
 + 6h \frac{\partial}{\partial x} [\rho(U_1 + U_2)] + 6h \frac{\partial}{\partial z} [\rho(W_1 + W_2)] + 12\rho V_2 + 12h \frac{\partial \rho}{\partial t}
 \end{aligned} \quad (2.37)$$

Các thành phần vận tốc  $u$  và  $w$  theo các chiều  $x$  và  $z$ :

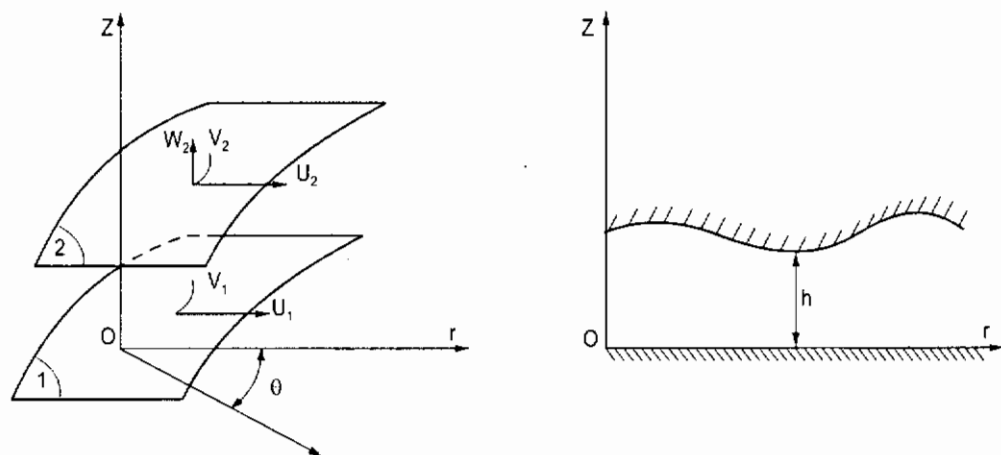
$$\left. \begin{aligned}
 u &= \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} y(y-h) - \frac{h-y}{h} U_1 + \frac{y}{h} U_2 \\
 w &= \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial z} y(y-h) - \frac{h-y}{h} W_1 + \frac{y}{h} W_2
 \end{aligned} \right\} \quad (2.38)$$

Ứng suất tiếp xúc trong chất lỏng:

$$\left. \begin{aligned}
 \sigma_{xy} &= \mu \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial x} (2y-h) + (U_2 - U_1) \frac{\mu}{h} \\
 \sigma_{yz} &= \mu \frac{\partial w}{\partial y} = \frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial z} (2y-h) + (W_2 - W_1) \frac{\mu}{h}
 \end{aligned} \right\} \quad (2.39)$$

Trong hệ tọa độ trụ  $(r, \theta, z)$  với chiều dày của màng  $h$  theo hệ trục  $OZ$  (hình 2.3), phương trình Raynol được viết:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial r} \left( \rho \frac{rh^3}{\mu} \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \rho \frac{h^3}{\mu r} \frac{\partial p}{\partial \theta} \right) &= 6r\rho(U_1 - U_2) \frac{\partial h}{\partial r} + \\ + 6\rho(V_1 - V_2) \frac{\partial h}{\partial \theta} + 6rh \frac{\partial}{\partial r} [\rho(U_1 + U_2)] + & \quad (2.40) \\ + 6h \frac{\partial p}{\partial \theta} [\rho(V_1 - V_2)] + 6\rho h(U_1 + U_2) + 12\rho r(W_2) + 12h \frac{\partial p}{\partial t} \end{aligned}$$



**Hình 2.3.** Hệ tọa độ trụ

Các thành phần vận tốc  $u$  và  $v$  của chất lỏng:

$$\left. \begin{aligned} u &= \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial r} z(z-h) + \frac{h-z}{h} U_1 + \frac{z}{h} U_2 \\ v &= \frac{1}{2\mu r} \frac{\partial p}{\partial \theta} z(z-h) + \frac{h-z}{h} V_1 + \frac{z}{h} V_2 \end{aligned} \right\} \quad (2.41)$$

Ứng suất tiếp xúc trong chất lỏng:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{rz} &= \mu \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial r} (2z-h) + (U_2 - U_1) + \frac{\mu}{h} \\ \sigma_{\theta z} &= \mu \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial \theta} (2z-h) + (V_2 - V_1) + \frac{\mu}{h} \end{aligned} \right\} \quad (2.42)$$

## 2.5. ĐIỀU KIỆN BIÊN

### 2.5.1. Điều kiện biên trong trường hợp bề mặt tiếp xúc nhẵn

Điều kiện biên phương trình Raynol (2.37) trong vùng  $\Omega$  gắn với áp suất (gradient của áp suất) và lưu lượng (hình 2.4):

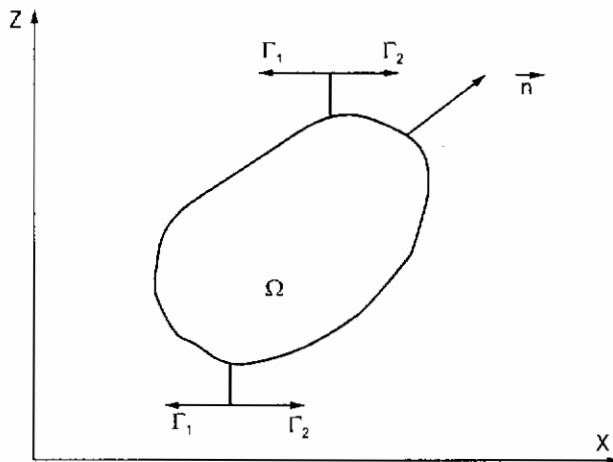
$$\left. \begin{aligned} p &= p_0 \text{ trên } \Gamma_1 \\ \bar{n} \cdot \left( \bar{U} \frac{h}{2} - \frac{h^3}{12\mu} \overline{\text{grad } p} \right) &= q \text{ trên } \Gamma_2 \end{aligned} \right\} \quad (2.43)$$

Trong đó:

$\bar{n}$  - véc tơ đơn vị (vuông góc với bề mặt);

$q$  - lưu lượng pháp trên chiều rộng đơn vị;

$\bar{U}$  - véc tơ vận tốc của các thành phần:  $U_1 + U_2$  và  $W_1 + W_2$ .



*Hình 2.4. Vùng lấy tích phân*

### 2.5.2. Vấn đề phá hủy màng bôi trơn

Các nghiên cứu thực nghiệm cho thấy tại vùng phá hủy màng dầu bôi trơn: áp suất không đổi và có giá trị bằng hoặc thấp hơn chút ít so với áp suất khí quyển (áp suất khí quyển và áp suất hóa hơi bão hòa là lân cận nhau).

Theo D. Dowson, C.M.Taylor, sự sụt áp ở một số điểm của  $\Omega$  (xấp xỉ áp suất khí quyển) dẫn tới việc phá hủy màng dầu bôi trơn theo ba trường hợp:

- Khí quyển xung quanh thâm nhập vào màng làm áp suất dầu giảm và cân bằng với áp suất bên ngoài.

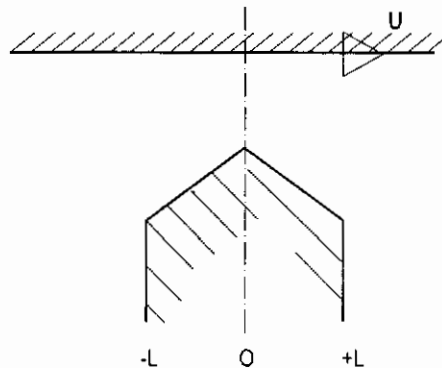
- Khí ga hoà tan trong chất bôi trơn làm cân bằng áp suất với bên ngoài dẫn đến việc đánh thủng màng.

- Khi áp suất dầu giảm xuống bằng áp suất hóa hơi - xuất hiện sự hóa hơi, các bọt hơi có thể làm phá hủy màng bôi trơn.

Tiếp cận vấn đề phá hủy màng bôi trơn trên phương diện vật lý (chuyển động, hình học tiếp xúc...) cho thấy:

+ Vùng gián đoạn được xem xét trong sự tương thích giữa chuyển động, dạng tiếp xúc và sự chảy tại đây - là sự đan xen giữa các rãnh khí và chất bôi trơn.

+ Hình dạng tiếp xúc làm màng dầu có sự thay đổi lõi sau lõm cũng gây phá hủy màng dầu, ví dụ bề mặt tiếp xúc có dạng nêm thủy động đối xứng (hình 2.5).



**Hình 2.5.** Nêm thủy động đối xứng

Việc phá hủy màng bôi trơn tạo ra vùng gián đoạn (vùng xâm thực) sẽ đi liền với việc phục hồi màng diễn ra sau đó dưới tác nhân dao động của dầu trong màng. Do vậy, vấn đề phá hủy màng là không nghiêm trọng nhưng sẽ có ý nghĩa cho việc thiết lập một điều kiện biên chung hoàn chỉnh.

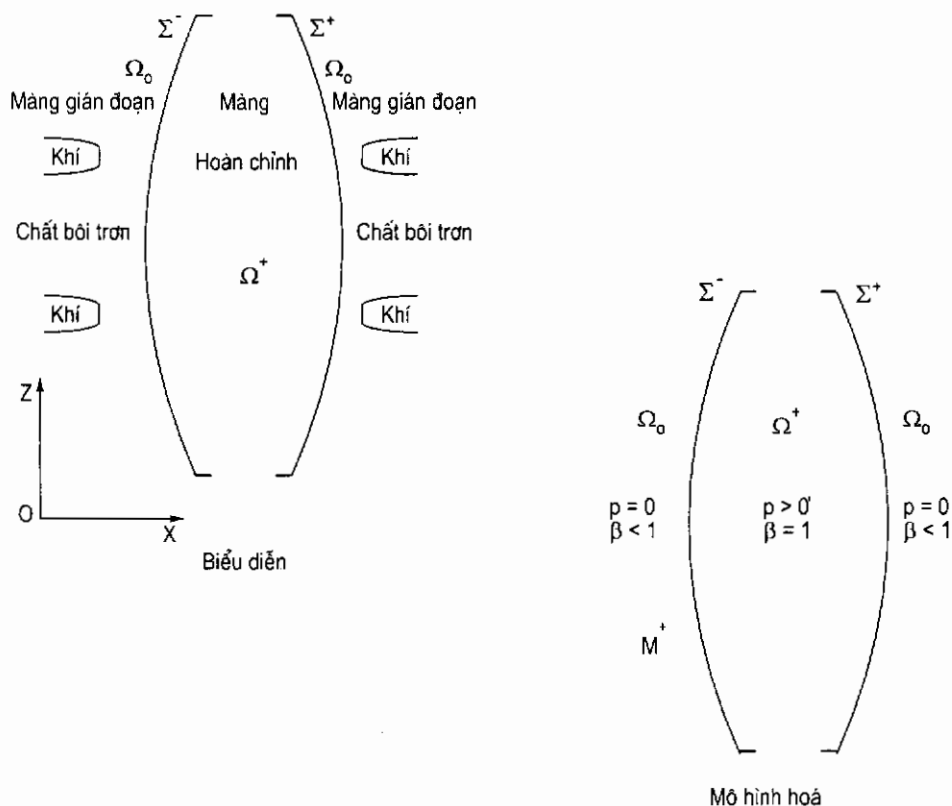
### 2.5.3. Điều kiện biên khi trong màng có vùng gián đoạn

Giả thiết rằng: "trong vùng  $\Omega$  có sự gián đoạn kèm theo sự tái tạo lại màng bôi trơn".

Miền lấy tích phân  $\Omega$  gồm hai vùng chính:

- Vùng màng dầu hoàn chỉnh  $\Omega^+$  (ở đây, luôn có sự tạo áp và  $p > 0$ ).
- Vùng màng dầu bị gián đoạn  $\Omega_0$  (ở đây, áp suất không đổi và  $p = 0$ ).

Giữa các vùng trên là các biên  $\Sigma^+$  và  $\Sigma^-$  ở đây có sự gián đoạn và tái hợp màng chất bôi trơn (hình 2.6).



**Hình 2.6.** Biểu diễn màng bôi trơn.

Chấp nhận thông số  $\beta(x, z)$  đặc trưng cho phần trăm của lượng chất bôi trơn trong thể tích cơ bản với chiều cao  $h$  quanh điểm  $M$ , ta có:

$$\left. \begin{aligned} M \in \Omega_0 &\leftrightarrow \beta(x, z) < 1 \text{ và } p(x, z) = 0 \\ M \in \Omega^+ &\leftrightarrow \beta(x, z) = 1 \text{ và } p(x, z) > 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.44)$$

Phương trình liên tục (2.1) biến thiên ở mọi điểm từ  $\Omega_0$  và  $\Omega^+$  có sự bảo toàn lưu lượng khối theo các bề mặt không liên tục  $\Sigma^-$  và  $\Sigma^+$ .

### 1) Vùng $\Omega^+$

Tích phân phương trình liên tục theo bề dày màng bôi trơn cho ta phương trình Rây-nô (2.37).

### 2) Vùng $\Omega_0$

Tích phân phương trình liên tục dọc theo chiều dày  $h$ , (chú ý tới thể tích cơ bản khí bao gồm phần trăm  $\beta$  của chất lỏng), ta có:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} [\rho\beta(U_1 + U_2)h] + \frac{\partial}{\partial z} [\rho\beta(W_1 + W_2)h] = \\ = 2\rho\beta \left( U_2 \frac{\partial h}{\partial x} + W_2 \frac{\partial h}{\partial z} - 2V_2 \right) + 2h \frac{\partial \rho\beta}{\partial t} \end{aligned} \quad (2.45)$$

Phương trình (2.45) được viết gọn lại:

$$\frac{\partial}{\partial x} [\rho\beta(U_1 + U_2)h] + \frac{\partial}{\partial z} [\rho\beta(W_1 + W_2)h] = 2 \frac{\partial}{\partial t} (\rho\beta h) \quad (2.46)$$

### 3) Chiều dày các bề mặt $\Sigma^-$ và $\Sigma^+$ :

Bảo toàn khối lượng cơ bản:

$$[\rho\beta V_n] = 0 \quad (2.47)$$

Trong đó:

$V_n$  - hình chiếu của vận tốc tương đối  $\bar{V}$  trên pháp tuyến  $\bar{n}$  của môi trường so với biên  $\Sigma$ .

Ta có:

$$\bar{U} = \bar{V} + \bar{W} \quad (2.48)$$

Trong đó:

$\bar{W}$  - trường vận tốc của  $\Sigma$  trong chuyển động riêng.

Do đó phương trình (2.37) được viết:

$$\int_0^h \rho\beta \bar{U} \cdot \bar{n} dy = \int_0^h \rho\beta \bar{W} \cdot \bar{n} dy \quad (2.49)$$

$U_n$  và  $W_n$  là hình chiếu trên pháp tuyến của các vận tốc  $\bar{U}$  và  $\bar{W}$ ;  $\frac{\partial p}{\partial n}$  là gradien của áp suất theo chiều pháp tuyến tại biên:

$$\rho\beta\frac{U_n h}{2} - \rho\frac{U_n h}{2} + \rho\frac{h^3}{12\mu}\frac{\partial p}{\partial n} = \rho\beta W_n h - \rho W_n h \quad (2.50)$$

hay:

$$\rho h(\beta - 1)\left(\frac{U_n}{2} - W_n\right) + \rho\frac{h^3}{12\mu}\frac{\partial p}{\partial n} = 0 \quad (2.51)$$

Các mặt  $\Sigma^-$  và  $\Sigma^+$  cố định ( $W_n = 0$ ) và phương trình (2.51):

$$\rho h(\beta - 1)\frac{U_n}{2} + \frac{\rho h^3}{12\mu}\frac{\partial p}{\partial n} = 0 \quad (2.52)$$

Phương trình này cho phép xác định các điều kiện biên chiều dày bề mặt  $\Sigma^-$  và  $\Sigma^+$ .

## 2.5.4. Điều kiện biên của Rây nol

### 2.5.4.1. Trường hợp màng dầu hoàn chỉnh

Trong trường hợp này, phương trình Rây nol là phương trình tuyến tính có vi phân từng phần dạng elip.

Đối với chất lỏng không nén được, phương trình Rây nol có dạng tường, có thể coi nó như phương trình Ole - Lagrăng của một hàm  $J(p)$ . Hàm có liên quan với phương trình (2.37) với các điều kiện biên (2.43), được viết:

$$J(p) = \iint_{\Omega} \left\{ -\frac{h^3}{12\mu}(\nabla p)^2 + h\bar{U} \cdot \overline{\text{grad}p} + 2p \left( U_2 \frac{\partial h}{\partial x} + W_2 \frac{\partial h}{\partial z} - V_2 \right) \right\} ds - \quad (2.53)$$

$$- 2 \int_{\Gamma_2} pqdf$$

biết rằng:  $V_2 = \frac{dh}{dt} = \frac{\partial h}{\partial t} + U_2 \frac{\partial h}{\partial x} + W_2 \frac{\partial h}{\partial z}$ , ta có:

$$J(p) = \iint_{\Omega} \left\{ -\frac{h^3}{12\mu}(\nabla p)^2 + h\bar{U} \cdot \overline{\text{grad}p} + 2p \frac{\partial h}{\partial t} \right\} ds - 2 \int_{\Gamma_2} pqdf$$

Cách tiếp cận này gặp phải hạn chế do người ta không luôn biết được sự quy chiếu vật lý lập hàm.

