

## BÁO CÁO HỌC THUẬT

### NGHIÊN CỨU ĐẶC ĐIỂM CHUYỂN ĐỘNG CỦA DÒNG HỖN HỢP HAI PHA RẮN - LỎNG QUA ĐOẠN ĐƯỜNG ỐNG NGHIÊNG

PHẠM ĐỨC THIÊN, Bộ môn Kỹ thuật Cơ khí, Trường Đại học Mỏ-Địa chất

#### 1. Đặt vấn đề

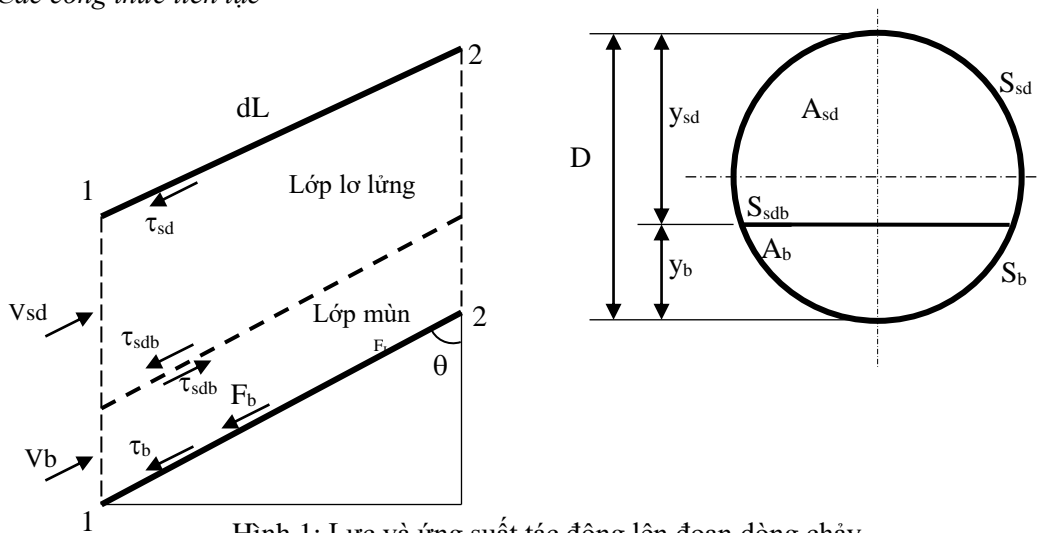
Vận tải dòng hai pha rắn lỏng, tùy theo độ nghiêng của đường ống sẽ hình thành mô hình 3 lớp thủy lực gồm lớp lơ lửng, lớp di chuyển và lớp tĩnh. Khi có sự hình thành lớp sẽ làm cho bài toán vận chuyển phức tạp và nếu lớp hạt hình thành đến một mức nào đó có thể gây tắc dòng vận chuyển. Vì vậy việc nghiên cứu đặc điểm dòng vận tải hai pha qua các đoạn ống nghiêng là điều rất cần thiết góp phần làm tăng hiệu quả của dòng vận tải.

#### 2. Đặc điểm dòng vận tải qua các đoạn đường ống nghiêng

Dòng vận tải hai pha về mặt tổng quan tồn tại mô hình 3 lớp thủy thực, tuy nhiên tùy theo độ nghiêng và vận tốc chất lỏng có thể tồn tại 1 lớp, hai lớp hoặc 3 lớp. Nếu ống nằm ngang sẽ tồn tại 3 lớp, nghiêng so với phương ngang từ 30 đến 60<sup>0</sup> tồn tại 2 lớp và đường ống đứng chỉ tồn tại 1 lớp hỗn hợp lơ lửng. Khi ống nghiêng đặc điểm vận tải có sự thay đổi lớn do có sự trượt của lớp pha rắn và có thể dẫn đến tắc đường ống. Trong quá trình phân tích, nghiên cứu nhận thấy dòng vận tải qua đoạn ống nghiêng có hai trường hợp hướng dòng chảy đi lên và hướng dòng chảy đi xuống, trường hợp đi xuống có sự trượt lớp rắn nhưng kết hợp với xoáy rối, lực trọng trường dẫn đến khó có thể xảy ra lắng đọng tắc đường ống. Vì vậy, ở đây chỉ nghiên cứu dòng chảy qua đoạn ống nghiêng dòng chảy đi lên và nghiên cứu cho dòng chảy ổn định tồn tại mô hình 2 lớp thủy lực (một lớp phân tán lơ lửng và một lớp hạt).

