

Bài 13: XÁC ĐỊNH HỆ SỐ NHỚT CỦA CHẤT LỎNG THEO PHƯƠNG PHÁP STOKES (STOKES)

1. Mục đích yêu cầu

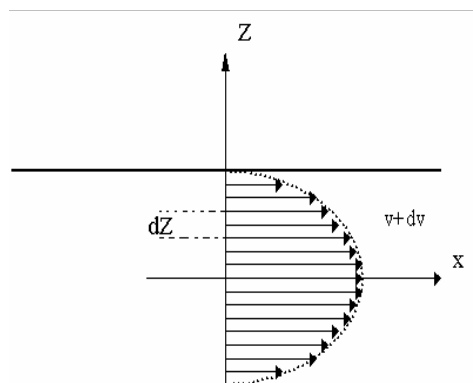
1.1. Mục đích: Mục đích của bài thí nghiệm này là trang bị cho sinh viên những kiến thức và kỹ năng thực nghiệm cần thiết để xác định hệ số nhớt của chất lỏng theo phương pháp Stokes.

1.2. Yêu cầu

1. Hiểu được cơ sở lý thuyết của thí nghiệm.
2. Hiểu được cấu tạo và hoạt động của thiết bị thí nghiệm dùng để xác định hệ số nhớt của chất lỏng theo phương pháp Stokes.
3. Biết cách tiến hành thí nghiệm nhằm xác định hệ số nhớt của chất lỏng theo phương pháp Stokes.
4. Viết được báo cáo thí nghiệm, tính được các sai số theo yêu cầu.

2. Cơ sở lý thuyết

Xét chuyển động của một chất lỏng trong một ống hình trụ theo phương song song với trục Ox của ống. Nếu vận tốc chuyển động của chất lỏng không quá lớn, ta có thể xem như dòng chất lỏng được phân chia thành nhiều lớp mỏng chuyển động với vận tốc \vec{v} có độ lớn thay đổi như biểu diễn trên hình 1. Nguyên nhân gây ra hiện tượng này là do ở mặt tiếp xúc giữa các lớp chất lỏng xuất hiện các *lực nội ma sát* có tác dụng cản trở chuyển động tương đối của chúng.



Hình 1

Nguyên nhân của lực nội ma sát trong chất lỏng là do đâu? Cấu tạo phân tử của các chất lỏng vừa có những nét giống với chất rắn, vừa có những nét giống với chất khí: mật độ phân tử trong chất lỏng rất lớn, gần giống như trong chất rắn, nhưng trong chất lỏng mỗi phân tử lại không có một vị trí cố định như trong chất rắn mà nó có thể di chuyển tương đối dễ dàng, gần giống như trong chất khí. Do đó, trạng thái lỏng có những

