



HCMUTE

FLUID DYNAMICS

Hung-Son Dang Ph.D.





CHƯƠNG 5

CHUYỂN ĐỘNG MỘT CHIỀU CỦA CHẤT LỎNG

OUTLINES

5.1 Tổn thất năng lượng trong dòng chảy

5.2 Dòng chảy tầng có áp trong ống tròn

5.3. Dòng chảy rối có áp trong ống tròn

5.4 Dòng chảy tầng trong khe hẹp có gradien áp suất

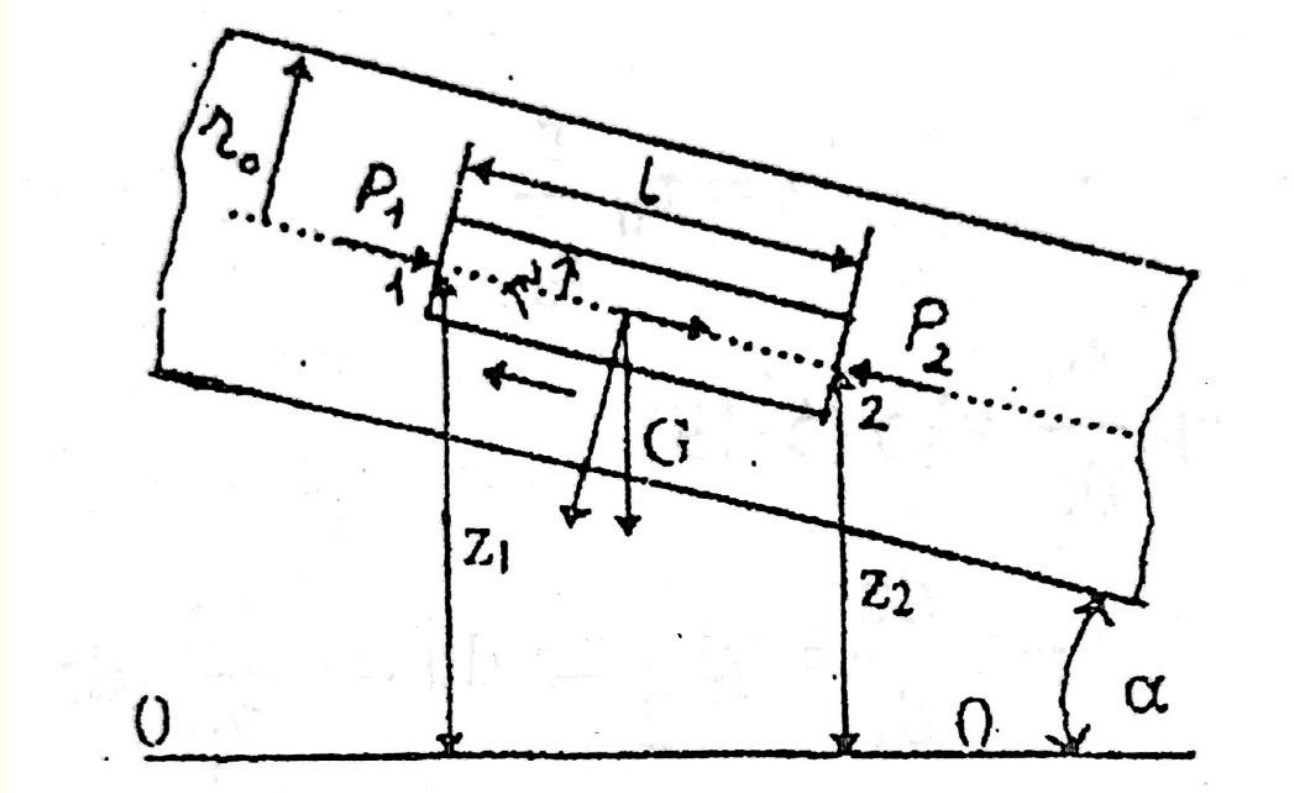
**5.5 Dòng chảy tầng do ma sát trong khe hẹp, sơ lược
về lý luận bôi trơn thủy động lực**

5.2 Dòng chảy tầng có áp trong ống tròn

5.2.1 Qui luật phân bố ứng suất tiếp và vận tốc trên mặt cắt ướt

* Quy luật phân bố vận tốc:

Khảo sát dòng chảy tầng ổn định trong ống tròn có đường kính d (bán kính r_0) không đổi, nằm trong mặt phẳng nghiêng một góc α so với mặt phẳng nằm ngang.



Hình 5.7 Phân tố lỏng hình trụ

5.2 Dòng chảy tầng có áp trong ống tròn

5.2.1 Qui luật phân bố ứng suất tiếp và vận tốc trên mặt cắt ướt

- Trong dòng chảy ta tách ra một phân tố lỏng hình trụ tròn nằm ngay giữa trục ống, có chiều dài l , bán kính r :

Thể tích của phân tố lỏng:

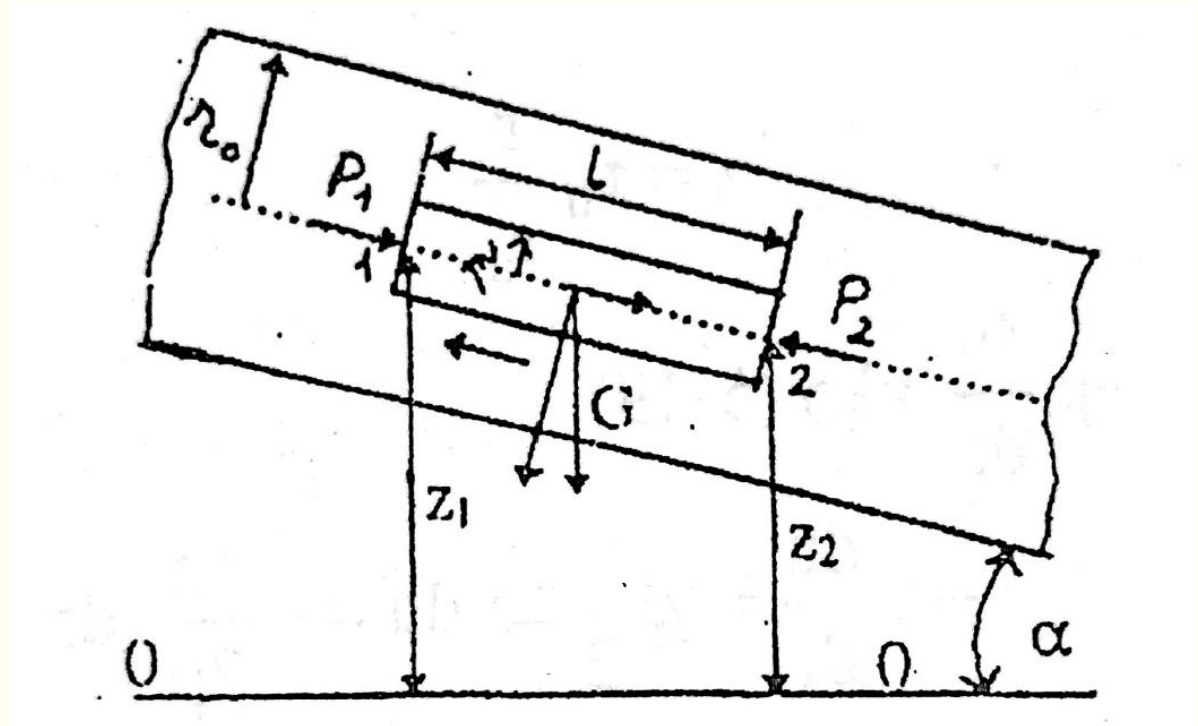
$$V = \pi r^2 l$$

Diện tích xung quanh của hình trụ: $S_{xq} = 2\pi r l$

- Ngoại lực:

. Lực khối: chỉ có trọng lực:

$$G = \gamma V = \gamma \pi r^2 l$$



Hình 5.7 Phân tố lỏng hình trụ

5.2 Dòng chảy tầng có áp trong ống tròn

5.2.1 Qui luật phân bố ứng suất tiếp và vận tốc trên mặt cắt ướt

Lực bề mặt: Áp lực ở đầu và cuối phân tố lỏng:

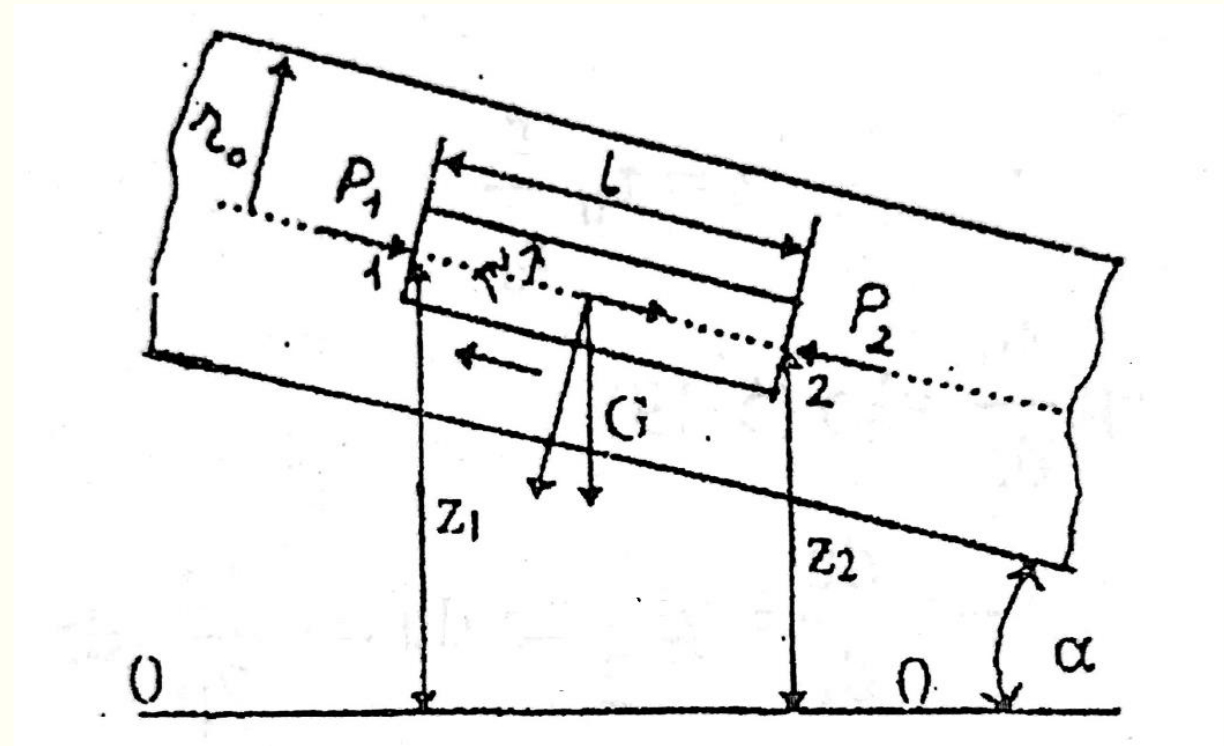
$$P_1 = p_1 \pi r^2$$

$$P_2 = p_2 \pi r^2$$

Lực ma sát: $T = \tau 2\pi r l$

- Áp dụng nguyên lý D'Alembert cho phân tố lỏng, ta có phương trình cân bằng lực theo phương dòng chảy:

$$P_1 - P_2 + G \sin \alpha - T = 0$$



Hình 5.7 Phân tố lỏng hình trụ

5.2 Dòng chảy tầng có áp trong ống tròn

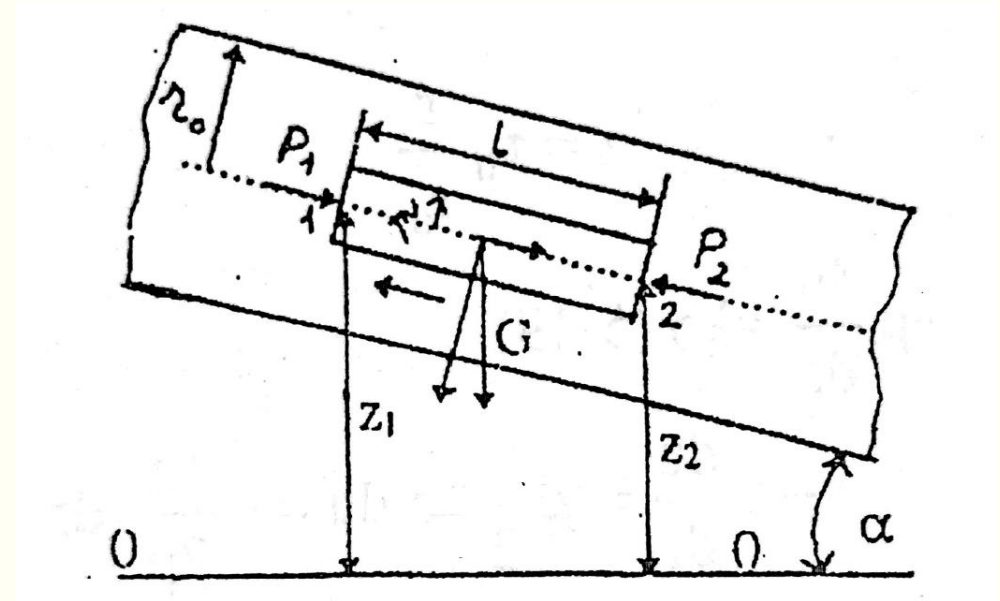
5.2.1 Qui luật phân bố ứng suất tiếp và vận tốc trên mặt cắt ướt

Hay:

$$p_1 \pi r^2 - p_2 \pi r^2 + \gamma \pi r^2 l \frac{z_1 - z_2}{1} - \tau 2\pi r l = 0$$

Chia hai vế của phương trình cho $\gamma \pi r^2$ ta được:

$$\frac{p_1}{\gamma} - \frac{p_2}{\gamma} + z_1 - z_2 - \tau \frac{2l}{\gamma r} = 0$$