Sử dụng kiểu thiết lập dạng ảnh, phương trình Rây nol (2.37) được viết:

$$L(p) = f(x,z) \quad (2.54)$$

Trong đó:

L - toán tử;

f - hàm ảnh.

Phải tìm các hàm  $p(x,z)$  sao cho thỏa mãn các điều kiện biên và vấn đề vi phân. Do vậy số dư:

$$W(p) = \int_{\Omega} \phi [L(p) - f] ds = 0 \quad \forall \phi(x, z)$$

#### **2.5.4.2. Trường hợp có gián đoạn màng bôi trơn - điều kiện biên Raynol và Gumbel**

Do các điều kiện vận hành, màng dầu bôi trơn bị gián đoạn và được phục hồi lại nên thường sử dụng điều kiện biên Raynol.

$$p = \frac{\partial p}{\partial n} = 0 \text{ trên } \Sigma \quad (2.55)$$

Thực tế có thể sử dụng điều kiện biên Gumbel cho phép không tôn trọng tính liên tục của màng với tiếp cận là bỏ qua các áp suất có giá trị thấp hơn áp suất khí quyển trong nghiệm cuối nên bảo toàn được tính tuyến tính của phương trình Raynol và cho kết quả gần với các kết quả thực nghiệm.

## **2.6. TÍNH TOÁN CÁC THÔNG SỐ TRONG TIẾP XÚC**

### **2.6.1. Áp suất trong màng**

Áp suất nhận được bằng cách tích phân phương trình của cơ học màng mỏng nhất (2.20; 2.29; 2.35; 2.37; 2.40 tùy theo từng trường hợp) hoặc bằng cách làm cực tiểu hàm  $J(p)$  (2.53). Nếu kết hợp với các biên, tạo thành các điều kiện tích cực:

- Các chiều cao  $H_1, H_2$  cho bằng dạng hình học tiếp xúc, có thể giảm thành một ẩn - chiều dày màng dầu  $h$ .

- Khối lượng riêng  $\rho$  trong trường hợp chất lỏng nén được được hợp lại vào áp suất và nhiệt độ theo định luật trạng thái khí.

- Độ nhớt nhảy với biến thiên nhiệt độ nhưng trao đổi chậm với áp suất.



### 2.6.2. Các thông số của chất lỏng trên thành tiếp xúc

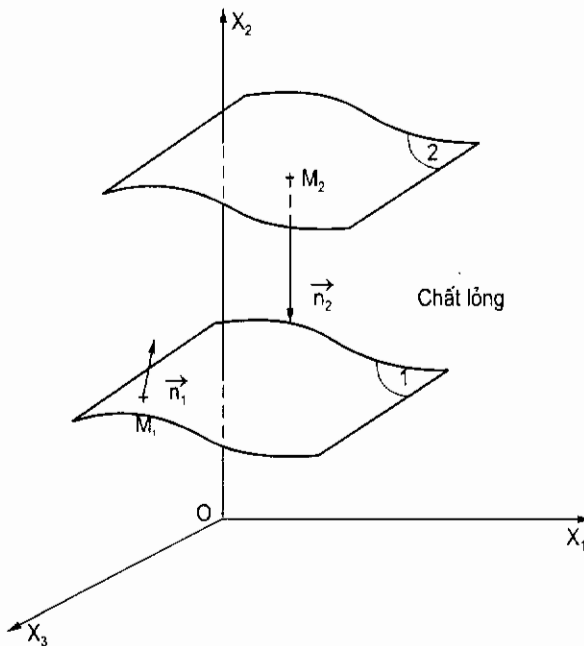
Véc tơ ứng suất  $\bar{T}$  tại điểm M của thành chỉ phụ thuộc tenxơ ứng suất tại điểm đó và véc tơ pháp  $\bar{n}$  (hình 2.7)

$$\bar{T}(M, \bar{n}) = \sum_{i=1}^3 T_i x_i = \sum_{i=1}^3 \sigma_{ij} n_j \bar{x}_j \quad (2.56)$$

Với  $n_j$  là thành phần véc tơ pháp tuyến trên M hướng từ mặt thành tới chất lỏng (pháp tuyến ngoài).

Đối với dòng chảy chất lỏng Niuton và giả thiết của cơ học màng mỏng nhớt, thì ma trận đặc trưng cho tenxơ của ứng suất:

$$[\sigma_{ij}] = \begin{bmatrix} -p & \mu \frac{\partial u_1}{\partial x_2} & 0 \\ \mu \frac{\partial u_1}{\partial x_2} & -p & \mu \frac{\partial u_3}{\partial x_2} \\ 0 & \mu \frac{\partial u_3}{\partial x_2} & -p \end{bmatrix}$$



Hình 2.7

Các lực tiếp tuyến do chất lỏng tác dụng lên thành:

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= \int_S \mu \left( \frac{\partial u_1}{\partial x_2} \right)_{x_2=H_1 \text{ hoặc } H_2} ds \\ F_3 &= \int_S \mu \left( \frac{\partial u_3}{\partial x_2} \right)_{x_2=H_1 \text{ hoặc } H_2} ds \end{aligned} \right\} \quad (2.57)$$

Tải trọng ngoài mà tiếp xúc có thể mang:

$$P = \int_S p ds$$

### 2.6.3. Lưu lượng

Lưu lượng sử dụng trong bồi trơn gồm:

- Lưu lượng thể tích cho chất lỏng không nén được.
- Lưu lượng khối cho chất lỏng nén được.

Tích phân vận tốc trong màng (các biểu thức 2.13; 2.30; 2.32; 2.38 hoặc 2.41), ta được các lưu lượng  $Q_j$ ,  $M_j$ .

+ Với chất lỏng không nén được  $\rho = \text{const}$ , lưu lượng  $Q_j$  (trên mặt cắt  $S_j$ -vuông góc với  $\bar{x}_j$ ):

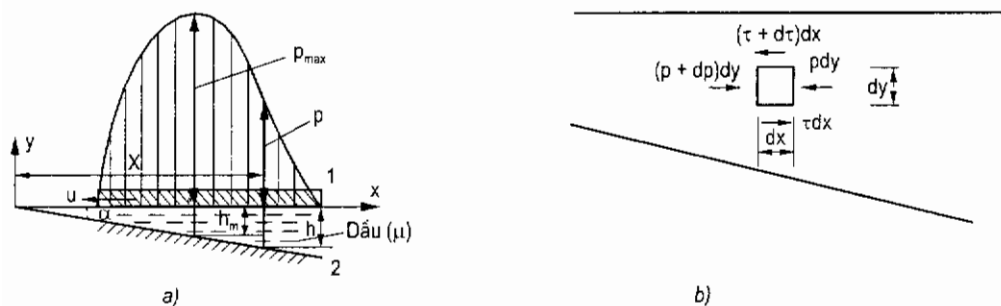
$$Q_j = \int_{S_j} u_j ds \quad (2.58)$$

+ Với chất lỏng nén được, biết  $u_j$  là thành phần vận tốc theo chiều  $x_j$ ; tại mặt cắt  $S_j$  lưu lượng khối:

$$M_j = \int_{S_j} \rho u_j ds \quad \text{với } j = 1 \text{ hoặc } 3 \quad (2.59)$$

## 2.7. PHƯƠNG TRÌNH RÂYNOL CHO DÒNG CHẢY MỘT CHIỀU TRONG KHE HỖ HÌNH CHÊM

Đối với trường hợp cụ thể, sau khi lập mô hình tính toán, kể đến các giả thiết - phương trình Rây nol có thể trở thành dạng tường. Ví dụ đối với dòng chảy một chiều trong khe hở hình chêm (hình 2.8a):



Hình 2.8

Vì có chuyển động tương đối giữa các lớp dầu trong khe hở nên sinh ra sự cản trượt. Theo (1.1), lực cản trượt trên một đơn vị diện tích:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

Xét một phân tử dầu có kích thước  $dx \times dy \times 1$  (hình 2.8b).

Từ điều kiện cân bằng phân tử đang xét, ta có:

$$dpdy = d\tau dx.$$

Do đó có thể viết:

$$\frac{d^2u}{dy^2} = \frac{1}{\mu} \frac{dp}{dx} \quad (2.60)$$

Giải phương trình (2.60), chú ý đến các điều kiện "tại bề mặt tấm đứng yên 2 (hình 2.8a):  $y = 0, u = 0$  và tại bề mặt chuyển động 1:  $y = h, u = U$ , có được vận tốc theo phương  $x$  của lớp dầu (ở tung độ  $y$ ):

$$u = U \frac{y}{h} + \frac{y}{2\mu} (y - h) \frac{dp}{dx} \quad (2.61)$$

Thể tích dầu chảy qua khoảng hở có chiều cao  $h$  và chiều rộng bằng 1 đơn vị trong thời gian 1 giây:

$$q = \int_0^h u dy = \frac{Uh}{2} - \frac{h^3}{12\mu} \cdot \frac{dp}{dx}$$

Giả thiết dòng dầu liên tục nên thể tích dầu chảy qua khoảng hở  $h$  và khoảng hở  $h_m$  (tại tiết diện có  $p = p_{\max}$  và  $\frac{dp}{dx} = 0$ ) trong thời gian 1 giây là bằng nhau:

$$q = \frac{Uh}{2} - \frac{h^3}{12\mu} \cdot \frac{dp}{dx} = \frac{Uh_m}{2} \quad (2.62)$$

Từ đó ta có phương trình Rây nol cho dòng chảy một chiều trong khe hở hình chêm:

$$\frac{dp}{dx} = 6\mu U \frac{h - h_m}{h^3} \quad (2.63)$$

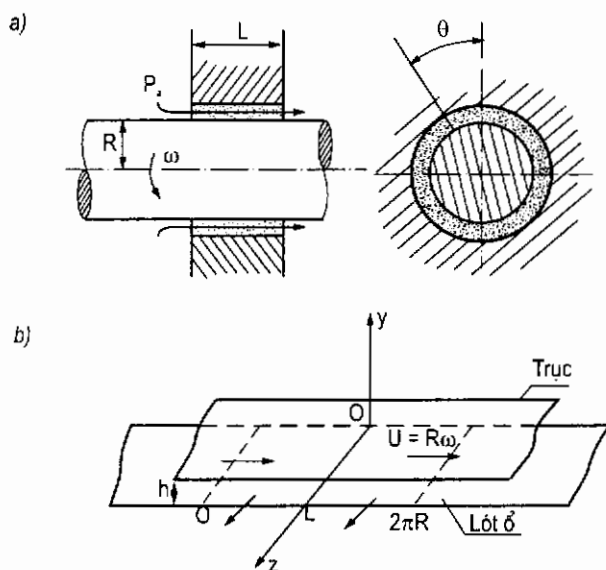
### Chương 3

## TÍNH TOÁN CÁC THÔNG SỐ CƠ BẢN CỦA Ổ TRƯỢT BÔI TRƠN ƯỚT

### 3.1. Ổ TRƯỢT THỦY TĨNH

#### 3.1.1. Mô hình tính toán

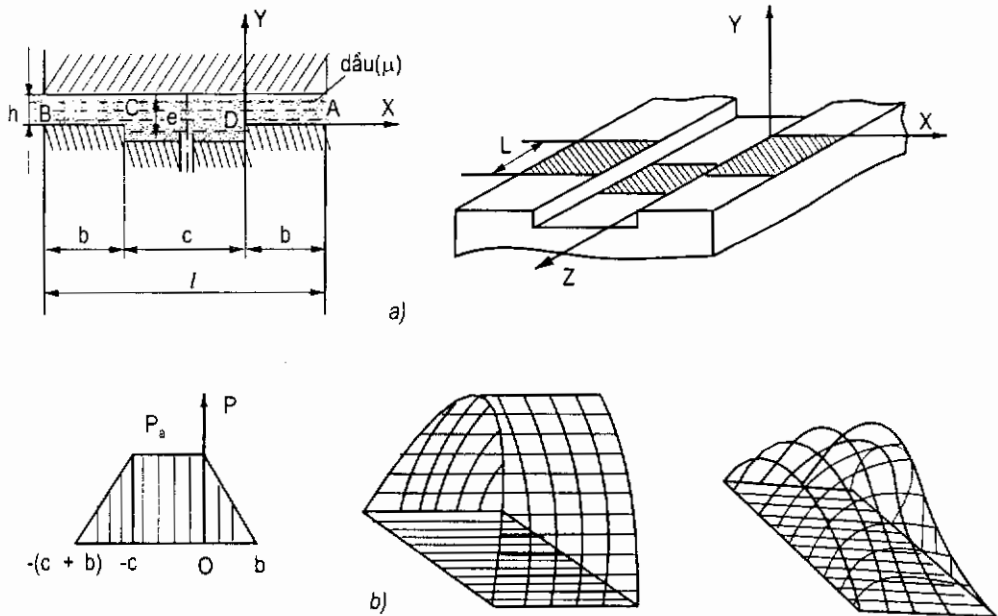
Để xác định thông số cơ bản trong ổ trượt thủy tĩnh (ổ thủy tĩnh) hình 3.1a, cần phải xây dựng mô hình tính toán. Dựa theo các giả thuyết trong chương 2 cho cơ học màng mỏng nhớt và khai triển hình học, màng bôi trơn được coi như một nêm dầu phẳng. Gắn vào đó một hệ trục tọa độ Đề - Các, ta nhận được mô hình tính toán, (hình 3.1b).



Hình 3.1. a) Ổ thủy tĩnh; b) Mô hình tính toán

### 3.1.2. Tính toán tải trọng và lưu lượng

Xét một đoạn ống thủy tĩnh khai triển có chứa một hốc dầu (hình 3.2a).



**Hình 3.2.** Sơ đồ tính toán tải trọng và lưu lượng trong ống thủy tĩnh:

a) Nêm thủy tĩnh phẳng chứa hốc dầu; b) Phân bố áp suất mặt cắt và không gian.

Giả thiết: chiều dài nêm theo phương Oz là vô tận; chiều sâu hốc e khá lớn so với chiều dày màng ( $e/h \geq 100$ ); áp suất trong hốc là không đổi ( $p = \text{const}$ ); hai bề mặt bôi trơn song song với nhau ( $h = \text{const}$ ); chất lỏng bôi trơn không nén được có khối lượng riêng  $\rho$  và độ nhớt  $\mu$  không đổi.

Với giả thuyết trên, phương trình Rây-nôl (2.37) còn là:

$$\frac{d^2 p}{dx^2} = 0$$

Trong đó:

$p$ - Áp suất trong màng.

Lấy áp suất khí quyển làm quy chiếu, tích phân biểu thức trên với các điều kiện biên cho áp suất.

$$p = p_a \text{ tại } x = 0$$

$$p = 0 \text{ tại } x = b$$

Ta có:

$$p = p_a \left( 1 - \frac{x}{b} \right) \quad 0 \leq x \leq b$$

$$p = \frac{p_a}{b} (c + b + x) \quad -(c + b) \leq x \leq -c$$

Phân bố áp suất được biểu diễn trên hình 3.2b.

Tải trọng trên chiều dài chuẩn L:

$$P = \int_S p ds = \int_{S_1} p_a ds + \int_{S_2} p ds$$

Trong đó:

$p_a$  - áp suất trong hốc;

$S_1$  - bề mặt hốc;

$S_2$  - bề mặt tấm có bề rộng b.

Sau khi tích phân, ta có:

$$P = L(b + c)p_a = L(l - b)p_a$$

Hay:

$$P = SK_p p_a \quad (3.1)$$

Trong đó:

S- tổng bề mặt của nêm.

$K_p$ - hệ số tải trọng:

$$K_p = l - b/l ; (0 < K_p < 1).$$

Như vậy, tải trọng tỷ lệ với áp suất trong hốc và là hàm của kích thước hốc.