#### 3. Thiết lập các mô hình toán học mô tả đặc điểm dòng chảy

##### 3.1. Các công thức liên tục



Hình 1: Lực và ứng suất tác động lên đoạn dòng chảy

Công thức liên tục cho pha lỏng:

$$A_{sd} C_{sd} V_{sd} + A_b C_b V_b = ACV \quad (1)$$

Công thức liên tục cho hạt rắn:

$$A_{sd} (1 - C_{sd}) V_{sd} + A_b (1 - C_b) V_b = A (1 - C) V \quad (2)$$

trong đó:

$A_{sd}$  ,  $A_b$  - là tiết diện lớp lơ lửng và lớp hạt ;  
 $C_{sd}$  ,  $C_b$  - là nồng độ thể tích hạt lơ lửng và lớp hạt;  
 $V_{sd}$  ,  $V_b$  - là vận tốc lớp lơ lửng và lớp hạt;  
 $C$  - là nồng độ thể tích hạt (nồng độ chung);  
 $A$  - là tiết diện ống;  
 $V$  - là vận tốc danh nghĩa dòng hỗn hợp trong ống,  $V = Q/A$ ;  
 $Q$  - Lưu lượng chất lỏng.

Dưới điều kiện dòng chảy ổn định công thức 1, 2 thể hiện bảo toàn khối lượng của hạt và pha chất lỏng. Sự liên hệ giữa các tiết diện:

$$A_{sd} + A_b = A \quad (3)$$

Nếu lớp hạt là tĩnh hoặc chuyển động tương đối chậm,  $V_b$  có thể được bỏ qua bởi giả thiết rằng lớp hình thành là tĩnh. Công thức 1,2 có thể được đơn giản thành:

$$A_{sd} C_{sd} V_{sd} = ACV \quad (4)$$

$$A_{sd} (1 - C_{sd}) V_{sd} = A(1 - C)V \quad (5)$$

### 3.2. Các công thức cân bằng lực

Công thức mô tả tổng hợp lực tác động lên lớp lơ lửng là:

$$A_{sd} \left( \frac{dP}{dL} \right) = \tau_{sd} S_{sd} + \tau_{sdb} S_{sdb} + \frac{F_{sdG}}{dL}, \quad (6)$$

với:  $\tau_{sd}$ , là ứng suất trượt trên thành lớp lơ lửng,  $\tau_{sdb}$  là ứng suất trượt trên bề mặt giao diện lớp lơ lửng và lớp hạt;  $S_{sd}$ , là chu vi ướt lớp lơ lửng,  $S_{sdb}$  là chu vi ướt giao diện lớp lơ lửng và lớp hạt;  $\frac{dP}{dL}$  là gradient áp suất;  $F_{sdG}$  là trọng lực tác động lên hỗn hợp lớp chất lỏng phân tán lơ lửng, là thành phần chỉ chịu ảnh hưởng bởi độ nghiêng của ống và được xác định:

$$F_{sdG} = \rho_{sd} g A_{sd} \cos\theta dL, \quad (7)$$

với  $\rho_{sd}$  - Khối lượng riêng hiệu dụng của lớp phân tán lơ lửng, xác định bởi:

$$\rho_{sd} = \rho_s C_{sd} + \rho_L (1 - C_{sd}) \quad (8)$$

trong đó:  $\rho_s$ ,  $\rho_L$  - là khối lượng riêng hạt khoan và chất lỏng khoan.