Hình 5.7 Phân tố lỏng hình trụ

5.2 Dòng chảy tầng có áp trong ống tròn

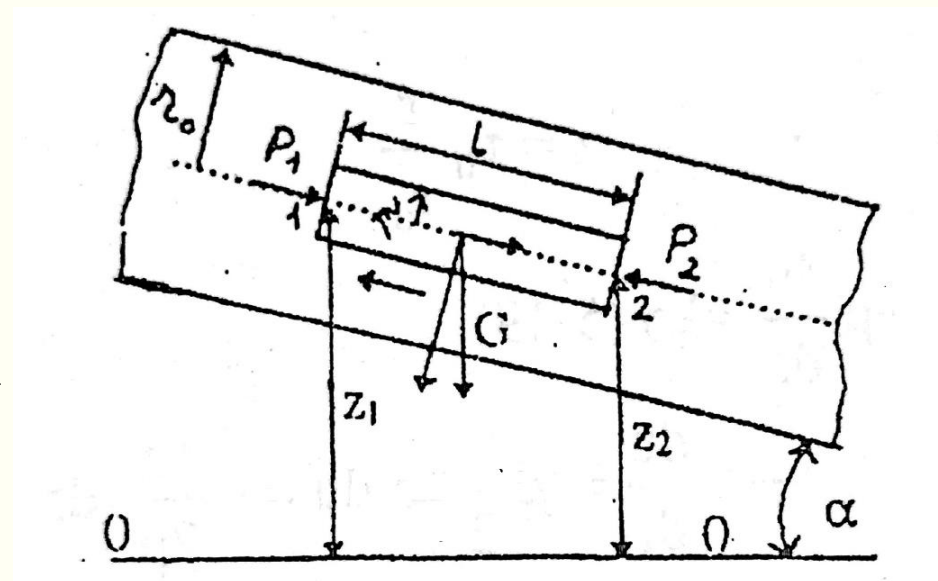
5.2.1 Qui luật phân bố ứng suất tiếp và vận tốc trên mặt cắt ướt

Hay:

$$\left(z_1 + \frac{p_1}{\gamma}\right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\gamma}\right) - \tau \frac{2.l}{\gamma.r} = 0$$

Vì dòng chảy đều $v = \text{const}$, nên:

$$\left(z_1 + \frac{p_1}{\gamma}\right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\gamma}\right) = h_w$$



Hình 5.7 Phân bố ứng suất tiếp và vận tốc

5.2 Dòng chảy tầng có áp trong ống tròn

5.2.1 Qui luật phân bố ứng suất tiếp và vận tốc trên mặt cắt ướt

Mặt khác:

$$J = \frac{h_w}{l}$$

hay

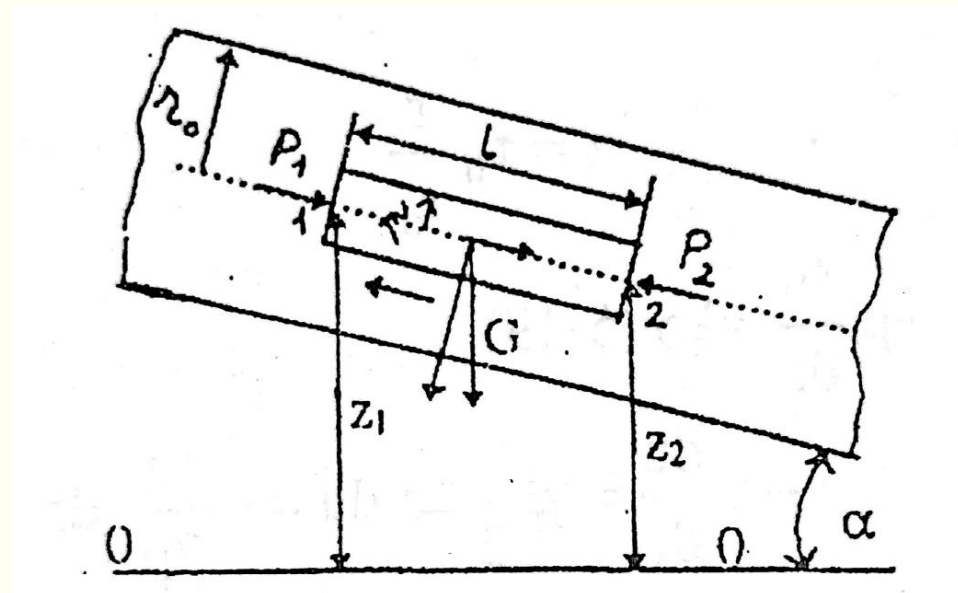
$$h_w = Jl$$

thay vào, ta có:

$$Jl - \tau \frac{2.l}{\gamma.r} = 0$$

Chuyển vế, giản ước l , rút τ ra, ta được:

$$\tau = \gamma J \frac{r}{2}$$



Hình 5.7 Phân tố lỏng hình trụ

5.2 Dòng chảy tầng có áp trong ống tròn

5.2.1 Qui luật phân bố ứng suất tiếp và vận tốc trên mặt cắt ướt

Phương trình này chứng tỏ rằng ứng suất tiếp tuyến phát sinh trong dòng chảy tỷ lệ bậc nhất với bán kính ống, phụ thuộc vào độ dốc thủy lực và trọng lượng riêng của chất lỏng.

Khi $r = r_o$ ta có ứng suất tiếp tại thành ống:

$$\tau_o = \gamma J \frac{r_o}{2} = \gamma J R_h$$

Phương trình này còn gọi là *phương trình cơ bản của chuyển động đều trong ống tròn*.

Từ định luật của Newton về lực nhớt $\tau = -\mu \frac{du}{dr}$ kết hợp với phương trình:

$$-\mu \frac{du}{dr} = \gamma J \frac{r}{2}$$

5.2 Dòng chảy tầng có áp trong ống tròn

5.2.1 Qui luật phân bố ứng suất tiếp và vận tốc trên mặt cắt ướt

Suy ra:

$$\frac{du}{dr} = - \frac{1}{2\mu} \gamma J r$$

Tích phân lên, ta được:

$$u = - \frac{1}{4\mu} J \gamma r^2 + C$$

C – hằng số tích phân được lấy từ điều kiện biên:

. Khi $r = r_o$ thì $u = 0$ ta có: $C = \frac{1}{4\mu} J \gamma r_o^2$

Thay C vào biểu thức của u, ta có:

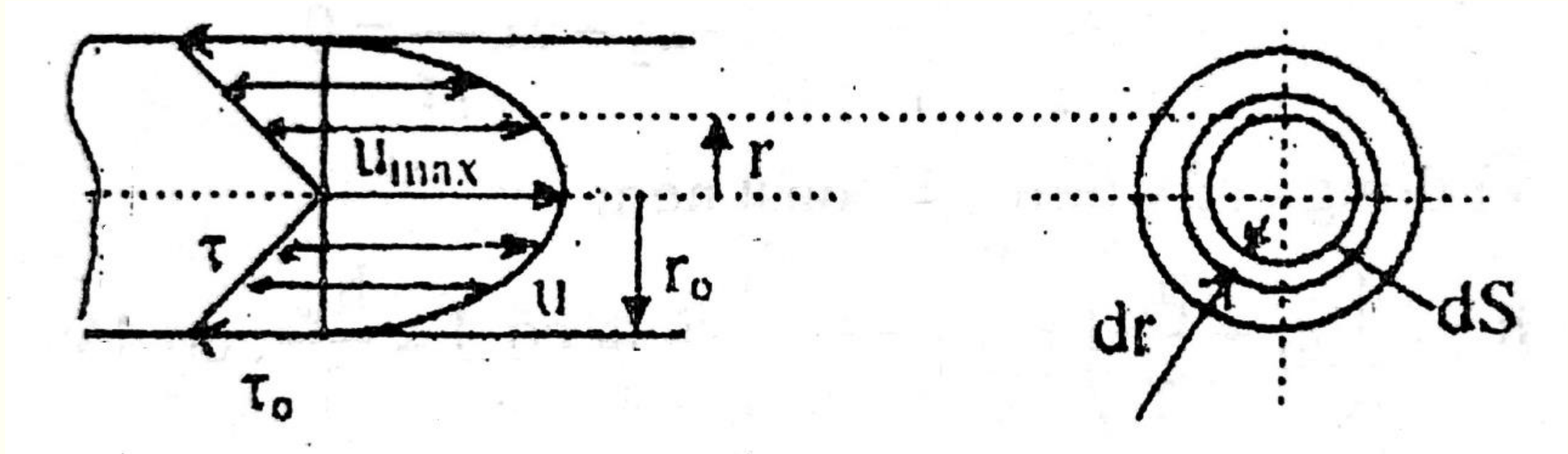
$$u = \frac{1}{4\mu} J \gamma r_o^2 - \frac{1}{4\mu} J \gamma r^2$$