Nếu biết áp suất của bơm cấp  $p_s$ ; đặt  $\beta = p_a/p_s$  gọi là tỷ số giữa áp suất trong hốc với áp suất cấp, biểu thức (3.1) có dạng:

$$P = \beta K_p S p_s \quad (3.2)$$

Vận tốc của chất lỏng:

$$u = \frac{1}{2\mu} \frac{dp}{dx} (y - h) \quad (3.3)$$

Lưu lượng Q của chất lỏng thoát ra từ nêm:

$$Q = \int_0^h u_{(x=b)} dy - L \int_0^h u_{(x=b-c)} dy = \frac{Lh^3 p_a}{6\mu b}$$

Nếu thay hệ số lưu lượng  $K_Q = L/6b$ :

$$Q = \frac{p_a h^3 K_Q}{\mu} \quad (3.4)$$

Hoặc:

$$Q = \frac{\beta p_s h^3 K_Q}{\mu} \quad (3.5)$$

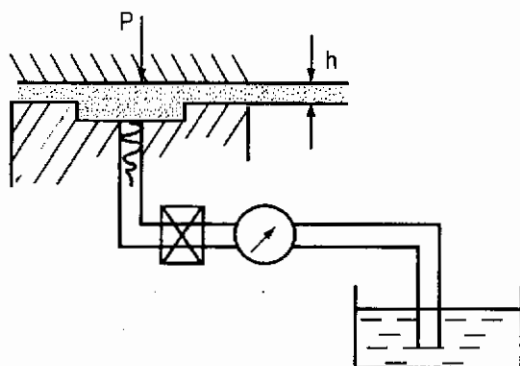
### 3.1.4. Độ ổn định của màng dầu thủy tĩnh

Biểu thức (3.1) cho thấy tải trọng độc lập với chiều dày màng bôi trơn  $h$ . Nhưng biểu thức (3.5) lại cho sự liên hệ giữa lưu lượng  $Q$  với chiều dày  $h$  và áp suất  $p_a$  trong hốc. Để có được độ ổn định của màng dầu (nghĩa là:  $h = \text{const}$ , ngay cả khi có sự thay đổi của tải trọng đặt  $P$  hay áp suất  $p_a$ ) cần bảo đảm về độ cứng của màng dầu.

Độ cứng của màng dầu  $J$  là tỷ số giữa biến thiên tải trọng và biến thiên chiều dày màng dầu:

$$J = -\frac{\partial P}{\partial h} = -\frac{\partial P}{\partial p_a} \cdot \frac{\partial p_a}{\partial h} \quad (3.6)$$

#### 3.1.4.1. Kiểu mao dẫn (hình 3.3)



Hình 3.3



Mao dẫn là ống xoắn có tỷ lệ giữa chiều dài và bán kính  $l/r > 50$ . Đối với dòng chất lỏng chảy tầng, lưu lượng xác định theo định luật Hagen - Poiseuille:

$$Q_c = \frac{\pi r^4}{8\mu l_c} (p_s - p_a) = \frac{K_c}{\mu} (p_s - p_a) \quad (3.7)$$

Với:

$$K_c = \frac{\pi r^4}{8l_c} \quad (3.8)$$

Từ sự cân bằng lưu lượng qua mao dẫn và lưu lượng thoát ra từ màng dầu, nhận được:

$$p_a = \frac{p_s}{\left(1 + \frac{K_Q}{K_c} h^3\right)} = \beta p_s; \quad \beta = \frac{1}{\left(1 + \frac{K_Q}{K_c} h^3\right)} \quad (3.9)$$

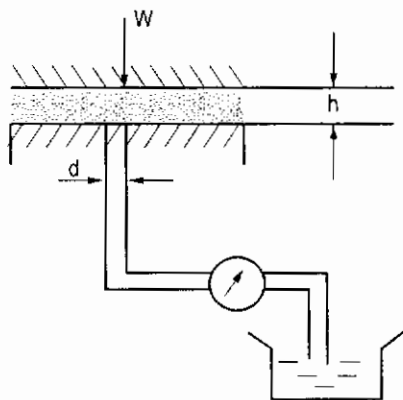
Độ cứng của màng dầu:

$$J_c = \frac{3p}{h} \cdot \frac{K_Q}{K_c} h^3 \cdot \frac{1}{\left(1 - \frac{K_Q}{K_c} h^3\right)}$$

Hoặc:

$$J_c = \frac{3P}{h} (1 - \beta) = 3\beta(1 - \beta) \frac{p_s S \cdot K_p}{h} \quad (3.10)$$

### 3.1.4.2. Kiểu trực tiếp (hình 3.4)



Hình 3.4

Dòng dầu cấp chảy qua lỗ đường kính  $d$  vào màng nên có thể tính gần đúng lưu lượng theo công thức:

$$Q_o = C_d \frac{\pi d^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2(p_s - p_a)}{\rho}} \quad (3.11)$$

Hay:

$$Q_o^2 = K_o (p_s - p_a) \quad (3.12)$$

Với:

$$K_o = \frac{2}{\rho} \left( C_d \frac{\pi d^2}{4} \right)^2 \quad (3.13)$$

Các lỗ trên thành nhẵn:  $C_d \approx 0,6$ .

Áp suất tại cửa lỗ:

$$p_a = \frac{1}{2h^6 K} \left( -1 + \sqrt{1 + 4K p_s h^6} \right) \quad (3.14)$$

Với:

$$K = \frac{K_Q^2}{\mu^2 K_o}$$

Độ cứng của màng dầu:

$$J_o = \frac{3P}{h} \left( 1 - \frac{\beta}{2 - \beta} \right) = 6\beta \frac{(1 - \beta) p_s S K_p}{2 - \beta h} \quad (3.15)$$

### 3.1.4.3. Khảo sát các đặc trưng của màng dầu

Các biểu thức (3.10) và (3.15) cho thấy với một màng dầu thủy tĩnh có dạng hình học ( $S, K_p$ ) và áp suất cấp ( $p_s$ ) xác định, thì độ cứng chỉ phụ thuộc vào tỷ số áp suất  $\beta = p_a/p_s$  và chiều dày  $h$ . Do vậy, cần thiết làm sáng tỏ thêm các trường hợp sau:

- Với một chiều dày màng cho trước  $h = h_o$ , khảo sát độ cứng  $J$  theo tỷ số áp suất  $\beta$ , để tìm giá trị độ cứng tối ưu ứng với điểm vận hành đã chọn ( $\beta = \beta_o$ ).

- Với một điểm làm việc (được đặc trưng bằng giá trị  $h = h_o$ ;  $\beta = \beta_o$ ), khảo sát xem các đại lượng  $J, P, Q$  biến đổi như thế nào khi chiều dày thực của màng dầu khác với giá trị đã dự liệu  $h_o$ .

Sử dụng các đại lượng không thứ nguyên:

$$\bar{J} = \frac{Jh_0}{p_s SK_p}$$

$$\bar{P} = \frac{P}{p_s SK_p}$$

$$\bar{Q} = \frac{\mu P}{h^3 p_s K_Q}$$

$$X = \frac{h}{h_0}$$

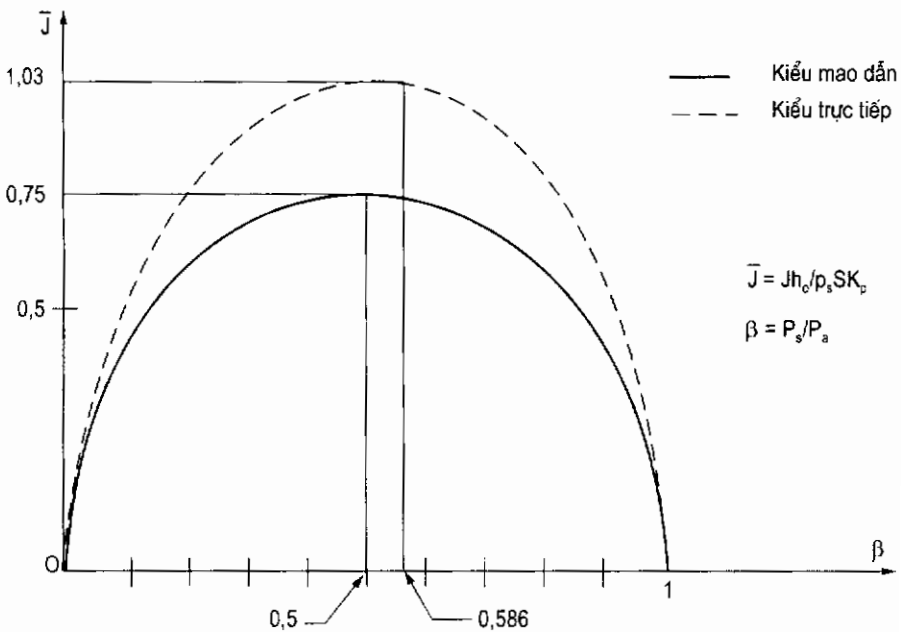
$$\beta = \frac{P_a}{P_s}$$

1) Khảo sát độ cứng theo  $\beta_0$ .

Từ các biểu thức (3.10) và (3.15) ta có:

$$J_0 = 3\beta_0(1 - \beta_0) \text{ - Với kiểu mao dẫn:}$$

$$J_0 = 6\beta_0 \frac{(1 - \beta)}{2 - \beta} \text{ - Với kiểu trực tiếp.}$$



Hình 3.5

Các đường cong trên hình 3.5 biểu diễn biến thiên các độ cứng không thứ nguyên của nêm dầu theo tỷ số áp suất  $\beta$ . Độ cứng lớn nhất của màng (kiểu mao dẫn) ở  $\beta_0 = 0,5$  và kiểu trực tiếp ở  $\beta_0 = 0,586$ . Kiểu trực tiếp - màng dầu có độ cứng cao hơn kiểu mao dẫn.

2) Khảo sát các đại lượng  $P, Q, J$  theo sự thay đổi chiều dày  $h_0$  (hoặc chiều dày tương đối  $X = h/h_0$ ).

Từ các biểu thức (3.2), (3.5), (3.6), (3.9), (3.10), (3.14), (3.15), ta có:

$$\begin{aligned}\bar{P} &= \beta \\ \bar{Q} &= \beta X^3\end{aligned}$$

Đối với một ống mao dẫn:

$$J_c = 3\beta_0 \frac{(1-\beta)}{X}$$

Với

$$\beta = \frac{1}{1 + \frac{K_Q}{K_c} h_0^3 X^3}$$

Đối với một lỗ:

$$\bar{J}_0 = \beta \frac{(1-\beta)}{X(2-\beta)}$$

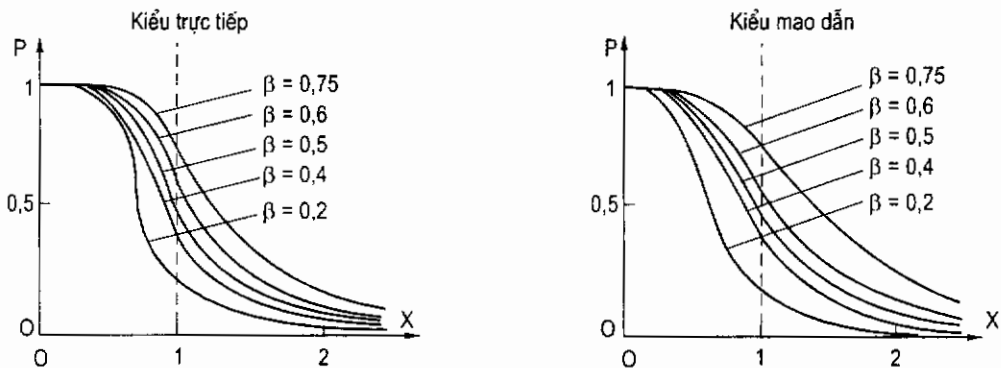
Với:

$$\beta = \frac{-1 + \sqrt{1 + \frac{4X^6 h_0^6 K_Q^2 P_s}{\mu K_0}}}{\frac{2X^6 h_0^6 K_Q^2 P_s}{\mu K_0}}$$

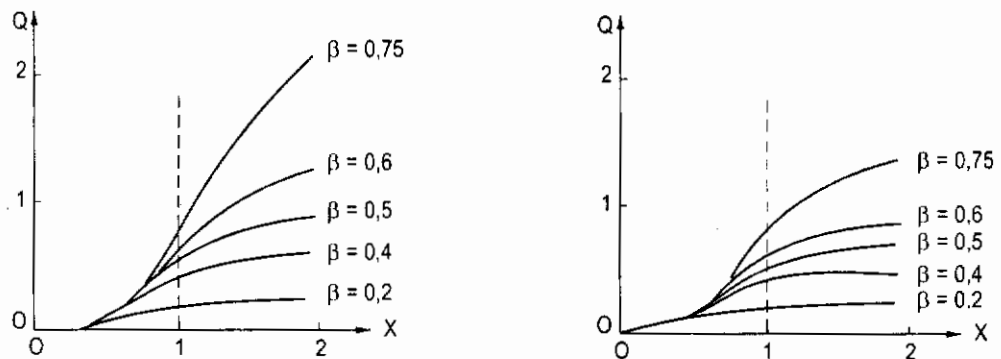
Hay:

$$\beta = \beta_0^2 \frac{-1 + \sqrt{1 + \frac{4(1-\beta_0)X^6}{\beta_0^2}}}{2(1-\beta_0)X^6}$$

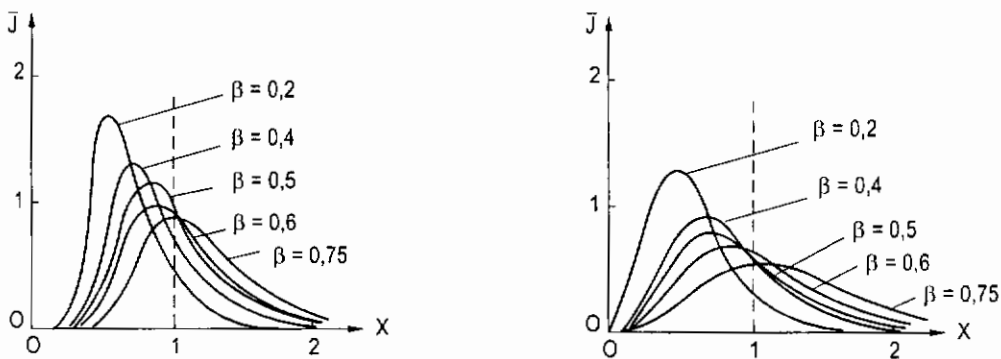
Đồ thị trên hình 3.6 biểu diễn sự biến thiên các đại lượng không thứ nguyên  $\bar{P}, \bar{Q}, \bar{J}$  khi thay đổi chiều dày tương đối  $X = h/h_0$ .



a) Biến thiên của tải trọng ( $\bar{P} = P / SK_p p_s$ ) vào chiều dày tương đối



b) Biến thiên lưu lượng ( $\bar{Q} = \mu Q / K_Q h_0^3 p_s$ ) vào chiều dày tương đối



c) Biến thiên độ cứng ( $\bar{J} = J h_0 / SK_p p_s$ ) vào chiều dày tương đối  $X = h/h_0$ .

**Hình 3.6.** Khảo sát các đặc trưng của màng vào chiều dày tương đối.

Qua các đồ thị, có thể nhận thấy:

a) Tải trọng không thứ nguyên  $\bar{P}$  tăng khi  $\beta$  tăng hoặc khi chiều dày màng  $h$  giảm.

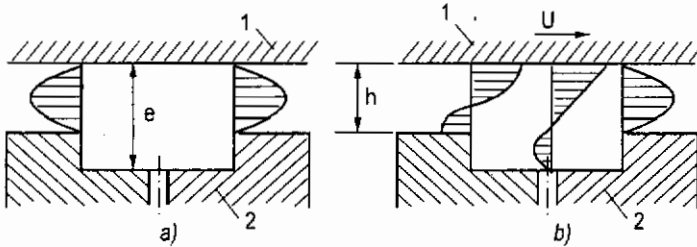
b) Lưu lượng không thứ nguyên  $\bar{Q}$  tăng khi  $\beta$  tăng hoặc khi chiều dày màng  $h$  tăng (đặc biệt đối với kiểu trực tiếp).

c) Độ cứng không thứ nguyên  $\bar{J}$  của màng trong trường hợp mao dẫn ít bị ảnh hưởng khi ra xa điểm làm việc.

So với kiểu trực tiếp, kiểu mao dẫn có kết cấu phức tạp hơn, giá trị độ cứng trong màng tuy thấp hơn nhưng lại ổn định nên kiểu mao dẫn được sử dụng nhiều (nhất là đối với các bề mặt ma sát có rãnh sần). Để giảm kích thước và đơn giản việc điều chỉnh - người ta thường chế tạo mao dẫn có dạng đường ren.

### 3.1.5. Ảnh hưởng của vận tốc

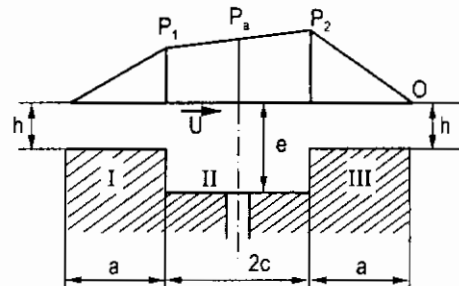
Khảo sát cấu hình thủy tĩnh trên hình 3.7: tấm 2 tạo hốc dầu và cố định, tấm 1 phẳng có thể chuyển động với vận tốc  $U$  cho thấy phân bố vận tốc chất lỏng (theo phương vận tốc) khi  $U = 0$  (hình 3.7a) và khi  $U \neq 0$  (hình 3.7b) khác nhau.