tính chất rất phức tạp. Cho đến nay người ta vẫn chưa xây dựng được một lý thuyết hoàn chỉnh về các chất lỏng. Trong số các lý thuyết về chất lỏng, lý thuyết do nhà vật lý Nga Ia. I. Frenkel đề xướng cho phép giải thích được nhiều tính chất của chất lỏng. Theo lý thuyết này, phân tử chất lỏng "lang thang" trong toàn thể tích của chất lỏng giống như một người du mục. Thỉnh thoảng nó dừng lại và dao động xung quanh một vị trí cân bằng nào đó (tại vị trí cân bằng này thế năng của phân tử đạt cực tiểu địa phương). Sau một thời gian, do va chạm với các phân tử khác, phân tử có thể nhận được một động năng đủ lớn giúp nó rời bỏ vị trí cân bằng này, bỏ đi để rồi tìm đến một vị trí cân bằng mới. Nó dao động xung quanh vị trí ấy một thời gian rồi lại tiếp tục bỏ đi nơi khác... Mỗi phân tử chất lỏng tương tác khá mạnh với các phân tử láng giềng và lực tương tác là lực hút, nhưng lực tương tác này giảm khá nhanh theo khoảng cách. Dựa trên lý thuyết này, có thể nêu ra hai nguyên nhân chính dẫn đến lực nội ma sát của chất lỏng. **Một là, sự trao đổi động lượng của các phân tử giữa các lớp chất lỏng có vận tốc định hướng khác nhau.** Trong một dòng chất lỏng, các phân tử chất lỏng tham gia đồng thời hai chuyển động: chuyển động có hướng và chuyển động nhiệt hỗn loạn. Kết quả là luôn có sự trao đổi các phân tử giữa các lớp chất lỏng. Các phân tử của lớp nhanh khi chuyển sang lớp chậm sẽ tương tác với các phân tử của lớp chậm và truyền bớt động lượng cho các phân tử đó, làm tăng vận tốc định hướng của lớp chậm. Tương tự, các phân tử của lớp chậm khi chuyển sang lớp nhanh sẽ làm giảm vận tốc định hướng của lớp nhanh. **Hai là, sự tương tác giữa các phân tử chất lỏng ở lân cận biên phân cách giữa hai lớp chất lỏng.** Theo lý thuyết Frenkel, mỗi một phân tử chất lỏng chịu sức hút của các phân tử lân cận có bên trong phạm vi một mặt cầu bán kính r gọi là mặt cầu tương tác phân tử (còn r gọi là bán kính tương tác phân tử). Do tương tác đó, mỗi phân tử ở gần biên phân cách của lớp này sẽ bị hút bởi các phân tử có bên trong mặt cầu tương tác phân tử nhưng thuộc lớp kia, làm cản trở chuyển động tương đối giữa hai lớp, tức là dẫn đến ma sát giữa hai lớp.

Thực nghiệm chứng tỏ trị số của lực nội ma sát F_{ms} giữa hai lớp chất lỏng có vận tốc định hướng là v và $v + dv$, nằm cách nhau một khoảng dz dọc theo phương Oz, tỷ lệ với gradient vận tốc $\frac{dv}{dz}$ (tức độ biến thiên của trị số vận tốc trên mỗi đơn vị dài) theo phương Oz và tỷ lệ với độ lớn của diện tích mặt tiếp xúc ΔS giữa hai lớp chất lỏng chuyển động tương đối với nhau:

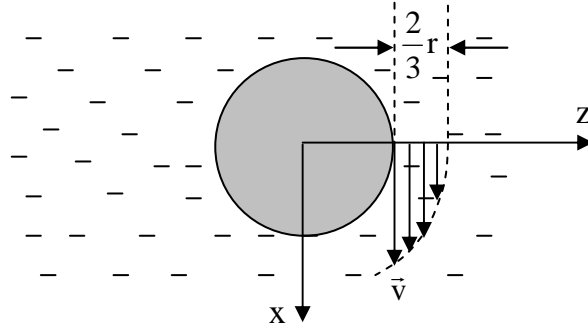
$$F_{ms} = \eta \frac{dv}{dz} \Delta S \quad (1)$$

Hệ số tỷ lệ η gọi là *hệ số nhớt (động lực)* của chất lỏng. Trị số của η phụ thuộc bản chất của chất lỏng và giảm khi nhiệt độ tăng. Đơn vị đo của η là kg/ms

Giả sử nếu một viên bi nhỏ bán kính r rơi thẳng đứng với vận tốc v trong khối chất lỏng, thì lớp chất lỏng bám dính vào mặt ngoài viên bi cũng chuyển động với cùng vận tốc v . Do tác dụng của lực nội ma sát, lớp chất lỏng này sẽ kéo các lớp khác nằm gần nó chuyển động theo. Thực nghiệm chứng tỏ trên khoảng cách $\frac{2r}{3}$ tính từ mặt

ngoài viên bi ra xa nó, vận tốc của các lớp chất lỏng có trị số giảm dần từ v đến 0 (hình 2). Khi đó gradient vận tốc theo phương Oz bằng:

$$\frac{dv}{dz} = \frac{v-0}{\frac{2r}{3}} = \frac{3v}{2r} \quad (2)$$



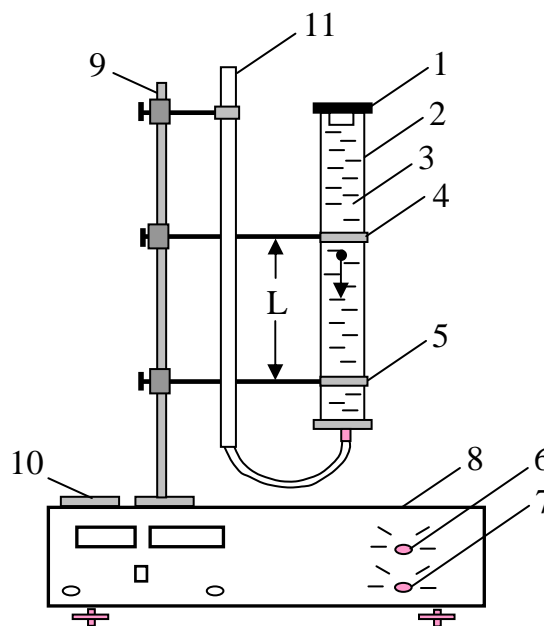
Hình 2

Theo công thức (1), lực nội ma sát giữa lớp chất lỏng bám dính vào mặt ngoài của viên bi ($\Delta S = 4\pi r^2$) và lớp chất lỏng tiếp xúc với nó có trị số bằng:

$$F_{ms} = \eta \frac{dv}{dz} \Delta S = \eta \frac{3v}{2r} 4\pi r^2$$

hay $F_{ms} = 6\pi\eta rv \quad (3)$

Công thức này gọi là *công thức Stốc*, nó cho biết lực ma sát nhớt tăng tỷ lệ với vận tốc v và chỉ đúng đối với những vận tốc v không lớn (cỡ vài m/s) của viên bi chuyển động trong chất lỏng rộng vô hạn.



Hình 3: Sơ đồ bộ thí nghiệm xác định hệ số nhớt của chất lỏng

Có thể xác định hệ số nhớt η của chất lỏng theo phương pháp Stốc (Stokes) nhờ bộ thiết bị vật lý kiểu MN - 971A (hình 3) gồm: một ống thuỷ tinh 2 đựng chất lỏng 3 được giữ thẳng đứng trên giá đỡ 9, hai đầu cảm biến từ 4 và 5 được nối với một bộ đo thời gian hiện số bố trí trên mặt phía trước của hộp chân đế 8. Khi thả rơi viên bi có khối lượng m qua phễu định tâm 1 vào trong chất lỏng có hệ số nhớt η cần đo, viên bi sẽ chịu tác dụng của ba lực:

- Trọng lực \vec{P} hướng thẳng đứng từ trên xuống và có trị số bằng:

$$P = mg = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_1 g \quad (4)$$

với r là bán kính và ρ_1 khối lượng riêng của viên bi, g là gia tốc trọng trường.

- Lực đẩy Acsimét \vec{F}_A hướng thẳng đứng từ dưới lên và có trị số bằng trọng lượng của khối chất lỏng bị viên bi chiếm chỗ:

$$F_A = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho g \quad (5)$$

với ρ là khối lượng riêng của chất lỏng.

- Lực nội ma sát \vec{F}_C hướng thẳng đứng từ dưới lên và có trị số bằng:

$$F_C = 6\pi\eta r v \quad (6)$$

với v là vận tốc của viên bi và η là hệ số nhớt của chất lỏng.

Dưới tác dụng của các lực trên, viên bi chuyển động với gia tốc $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$ tuân theo phương trình cơ bản của động lực học:

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{P} + \vec{F}_A + \vec{F}_C \quad (7)$$

Chiếu phương trình (7) xuống hướng chuyển động của viên bi, ta tìm được:

$$m \frac{dv}{dt} = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_1 g - \frac{4}{3} \pi r^3 \rho g - 6\pi\eta r v$$