Hay:

$$u = \frac{1}{4\mu} J \gamma r_o^2 \left(1 - \frac{r^2}{r_o^2} \right)$$

5.2 Dòng chảy tầng có áp trong ống tròn

5.2.1 Qui luật phân bố ứng suất tiếp và vận tốc trên mặt cắt ướt



Hình 5.8 Phân bố vận tốc

5.2 Dòng chảy tầng có áp trong ống tròn

5.2.1 Qui luật phân bố ứng suất tiếp và vận tốc trên mặt cắt ướt

Biểu thức biểu thị *phân bố vận tốc theo quy luật parabol*.

. Khi $r = 0$ thì $u = u_{\max}$, tại trục ống, ta có:

$$u_{\max} = \frac{1}{4\mu} J \gamma r_o^2$$

Hay là:
$$u = u_{\max} \left(1 - \frac{r^2}{r_o^2} \right)$$

* Lưu lượng:

$$Q = \int_S u dS$$

Dùng phép đổi biến, $S = \pi r^2$, suy ra:

$$dS = 2\pi r dr.$$

5.2 Dòng chảy tầng có áp trong ống tròn

5.2.1 Qui luật phân bố ứng suất tiếp và vận tốc trên mặt cắt ướt

Ta có:
$$Q = \int_0^{r_o} u 2\pi r dr = 2\pi u_{\max} \int_0^{r_o} \left(1 - \frac{r^2}{r_o^2}\right) r dr$$
$$= 2\pi u_{\max} \left(\frac{r_o^2}{2} - \frac{r_o^4}{4r_o^2}\right)$$
$$= 2\pi u_{\max} \left(\frac{r_o^2}{2} - \frac{r_o^2}{4}\right) = 2\pi u_{\max} \frac{r_o^2}{4}$$

Vậy:
$$Q = \frac{\pi r_o^2}{2} u_{\max}$$

Hay:
$$Q = \frac{1}{8\mu} J \gamma \pi r_o^4$$

* Vận tốc trung bình mặt cắt ướt:

Ta có phương trình lưu lượng: $Q = vS = v\pi r_o^2$ kết hợp với biểu thức, suy ra:

5.2 Dòng chảy tầng có áp trong ống tròn

5.2.1 Quy luật phân bố ứng suất tiếp và vận tốc trên mặt cắt ướt

$$v = \frac{u_{\max}}{2} = \frac{1}{8\mu} J \gamma r_o^2 = \frac{1}{32\mu} J \gamma d^2$$

* Quan hệ u và v : thay $u_{\max} = 2v$ vào ta được:

$$u = 2v \left(1 - \frac{r^2}{r_o^2} \right)$$

Hay:
$$\frac{u}{v} = 2 \left(1 - \frac{r^2}{r_o^2} \right)$$

5.2 Dòng chảy tầng có áp trong ống tròn

5.2.2 Tổn thất năng lượng dọc đường và công thức tính hệ số ma sát

Tổn thất dọc đường, công thức tính hệ số ma sát λ :

Từ đó ta rút ra:

$$J = \frac{32\mu v}{\gamma d^2} = \frac{32\mu v}{\rho g d^2}$$

Suy ra:
$$h_d = J l = \frac{32\mu l v}{\rho g d^2} = \frac{32.2}{\frac{v d}{v}} \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} = \frac{64}{Re} \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g}$$

5.2 Dòng chảy tầng có áp trong ống tròn

5.2.2 Tổn thất năng lượng dọc đường và công thức tính hệ số ma sát

Thay: $Re = \frac{vd}{\nu}$ và $v = \frac{4Q}{\pi d^2}$, ta có:

$$h_d = \frac{128\nu l Q}{\pi g d^4}$$

So sánh với công thức Darcy, ta được:

$$\lambda = \frac{64}{Re}$$

* Định luật Hagen - Poise: tính độ sụt áp trong dòng chảy đều trong ống tròn nằm ngang.

5.2 Dòng chảy tầng có áp trong ống tròn

5.2.2 Tổn thất năng lượng dọc đường và công thức tính hệ số ma sát

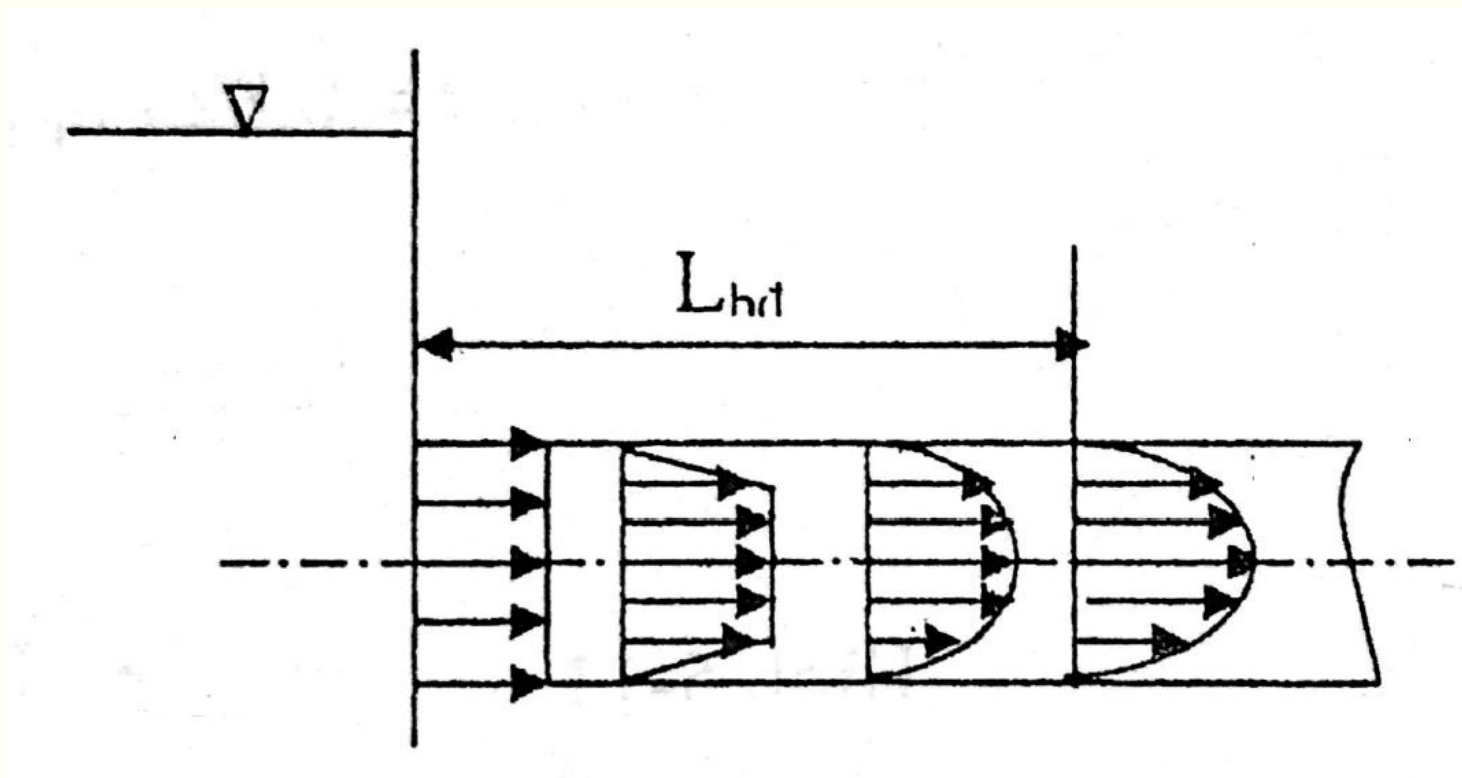
Thay $h_d = \frac{\Delta p}{\gamma}$ vào ta có:

$$\Delta p = \frac{128\mu l Q}{\pi d^4}$$

Biểu thức biểu thị định luật Hagen-Poise: Trong dòng chảy tầng đều có áp trong ống tròn, độ chênh áp tỷ lệ bậc nhất với lưu lượng dòng chảy qua ống và chiều dài đường ống và tỉ lệ nghịch bậc bốn với đường kính ống.

5.2 Dòng chảy tầng có áp trong ống tròn

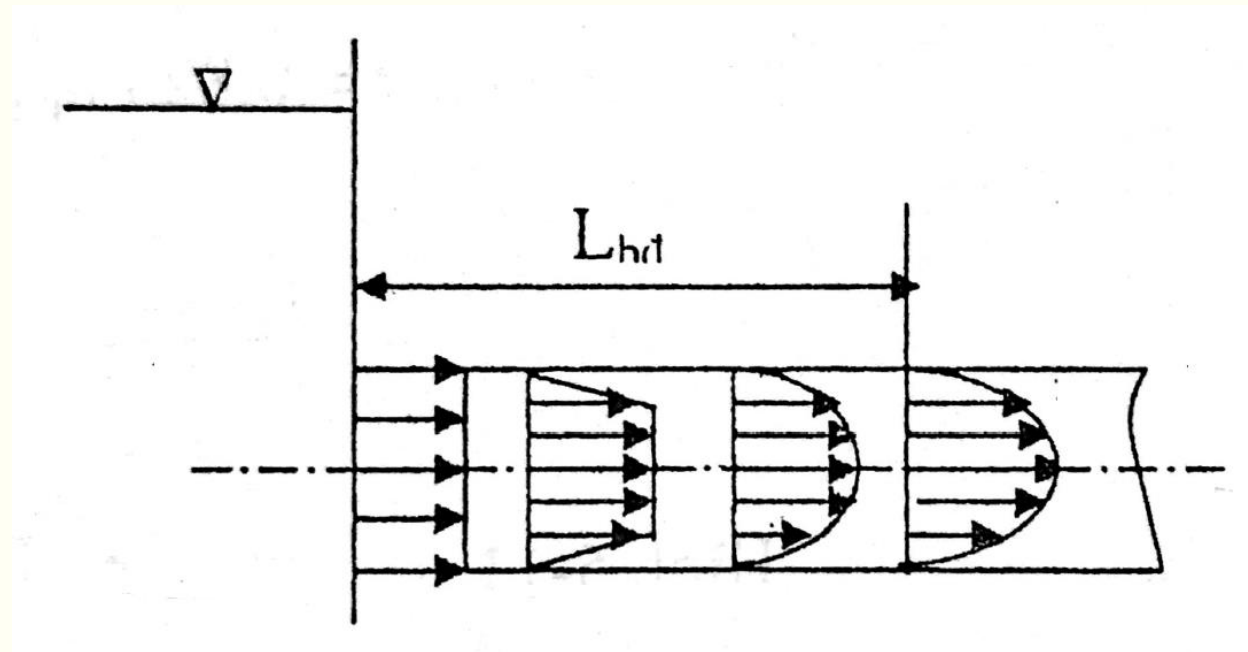
5.2.3 Đoạn ban đầu của dòng chảy tầng



Hình 5.9 Sự hình thành dòng chảy tầng

5.2 Dòng chảy tầng có áp trong ống tròn

5.2.3 Đoạn ban đầu của dòng chảy tầng



Hình 5.9 Sự hình thành dòng chảy tầng

5.3. Dòng chảy rối có áp trong ống tròn

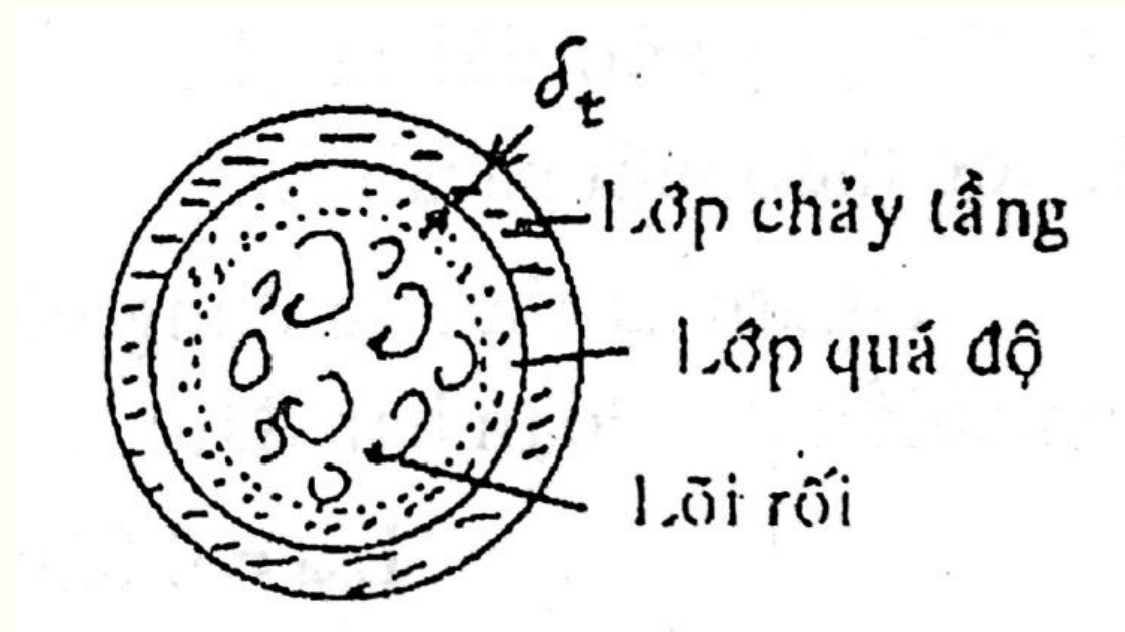
5.3.1 Cấu trúc dòng chảy rối

Dòng chảy ở trạng thái rối khi $Re > 2320$.