**Hình 3.7.** Phân bố vận tốc chất lỏng

a) Khi tấm 1 đứng yên ( $U = 0$ ); b) Khi tấm 1 chuyển động ( $U \neq 0$ )

Trên hình 3.8. biểu diễn ảnh hưởng của vận tốc đến phân bố áp suất trong cấu hình thủy tĩnh.



**Hình 3.8.** Ảnh hưởng của vận tốc đến phân bố ứng suất.

Nếu chia dòng chảy thành 3 miền: I, II, III giả thuyết rằng:  $h/a \ll 1$  và  $e/c \ll 1$  (hình 3.8). Áp dụng phương trình Rây-nô-l cho từng miền ta được biến thiên tuyến tính của áp suất. Các áp suất  $p_1$  và  $p_2$  được xác định từ sự bảo toàn về lưu lượng:

$$\left. \begin{aligned} \frac{h}{2} \left[ U - \frac{h^2 p_1}{6\mu a} \right] &= \frac{1}{2} \left[ U - \frac{l^2}{6\mu} \frac{p_a - p_1}{c} \right] \\ \frac{h}{2} \left[ U - \frac{h^2 p_2}{6\mu a} \right] &= \frac{1}{2} \left[ U - \frac{l^2}{6\mu} \frac{p_2 - p_a}{c} \right] \end{aligned} \right\} \quad (3.16)$$

Loại trừ áp suất tại tâm hốc  $p_a$ , ta có:

$$p_2 - p_1 = 12\mu \frac{U \cdot c}{e^2} \cdot \frac{1 - h/e}{1 + \frac{ch^2}{ae^3}} \quad (3.17)$$

Kể đến giả thiết  $h/e \ll 1$ , biểu thức được đơn giản thành:

$$p_2 - p_1 = 12\mu U \cdot c / e^2 \quad (3.18)$$

Khi vận tốc tịnh tiến đạt giá trị tới hạn:

$$U_1^* = \frac{p_a e^2}{6\mu c} \quad (3.19)$$

áp suất  $p_1$  bằng 0, có hiện tượng dầu bị xâm thực tại phần đầu của hốc - màng dầu không ổn định.

Mặt khác, biểu thức (3.16) cho thấy lưu lượng tổng của màng dầu không thay đổi do vận tốc tịnh tiến:

$$Q_1 = L \frac{h^3}{12\mu} \cdot \frac{p_1 + p_2}{a} = \frac{Lh^3 p_a}{6\mu a}$$

lưu lượng tương đối tại vùng I bằng 0 do vận tốc tịnh tiến đạt được giá trị tới hạn  $U_2^*$ :

$$U_2^* = \frac{h^2 p_1}{6\mu a} \approx \frac{h^2 p_a}{6\mu a} \quad (3.20)$$

Nếu vận tốc lớn hơn  $U_2^*$  có thể có đường khí vào màng và hốc gây hiện tượng không ổn định trong hệ, cần có giải pháp bằng cách bổ sung thêm nguồn chất lỏng tại phía tấm động (giống như cơ chế bơm trong hoạt động nhớt).

### 3.1.6. Công suất tiêu hao

Tiêu hao công suất gồm:

- Công suất của bơm cấp:

$$N_p = \frac{P_s Q}{\eta}; \quad (3.21)$$

Trong đó:  $\eta$  - hiệu suất của bơm dầu.

- Công suất mất mát do ma sát với thành:

$$N_c = U \int_{(S)} \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)_{y=h} ds$$

Tại vùng I và III, đối với hai bề mặt đối xứng (hình 3.8):

$$N_{cp} = 2aL\mu \frac{U^2}{h}$$

Tại vùng II (chứa hốc):

$$N_{ca} = 8cL\mu \frac{U^2}{e}$$

Từ đó:

$$N_c = 2aL\mu \frac{U^2}{h} + 8cL\mu \frac{U^2}{e} \quad (3.22)$$

Do ( $e \gg h$ ), bỏ qua số hạng thứ hai trong công thức (3.22), nên:

$$N_c = A_s \mu \frac{U^2}{h} \quad (3.23)$$

với  $A_s$  là bề mặt ma sát không kể hốc:  $A_s = 2ah$ .

- Công suất tổng:

$$N_t = N_p + N_c = A_s \mu \frac{U^2}{h} + C_2 \frac{h^3}{\mu}; \quad C_2 = \frac{P}{SK_p} p_s \frac{K_Q}{\eta} \quad (3.24)$$

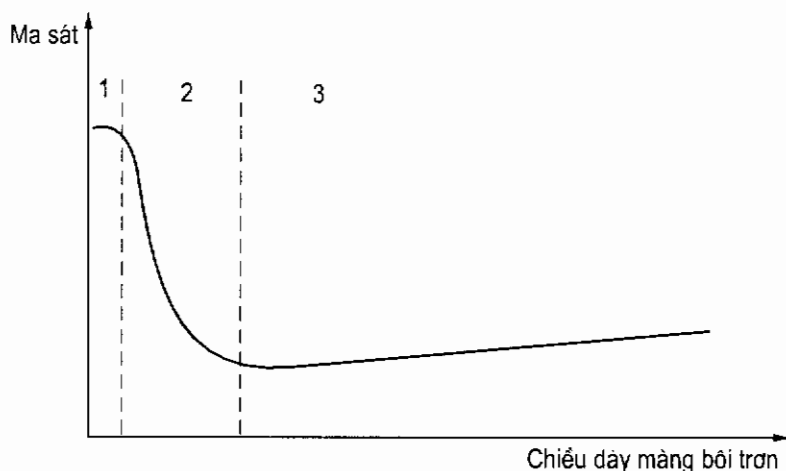
Trong đó:  $A_s$  và  $C_2$ - hàm không đổi của: dạng hình học tiếp xúc màng dầu thủy tĩnh, áp suất cấp, hiệu suất bơm và các đặc tính trở thủy lực.

Nếu độ nhớt chất lỏng  $\mu$  nhỏ, chiều dày màng  $h$  lớn thì năng lượng mất mát trong màng nhỏ.



### 3.1.7. Chiều dày màng dầu thủy tĩnh

Vào năm 1902 Richard Stribeck (1861 - 1950) đã đưa ra đường cong biểu diễn biến thiên của ma sát vào chiều dày màng bôi trơn (hình 3.9). Trên đồ thị phân chia thành ba vùng:



**Hình 3.9.** Đường cong Stribeck

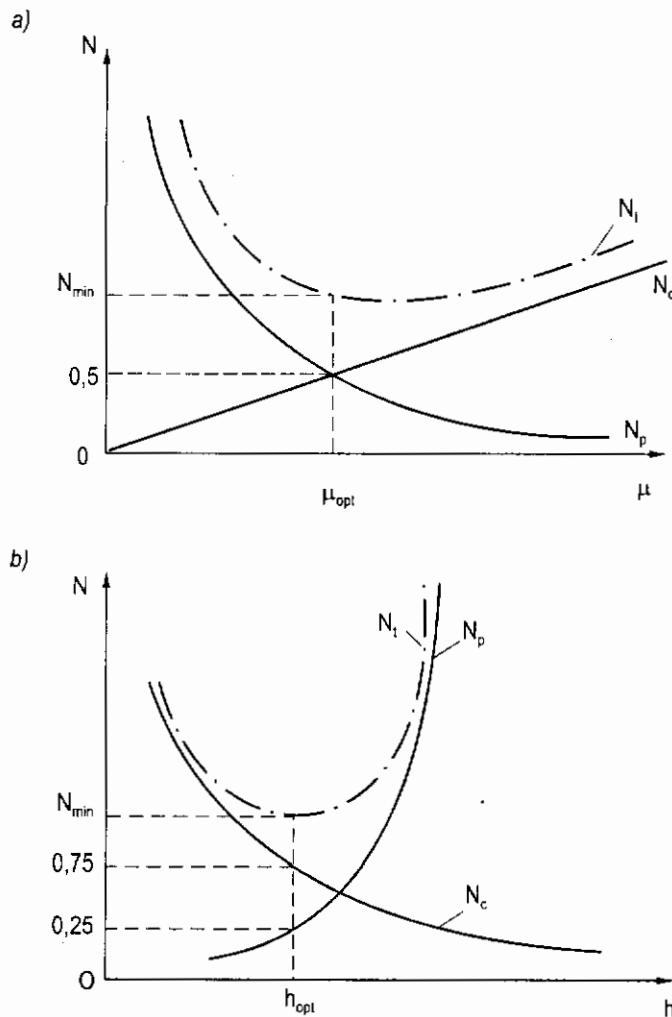
- Vùng 1: Ma sát không có chất bôi trơn (khô và nửa khô).
- Vùng 2: Ma sát khi bôi trơn giới hạn và nửa ướt.
- Vùng 3: Ma sát khi bôi trơn ướt.

Đường cong Stribeck cho đến nay vẫn giữ nguyên giá trị. Nó cho phép giải thích về sự phụ thuộc của chế độ ma sát vào chiều dày màng bôi trơn.

Đối với chế độ bôi trơn ma sát ướt, chiều dày màng bôi trơn được hiểu là khoảng cách giữa bề mặt ma sát  $h$ . Nó có mặt trong các phương trình thủy động lực học viết cho màng mỏng nhớt. Trong bôi trơn thủy tĩnh người ta luôn mong muốn đạt được một chiều dày màng không đổi ( $h = \text{const}$ ).

Từ lý thuyết bôi trơn và những tiếp cận đã áp dụng để xác định các thông số cơ bản trong hệ thống bôi trơn thủy tĩnh và xét đến khả năng giảm tiêu hao công suất sẽ cho ta công thức tính chiều dày màng bôi trơn  $h$ .

Trên hình 3.10 là đồ thị biểu diễn sự biến đổi của các thành phần công suất vào độ nhớt, khi chiều dày  $h = \text{const}$  và vào chiều dày khi độ nhớt  $\mu = \text{const}$ .



**Hình 3.10**

a) Mất mát công suất khi chiều dày  $h = const$ ;

b) Mất mát công suất khi độ nhớt  $\mu = const$ .

Có thể nhận thấy, với độ nhớt tối ưu  $\mu_{opt}$  - công suất mất mát do ma sát và công suất do bơm dầu là bằng nhau. Trong khi, đối với chiều dày tối ưu  $h_{opt}$ , thì công suất mất mát do ma sát gấp 3 lần so với công suất bơm cấp.

Như vậy, không thể dễ dàng tối ưu ngay được giữa độ nhớt và chiều dày màng trên quan điểm mất mát công suất. Mặc dù vậy, có thể nhận nhượng một tỷ lệ  $N_t/N_p$  giữa 1 và 3.

Lấy trị số trung bình  $N_c/N_p = 2$ , kết hợp các biểu thức (3.2), (3.5), (3.21) và (3.23), nhận được:

$$h = \sqrt{\left(\frac{\mu USK_p}{P}\right)^4 \left(\frac{\eta \beta A_s}{2K_Q}\right)} \quad (3.25)$$

Đối với một màng dầu thủy tĩnh khi hoạt động thường tồn tại các yếu tố làm giảm độ cứng như dao động, phát sinh xoáy cuộn ở tốc độ cao... Do vậy, cần có một chiều dày màng dầu đủ lớn và luôn ổn định. Điều này còn mang một ý nghĩa thực tế lớn, vì:

- Kích thước bề mặt ma sát rất lớn (so với h);
- Trạng thái bề mặt không hoàn hảo (sai lệch kích thước, sai lệch hình dáng hình học và nhám);
- Các bộ phận của hệ thống bị biến dạng;
- Các ảnh hưởng do vận tốc;
- Có thể tồn tại các dao động hoặc quá tải;
- Mong muốn hệ thống có độ tin cậy cao;...

Giá trị của h xác định theo (3.25) đảm bảo hạn chế mất mát năng lượng và tránh được tiếp xúc giữa hai bề mặt ma sát.

Tùy thuộc vào cấu hình thủy tĩnh cụ thể, cần có công thức phù hợp để xác định chiều dày màng bôi trơn nhỏ nhất (hoặc khe hở nhỏ nhất  $h_{min}$ ).

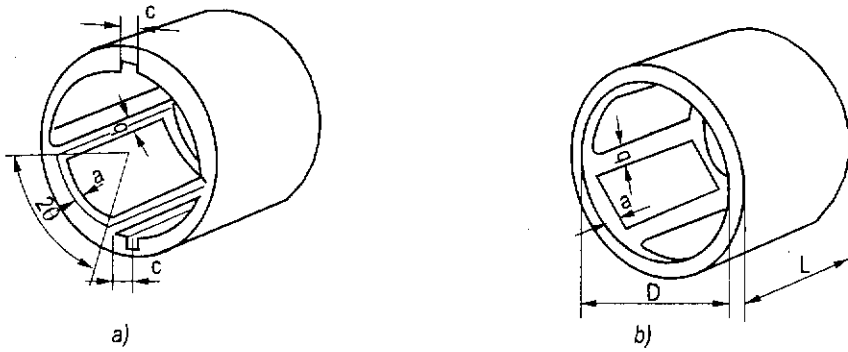
### 3.1.8. Xác định khe hở nhỏ nhất trong ổ thủy tĩnh

#### 3.1.8.1. Kết cấu của ổ thủy tĩnh

Ổ trượt đỡ thủy tĩnh có bề mặt ma sát hình trụ đường kính danh nghĩa D, chiều dài làm việc L (bề rộng ổ).

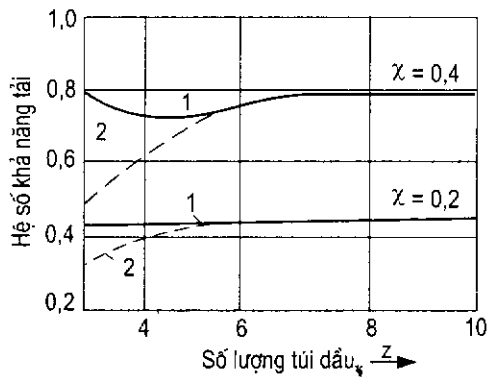
Bề mặt ổ cố định, trên đó tạo các hốc chứa dầu (túi dầu) phân bố đều xung quanh (hình 3.11).

Số lượng túi dầu (z), hình dạng và kích thước (chiều sâu t, dài  $l$ , góc chắn cung chiều rộng  $2\theta$ , các kích thước tương quan a, b, c) được lựa chọn từ thực nghiệm hoặc kinh nghiệm vận hành các ổ thủy tĩnh trong các cụm máy.



**Hình 3.11.** a) Ổ có rãnh; b) Ổ không có rãnh

- Thường chọn  $z \geq 4$  (số chẵn). Nếu số túi nhỏ thì độ cứng màng dầu và khả năng tải không đều, số túi lớn ( $z \geq 6$ ) thì sự không đồng nhất này hầu như biến mất (xem đồ thị hình 3.12).



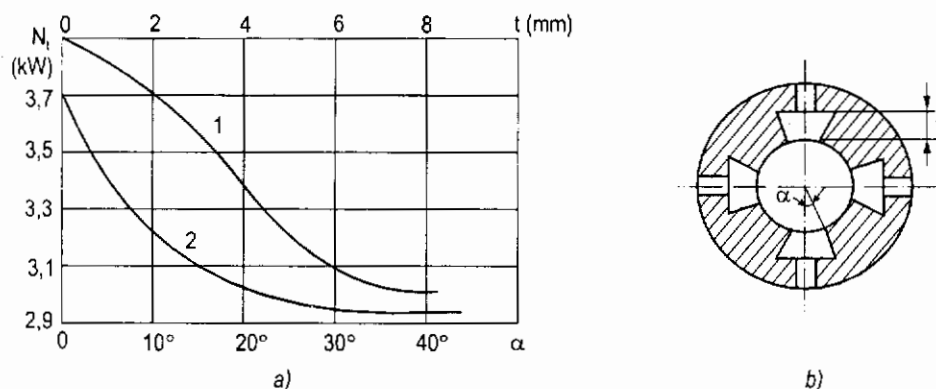
**Hình 3.12.** Đoạn (1): khí tải trọng tác dụng vào giữa túi;  
Đoạn (2): khí tải trọng tác dụng vào giữa vùng tiếp giáp.

Trong các trường hợp quan trọng nên dùng  $z = 6$ ; còn đối với các ổ nhỏ chịu tải trọng không lớn và ổn định có thể chọn  $z = 4$ .

- Hình dạng, kích thước túi dầu có ý nghĩa khi tần số quay của ổ lớn, làm dầu có thể bị cuốn ra khỏi túi gây chảy rối hoặc hiệu ứng thủy động dẫn đến tổn thất lớn trong túi dầu.

Có thể khắc phục điều này bằng cách tăng chiều sâu túi ( $t$ ) và tạo mang rãnh để khóa dầu trong túi (góc  $\alpha$ ).