Công thức tổng hợp lực tác động lên lớp hạt là:

$$A_b \left( \frac{dP}{dL} \right) = \tau_b S_b - \tau_{sdb} S_{sdb} + \left( \frac{F_b}{dL} \right) + \frac{F_{bG}}{dL}, \quad (9)$$

với  $F_{bG}$  là trọng lực tác động lên lớp hạt và được xác định:

$$F_{bG} = \rho_b g A_b \cos\theta dL \quad (10)$$

Công thức 6 có thể viết thành:

$$\left( \frac{dP}{dL} \right) = \frac{1}{A_{sd}} [\tau_{sd} S_{sd} + \tau_{sdb} S_{sdb} + \rho_{sd} g A_{sd} \cos\theta] \quad (11)$$

Công thức 8 được viết thành:

$$\frac{F_b}{dL} = -\tau_b S_b + \tau_{sdb} S_{sdb} - \rho_b g A_b \cos\theta + A_b \left( \frac{dP}{dL} \right) \quad (12)$$

Kết hợp công thức 9 và 11 và rút  $F_b$ , được:

$$F_b = \left[ -\tau_b S_b + \tau_{sdb} S_{sdb} - \rho_b g A_b \cos\theta + \frac{A_b}{A_{sd}} (\tau_{sd} S_{sd} + \tau_{sdb} S_{sdb} + \rho_{sd} g A_{sd} \cos\theta) \right] dL \quad (13)$$

Từ trên, cho thấy lực  $F_b$  là lực tác động lên lớp hạt tạo ra bởi trọng trường, ứng suất chất lỏng và gradien áp suất. Ứng suất trượt trong ống xác định bởi:

$$\tau_{sd} = \frac{1}{2} \rho_{sd} V_{sd}^2 f_{sd} \quad (14)$$

$$\tau_b = \frac{1}{2} \rho_b |V_b| V_b f_b \quad (15)$$

$$\tau_{sdb} = \frac{1}{2} \rho_{sd} (V_{sd} - V_b)^2 f_{sdb} \quad (16)$$

trong đó:  $f_{sd}$  và  $f_{sdb}$  là các hệ số ma sát, là hàm của số Reynol. Theo Doron và Martin  $f_{sd}$  và  $f_{sdb}$  được tính toán:

$$f_{sd} = 0,00454 + 0,645 \text{Re}^{-0,7} \quad (\text{Doron et al [4]}) \quad (17)$$

$$f_{sdb} = h \text{Re}^p n^q \left( \frac{d_p}{D_{sd}} \right)^t \quad (\text{Martin et al [8]}) \quad (18)$$

trong đó:  $h = 0,966368$ ;  $p = -1,07116$ ;  $q = 2,34539$ ,  $t = -2,34539$ ,  $D_{sd}$  là đường kính thủy lực lớp lơ lửng,  $D_{sd} = 4A_{sd}/(S_{sd} + S_{sdb})$ . Số Reynol của lớp lơ lửng được sử dụng để tính cả hai  $f_{sd}$  và  $f_{sdb}$ ,  $\text{Re}_{sd} = \rho_{sd} V_{sd} D_{sd} / \mu_{eL}$ .

Hệ số ma sát khô  $f_b$  được tìm ra từ quan hệ thực nghiệm, được tính toán dựa trên đường kính thủy lực, cho bởi [5]:

$$f_b = 0,046 \left( \frac{\rho_b V_b D_b}{\mu_{eL}} \right)^{-0,2}, \quad (19)$$

trong đó:  $\rho_b$  - Khối lượng riêng hiệu dụng của lớp hạt, xác định bởi:

$$\rho_b = \rho_s C_b + \rho_L (1 - C_b) \quad (20)$$

$\mu_{eL}$ - độ nhớt động lực học chất lỏng có thể lấy là độ nhớt của nước, trong trường hợp chất lỏng là phi Newton thì phải tính toán theo độ nhớt tương đương Newton [1].