Đặc điểm đặc trưng của dòng rối:

Các phần tử chất lỏng chuyển động hỗn loạn.

- Tại mọi điểm trong không gian dòng rối, các yếu tố đặc trưng cho chuyển động của chất lỏng (vận tốc, áp suất, ...) thay đổi liên tục theo thời gian và không gian mà không theo một định luật nhất định nào.



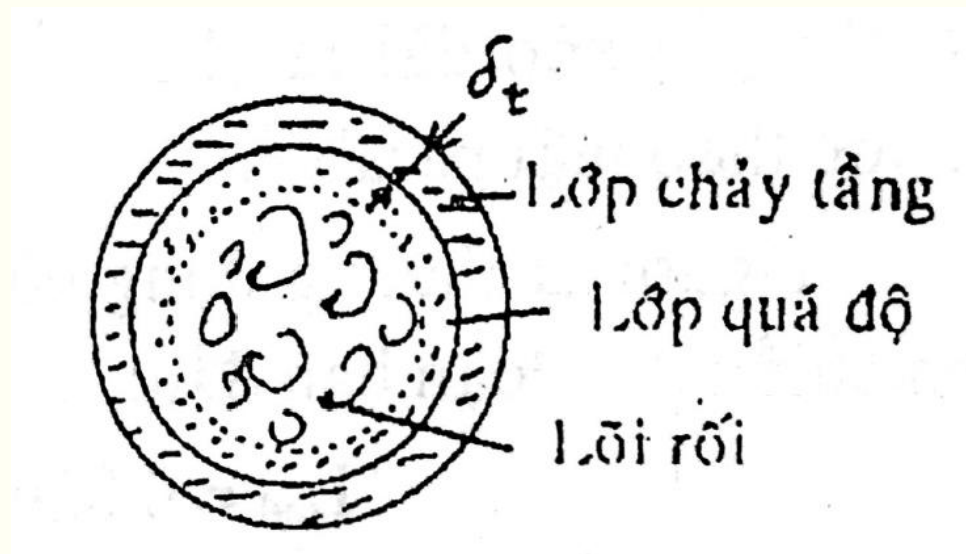
Hình 5.10 Cấu trúc dòng chảy rối

5.3. Dòng chảy rối có áp trong ống tròn

5.3.1 Cấu trúc dòng chảy rối

Từ hình biểu thị hiện tượng mạch động của vận tốc, ý nghĩa là xét trong một khoảng thời gian T đủ dài, dường như sự thay đổi vận tốc xảy ra xung quanh một giá trị trung bình u nào đó.

Hiện tượng mạch động vận tốc kéo theo mạch động áp suất.



5.3. Dòng chảy rối có áp trong ống tròn

5.3.1 Cấu trúc dòng chảy rối

Hiệu ứng mạch động của các yếu tố chuyển động có ảnh hưởng lớn đến độ bền và ổn định của các dãy cánh động turbine cũng như các máy thủy khí có cánh khác, đồng thời có ảnh hưởng lớn đến tổn thất năng lượng trong dòng chảy.

Vận tốc và áp suất tức thời của dòng rối.

$$u = \bar{u} + u'$$

$$p = \bar{p} + p'$$

\bar{u} , \bar{p} - các giá trị trung bình thời gian của vận tốc và áp suất.

$$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_t^{T+t} u dt ; \bar{p} = \frac{1}{T} \int_t^{T+t} p dt$$

u' , p' - các thành phần mạch động của u và p .

5.3. Dòng chảy rối có áp trong ống tròn

5.3.1 Cấu trúc dòng chảy rối

Giá trị trung bình thời gian của u' và p' bằng 0, tức là:

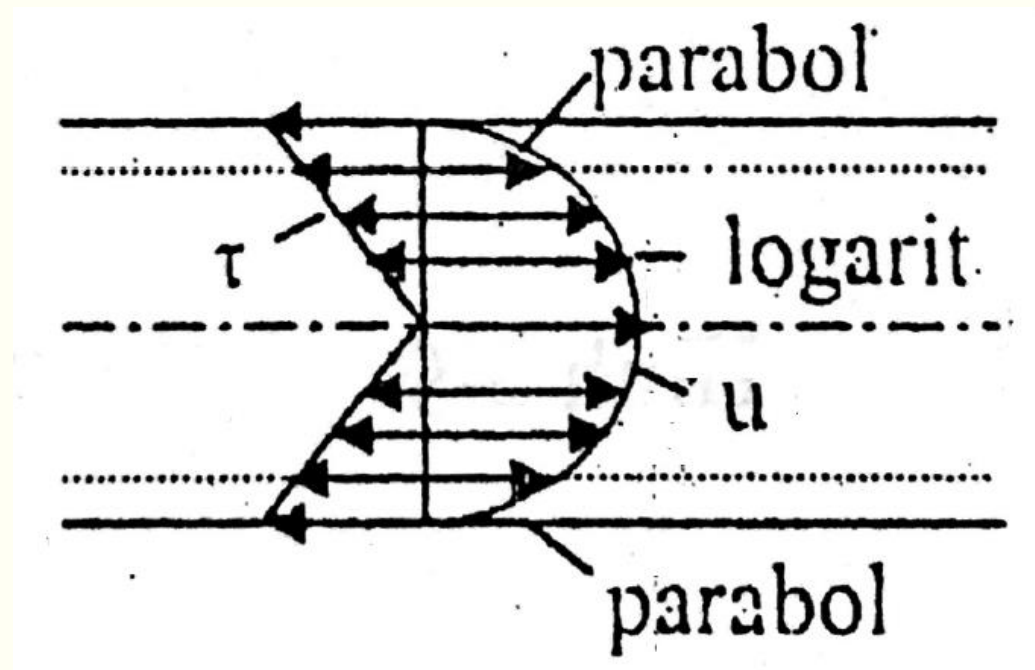
$$\overline{u'} = 0, \quad \overline{p'} = 0,$$

Sự tồn tại các thành phần mạch động vận tốc, dẫn tới việc xuất hiện những thành phần ứng suất phụ trong dòng rối.

Vì vậy, nếu tiến hành thực nghiệm dòng rối trên mẫu thực sẽ gặp rất nhiều khó khăn. Để tiện lợi hơn trong việc nghiên cứu, dòng rối thực tế được chuyển về bài toán nghiên cứu trên mẫu dòng chảy rối của Butximet – dòng chảy rối trung bình thời gian.

5.3. Dòng chảy rối có áp trong ống tròn

5.3.2 Qui luật phân bố ứng suất tiếp và vận tốc trên mặt cắt ướt



Hình 5.11 Qui luật phân bố ứng suất tiếp và vận tốc trên mặt cắt ướt

5.3. Dòng chảy rối có áp trong ống tròn

5.3.1 Qui luật phân bố ứng suất tiếp và vận tốc trên mặt cắt ướt

Cấu trúc dòng chảy rối gồm 3 khu vực:

- Lớp chảy tầng sát thành có chiều dày δ_t .