Đồ thị hình 1.13a cho thấy với chiều sâu  $t$  và góc  $\alpha$  càng lớn, thì tổn thất công suất giảm nhiều. Từ đồ thị có thể chọn được  $\alpha$  và  $t$  thích hợp cho từng kết cấu (hình 3.13b).



**Hình 3.13.** 1) Khi thay đổi chiều sâu rãnh  $t$ ; 2) Khi thay đổi góc mang rãnh  $\alpha$ .

Trong tính toán - thiết kế có thể lấy các kích thước chiều dài túi dầu  $l_1$  và khoảng cách giữa hai túi kề nhau  $b$ , theo:

$$l_1 = 0,8D; b = a = 0,1D \quad (3.26)$$

Cơ chế bôi trơn ổ thủy tĩnh: dầu cao áp được bơm vào các túi dầu trong ổ và hình thành màng dầu bôi trơn giữa các bề mặt ma sát, sau đó dòng dầu sẽ thoát về bể. Tùy theo kết cấu ổ có hai cách bố trí đường dầu về:

- Dầu theo lỗ trên rãnh qua bơm hút về bể (hình 3.11a).
- Dầu tràn qua mép ổ, theo đường dẫn về bể - giữa các túi không cần xẻ rãnh (hình 3.11b).

Ngõng trục chuyển động quay tròn với tần số quay  $\omega$  tạo ra vận tốc tương đối  $\bar{U}$  giữa hai bề mặt ma sát. Bề mặt ngõng trục là trụ trơn được chế tạo chính xác.

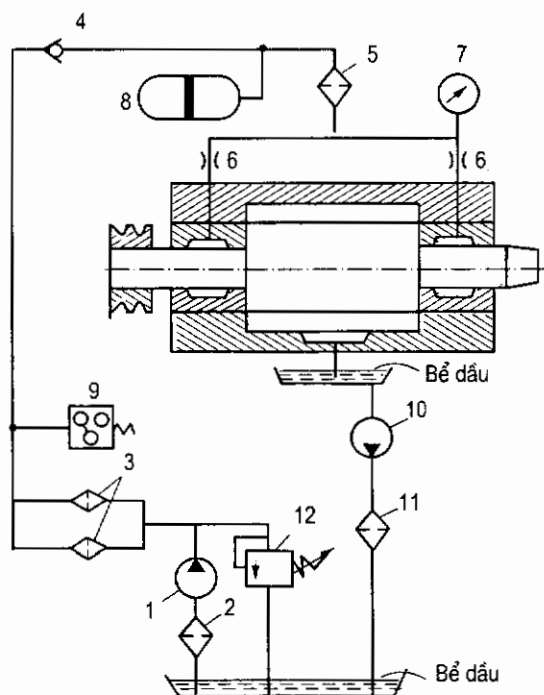
Trên phương diện dung sai - lắp ghép, hai bề mặt ngõng trục và ổ, ràng buộc với nhau bằng một mối ghép lỏng. Giữa chúng có các kích thước tương quan sau:

- Độ hở tuyệt đối hay độ hở hướng kính  $\Delta$  (hiệu đường kính ổ và ngõng trục);
- Độ lệch tâm giữa ngõng trục và ổ  $e$ ;

- Độ lệch tâm tương đối:  $\chi = \frac{2e}{\Delta}$ .

Đường kính danh nghĩa của ổ (D) được chọn theo điều kiện về độ cứng của trục. Bề rộng ổ (L) lựa chọn từ điều kiện định vị trên cơ sở tỷ lệ:  $\frac{L}{D} \leq 1$ .

### 3.1.8.2. Hệ thống bôi trơn ổ thủy tĩnh



**Hình 3.14**

1- bơm cấp; 2- lọc thô; 3- lọc tinh; 4- van một chiều; 5- lọc đặc biệt; 6- trở thủy lực (tiết lưu); 7- áp kế; 8- bộ tích áp; 9- role áp suất; 10- bơm hút; 11- bộ trao đổi nhiệt; 12- van tràn.

Hình 3.14 biểu diễn sơ đồ nguyên lý cung cấp dầu cho cụm ổ thủy tĩnh. Dầu từ bể được bơm 1 hút qua bộ lọc thô 2; đẩy qua bộ phận lọc tinh 3 (mắt lưới 15÷70 $\mu$ m). Van tràn 12 giữa cho dầu luôn có áp suất cần thiết. Dầu tiếp tục qua van một chiều 4, bộ lọc đặc biệt 5 (mắt lưới 5÷10 $\mu$ m), qua trở thủy lực 6 vào túi dầu trong ổ. Tùy theo số lượng túi dầu, cần bố trí một hệ thống van phân phối dầu thích hợp.

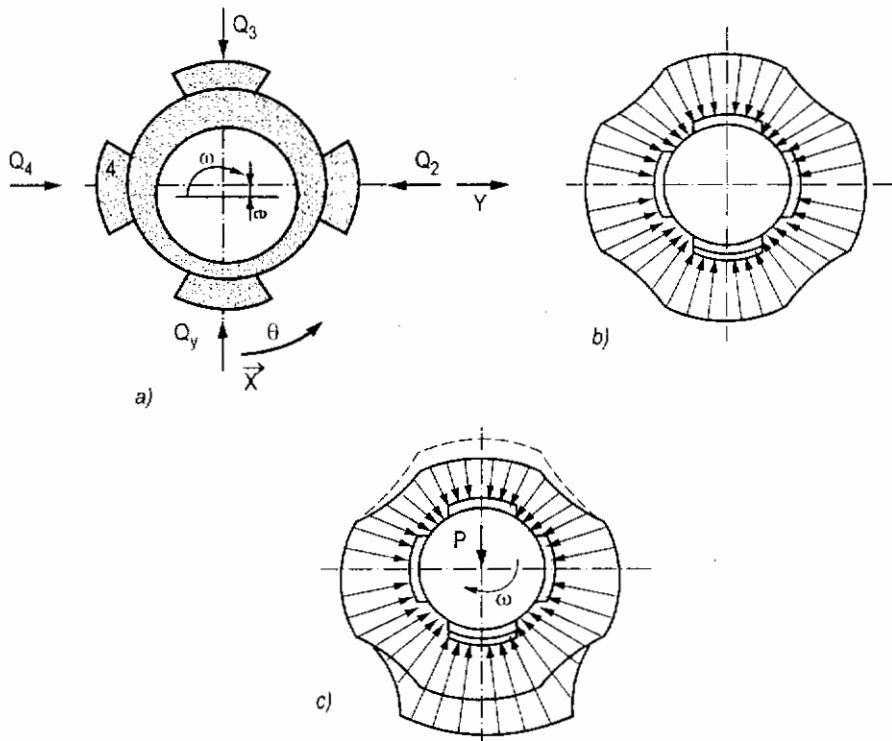
Trên đường dầu còn bố trí role áp suất 9 để phòng ngừa sự cố - nếu khi role áp suất 9 chưa hoạt động, bộ phận truyền dẫn chưa ngắt thì van một chiều 4 và bộ tích áp 8 lập tức tác động ngay để trợ giúp.

Dầu vào ổ làm nhiệm vụ nâng ngồng trục rồi tràn qua mép (hoặc theo rãnh) qua bơm hút 10; bộ trao đổi nhiệt 11 về bể.

Trường hợp ổ làm việc với vận tốc cao, cần có thêm thiết bị làm lạnh để giữ cho dầu trong bể chứa luôn ở nhiệt độ nhất định.

### 3.1.8.3. Xác định các thông số cơ bản của ổ thủy tĩnh

#### 1) Áp suất trong ổ thủy tĩnh

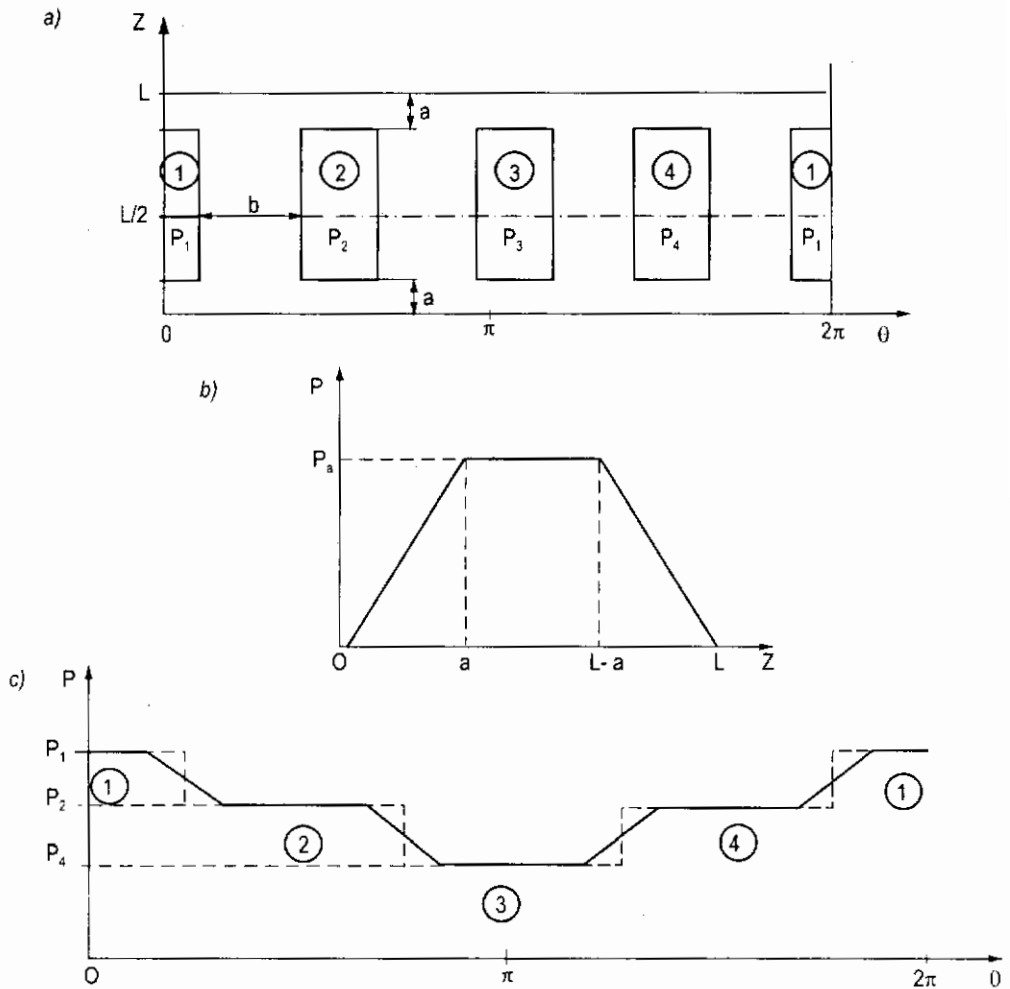


**Hình 3.15.** a) Ổ thủy tĩnh;

b) Phân bố áp suất theo mặt cắt ngang khi ổ chưa chịu tải;

c) Phân bố áp suất theo mặt cắt ngang khi ổ chịu tải.

Mô hình để phân tích - tính toán áp suất là một ổ thủy tĩnh gồm 4 túi dầu, có tốc độ quay cơ bản, dầu trong ổ có độ nhớt cao - chảy tầng (hình 3.15, 3.16). Nếu khoảng cách  $b$  nhỏ, có thể bỏ qua dòng chảy xoáy và nếu khoảng cách  $a$  giữa túi với mép ổ là nhỏ, có thể coi gradien áp suất dọc trục ổ không đổi. Do đó, có thể xem nêm dầu trong ổ liên tục với chiều dài  $\pi D$ , chiều dày  $h$ .



**Hình 3.16.** a) Khai triển ổ theo chu vi;

b) Phân bố áp suất theo chiều trục ổ; c) Phân bố áp suất theo chu vi ổ.

Hệ trục tọa độ Đề - Các được thiết lập trên hình 3.16a có  $OZ$  trùng với phương trục của ổ.

*a) Phân bố áp suất trong ổ thủy tĩnh*

Trên các hình 3.15 và 3.16 biểu diễn phân bố áp suất trong ổ thủy tĩnh trên các mặt cắt ngang, dọc và theo chu vi.

Có thể phân biệt hai trường hợp:

- Ổ chưa chịu tải: áp suất trong các túi dầu 1, 2, 3, 4 phân bố theo phương trục và theo chu vi ổ có giá trị giống nhau (xem hình 3.15b; 3.16b).



- Khi ổ chịu tải (tải trọng có đường tác dụng trùng với phương trục đối xứng của các túi dầu số 1 và số 3, áp suất trong các túi dầu thay đổi và có giá trị khác nhau (xem hình 3.15c, 3.16c).

Với vị trí các túi dầu của ổ được khai triển theo chu vi trên hình 3.16a (tại  $z = \frac{L}{2}$ ) Áp suất trong túi số 1 có giá trị lớn nhất, áp suất trong túi số 3 có giá trị nhỏ nhất (hình 3.16c). Có thể giải thích điều này là do ảnh hưởng của trọng lượng trục gây ra.

*b) Giá trị áp suất trong túi dầu*

Từ mô hình tính và các giả thiết được nêu, áp suất danh nghĩa trong các túi dầu của ổ thủy tĩnh được lấy theo công thức giải tích (3.9):

$$p_a = \frac{p_s}{\left(1 + \frac{K_Q}{K_c} h^3\right)} = \beta p_s \quad (3.27)$$

Áp suất trong các túi là nghiệm của hệ phương trình tuyến tính (3 phương trình 3 ẩn số) được suy ra từ phương trình Raynol:

$$\left. \begin{aligned} p_1 \left( f_1 + \frac{\beta}{1-\beta} + mg_1 \right) - p_2 mg_1 &= \frac{\beta}{1-\beta} p_s \\ -p_1 \frac{mg_1}{2} + p_2 \left[ f_1 + \frac{\beta}{1-\beta} + \frac{m}{2} (g_1 - g_2) \right] - p_3 \frac{mg_2}{2} &= \frac{\beta}{1-\beta} p_s \\ -\frac{mg_2}{2} p_2 + p_3 \left( f_1 + \frac{\beta}{1-\beta} + mg_2 \right) &= \frac{\beta}{1-\beta} p_s \end{aligned} \right\} \quad (3.28)$$

Trong đó:

$p_1, p_2 (= p_4), p_3$  - áp suất trong các túi dầu:

$\beta = \frac{p_a}{p_s}$  - tỷ số giữa áp suất danh nghĩa túi dầu với áp suất bơm cấp:

$m = \frac{4a(L-a)}{\pi Db}$  - hệ số hình dạng ổ;

$$f_1 = 1 - \frac{4}{\pi}(2,121\chi - 1,93\chi^2) + 0,589\chi^3;$$

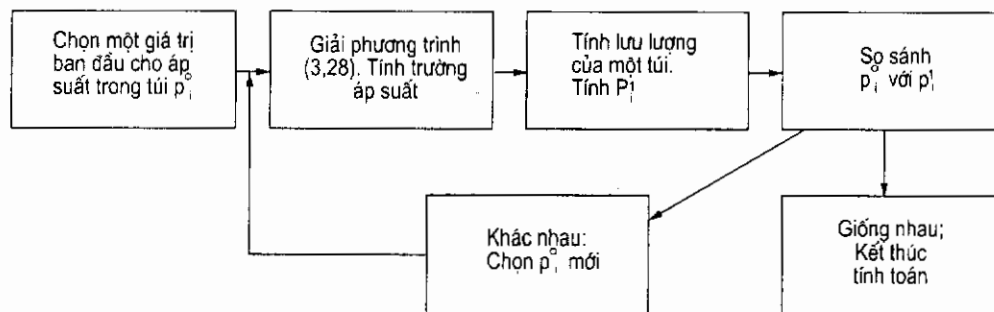
$$f_2 = 1 + \frac{4}{\pi}(0,428\chi^2);$$

$$f_3 = 1 + \frac{4}{\pi}(2,121\chi + 1,934\chi^2 + 0,589\chi^3);$$

$$g_1 = \left(1 - \chi \frac{\sqrt{2}}{2}\right)^3;$$

$$g_1 = \left(1 + \frac{\chi}{\sqrt{2}}\right)^3$$

Có thể xác định các áp suất  $p_i$  ( $i = 1, \dots, 4$ ) bằng phương pháp số, theo sơ đồ khối tổng quát trên hình 3.17.