Nghiệm của phương trình này có dạng:

$$v = \frac{2(\rho_1 - \rho)r^2 g}{9\eta} (1 - e^{\frac{-3\pi\eta r t}{2m}}) \quad (8)$$

trong đó e là cơ số của lôganêpe, t là thời gian chuyển động của viên bi. Dễ dàng nhận thấy sau khoảng thời gian t không lớn, đại lượng $e^{\frac{-3\pi\eta r t}{2m}}$ giảm nhanh tới 0 và vận tốc v của viên bi sẽ đạt trị số không đổi bằng:

$$v_0 = \frac{2(\rho_1 - \rho)r^2 g}{9\eta} \quad (9)$$

Trong giai đoạn đầu của chuyển động, gia tốc \vec{a} làm cho vận tốc viên bi tăng dần, mặt khác khi vận tốc tăng thì lực nội ma sát cũng tăng theo. Khi vận tốc đạt đến giá trị v_0 nào đó thì lực đẩy Acsimet và lực nội ma sát sẽ triệt tiêu hoàn toàn trọng lực, viên bi sẽ chuyển động thẳng đều. Có thể xác định trị số của v_0 bằng cách đo khoảng

thời gian chuyển động τ của viên bi rơi thẳng đều giữa hai vạch chuẩn 4 và 5 cách nhau một khoảng L :

$$v_0 = \frac{L}{t}$$

Thay v_0 vào (9) với d là đường kính của viên bi, ta tìm được:

$$\eta = \frac{1}{18} \frac{(\rho_1 - \rho)d^2 g \tau}{L} \quad (10)$$

Thực tế, chất lỏng không rộng vô hạn mà chứa trong một ống trụ có đường kính D hữu hạn. Khi đó hệ số nhớt η của chất lỏng phải tính theo công thức:

$$\eta = \frac{1}{18} \frac{(\rho_1 - \rho)d^2 g \tau}{L(1 + 2,4 \frac{d}{D})} \quad (11)$$

Trong thí nghiệm này, nếu biết trước các đại lượng ρ_1 , ρ , g , L , D , ta có thể xác định được hệ số nhớt η của chất lỏng (dầu nhờn) bằng cách đo đường kính d của viên bi và khoảng thời gian chuyển động rơi thẳng đều τ của nó trên khoảng cách L giữa hai vạch chuẩn chọn trước.

3. Dụng cụ

Bộ thí nghiệm xác định hệ số nhớt của chất lỏng (hình 4) gồm:

1/ Thiết bị thí nghiệm vật lý MN - 971A gồm:

- Ống thủy tinh cao 95cm, chia độ 2mm/vạch.
- Chất lỏng (dầu nhờn) cần đo hệ số nhớt.
- Các viên bi (bằng sắt hoặc vật liệu từ mềm).
- Phễu định hướng dùng để thả các viên bi.
- Nam châm nhỏ dùng để lấy các viên bi ra khỏi chất lỏng.
- Hộp chân đế và giá đỡ.
- Thiết bị hiện số đo thời gian rơi của viên bi.
- Cảm biến.

2/ Thước panme 0 - 25mm, độ chính xác 0,01mm.



Hình 4: Bộ thí nghiệm xác định hệ số nhớt của chất lỏng

4. Trình tự thí nghiệm

4.1. Đo đường kính d của viên bi bằng panme (xem bài 1)

Dùng panme, thực hiện 10 lần phép đo đường kính d của viên bi tại các vị trí khác nhau của viên bi. Đọc và ghi giá trị của d trong mỗi lần đo vào bảng số liệu.

4.2. Đo khoảng thời gian chuyển động τ của viên bi rơi trong chất lỏng

a/ Vận các vít ở mặt dưới của hộp chân đế 8 (hình 3) để điều chỉnh sao cho giá đỡ 9 và ống trụ thủy tinh 2 đựng chất lỏng 3 hướng thẳng đứng. Giữ cố định vị trí của cảm biến 4 (đã được điều chỉnh nằm cách miệng của ống trụ thủy tinh một khoảng lớn hơn 20cm và cách cảm biến 5 một khoảng không đổi L (30 - 40cm)).

Cắm phích lấy điện của bộ thiết bị vật lý MN - 971A vào nguồn điện $\sim 220V$. Bấm khoá K trên mặt trước của hộp chân đế 8: đèn LED phát sáng và các chữ số hiển thị trong các cửa sổ “TIME” và “N” trên mặt máy.

b/ Điều chỉnh độ nhạy của cảm biến từ 4 và 5 của bộ đo thời gian hiện số theo trình tự sau:

- Vận cả hai núm xoay 6 và 7 *ngược chiều kim đồng hồ* về vị trí tận cùng bên trái. Ấn nút “reset” để các chữ số hiển thị đều trở về 0.