Trong miền này, do ảnh hưởng kìm hãm của thành ống, các phần tử chất lỏng sát thành bám chặt vào thành ống và các lớp mỏng khác trượt lên nó. Theo thực nghiệm δ_t có thể xác định gần đúng theo công thức. Đối với ống tròn:

$$\delta_t = \frac{30d}{\text{Re}\sqrt{\lambda}}$$

5.3. Dòng chảy rối có áp trong ống tròn

5.3.2 Qui luật phân bố ứng suất tiếp và vận tốc trên mặt cắt ướt

- Miền quá độ:

Là phần cơ bản của dòng chảy, trong đó các phần tử chất lỏng chuyển động hỗn loạn nhưng có xu hướng chung là chuyển động dọc theo trục ống. Sự phân bố vận tốc trung bình thời gian \bar{u} gần như đều nhau trên thiết diện ướt.

Nằm giữa lõi rối và lớp chảy tầng sát thành. Chiều dày của lớp quá độ δ_{qd} không ổn định, thay đổi liên tục phụ thuộc vào sự thay đổi của cường độ rối.

Ứng suất tiếp và sự phân bố vận tốc trên thiết diện ướt của dòng rối.

5.3. Dòng chảy rối có áp trong ống tròn

5.3.2 *Qui luật phân bố ứng suất tiếp và vận tốc trên mặt cắt ướt*

Prandtl cho rằng, trong dòng rối các phần tử chất lỏng chuyển động hỗn loạn nhưng đều có xu hướng chuyển động theo một hướng chung.

Do sự chuyển động hỗn loạn nên các phần tử chất lỏng ở các lớp trộn lẫn với nhau và được thực hiện nhờ các thành phần mạch động vận tốc.

Kết quả của sự trộn lẫn các phần tử chất lỏng giữa các lớp khác nhau gây nên hiệu ứng trao đổi động lượng và làm thúc đẩy hoặc kìm hãm các lớp chất lỏng chuyển động nhanh lên hay chậm lại.

Do đó tạo nên xu hướng bình quân hóa vận tốc trên thiết diện ướt của dòng chảy.

5.3. Dòng chảy rối có áp trong ống tròn

5.3.2 Qui luật phân bố ứng suất tiếp và vận tốc trên mặt cắt ướt

Như vậy, tại mặt tiếp xúc giữa hai lớp bất kỳ trong dòng rối, xuất hiện tác dụng kéo đi và hãm lại giống như ứng suất tiếp giữa hai lớp đó.

Trên cơ đó, Prandtl giả thuyết rằng: trong dòng rối, sự xáo trộn của các phần tử chất lỏng giữa các lớp được thực hiện nhờ các thành phần mạch động vận tốc đã tạo nên ứng suất tiếp rối phụ thêm giữa các lớp chất lỏng.

Do đó trong dòng rối, người ta đưa vào trong biểu thức Newton một hệ số bổ sung ε tương ứng.

$$\tau = (\mu + \varepsilon) \frac{du}{dr}$$

Tóm lại ứng suất tiếp phát sinh trong dòng rối cũng tỷ lệ bậc nhất với bán kính ống giống như trong dòng chảy tầng.

5.3. Dòng chảy rối có áp trong ống tròn

5.3.2 Qui luật phân bố ứng suất tiếp và vận tốc trên mặt cắt ướt

- Lõi rối:

Cho đến nay, sự phân bố vận tốc trong dòng chảy rối vẫn chưa có công thức dựa trên lý thuyết chặt chẽ. Qua thực nghiệm và giả thiết của Prandtl, người ta tìm được công thức tính vận tốc trung bình thời gian trong dòng rối:

$$\bar{u} = \bar{u}_{\max} - 5,75u_* \lg \frac{r_o}{r}$$

trong đó: $u_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} = \sqrt{gR_h J}$ - còn gọi là vận tốc ma sát hay vận tốc động lực.

* Vận tốc trung bình mặt cắt ướt:

$$v = 0,825u_{\max}$$

5.3. Dòng chảy rối có áp trong ống tròn

5.3.2 *Qui luật phân bố ứng suất tiếp và vận tốc trên mặt cắt ướt*

Nhận xét:

- Trong dòng rối qui luật phân bố vận tốc trên mặt cắt ướt theo qui luật logarit và so với quy luật phân bố vận tốc trong dòng tầng thì vận tốc trong dòng rối đầy hơn.
- Tại những miền gần thành ống gradient vận tốc của dòng chảy rối lớn hơn nhiều so với chảy tầng, vì vậy ứng suất tiếp τ ở miền này trong dòng rối lớn hơn nhiều so với dòng tầng.
- Quy luật chỉ dùng cho lõi rối và miền quá độ, còn trong miền chảy tầng sát thành vận tốc phân bố theo quy luật bậc nhất.

5.3. Dòng chảy rối có áp trong ống tròn

5.3.3 Hệ số ma sát λ

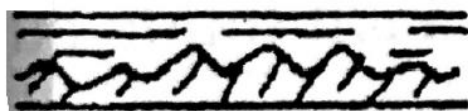
Hệ số ma sát λ là hàm số của Re và độ nhám tương đối Δ/r_o .

$$\lambda = f\left(Re, \frac{\Delta}{r_o}\right)$$

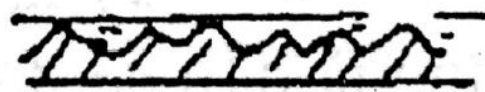
Nicurat đã làm thí nghiệm với nhiều đường ống có độ nhám tương đối Δ/r_o khác nhau (trị số biến đổi từ 1/15 đến 1/507)

Trong khi thí nghiệm, Nicurat đo các trị số của tổn thất năng lượng h_d để tìm λ , đồng thời tìm các số Re tương ứng.

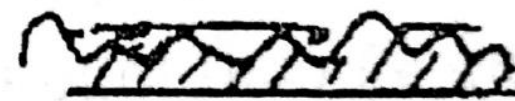
Đồ thị Nicurat có trục hoành biểu diễn $\lg Re$, trục tung biểu diễn $\lg 100\lambda$. Đồ thị có 5 khu vực:



$$\delta_1 > \Delta$$



$$\delta_1 \approx \Delta$$



$$\delta_1 < \Delta$$

5.3. Dòng chảy rối có áp trong ống tròn

5.3.3 Hệ số ma sát λ

Khu vực I: $\lg Re \leq 3,3$ ($Re \leq 2320$) là khu vực **chảy tầng**, λ chỉ phụ thuộc Re mà không phụ thuộc Δ/r_o .

$$\lambda = f_1(Re) = \frac{64}{Re}$$

Khu vực II: $3,3 < \lg Re \leq 3,5$ là khu vực **quá độ từ chảy tầng sang chảy rối**. Ta thấy với những ống có Δ/r_o khác nhau, các điểm tương ứng đều nằm trên một đường thẳng. λ chỉ phụ thuộc Re .

$$\lambda = f_2(Re)$$

5.3. Dòng chảy rối có áp trong ống tròn

5.3.3 Hệ số ma sát λ

Khu vực III: $3,5 < \lg Re \leq 5,2$ và ứng với những điểm nằm dưới đường thẳng: **khu vực chảy rối thành trơn thủy lực**. Ta thấy với những điểm có Δ/r_o khác nhau, các điểm tương ứng cũng nằm trên một đường thẳng. λ cũng chỉ phụ thuộc Re (bởi vì các lớp chảy tầng bao phủ mô nhám Δ trên thành ống, Δ/r_o càng lớn khu vực càng hẹp).