**Hình 3.17**

Ta có thể chọn giá trị áp suất trong túi dầu của ổ thủy tĩnh theo:

$$p_i^0 = 10 \cdot 10^5 \div 50 \cdot 10^5 \text{ Pa (tốt nhất: } 10 \cdot 10^5 \div 20 \cdot 10^5 \text{ Pa)}.$$

## 2) Lưu lượng và tải trọng trong ổ thủy tĩnh

### a) Lưu lượng

Lưu lượng danh nghĩa của một túi dầu trong ổ thủy tĩnh:

$$Q_a = \frac{p_a C^3 K_Q}{\mu}; \tag{3.29}$$

$$K_Q = \frac{1}{6a} \cdot \frac{\pi D}{4}$$

Thực chất, áp suất ở các túi khác nhau như đã được chỉ ra nên lưu lượng ở các túi thay đổi khác với giá trị danh nghĩa, nhưng lưu lượng tổng của dầu qua ổ không đổi và được xác định theo:

$$Q = \frac{Dc^3}{6\mu a} p_s \frac{\beta}{1-\beta} \left( 4 - \frac{p_1 - 2p_2 + p_3}{p_s} \right) \quad (3.30)$$

*b) Tải trọng*

Khả năng tải của ổ thủy tĩnh xác định theo công thức:

$$P = 2\sqrt{2}D(L-a)(p_1 - p_3) \quad (3.31)$$

Khi tính toán thiết kế có thể sử dụng công thức gần đúng (với độ chính xác đủ cho các tính toán kỹ thuật):

$$P = p_s \cdot F_{hd} \cdot C_p(\chi, k) \quad (3.32)$$

Trong đó:  $p_s$ - áp suất bơm cấp;

$F_{hd}$  - diện tích hiệu dụng của ổ. Với ổ có số túi dầu:  $z = 4 \div 6$  thì:

$$F_{hd} \approx 0,5D^2 \quad (3.33)$$

$C_p(\chi, k)$ - hàm số phụ thuộc  $\chi$  và hình dạng ổ. Nếu độ lệch tâm tương đối:  $\chi \leq 0,4$ , thì có thể lấy:

$$C_p = 1,5\chi \quad (3.34)$$

Thay (3.33), (3.34) vào (3.32) nhận được:

$$P = 1,5 \frac{e}{\Delta} D^2 p_s \quad (3.35)$$

*3) Độ cứng của màng dầu trong ổ thủy tĩnh*

Xuất phát từ công thức:

$$J = \frac{dP}{de} \quad (3.36)$$

Kế đến công thức (3.35):

$$J = \frac{1,5D^2 p_s^2}{\Delta} \quad (3.37)$$

*4) Công suất tiêu hao trong ổ thủy tĩnh.*

Khi ổ thủy tĩnh hoạt động, công suất tiêu hao bao gồm:

a) Công suất tiêu hao do bơm cấp ( $N_p$ ):

$$N_p = 0,365 \frac{p_s^2 \Delta^3}{\mu}, (\text{kW}) \quad (3.38)$$

b) Công suất tiêu hao do ma sát ( $N_c$ ):

- Công suất tiêu hao do ma sát của dầu tại vùng tiếp giáp giữa các túi dầu theo phương trục ( $N_{c1}$ ):

$$N_{c1} = 0,17 \cdot 10^{-9} \mu l_1 D^3 \frac{n^2}{\Delta} \frac{\theta_b}{360^\circ}, (\text{kW}) \quad (3.39)$$

- Công suất tiêu hao do ma sát của dầu tại vùng tiếp giáp theo mép ổ ( $N_{c2}$ ):

$$N_{c2} = 0,34 \cdot 10^{-9} \mu a D^3 \frac{n^2}{\Delta} \frac{2\theta}{360^\circ}, (\text{kW}) \quad (3.40)$$

- Công suất tiêu hao do ma sát trong túi dầu ( $N_{c3}$ ):

$$N_{c3} = 0,136 \cdot 10^{-12} \frac{\mu n^2 D \left(1 + \frac{2t}{D}\right) z(2\theta)}{2t \left(1 + \frac{2t}{D}\right) 360^\circ}, (\text{kW}) \quad (3.41)$$

Công suất tiêu hao trong túi dầu rất nhỏ nên có thể bỏ qua, do đó:

$$N_c \approx N_{c1} + N_{c2} = 0,072 \cdot 10^{-16} \frac{\mu n^2 D^4}{\Delta}, (\text{kW}) \quad (3.42)$$

Vậy công suất tiêu hao chung cho ổ thủy tĩnh:

$$N_t = N_p + N_c = 0,365 \frac{p_s^2 \Delta^3}{\mu} + 0,072 \cdot 10^{-16} \frac{\mu n^2 D^4}{\Delta} \quad (3.43)$$

Trong các công thức trên:

$p_s$  - áp suất bơm cấp, (N/mm<sup>2</sup>);

$\mu$  - độ nhớt động lực của dầu bôi trơn;

$n$  - số vòng quay trong 1 phút của ổ;

$D$  - đường kính danh nghĩa của ổ, (mm);

$z$  - số túi dầu trong ổ;

$t$  - chiều sâu túi dầu, (mm);

$2\theta$  - góc chấn cung bề rộng túi dầu ( $^{\circ}$ );

$\theta_b$ - góc chấn cung khoảng cách  $b$  giữa hai túi dầu kề nhau ( $^{\circ}$ ).

$\Delta$  - độ hở hướng kính của ổ, (mm).

Với giả thiết chiều dày lớp bôi trơn trong ổ thủy tĩnh không đổi, nên:

$$h = \frac{\Delta}{2}, \text{ mm} \quad (3.44)$$

#### 3.1.8.4. Xác định khe hở nhỏ nhất trong ổ thủy tĩnh

Xác định khe hở nhỏ nhất trong ổ thủy tĩnh được lồng ghép với việc lựa chọn giá trị hợp lý của các thông số cơ bản:  $D$ ,  $J$ ,  $\mu$ ... theo một trình tự thống nhất.

1) Trình tự lựa chọn và tính toán

a) Chọn đường kính danh nghĩa của ổ sao cho độ cứng của trục trong khoảng  $25 \div 50 \text{ kG}/\mu\text{m}$ .

Độ cứng của trục (vật liệu bằng thép, kích thước:  $D$ ,  $l$ ):

$$J_{tr} = \frac{48EI}{l^3} \quad (3.45)$$

Trong đó:

$E$  - môđun đàn hồi vật liệu trục ( $E = 2,15 \cdot 10^5 \text{ N}/\text{mm}^2$ );

$I$  - mômen quán tính chính của trục ( $I \approx 0,05 D^4$ ,  $\text{mm}^4$ );

$l$  - khoảng cách giữa hai ổ đỡ trục, mm.

Thay vào (3.45) nhận được:

$$D = \sqrt[4]{\frac{J_{tr} l^3}{2,4E}}, \text{ (mm)} \quad (3.46)$$

b) Độ hở hướng kính trong ổ thủy tĩnh được lấy theo:

$$\Delta \approx 10^{-3} D \quad (3.47)$$

c) Chọn độ cứng của lớp bôi trơn trong ổ, có tính đến cân bằng độ cứng của toàn cụm - Độ cứng này tương đương với độ cứng của bản thân trục.

Nếu lấy độ cứng giới hạn  $J \geq 50 \cdot 10^4 \text{ N}/\text{mm}$ , công thức (3.37) có dạng:

$$\frac{P_s}{\Delta} \geq \frac{50 \cdot 10^4}{1,5D^2} \text{ hay } P_s \geq \frac{5 \cdot 10^5 \Delta}{1,5D^2} \quad (3.48)$$

d) Chọn độ nhớt dầu bôi trơn theo yêu cầu giảm thiểu tiêu hao công suất, từ các điều kiện:

$$\frac{dN_t}{d\mu} = 0; N_t \text{ theo (3.43)}$$

Giá trị độ nhớt:

$$\mu = 2,25 \cdot 10^8 \left( \frac{\Delta}{D} \right)^2 \frac{P_s}{n} = 225 \frac{P_s}{n} \quad (3.49)$$

e) Từ điều kiện:  $\frac{dN_t}{d\Delta} = 0$ , nhận được giá trị độ hở nhỏ nhất trong ổ thủy tĩnh:

$$\Delta_{\min} = 5,05 \cdot 10^{-5} D \sqrt{\frac{\mu n}{P_s}}, \text{ mm} \quad (3.50)$$

### 2) Trị số nhám bề mặt ngõng trục và ổ

Căn cứ vào các trị số độ hở danh nghĩa  $\Delta$ , độ hở nhỏ nhất  $\Delta_{\min}$ , tra bảng tiêu chuẩn Dung sai sẽ cho ta chế độ lắp ghép giữa ngõng trục và ổ.

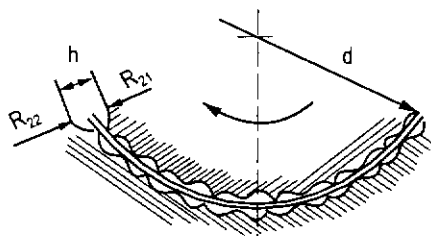
Trị số nhám bề mặt ổ trượt được xác định theo:

$$R_{Z1} + R_{Z2} + \gamma_b \leq \frac{\Delta_{\min}}{3} \quad (3.51)$$

Trong đó:

$R_{Z1}, R_{Z2}$  - thông số nhám bề mặt ngõng trục 1 và ổ 2,  $\mu\text{m}$  (hình 3.18).

$\gamma_b$  - lượng bổ sung, để màng dầu không bị đánh thủng:  $\gamma_b = 2 \div 3 \mu\text{m}$ .

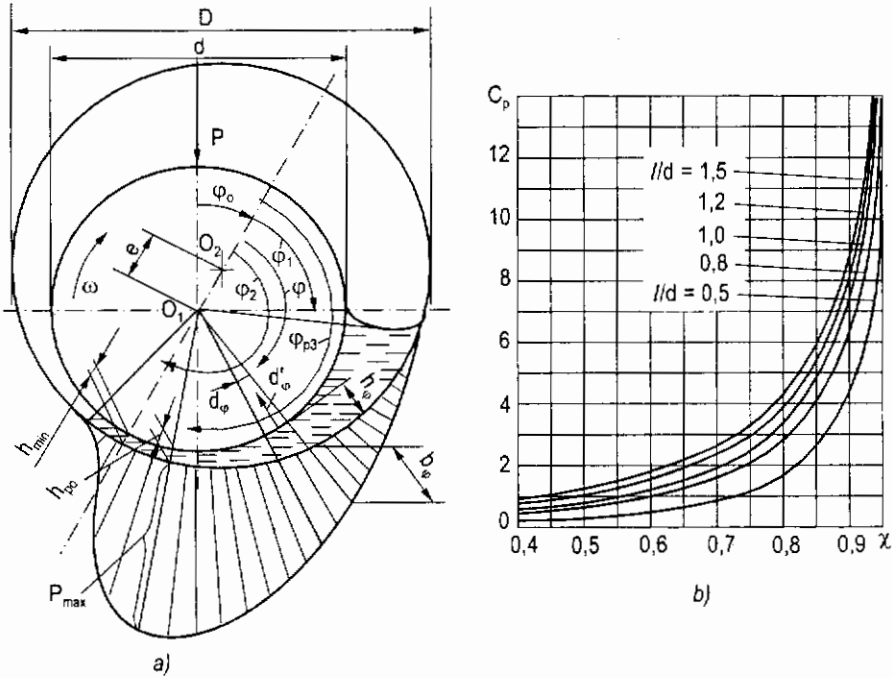


Hình 3.18

## 3.2. Ổ TRƯỢT THỦY ĐỘNG

### 3.2.1. Khả năng tải của ổ

Sơ đồ tính toán khả năng tải của ổ trượt đỡ bôi trơn ướt theo phương pháp thủy động (ổ thủy động) trên hình 3.19. Trong đó:  $\varphi_a$  là góc tạo bởi phương của đường nối tâm  $O_1, O_2$  và phương đường tác dụng của lực  $P$ . Dầu bôi trơn bị cuốn vào khoang hẹp dần giữa ngông trục và lót ổ, bị nén lại và tạo ra áp suất dư cân bằng với tải trọng ngoài  $P$  (hình 3.19a).



Hình 3.19

Sử dụng các ký hiệu:

$\Delta = D - d$  - độ hở hướng kính;

$\psi = \Delta/d$  - độ hở tương đối;

$h_{min}$  - khe hở nhỏ nhất (chiều dày nhỏ nhất của màng dầu);

$e = \frac{\Delta}{2} - h_{min}$  - độ lệch tâm tuyệt đối ;

$\left( \chi = \frac{2e}{\Delta} \right), \chi$  - độ lệch tâm tương đối .

Như vậy chiều dày nhỏ nhất của lớp bôi trơn xác định theo:

$$h_{\min} = \frac{\Delta}{2} - e = \frac{\Delta}{2}(1 - \chi) \quad (3.52)$$

Chiều dày lớp dầu tại tiết diện ứng với góc  $\varphi$  và  $\varphi_m$ :

$$h_{\varphi} = \frac{\Delta}{2} - e \cos \varphi = \frac{\Delta}{2}(1 - \chi \cos \varphi)$$

$$h_{\varphi_m} = \frac{\Delta}{2} - e \cos \varphi_m = \frac{\Delta}{2}(1 - \chi \cos \varphi_m)$$

Sử dụng hệ tọa độ độc cực (thay  $h = h_{\varphi}$ ,  $h_m = h_{\varphi_m}$ ) sau khi biến đổi ta được:

$$\begin{aligned} dp &= 6\mu \frac{\omega}{\psi^2} \cdot \frac{(1 + \chi \cos \varphi) - (1 + \chi \cos \varphi_m)}{((1 + \chi \cos \varphi)^3)} d\varphi \\ &= 6\mu \frac{\omega}{\psi^2} \cdot \frac{\chi(\cos \varphi - \cos \varphi_m)}{((1 + \chi \cos \varphi)^3)} d\varphi \end{aligned}$$

với  $\omega = \frac{2U}{d}$  ( $U$  - vận tốc vòng của ổ trục).

Áp suất tại tiết diện ứng với góc  $\varphi$ :

$$p_{\varphi} = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} dp$$

Thành phần thẳng đứng của  $p_{\varphi}$ :

$$p_{\varphi_y} = p_{\varphi} \cos[\pi - (\varphi_a + \varphi)] = -p_{\varphi} \cos(\varphi_a + \varphi)$$

Tích phân  $p_{\varphi_y}$  trong miền có áp suất thủy động giới hạn bởi góc  $\varphi_1$  và  $\varphi_2$  với bề rộng  $l$  của ổ, sẽ cân bằng với tải trọng ngoài.

$$P = \frac{ld}{2} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} p [-\cos(\varphi_a + \varphi)] d\varphi = \frac{\mu\omega l}{\psi^2} dC_p \quad (3.53)$$

Trong đó:  $C_p = 3 \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \int_{\varphi_1}^{\varphi} \frac{\chi(\cos \varphi - \cos \varphi_m)}{(1 + \chi \cos \varphi)^2} d\varphi [-\cos(\varphi_a + \varphi)] d\varphi$  - gọi là hệ số

khả năng tải. Hệ số này được xác định bằng phương pháp tích phân đồ thị phụ thuộc vào độ lệch tâm tương đối  $\chi$  và chiều dài tương đối  $l/d$  ứng với trường hợp  $\varphi_2 - \varphi_1 = 180^\circ$  khi chêm dầu choán một nửa cung tròn có xét đến hiện tượng dầu chảy ra hai mép do chiều dài ổ có hạn.



Từ công thức (3.53) có thể thấy khả năng tải của ổ thủy động phụ thuộc vào các thông số kết cấu của ổ như độ hở tương đối  $\psi$ , chiều dài tương đối  $l/d$ , độ lệch tâm tương đối  $\chi$ , tần số quay của ngõng trục  $\omega$  và độ nhớt của dầu bôi trơn  $\mu$ . Khả năng tải  $P$  của ổ tăng lên khi tăng  $\omega$ ,  $\mu$  và giảm  $\psi$ . Nếu số vòng quay của ngõng trục thấp, chế độ ma sát ướt rất khó được đảm bảo nên đối với các trục quay chậm - tải lớn người ta sử dụng bôi trơn thủy tĩnh.

### 3.2.2. Xác định chiều dày nhỏ nhất của lớp bôi trơn

Điều kiện để thực hiện chế độ bôi trơn ma sát ướt trong ổ trượt là:

$$h_{\min} \geq s(R_{Z1} + R_{Z2}) \quad (3.54)$$

trong đó:  $s$  - hệ số an toàn, kể đến sai số do chế tạo - lắp ghép, sai số về lực và chế độ nhiệt, thường lấy  $s = 2$ .

$R_{Z1}$  và  $R_{Z2}$  nằm trong khoảng  $6,3 + 32\mu\text{m}$  (đối với ngõng trục  $R_{z1} < 32\mu\text{m}$  đối với ổ  $R_{z2} > 6,3\mu\text{m}$ ), xem hình 3.18.