- Điều chỉnh độ nhạy của cảm biến 5 (nằm ở phần dưới của thân ống trụ thủy tinh 2 đựng chất lỏng) bằng cách vận từ từ núm xoay 7 *theo chiều quay của kim đồng hồ* cho tới khi các chữ số hiển thị trên cửa sổ “TIME” bắt đầu nhảy số thì dừng và vận

ngược lại một chút (khoảng 1/4 đến 1/2 độ chia của nó). Sau đó, ấn nút “RESET” để các chữ số hiện thị đều trở về 0. Kiểm tra lại vị trí này bằng cách chạm nhẹ ngón tay vào đầu cọc nối dây của cảm biến 5: nếu các chữ số hiện thị trên cửa sổ “TIME” lại nhảy số, thì cảm biến 5 đã được điều chỉnh đủ nhạy để hoạt động.

- Thực hiện động tác tương tự đối với núm xoay 6 để điều chỉnh độ nhạy của cảm biến 4. Bấm nút “RESET” để các chữ số hiện thị đều trở về 0.

Chú ý: Khi một trong hai cảm biến điều chỉnh không đúng (ở vị trí vượt quá ngưỡng độ nhạy) thì không thể điều chỉnh tiếp cảm biến thứ hai. Trong trường hợp này, ta phải thực hiện lại động tác (2 - b) một cách cẩn thận hơn.

c/ Thả nhẹ viên bi sắt qua chiếc phễu định tâm 1 để nó rơi thẳng đứng dọc theo trục của ống trụ thủy tinh 2 đựng chất lỏng có hệ số nhớt η cần đo.

Khi viên bi chuyển động đi qua tiết diện ngang của cảm biến 4 hoặc 5 (có dạng là một vòng dây dẫn nối với mạch cộng hưởng điện), nó sẽ làm xuất hiện một xung điện có tác dụng đóng hoặc ngắt bộ đo thời gian hiện số. Vì vậy bộ đo thời gian hiện số sẽ tự động đo khoảng thời gian rơi τ của viên bi trên khoảng cách L giữa hai cảm biến 4 và 5. Thực hiện 10 lần động tác này với cùng một viên bi đã chọn. Đọc và ghi giá trị của τ hiện thị trong cửa sổ “TIME” ứng với mỗi lần đo được vào bảng số liệu.

Bên trái của cửa sổ “TIME” còn có cửa sổ hiện thị “N” để theo dõi số lần hoạt động của các cảm biến 4 và 5: mỗi lần viên bi đi qua một cảm biến, chữ số hiện thị trong cửa sổ “N” lại tăng thêm một đơn vị.

Chú ý: Sau mỗi lần đo, ta có thể lấy viên bi sắt ra khỏi ống nối 11 bằng cách dùng một nam châm nhỏ (đặt trên mặt hộp chân đế 8 hoặc trong hộp 10). áp sát nam châm vào ống nối 11 tại vị trí có viên bi và dịch chuyển nam châm nhẹ nhàng để làm cho viên bi trượt dọc theo thân ống nối 11 lên tới miệng ống này. Chờ cho dầu nhờn bám dính trên viên bi nhỏ giọt hết, ta lấy nó ra và đặt lên một tờ giấy thấm.

d/ Đo và ghi các số liệu sau đây vào các bảng số liệu:

- Độ chính xác của thước panme.
- Khối lượng riêng ρ của chất lỏng (dầu nhờn): $(0,85 \pm 0,01) \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$.
- Khối lượng riêng ρ_1 của viên bi: $(7,8 \pm 0,1) \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$.
- Khoảng cách L giữa hai đầu cảm biến 4 và 5.
- Đường kính D của ống trụ thủy tinh.
- Nhiệt độ t ($^{\circ}\text{C}$) trong phòng thí nghiệm.
- Độ chính xác của bộ đo thời gian hiện số.

5. Báo cáo thí nghiệm

XÁC ĐỊNH HỆ SỐ NHỚT CỦA CHẤT LỎNG THEO PHƯƠNG PHÁP STÖCK

Lớp

Xác nhận của giáo viên

KípNhóm

Họ tên

Mục đích thí nghiệm

.....
.....