$$\lambda = f_3(Re)$$

5.3. Dòng chảy rối có áp trong ống tròn

5.3.3 Hệ số ma sát λ

Khu vực IV: $3,5 < \lg Re \leq 5,2$ và ứng với những điểm nằm trên đường thẳng: khu vực quá độ từ chảy rối thành trơn sang thành nhám hay còn gọi là **khu vực chảy rối thành không hoàn toàn nhám**. Những điểm có Δ/r_o khác nhau điểm thí nghiệm nằm trên những đường cong khác nhau.

$$\lambda = f_4\left(Re, \frac{\Delta}{r_o}\right)$$

5.3. Dòng chảy rối có áp trong ống tròn

5.3.3 Hệ số ma sát λ

Khu vực V: $\lg Re > 5,2$: **khu vực chảy rối thành hoàn toàn nhám.**
(còn được gọi là *khu vực bình phương sức cản*). Những điểm thí nghiệm có Δ/r_o khác nhau nằm trên những đường thẳng nằm ngang khác nhau. λ chỉ phụ thuộc vào Δ/r_o , mà không phụ thuộc vào Re .

$$\lambda = f_5\left(\frac{\Delta}{r_o}\right)$$

5.3. Dòng chảy rối có áp trong ống tròn

5.3.3 Hệ số ma sát λ

1. Khu vực chảy rối thành trơn thủy lực:

+ Công thức Brazduyt, khi $2320 < Re < 10^5$, $\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}$

+ Công thức Kônacôp, khi $2320 < Re < 3,26 \cdot 10^6$, $\lambda = \frac{1}{(1,8 \lg Re - 1,5)^2}$

2. Khu vực chảy rối thành không hoàn toàn nhám:

+ Công thức Anstun:

$$\lambda = 0,1 \left(1,46 \frac{\Delta}{d} + \frac{100}{Re} \right)^{0,25}$$

5.3. Dòng chảy rối có áp trong ống tròn

5.3.3 Hệ số ma sát λ

3. Khu vực chảy rối thành nhám:

+ Công thức Nicurat, khi $Re > 4.10^6$

$$\lambda = \frac{1}{d(2\lg \frac{r_0}{\Delta} + 1,74)^2}$$

+ Công thức dùng cho kim loại theo quy phạm Liên xô, do Frenken đề nghị:

$$\lambda = \frac{0,25}{(\lg \frac{3,7d}{\Delta})^2}$$

+ Công thức tính λ suy từ hệ số Chezy: Để tính vận tốc trong dòng chảy đều trạng thái rối, Chezy đưa ra công thức:

$$v = C\sqrt{RJ}$$

5.3. Dòng chảy rối có áp trong ống tròn

5.3.3 Hệ số ma sát λ

trong đó: C- hệ số Chezy;

R - bán kính thủy lực (m);

J- độ dốc thủy lực.

Trong công thức thay $J = \frac{h_d}{l}$, suy ra:

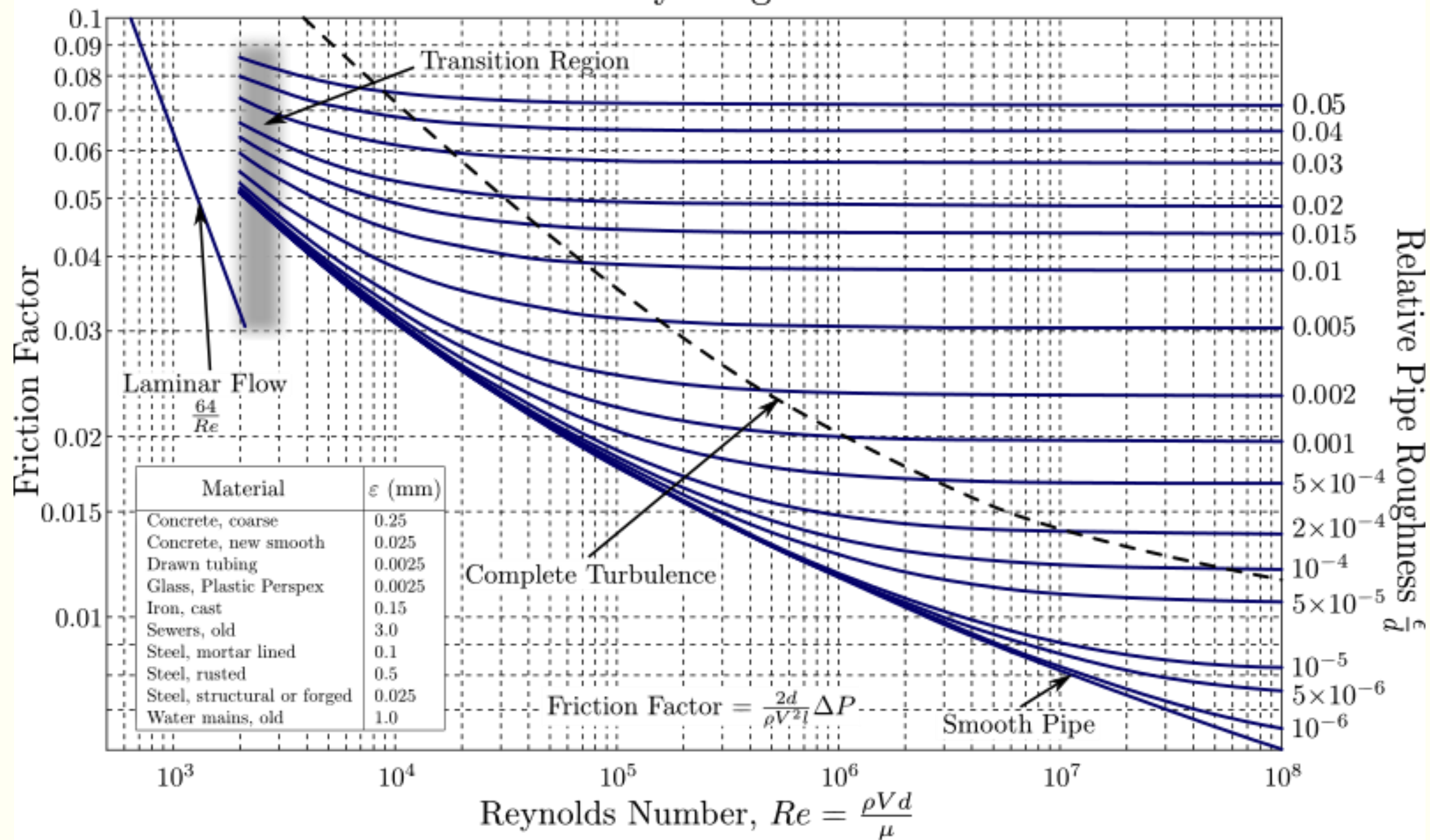
$$h_d = \frac{l \cdot v^2}{C^2 R}; \quad l - \text{chiều dài đường ống.}$$

So sánh công thức với công thức Darcy ta tính được:

$$\lambda = \frac{8g}{C^2}$$

Công thức Chezy thường dùng cho dòng chảy rối chảy không áp (cũng có thể dùng cho dòng có áp trong ống).

Moody Diagram





The End