Chiều dày nhỏ nhất của lớp bôi trơn  $h_{\min}$  cũng chính là khe hở nhỏ nhất của ổ trượt, được xác định theo (3.52):

$$h_{\min} = \frac{\Delta}{2}(1 - \chi) = \psi(1 - \chi)\frac{d}{2} \quad (3.55)$$

trong đó: độ hở tương đối  $\psi$  thường lấy bằng:

$$\psi = 8 \cdot 10^{-4} \cdot U^{0.25} \quad (3.56)$$

Để xác định độ lệch tâm tương đối  $\chi$  trong (3.55), cần xác định hệ số khả năng tải  $C_p$  được suy ra từ (3.53):

$$C_p = \frac{P}{ld} \cdot \frac{\psi^2}{\mu\omega} = \frac{p \cdot \psi^2}{\mu\omega} \quad (3.57)$$

thay:  $p = P/ld$ ;  $l/d = 0,6 \div 1$ ; chọn loại dầu bôi trơn có độ nhớt  $\mu$ , dựa vào  $C_p$  sẽ tra được  $\chi$  theo đồ thị trên hình 3.19b.

### 3.2.3. Tính toán nhiệt

Tính toán nhiệt xuất phát từ phương trình cân bằng nhiệt "nhiệt lượng sinh ra bằng nhiệt lượng truyền đi":

$$\Omega = \Omega_1 + \Omega_2 \quad (3.58)$$

Nhiệt lượng sinh ra trong ổ (trong một giây):

$$\Omega = P.U.f.10^{-3}, \text{kW} \quad (3.59)$$

Trong đó:

P- lực hướng tâm (N);

U- vận tốc vòng (m/s);

f- hệ số ma sát tính từ tỷ số  $f/\psi$  tra trên hình 3.20a theo tỷ số  $l/d$  và  $\chi$ .

Nhiệt lượng theo dầu chảy qua ổ trong một giây bằng:

$$\Omega_i = C.\rho.Q.\Delta t, \text{kW} \quad (3.60)$$

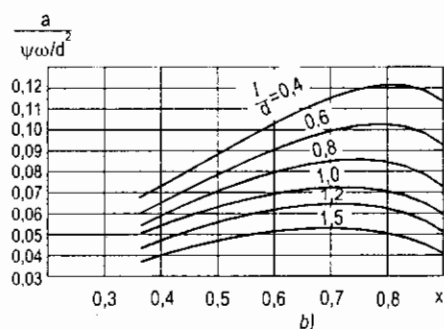
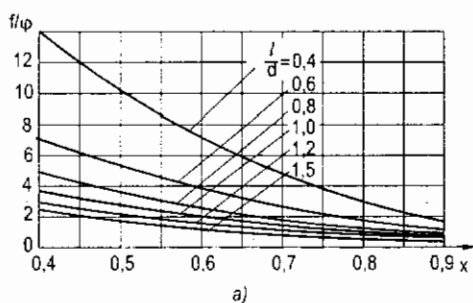
Trong đó:

C- nhiệt dung riêng của dầu ( $C = 1,7 \div 2,1 \text{kJ/kg}.\text{°C}$ );

$\rho$  - khối lượng riêng của dầu ( $\rho = 850 \div 900 \text{kg/m}^3$ );

Q - lưu lượng dầu chảy qua ổ ( $\text{m}^3/\text{s}$ ), tính từ tỷ số  $Q/\psi\omega.l.d^2$  tra theo  $\chi$  và  $l/d$  trên hình 3.20b;

$\Delta t = t_r - t_v$  - hiệu nhiệt độ dầu ra và dầu vào.



Hình 3.20

Nhiệt lượng thoát qua trục và thân ổ trong một giây:

$$\Omega_2 = K_t \pi d l \Delta t, \text{ kW} \quad (3.61)$$

Trong đó:

$K_t$  - hệ số thoát nhiệt qua trục và thân ổ ( $K_t = 0,04 \div 0,08 \text{ kW/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ );  
 $d, l$  - đường kính ngỗng trục và bề rộng lót ổ (m).

Thay (3.59), (3.60), (3.60) vào (3.58), tìm được:

$$\Delta t = t_r - t_v = \frac{fPU}{1000(C.p.Q + K_t \pi d l)} \quad (3.62)$$

Khi chọn độ nhớt  $\mu$  của dầu phải giả thiết nhiệt độ làm việc của ổ:

$$t = \frac{t_v + t_r}{2} = t_v + \frac{\Delta t}{2} \quad (3.63)$$

Nhiệt độ dầu ở cửa ra của ổ bằng:

$$t_r = t_v + \Delta t \quad (3.64)$$

Thông thường nhiệt độ cửa vào  $t_v$  và cửa ra  $t_r$  lấy theo:

$$t_v = 35 \div 45^\circ\text{C};$$

$$t_r = 80 \div 100^\circ\text{C}.$$

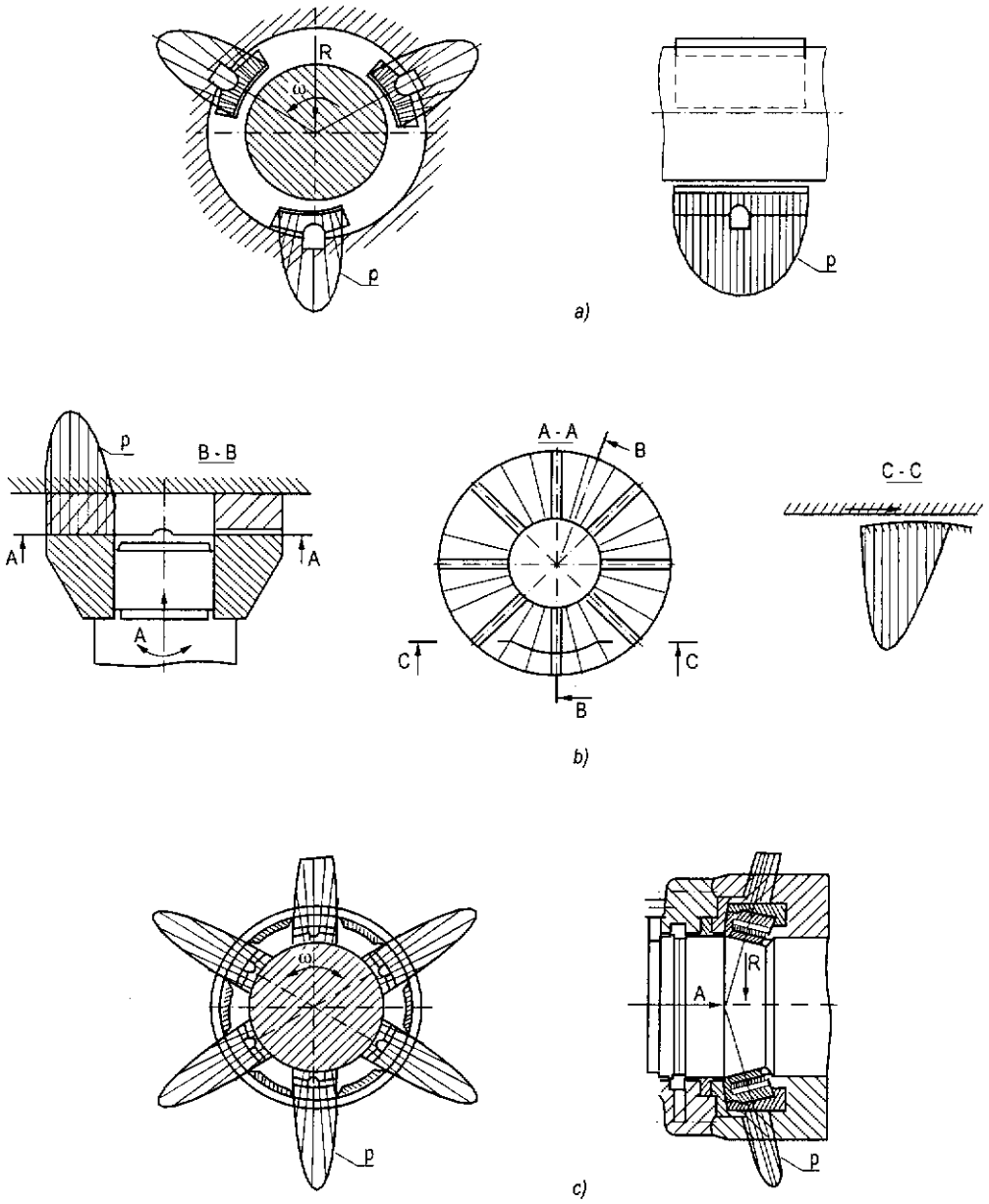
Sử dụng các công thức (3.62) và (3.63) ta xác định được nhiệt độ làm việc của ổ, từ đó có thể kiểm tra ảnh hưởng của nó đến độ nhớt của dầu và khả năng tải của ổ.

### 3.2.4. Sơ lược về ổ hướng kính có bạc tự lựa

Loại ổ này có kết cấu phức tạp, bạc ổ gồm nhiều mảnh độc lập có thể tùy động theo các phương hướng kính - dọc trục và được cấp dầu riêng (hình 3.21). Nó có khả năng tự lựa theo độ nghiêng của trục nên được sử dụng để loại trừ dao động tự nhiên cho các trục trong động cơ cao tốc hoặc tua bin.

Việc tính toán ổ hướng kính có bạc tự lựa, gồm các bước:

- Xác định vị trí cân bằng của ngỗng trục và với mỗi bạc;
- Xác định khả năng tải, tiêu hao dầu và mất mát do ma sát trong trường hợp cho trước hướng của tải trọng tác dụng lên ổ.



**Hình 3.21.** Ổ hướng kính có bạc tựa lưa và phân bố áp suất dầu:  
a) Ổ đỡ; b) Ổ chặn; c) Ổ đỡ chặn

## Chương 4

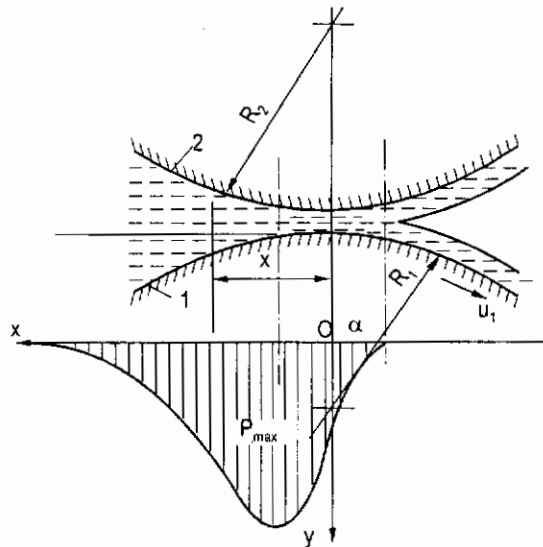
# KHÁI NIỆM VỀ BÔI TRƠN THỦY ĐỘNG TIẾP XÚC, BÔI TRƠN LƯU BIẾN VÀ BÔI TRƠN KHÍ

### 4.1. BÔI TRƠN THỦY ĐỘNG TIẾP XÚC

#### 4.1.1. Bôi trơn thủy động tiếp xúc có độ nhớt không đổi

Bài toán này khác với bài toán thủy động trong ổ trượt ở chỗ hai mặt trụ thường tiếp xúc ngoài với nhau. Do đó phải thừa nhận những giả thiết của Raynol:

- Bỏ qua lực quán tính và lực khối.
- Chiều dày lớp dầu bôi trơn rất nhỏ so với các bán kính cong của các bề mặt trụ nên ảnh hưởng biến dạng của các mặt trụ là không đáng kể.
- Giá trị áp suất  $p$  trên toàn bộ chiều dày màng bôi trơn đều giống nhau nên không phụ thuộc vào  $y$  và chỉ còn là hàm số của  $x$ ;
- Không có sự trượt của dầu theo khe hở.



Hình 4.1

Xuất phát từ phương trình Raynol:

$$\frac{dp}{dx} = \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (4-1)$$

và nhận được các kết quả:

1) Khả năng tải trên đơn vị chiều dài:

$$P = 4,896\mu \frac{U_0 R}{h_{\min}} \quad (4-2)$$

Trong đó:

$\mu$ - độ nhớt (được xem là không đổi);

$U_0$  - vận tốc trung bình:

$$U_0 = \frac{U_1 + U_2}{2}$$

$U_1, U_2$  - vận tốc của mặt, trụ 1 và 2. Nếu  $U_1 = U_2 = U$  thì  $U_0 = U$ .

$R$ - bán kính cong tương đương của các bề mặt (xem hình 4.1).

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

$h_{\min}$ - giá trị nhỏ nhất của khe hở.

Ta có nhận xét sau đây:

+ Bán kính cong càng nhỏ thì vùng khe hở tiếp xúc càng hạn chế, áp lực xuất hiện trong lớp dầu càng lớn. Áp lực theo đường cong này giảm nhanh khi  $h$  tăng lên. Kết quả là khả năng tải giảm.

+ Độ nhớt của dầu càng cao, nội lực càng lớn, khả năng tải lớn. Độ nhớt trong vùng tiếp xúc thay đổi lớn sẽ ảnh hưởng đến khả năng tải của màng dầu.

+ Vận tốc bề mặt tiếp xúc càng lớn, động năng của dầu lớn, khả năng tải tăng.

+ Giá trị khe hở  $h_{\min}$  càng nhỏ, lượng thu hẹp khe hở lớn (khi cùng đường cong bề mặt) thì áp lực càng lớn, khả năng tải tăng. Tuy nhiên không thể giảm  $h_{\min}$  xuống quá giá trị cho phép vì nó ảnh hưởng đến khả năng chống mòn.

2) Áp suất lớn nhất:

$$P_{\max} = 1,521 \cdot \frac{\mu U_0}{h_{\min}^2} \sqrt{2Rh_{\min}} \quad (4-3)$$

#### 4.1.2. Bôi trơn thủy động tiếp xúc có độ nhớt thay đổi

Đặc điểm cơ bản của bài toán này là áp suất tiếp xúc rất lớn (áp suất tiếp xúc định mức khoảng  $10^2$ MPa). Điều này thường xảy ra khi tiếp xúc điểm hoặc đường như trong: truyền động bánh răng, truyền động xích, ổ lăn. Khi đó, không thể bỏ qua biến dạng của các vật thể tiếp xúc và sự chảy của vật liệu bôi trơn trong khe hở xác định bởi các biến dạng cục bộ. Độ nhớt của vật liệu bôi trơn sẽ tăng theo áp suất kèm theo những tính chất đặc trưng cho vật thể rắn như môđun đàn hồi, hệ số Poisson,...

Để giải bài toán này, thường dựa trên những giả thiết sau:

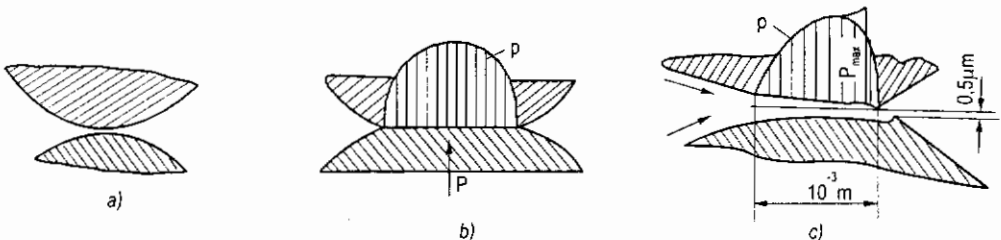
- Bài toán được xét là bài toán phẳng;
- Bề mặt vật rắn được xem là phẳng - nhẵn;
- Vật liệu bôi trơn là chất lỏng Newton;
- Vùng tiếp xúc có chiều rộng không đổi;
- Độ nhớt dầu bôi trơn trong vùng tiếp xúc không phụ thuộc vào nhiệt độ.

Khi tính toán những cặp ma sát cụ thể, người ta còn đưa thêm những giả thiết phụ. Ví dụ khi xét ổ lăn, người ta thường giả thiết các con lăn không quay khi lăn (vì chuyển động quay đó làm xuất hiện các hiệu ứng phi Newton trong vật liệu bôi trơn).

Những kết quả chủ yếu của bài toán này:

##### 1) Sự phân bố áp suất trong vùng tiếp xúc

Trong vùng chảy thoát của vật liệu bôi trơn từ khe hở, xuất hiện cực đại thứ hai của áp suất. Giá trị đó có thể vượt áp suất cực đại ở vùng tiếp xúc khi không có bôi trơn tới 20% (hình 4.2c).

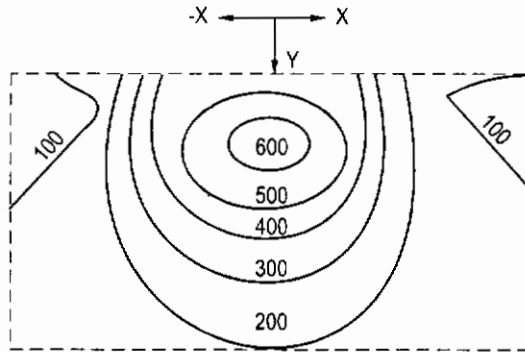


**Hình 4.2.** Phân bố áp suất vùng tiếp xúc: a) Tiếp xúc không tải; b) Tiếp xúc có tải không chuyển động; c) Tiếp xúc có tải khi lăn có bôi trơn.