$D_b$ -đường kính thủy lực lớp hạt, được xác định bởi:

$$D_b = \frac{4A_b}{S_b + S_{sdb}} \quad (21)$$

Gộp công thức 1 và 2 sau đó rút ra vận tốc trung bình của lớp phân tán lơ lửng, được:

$$V_{sd} = \left( \frac{A}{A_{sd}} \right) V - \left( \frac{A_b}{A_{sb}} \right) V_b \quad (22)$$

Khi lớp hạt là tĩnh hoặc trượt tương đối chậm so với lớp lơ lửng thì vận tốc của lớp hạt có thể là không đáng kể, điều đó nói lên  $V_b \approx 0$ . Sau đó công thức 1 và 2 được đơn giản thành:

$$A_{sd} C_{sd} V_{sd} = A C V \quad (23)$$

Công thức 22 cũng được đơn giản thành:

$$V_{sd} = \left( \frac{A}{A_{sd}} \right) V \quad (24)$$

Từ công thức 23 và 24, cho thấy rằng:

$$C_{sd} = C \quad (25)$$

Công thức 25 thỏa mãn dưới điều kiện dòng chảy ổn định. Công thức 23 có thể biến đổi thành:

$$A_{sd} = \left( \frac{V}{V_{sd}} \right) A \quad (26)$$

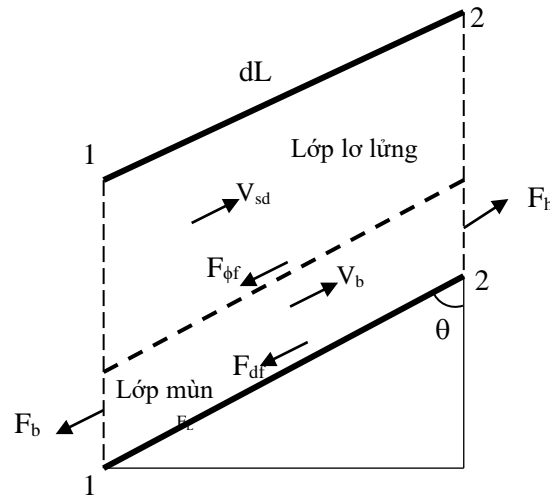
Công thức 26 là một hàm số của  $y_{sd}$  chiều cao lớp lơ lửng hoặc  $y_b$  chiều cao lớp hạt và vận tốc  $V$ . Chiều cao của lớp hạt  $y_b$  trực tiếp ảnh hưởng bởi vận tốc cục bộ của lớp lơ lửng và nồng độ thể tích hạt của nó. Một sự thay đổi trong các thông số đó làm thay đổi cân bằng lực và mômen. Vận tốc cản sự lắng của hạt ( $V_h$ ) và hệ số khuếch tán cũng là hàm số của nồng độ thể tích hạt của lớp hạt phân tán lơ lửng ( $C_{sd}$ ). Vì vậy, chiều cao lớp hạt tĩnh có thể thu được bởi tính toán lặp lại của toàn bộ các công thức liên quan. Chiều cao lớp hạt thu được ( $y_b$ ), vận tốc trung bình của lớp hạt phân tán lơ lửng ( $V_{sd}$ ) có thể nhận được từ đặc điểm hình học mặt cắt ngang của ống.

#### 4. Hiện tượng hạt trượt xuống và Vận tốc chống trượt nhỏ nhất

##### 4.1. Hiện tượng hạt trượt xuống

Khi dòng chất lỏng hỗn hợp chảy qua đoạn ống ccos độ nghiêng đi lên, bằng áp lực thủy động dòng vận tải tạo ra làm cả hạt trong lớp lơ lửng và hạt trong lớp hạt chuyển động lên tạo sự vận

tải của dòng chảy. Tuy nhiên, nếu áp lực thủy động không đạt đến một giá trị yêu cầu cần thiết, không thắng được lực tác động lên lớp làm lớp trượt xuống dẫn đến nguy cơ tắc ống. Để giải quyết vấn đề này ta sẽ phân tích lực tác động lên lớp hạt để tìm ra điều kiện đảm bảo lớp hạt không trượt xuống.