Kết quả thí nghiệm

Bảng số liệu

$\rho = \dots \pm \dots \text{ (kg/m}^3\text{)}$		$\rho_1 = \dots \pm \dots \text{ (kg/m}^3\text{)}$		
$L = \dots \pm \dots \text{ (mm)}$		$D = \dots \pm \dots \text{ (mm)}$		
$T = \dots \pm \dots \text{ (}^\circ\text{C)}$		$\Delta t_{dc} = \dots \text{ (s)}$		
Lần đo	d_i	Δd_i	τ_i	$\Delta \tau_i$
$i = 1$				
...				
10				
TB	$\bar{d} = \dots$	$\overline{\Delta d} = \dots$	$\bar{\tau} = \dots$	$\overline{\Delta \tau} = \dots$

Chú ý: Sai số tuyệt đối của các đại lượng đo trực tiếp d , τ được xác định bằng tổng sai số do dụng cụ và sai số trung bình của các lần đo:

$$\Delta d = (\Delta d)_{dc} + \Delta \bar{d} = \dots \text{ (mm)}$$

$$\Delta \tau = (\Delta \tau)_{dc} + \Delta \bar{\tau} = \dots \text{ (s)}$$

Xác định hệ số nhớt của chất lỏng (dầu nhờn):

a/ Sai số tương đối của hệ số nhớt η :

$$\delta = \frac{\Delta \bar{\eta}}{\bar{\eta}} = \frac{\Delta \rho_1 + \Delta \rho}{\rho_1 - \rho} + \frac{\Delta g}{g} + \frac{\Delta \tau}{\bar{\tau}} + \frac{\Delta L}{L} + \frac{1}{D + 2,4\bar{d}} \left[(2D + 2,4\bar{d}) \frac{\Delta d}{\bar{d}} + 2,4\bar{d} \frac{\Delta D}{D} \right] = \dots$$

b/ Giá trị trung bình của hệ số nhớt η :

$$\bar{\eta} = \frac{1}{18} \frac{(\rho_1 - \rho) \bar{d}^2 g \bar{\tau}}{L(1 + 2,4 \frac{\bar{d}}{D})} = \dots = \dots \text{ (kg/ms)}$$

c/ Sai số tuyệt đối của hệ số nhớt η :

$$\Delta \eta = \delta \bar{\eta} = \dots = \dots \text{ (kg/ms)}$$

d/ Kết quả của phép đo hệ số nhớt η :

$$\eta = \bar{\eta} \pm \Delta \eta = \dots \pm \dots \text{ (kg/ms)}$$

6. Câu hỏi kiểm tra

- 1/ Sự xuất hiện của lực nội ma sát. Giải thích bản chất và viết biểu thức của lực này. Đơn vị đo hệ số nhớt của chất lỏng.
- 2/ Trình bày cách xác định hệ số nhớt của chất lỏng theo phương pháp Stốc. Giải thích nguyên nhân gây ra lực cản đối với chuyển động của viên bi rơi trong chất lỏng.
- 3/ Vận tốc của viên bi rơi trong chất lỏng thay đổi phụ thuộc thời gian như thế nào? Tại sao khi đo thời gian rơi của viên bi lại bắt đầu từ một vị trí nào đó cách miệng ống trụ thủy tinh một khoảng đủ lớn (chẳng hạn lớn hơn 20cm)?
- 4/ Trong điều kiện nào, ta có thể tính hệ số nhớt η của chất lỏng theo công thức (10) hoặc (11)?
- 5/ Áp dụng phép tính vi phân đối với công thức (11), chứng minh sai số tương đối của hệ số nhớt η có dạng:

$$\frac{\Delta\eta}{\eta} = \frac{\Delta\rho_1 + \Delta\rho}{\rho_1 - \rho} + \frac{\Delta g}{g} + \frac{\Delta\tau}{\tau} + \frac{\Delta L}{L} + \frac{1}{D + 2,4d} \left[(2D + 2,4d) \frac{\Delta d}{d} + 2,4d \frac{\Delta D}{D} \right]$$