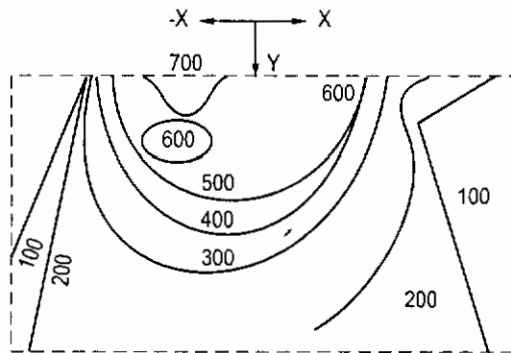
## 2) Trạng thái ứng suất - biến dạng trong vật liệu

Trạng thái này xuất hiện khi có tác dụng đồng thời của các ứng suất pháp và ứng suất tiếp có thể đến các hiện tượng đàn hồi nhiệt ở vùng tiếp xúc.

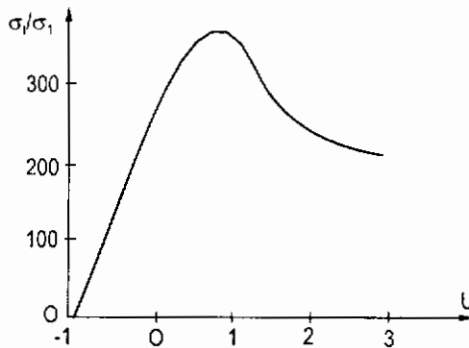
Trên hình 4.3 là biểu đồ đường cong ứng suất tương đối  $\sigma/\sigma_1$  khi tiếp xúc có tải đứng yên, còn hình 4.4 là trường hợp tiếp xúc có tải nhưng các bề mặt chuyển động tương đối với nhau (trong đó  $\sigma_1$  là ứng suất đơn vị, MPa).



Hình 4.3. Các đường cong ứng suất  $\sigma/\sigma_1$  khi tiếp xúc có tải đứng yên



Hình 4.4. Các đường cong ứng suất  $\sigma/\sigma_1$  khi tiếp xúc có tải chuyển động



Hình 4.5. Đường ứng suất nhiệt khi trượt



Hình 4.5 là phân bố ứng suất nhiệt  $\sigma/\sigma_1$  trên bề mặt vật thể ma sát khi trượt ( $\sigma_1$  là ứng suất nhiệt).

Những hư hỏng trên bề mặt và tuổi thọ của cặp ma sát phụ thuộc vào trạng thái ứng suất biến dạng này.

### 3) Hệ số ma sát

Hệ số ma sát  $f$  là hàm của vật liệu bề mặt, vật liệu bôi trơn, tải trọng, vận tốc dịch chuyển, các điều kiện nhiệt độ và hình dạng bề mặt tiếp xúc.

Giá trị hệ số ma sát xác định theo lý thuyết có thể lớn hơn 10÷100 lần so với thực nghiệm.

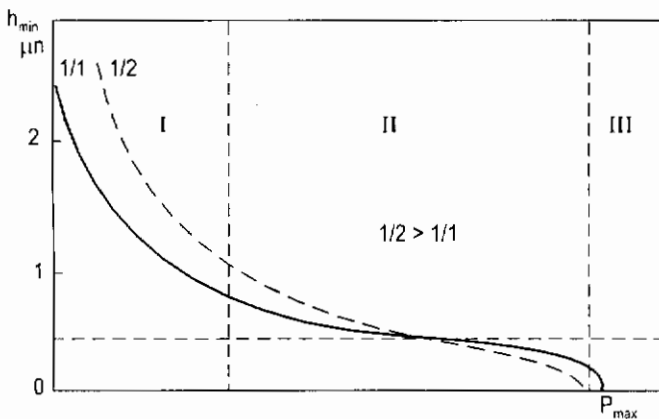
### 4) Giá trị nhỏ nhất của khe hở bôi trơn.

Thực nghiệm chứng tỏ rằng ở áp suất  $3 \cdot 10^3 \text{MPa}$  giá trị  $h_{\min} = 0,2 \mu\text{m}$  nhưng lý thuyết lại cho một kết quả với giá trị lớn hơn. Sự khác nhau này được giải thích bởi hiện tượng tích thoát độ nhớt của dầu bôi trơn.

Cần chú ý rằng khi sử dụng lý thuyết bôi trơn thủy động học cổ điển thì  $h_{\min} < 0,1 \mu\text{m}$  - khe hở này không phù hợp với sự chảy thực tế.

### 4.1.3. Điều kiện để có bôi trơn thủy động tiếp xúc

Trên hình 4.6 biểu diễn quan hệ giữa  $h_{\min}$  và  $p_{\max}$  (gồm 3 vùng): bôi trơn thủy động (I); bôi trơn thủy động tiếp xúc (II) và bôi trơn giới hạn (III).



**Hình 4.6.** Mối quan hệ giữa chiều dày nhỏ nhất của màng bôi trơn và áp suất tiếp xúc cực đại

Để đánh giá điều kiện có bôi trơn thủy động tiếp xúc có thể sử dụng hệ thức thực nghiệm sau:

$$X_b = \frac{h_{\min}}{\sqrt{R_{z1} + R_{z2}}} \geq 3 \div 4 \quad (4-4)$$

Trong đó:

$R_{z1}, R_{z2}$ , - chiều cao nhấp nhô của prôpin theo 10 điểm trên bề mặt các vật thể tiếp xúc.

- Khi  $X_b \leq 1$ : xuất hiện biến dạng và mài mòn các bề mặt tiếp xúc;
- Khi  $X_b = 1 \div 1,5$ : xuất hiện các vùng biến dạng dẻo riêng biệt, xảy ra sự tróc và tách rời các hạt mòn có kích thước nhỏ;
- Khi  $X_b = 1,5 \div 3$ : tạo thành các vùng trơn nhẵn trên các đoạn cục bộ, chế độ bôi trơn thủy động tiếp xúc được xác lập;
- Khi  $X_b \geq 3$ : chế độ bôi trơn thủy động tiếp xúc được thực hiện trên toàn bộ vùng tiếp xúc.

## 4.2. BÔI TRƠN LƯU BIẾN

Lý thuyết bôi trơn lưu biến là lý thuyết bôi trơn tổng quát có thể kể đến tính chất lưu biến của vật liệu bôi trơn - được xây dựng trên cơ sở lưu biến học.

Lưu biến học là một ngành cơ học nghiên cứu quá trình biến dạng của vật liệu dưới tác dụng của ứng suất.

Có ba biến dạng cơ bản ứng với ba mô hình sau:

1. Mô hình đàn hồi Húc - đặc trưng bởi định luật Húc:

$$\sigma = \varepsilon E \quad (4-5)$$

Trong đó:  $\sigma$ - ứng suất;

$\varepsilon$ - biến dạng tương đối;

$E$ - môđun đàn hồi.

Mô hình biểu thị bằng một lò xo có môđun đàn hồi  $E$  (hình 4.6a).

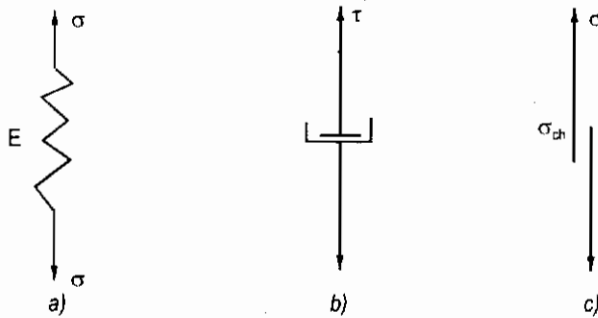
2. Mô hình nhớt Niuton - đặc trưng bởi định luật Niuton:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad \text{hoặc} \quad \tau = \mu \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (4-6)$$

Mô hình biểu thị bằng một pittông chuyển động trong xilanh có môi trường nhớt (hình 4.6b).

3. Mô hình dẻo ST - Venant - đặc trưng bởi giới hạn chảy của vật liệu. Khi ứng suất đạt giới hạn chảy  $\sigma_{ch}$ , vật liệu bắt đầu biến dạng dẻo.

Mô hình được biểu thị bằng hai mặt phẳng áp và trượt trên nhau (hình 4.6c - phần tử ma sát Culông).



**Hình 4.7.** Sơ đồ các mô hình cơ bản:

a) Mô hình Húc; b) Mô hình Niuton; c) Mô hình ST-Venant.

Các vật thể trong thực tế vừa có tính nhớt vừa có tính đàn hồi, dẻo nên chúng là một sự tổ hợp của các mô hình trên theo một quy luật nào đó.

- Nếu mắc song song mô hình Húc và mô hình Niuton ta được mô hình đàn nhớt Kenvin (hình 4.7a) có phương trình trạng thái sau:

$$\varepsilon = e^{\frac{1}{\mu} E} \left( \varepsilon_0 + \frac{1}{\mu} \int_0^t \sigma \cdot e^{\frac{1}{\mu} E} \cdot dt \right) \quad (4-7)$$

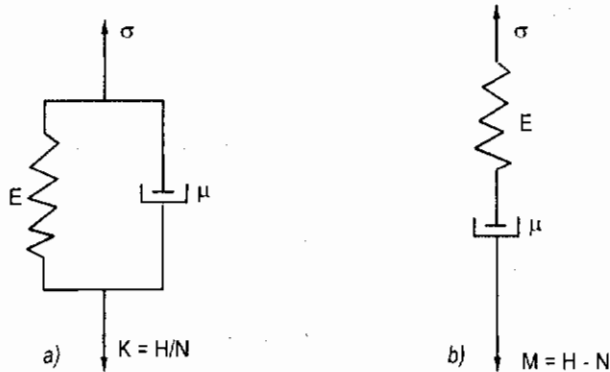
- Nếu mắc nối tiếp mô hình Húc và Niuton ta được mô hình Macxoen (hình 4.7b) có phương trình trạng thái là:

$$\sigma = e^{-\frac{1}{\mu} E} \left( \varepsilon_0 + E \int_0^t \frac{d\varepsilon}{dt} \cdot e^{\frac{1}{\mu} E} \cdot dt \right) \quad (4-8)$$

Trong lý thuyết bôi trơn lưu biến, tính lưu biến của chất bôi trơn (dầu phi Niuton) luôn được kể đến khi thiết lập phương trình Rây nol. Chẳng hạn với dòng bôi trơn đàn - nhớt, hệ phương trình Rây nol có dạng:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial x} &= \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} \\ \frac{\partial p}{\partial z} &= \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} \end{aligned} \right\} \quad (4-9)$$

Với chất lỏng Newton, hệ phương trình trên trở về hệ phương trình Ráynol quen thuộc trong không gian 3 chiều.



*Hình 4.8. a) Sơ đồ và ký hiệu mô hình đàn nhớt Kelvin;  
b) Sơ đồ và ký hiệu mô hình Maxoen.*

### 4.3. BÔI TRƠN KHÍ

Tùy theo phương pháp tạo áp suất trong lớp khí bôi trơn mà bôi trơn khí có thể là bôi trơn khí động hoặc khí tĩnh.

So với bôi trơn lỏng, bôi trơn khí có những ưu nhược điểm sau:

Về ưu điểm:

- Hệ số ma sát f rất thấp nên nhiệt tỏa ra ít. Cường độ hao mòn bề mặt ma sát rất nhỏ so với bôi trơn lỏng;

- Làm việc trong khoảng tốc độ rộng và ở tốc độ rất thấp hoặc rất cao;

- Có thể làm việc tin cậy ở điều kiện nhiệt độ cao.

Nhược điểm:

- Khả năng tải bị hạn chế bởi áp suất khí thấp (chỉ vào khoảng vài atm);

- Luôn gặp khó khăn khi tạo ra vô số lỗ nhỏ qua thành (thường < 0,1mm) để cấp khí vào bề mặt bôi trơn đảm bảo cho khả năng chịu tải;

- Đòi hỏi việc chế tạo và lắp ghép chính xác.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Nguyễn Anh Tuấn, Nguyễn Văn Thèm. *Kỹ thuật ma sát và những biện pháp nâng cao tuổi thọ thiết bị*. Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội 1990.
2. Nguyễn Trọng Hiệp. *Chi tiết máy*. Nhà xuất bản Giáo dục. Hà Nội, 1994.
3. Bùi Văn Gòn. *Nghiên cứu lý thuyết bôi trơn ứng dụng cho việc xác định khe hở nhỏ nhất của ổ thủy tinh*. Luận văn Thạc sỹ kỹ thuật. Hà Nội, 1997.
4. Trịnh Chất. *Cơ sở thiết kế máy và chi tiết máy*. Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật. Hà Nội, 2005.
5. Nguyễn Anh Tuấn, Phạm Văn Hùng. *Ma sát học*. Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật. Hà Nội, 2005.
6. Тябин. Н.В, Нгюэн Анх Туан. *Поведение вязко-пластических смазок в реостатических подпятниках скольжения С.Б "Пластичные смазки"*. Киев. 1971.
7. Пуш.В.Э, *Конструирование Металлорежущих стачков*. Москва, 1997.
8. Frêne Jean, Daniel Nicolas, Bernard Degueurce, Daniel Berthe, Maurice Godet, Préfacede Gilbert Riollet, *Lubrification hydroymanique Paliers et Buteés*. Paris, 1990.

# MỤC LỤC

	Trang
<i>Lời nói đầu</i>	3
<b>Chương 1. Đại cương về sôi trơn ướt</b>	
1.1. Hiện tượng ma sát khi sôi trơn ướt	5
1.2. Phương pháp sôi trơn ướt	6
1.3. Chất sôi trơn - quá trình cải thiện và sử dụng	12
<b>Chương 2. Các phương trình thủy động lực học viết cho màng mỏng nhớt</b>	
2.1. Phương trình tổng quát	19
2.2. Ý nghĩa vật lý	26
2.3. Phương trình năng lượng cho màng mỏng nhớt	27
2.4. Dạng đặc biệt của phương trình màng mỏng nhớt tổng quát	29
2.5. Điều kiện biên	34
2.6. Tính toán các thông số trong tiếp xúc	39
2.7. Phương trình Raynol cho dòng chảy một chiều trong khe hở hình chêm	41
<b>Chương 3. Tính toán các thông số cơ bản của ổ trượt sôi trơn ướt</b>	
3.1. Ổ trượt thủy tĩnh	44
3.2. Ổ trượt thủy động	70
<b>Chương 4. Khái niệm về sôi trơn thủy động tiếp xúc, sôi trơn lưu biến và sôi trơn khí</b>	
4.1. Sôi trơn thủy động tiếp xúc	76
4.2. Sôi trơn lưu biến	81
4.3. Sôi trơn khí	83
<b>Tài liệu tham khảo</b>	

# LÝ THUYẾT BÔI TRƠN ƯỚT

*Chịu trách nhiệm xuất bản:*

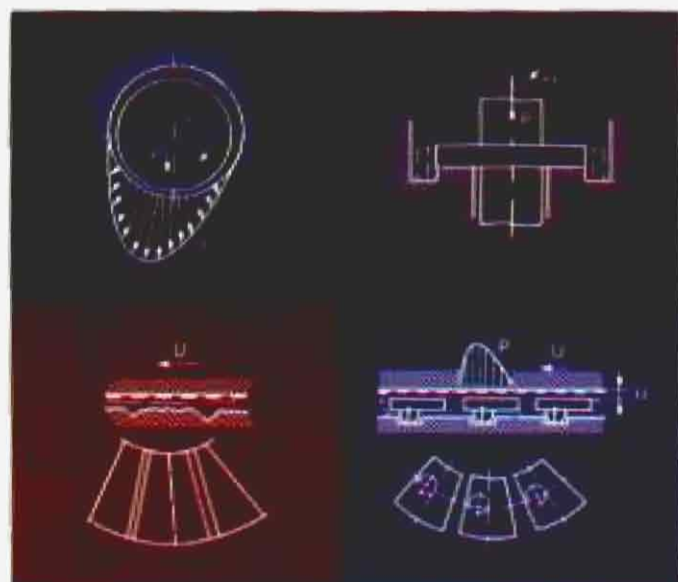
BÙI HỮU HẠNH

Biên tập:	LƯƠNG CAO PHI
Chế bản:	ĐÌNH THỊ PHƯỢNG
Sửa bản in:	LƯƠNG CAO PHI
Vẽ bìa:	HS. VŨ BÌNH MINH

---

In 700 cuốn khổ 17×24 tại Xưởng in Nhà xuất bản Xây dựng. Giáp chấp nhận xuất bản số 178-2005/CXB/2-208/XD ngày 12/12/2005. In xong và nộp lưu chiểu tháng 12/2005.

**CHÀO MỪNG 50 NĂM THÀNH LẬP**  
**TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA HÀ NỘI (1956 - 2006)**  
**VÀ 40 NĂM THÀNH LẬP**  
**TRƯỜNG ĐẠI HỌC XÂY DỰNG (1966 - 2006)**



# LÝ THUYẾT BÔI TRƠN ƯỚT