Hình 2

Lực thủy động  $F_h$  tác động làm cho lớp hạt xu hướng chuyển động theo hướng dòng vận tải được đưa vào tính toán thông qua lực ma sát thủy động  $F_{hf}$  tác động giữa lớp hạt và thành ống (hai lực này có giá trị bằng nhau nhưng ngược hướng). Lực ma sát này được hợp lực bởi 2 thành phần: Lực ma sát khô  $F_{df}$  mà được tạo ra bởi hạt trên bề mặt tiếp xúc giữa lớp hạt và thành ống và lực ma sát ranh giới  $F_{\phi f}$  ngăn cản lớp hạt chuyển động.

$$F_{hf} = F_{df} + f_{\phi f} \quad (27)$$

Lực ma sát khô được xác định bởi tích hệ số ma sát khô và tổng lực pháp tuyến đưa vào lớp hạt, được chỉ ra theo công thức[6]:

$$F_{df} = \eta(\rho_s - \rho_L)g \cos\theta C_b A_b dL \quad (28)$$

Lực ma sát ranh giới  $F_{\phi f}$  là do sự truyền ứng suất từ bề mặt phân cách qua lớp hạt. Bagnold [2] cho thấy rằng khi chất lỏng chảy trên sự tích tụ của hạt, có tồn tại một ứng suất pháp tuyến trên bề mặt phân cách, mà được kết hợp với ứng suất đưa vào bởi lớp chất lỏng [1]. Mối quan hệ đó là:

$$F_{\phi f} = \eta \frac{\tau_{sdb} S_{sdb}}{tg\phi} dL, \quad (29)$$

trong đó:  $\eta$  là hệ số trượt cho bởi hạt rắn;  $\phi$  là góc ma sát trong. Giá trị của  $tg\phi$  là  $0,35 \div 0,75$  phụ thuộc vào loại dòng chảy và tính chất hạt[3]. Giá trị của  $\eta = 0,15$  và  $tg\phi = 0,6$  được đề xuất bởi Martin [7].

Từ đó, ta có:

$$F_{hf} = \left[ \eta(\rho_s - \rho_L)g \cos\theta C_b A_b + \eta \frac{\tau_{sdb} S_{sdb}}{tg\phi} \right] dL \quad (30)$$

Khi lớp hạt trượt xuống trong đoạn ống nghiêng, sự chuyển động về phía thấp làm tăng sự lắng đọng trong ống. Thêm nữa, lớp hạt sẽ đột ngột trượt xuống khi chất lỏng vận tải bị ngừng tuần hoàn dẫn đến đóng kín ống và tắc ống. Như vậy, ta phải cần điều kiện chống lớp hạt trượt xuống.

#### 4.2. Vận tốc chống trượt nhỏ nhất ( $V_{as}$ )

Vận tốc chống trượt nhỏ nhất ( $V_{as}$ ) là vận tốc của chất lỏng lớp lơ lửng để giữ lớp hạt ở trạng thái tĩnh.  $V_{as}$  có thể đáp ứng như là một sự hướng dẫn để ngăn ngừa sự trượt xuống của lớp hạt. Khi  $F_b$  chính bằng độ lớn của lực ma sát thủy động  $F_{hf}$  thì lớp hạt là tĩnh. Vận tốc chất lỏng lơ lửng là vận tốc chống trượt nhỏ nhất ( $V_{as}$ ) khi lực là bằng nhau ( $F_b = F_{hf}$ ). Nếu  $F_{hf} > F_b$  lớp hạt sẽ trượt xuống. Lớp hạt trượt lên trong trường hợp ngược lại ( $F_b > F_{hf}$ ).

