4.2.1 Визначення динамічної в’язкості рідини

Детальний опис роботи подано в [2, (робота 6); 8, (робота МТ-6.2)].

Існує вільно доступна комп’ютерна версія цієї роботи [25].

Метою роботи є ознайомлення з вимірюванням динамічної в’язкості рідини η за методом Стокса та експериментальне визначення цим методом в’язкості касторової олії.

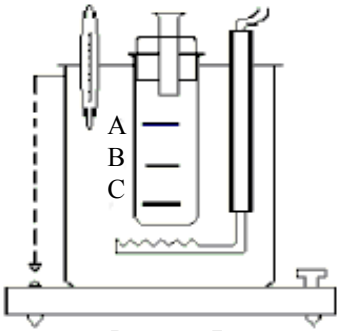

Рисунок 7

Експериментальна установка (віскозиметр Стокса, рис. 7) є скляним циліндром з трьома кільцевими позначками А, В і С на його зовнішній поверхні. Зазвичай позначки А, В і С мають вигляд трьох кілець, виготовлених з пружної нитки та щільно надягнутих на циліндр. Циліндр установлюють вертикально використовуючи регулювальні гвинти на його основі та висок. В циліндр наливають касторову олію у такий спосіб, щоб її рівень був на 5 - 10 см вищим від верхньої позначки А. Для забезпечення руху кульки по осі циліндра, застосовують напрямну лійку.

Температуру рідини вимірюють термометром, густину досліджуваної рідини – ареометром, діаметри металевих кульок – мікрометром. Відстані між позначками та висоту стовпа рідини в циліндрі вимірюють з допомогою міліметрової шкали, яка розташована на підставці за скляним циліндром віскозиметра (на рис. 7 не зображена) або лінійки.

Мети роботи досягають через вимірювання часу t, за який металева кулька, що рухається рівномірно вздовж осі віскозиметра, проходить відстань S між позначками А та С. З урахуванням поправок, що враховують обмеженість об’єму віскозиметра, *робоча формула* роботи має такий вигляд:

$$\eta = \frac{2}{9} g r^2 \cdot \frac{(\rho - \delta)t}{S} \cdot \frac{1}{1 + 2,4\frac{r}{R}} \cdot \frac{1}{1 + 3,3\frac{r}{h}}, \qquad (2.1.1)$$

де g = 9,81 м/с^2 – прискорення вільного падіння, r - радіус металевої кульки, δ - густина касторової олії, ρ - густина металу кульки, R - радіус циліндра віскозиметра, h - висота стовпа рідини у віскозиметрі.

У реальному навчальному досліді відношення $r/R < 10^{-1}$ і $r/h < 10^{-2}$. Беручи до уваги значення похибок, що їх вносять вимірювання величин S і t, урахування поправок, спричинених обмеженістю об’єму віскозиметра, тобто обчислення двох останніх множників у формулі (2.1.1), є неістотним, отже й надлишковим. Таким чином *розрахункова формула* роботи стає такою:

$$\eta = \frac{2}{9} g r^2 \cdot \frac{(\rho - \delta)t}{S} \quad . \qquad (2.1.2)$$

Виконання лабораторної роботи складається з двох етапів.

А. На першому (підготовчому) етапі вимірюють величини, які в подальшому експерименті залишаються незмінними.

А1. З таблиць (див., наприклад, [23]) відшукати густину металевих кульок. Як правило ці кульки є сталевими, отже $\rho = 7{,}87 \cdot 10^3$ кг/м^3.

А2. З допомогою ареометра [24] визначити й записати густину касторової олії δ.

А3. Використовуючи шкалу розташовану позаду циліндра ареометра, знайти відстані між позначками: S_1 - між А та В, S_2 - між В та С.

З наявного набору кульок відібрати на око щонайменше 10 наближено однакових кульок найменшого розміру.

Упевнитись, що рух цих кульок між позначками А та С можна вважати усталеним і рівномірним. Для цього виміряти час руху 3 ÷ 5 кульок на відрізках АВ - t_1 і ВС - t_2, та вирахувати середні швидкості кожної з кульок на цих відстанях: $\overline{u}_1 = S_1 / \overline{t}_1$, $\overline{u}_2 = S_2 / \overline{t}_2$. Якщо u_1 та u_2 виявляться рівними *в межах похибки їхнього вимірювання*, то кульками цього розміру можна користуватися при подальшому виконанні роботи, обравши за величину S у формулі (2.1.2) довжину відрізку АС. Рівність

$$\overline{u}_1 = \overline{u}_2 \qquad (2.1.3)$$

слід уважати доконаною, якщо довірчі інтервали для величин u_1 і u_2 збігаються щонайменше на 78%. Методика перевірки виконання рівності (2.1.3) є такою самою, як описано у п. 2.4 Вступу; при цьому $\delta \leq$ 22%. Якщо рівність (2.1.3) не виконується, треба зсунути всі три нитки-позначки на 2 - 3 см *донизу* й повторити всі викладені у цьому пункті операції спочатку.

Використовуючи шкалу розташовану позаду циліндра віскозиметра, виміряти й записати відстань між позначками А та С, яку позначитимемо S.