Khi lớp hạt là tĩnh thì  $F_{hf} = F_b$ , đồng thời lúc đó  $V_b = 0$ ,  $V_{sd} = V_{as}$ . Các ứng suất trở thành:

$$\tau_{sd} = \frac{1}{2} \rho_{sd} V_{as}^2 f_{sd} \quad (31)$$

$$\tau_b = 0 \quad (32)$$

$$\tau_{sdb} = \frac{1}{2} \rho_{sd} V_{as}^2 f_{sdb} \quad (33)$$

Từ đó, vận tốc chống trượt nhỏ nhất ( $V_{as}$ ) được xác định bởi cân bằng công thức 13 và 30 cùng kết hợp công thức 31,32,33, ta được:

$$V_{as} = \sqrt{\frac{A_b g \cos \theta [\rho_b + \eta(\rho_s - \rho_L) C_b]}{\frac{1}{2} \rho_{sd} f_{sdb} S_{sdb} \left(1 + \frac{A_b}{A_{sd}} - \frac{\eta}{tg \phi}\right)}} \quad (34)$$

Để đảm bảo lớp hạt không trượt xuống, vận tốc trung bình của lớp lơ lửng ( $V_{msd}$ ) phải thỏa mãn:  $V_{msd} \geq V_{as}$ .

## 5. Kết luận

Từ đặc điểm nghiên cứu trên cho thấy khi vận chuyển dòng hai pha gặp đoạn đường ống nghiêng có thể xảy ra hiện tượng trượt xuống của lớp hạt, dẫn đến nguy cơ tắc ống phá vỡ bài toán vận tải. Bằng nghiên cứu đặc điểm chuyển động trong trường hợp này, đã đưa ra được điều kiện chống sự trượt xuống của lớp hạt đảm bảo an toàn vận tải dòng hai pha.

### Tài liệu tham khảo

- [1]. Phạm Đức Thiên (2011). Độ nhớt tương đương Newton và phân biệt chế độ chảy của chất lỏng phi Newton trong cột cần và khoảng không vành xuyên giếng khoan. Tạp chí Khoa học kỹ thuật Mỏ- Địa chất, số 33 tháng 01- 2011. Đại học Mỏ- Địa chất, Hà Nội
- [2]. Bagnold, R.A.: "Experiments on a Gravity-Free Dispersion of Large Solid Spheres in a Newtonian Fluid Under Shear," Proc. R. Soc. Vol. A225. 1954. pp.49-63.
- [3]. Chabra, R.P.: "Motion of Spheres in Power Law Fluids of Intermediate Reynolds Numbers: A Unified Approach," Chem. Eng. Process, Vol. 28, 1990, p. 89-94.
- [4]. Doron, P. and Barnea, D.: "A Three-Layer Model for Solid-Liquid Flow in Horizontal Pipes," International Journal of Multiphase Flow, Vol. 19, No. 6, 1993, p.1029-1043.
- [5]. Doron, P., Granica, D., and Barnea, D.: "Slurry Flow in Horizontal Pipes- Experimental and Modeling," International Journal of Multiphase Flow, Vol. 13, No. 4, 1987, p.535-547.
- [6]. Hopkin, E.A.: "Factors Affecting Cuttings Removal During Rotary Drilling," JPT, June 1967, p. 807-814.
- [7]. Martins, A.L., Santana, C.C.: "Evaluation of Cutting Transport in Horizontal and Near Horizontal Wells-A Dimensionless Approach," SPE Paper 23643 presented At the 2<sup>nd</sup> Latin American Petroleum Engineering Conference, Caracas, Venezuela, March 8-11, 1992.
- [8]. Martin, A.L., Sa, C.H.M., Lourenco, A.M.F. and Fieire, L.G.M.: "Experimental Determination of Interfacial Friction Factor in Horizontal Drilling With a Bed of Cuttings," SPE Paper 36075 presented at the 4<sup>th</sup> Latin American and Caribbean Petroleum Engineering and Conference, Port of Spain, Trinidad, April 23-26, 1996.