В. На другому (основному) етапі насамперед слід накреслити рекомендовану таблицю вимірювань, голівка якої має такий вигляд.

n	r, мм	t,с	η_i, Па·с ---------- - y_i, кг/(м^2·с)	$\Delta\eta_i$, Па·с ---------- - x_i, м$^{-1}$
1	2	3	4	5

Вимірювання складають такі кроки.

В1. З допомогою мікрометра визначити діаметр однієї сталевої кульки з-поміж кульок, відібраних на етапі А. Радіус r кульки занести в стовпчик 2 таблиці вимірювань.

В2. Укинути кульку у лійку та виміряти час її руху між позначками А та С (відстань S). Результат занести в стовпчик 3 таблиці вимірювань.

B3. Повторити кроки B1 й B2 щонайменше п'ять разів ($n = 5$) .

Алгоритм опрацювання результатів експерименту

Проведені вимірювання є сукупними, тому що динамічну в'язкість рідини η визначає співвідношення (2.1.2) через сукупно виміряні значення кількох величин – радіуса кульки r та часу її руху t вздовж осі віскозиметра при проходженні шляху S між позначками A та C.

Як правило, кульки калібровані, тобто мають дуже близькі радіуси, отже й виміряні проміжки часу мають бути практично однаковими. Зазначені особливості досліду не дають змоги використати графічний метод опрацювання результатів для відшукання похибки Δη динамічної в'язкості.

З цієї скрути існує два виходи.

A. За першим, доволі наближеним, способом опрацювання результатів вимірювань вважатимемо, що умови різних спостережень у нашому досліді є невідтворюваними. Деякою мірою це саме так, оскільки напрям руху кожної кульки після її вильоту з лійки відрізняється від такого для інших кульок. Тоді похибку визначення в'язкості рідини Δη можна шукати так само, як при прямих вимірюваннях, а шуканий алгоритм опрацювання результатів досліду є таким.

A1 Для кожної пари значень радіусу кульки r і часу її руху t між позначками A і C за формулою (2.1.2) вирахувати в'язкість рідини η_i «у i-ому спостереженні» та занести ці значення у стовпчик 4 таблиці вимірювань.

A2 Знайти середнє за всіма спостереженнями значення в'язкості рідини <η> :

$$\langle \eta \rangle = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\eta_i \ . \qquad (2.1.3)$$

A3 Обчислити та занести у стовпчик 5 таблиці вимірювань абсолютні похибки в'язкості рідини у i-ому спостереженні:

$$\Delta\eta_i = \left|\langle \eta \rangle - \eta_i\right| . \qquad (2.1.4)$$

A4 Вирахувати похибку визначення в'язкості рідини Δη за алгоритмом підрозділу 2.1:

$$\Delta\eta = t_\alpha(n)\sqrt{\frac{1}{n(n-1)}\sum_{i=1}^{n}\left(\Delta\eta_i\right)^2} \qquad (2.1.5)$$

де $t_\alpha(n)$ коефіцієнт Стьюдента. З огляду на неповну коректність цього алгоритму рекомендовано обирати надійність досліду $\alpha = 0{,}5$.

A5 Результат подати у вигляді

$$\eta = \langle \eta \rangle \pm \Delta\eta \ . \qquad (2.1.6)$$

B. Другий, істотно коректніший спосіб опрацювання результатів досліду полягає у прямому застосуванні методу найменших квадратів (п. 2.3.2 Вступу).

В1 Насамперед слід провести лінеаризацію розрахункової формули (2.1.2), що можна зробити, наприклад, у такий спосіб. Уведемо нові змінні:

$$y = 2g(\rho - \delta)t, \qquad x = \frac{9S}{r^2}. \qquad (2.1.7)$$

Тоді розрахункова формули (2.1.2) набуває вигляду:

$$y = \eta x\,, \qquad (2.1.8)$$

і є цілком придатною для застосування алгоритму, викладеного у п. 2.3.2 Вступу.

В2 Для кожної пари значень радіусу кульки r і часу її руху t між позначками А і С (i-те спостереження) обчислити за формулами (2.1.7) значення величин y_i та x_i й занести їх у стовпчики 4 та 5 таблиці вимірювань відповідно.

В3 Обчислити середні за всіма спостереженнями значення $\overline{y}$ та $\overline{x}$:

$$\overline{y} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i\,, \qquad \overline{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i\,. \qquad (2.1.9)$$

В4 Використовуючи співвідношення, наведені у п. 2.3.2 Вступу, відшукати середнє значення в'язкості рідини $\overline{\eta}$ та похибку її вимірювання $\Delta\eta$:

$$\overline{\eta} = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - \overline{x}\right) y_i}{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - \overline{x}\right)^2}, \qquad \Delta\eta = S_y\sqrt{\frac{n}{D}}\,, \qquad (2.1.10)$$

де

$$S_y = \frac{1}{n-2}\sum_{i=1}^{n}\left(y_i - \eta x_i\right)^2, \qquad D = n\sum_{i=1}^{n} x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} x_i\right)^2. \qquad (2.1.11)$$

В5 Результат подати у вигляді:

$$\eta = \overline{\eta} \pm \Delta\eta\,. \qquad (2.1.12)$$

Порівняти середні значення в'язкості рідини та довірчі інтервали для неї, вирахувані за формулами (2.1.6) та (2.1.12), зробити висновок щодо коректності застосування наближеного алгоритму, викладеного у варіанті А цього опису.