

## Работа 2.18

### Исследование зависимости вязкости жидкости от температуры и определение энергии активации ее молекул

**Оборудование:** исследуемая жидкость, капиллярный вискозиметр, секундомер, термостат с контрольным и контактным термометрами, ареометр.

#### Введение

При относительном движении слоев жидкости между ними возникают силы трения. Эти силы приложены к слоям жидкости и действуют по касательной к ним. При этом два слоя жидкости, движущиеся относительно друг друга, взаимодействуют вдоль поверхности раздела с равными по модулю и противоположными по направлению силами внутреннего трения. Физические причины возникновения этих сил в жидкостях и газах разные. В жидкостях они обусловлены главным образом действием сил взаимодействия между молекулами, принадлежащими разным слоям этой жидкости, в газах — переносом импульса при столкновениях молекул разных слоев. Однако, как показывает опыт, как в жидкостях, так и в газах силы внутреннего трения подчиняются одному и тому же закону Ньютона:

$$dF = \eta dS \frac{dv}{dx},$$

где  $dS$  — площадь соприкасающихся слоев,  $dv/dx$  — *градиент скорости в направлении, перпендикулярном к движению слоев*,  $\eta$  — *коэффициент пропорциональности*, который зависит от рода жидкости или газа и характеризует их вязкие свойства.

Этот коэффициент и называют *коэффициентом внутреннего трения* или *вязкости жидкости* (*коэффициент динамической вязкости*). В соответствии с законом Ньютона коэффициент динамической вязкости численно равен тангенциальной силе внутреннего трения, которая возникает между двумя слоями единичной площади при единичном градиенте скорости между ними. В СИ единицей измерения коэффициента вязкости является 1 Па·с.

В соответствии с молекулярно-кинетической теорией, которую развил Френкель и другие исследователи, жидкость представляет собой дырочную структуру: частицы распределяются в жидкости в виде компактных объединений, в которых сохраняется ближний порядок. При температурах, близких к температуре затвердения (кристаллизации), тепловое движение в жидкости в основном сводится к колебаниям молекул около некоторых средних положений

равновесия, которые, в отличие от положений равновесия частиц в твердых телах, имеют временный характер. Молекула жидкости колеблется около положения равновесия в течение времени  $\tau$ , а затем положение ее равновесия изменяется скачком на расстояние, равное среднему расстоянию между соседними молекулами. Как показали расчеты, среднее время «оседлой жизни» молекулы  $\tau$  (или так называемое *время релаксации*) и коэффициент вязкости  $\eta$  равны соответственно:

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{W}{kT}\right) \quad (1)$$

и

$$\eta = A \exp\left(\frac{W}{kT}\right), \quad (2)$$

где  $\tau_0$  — период колебаний молекул около положения равновесия,  $W$  — энергия активации,  $T$  — абсолютная температура,  $k$  — постоянная Больцмана и  $A$  — коэффициент, который зависит от температуры  $T$ .

При небольших интервалах температур множитель  $A$  можно считать постоянным.

Из формулы (2) с учетом  $A = \text{const}$  получаем:

$$\ln \eta = \ln A + \frac{W}{k} \cdot \frac{1}{T}. \quad (3)$$

Это уравнение представляет собой уравнение прямой линии

$$\ln \eta = f\left(\frac{1}{T}\right). \quad (4)$$

Экспериментальные исследования действительно приводят к такому результату, но только в небольшом температурном интервале, что и свидетельствует о приближенном характере формулы (2).

**Описание метода и установки.** Существует несколько методов определения коэффициента вязкости жидкости. Один из этих методов основан на использовании закона Пуазейля для ламинарного течения жидкости в трубках (капиллярах). Если вязкая жидкость течет по трубе и смачивает стенки, то слой ее около стенки практически остается неподвижным и тормозит движение прилегающих к нему слоев из-за внутреннего трения между ними.

Пуайзель установил связь между объемом жидкости  $V$ , протекающим через капилляр, радиусом  $r$  и длиной  $l$  за время  $t$  и коэффициентом вязкости  $\eta$  :

$$V = \frac{\pi r^4 \Delta p t}{8\eta l}, \quad (5)$$

где  $\Delta p$  — разность давлений на концах капилляра, через который протекает жидкость.

Используя формулу (5) и зная величины  $V$ ,  $r$ ,  $l$ ,  $\Delta p$ , можно определить коэффициент вязкости:

$$\eta = \frac{\pi r^4 \Delta p t}{8 V l}. \quad (6)$$

Закон Пуазейля положен в основу устройства специального прибора для определения вязкости — *капиллярного вискозиметра*.

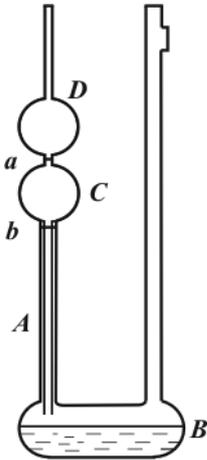


Рис. 2.25

Простейший капиллярный вискозиметр (*вискозиметр Оствальда*) представляет собой U-образную трубку, в узкое колено которой впаян капилляр  $A$  (рис. 2.25). Вискозиметр имеет расширения  $B$ ,  $C$  и  $D$ . В расширение  $B$  заливается исследуемая жидкость. Расширение  $C$  является рабочим. Расширение  $D$  играет вспомогательную роль. Измерение вязкости основано на измерении времени вытекания через капилляр определенного объема жидкости из рабочего объема  $C$ , ограниченного кольцевыми метками  $a$  и  $b$ . Поскольку формула (6) справедлива только для ламинарного течения, то при измерении вязкости жидкости нужно подбирать вискозиметр с таким капилляром, чтобы течение жидкости в нем было ламинарным.

Капиллярный вискозиметр более удобно использовать не для абсолютных измерений вязкости жидкости, а для относительных. С этой целью используют эталонную жидкость с известным коэффициентом вязкости. Поскольку рабочий объем вискозиметра  $V$ , радиус  $r$  и длина  $l$  капилляра постоянны, то для эталонной жидкости уравнение (6) будет иметь вид:

$$\eta_0 = \frac{\pi r^4 \Delta p_0 t_0}{8 \eta l}, \quad (7)$$

где  $t_0$  — время вытекания эталонной жидкости из капилляра,  $\Delta p_0$  — разность давлений на концах капилляра.

Из формул (6) и (7) следует, что

$$\frac{\eta}{\eta_0} = \frac{t \Delta p}{t_0 \Delta p_0}. \quad (8)$$

Если жидкость вытекает под действием силы тяжести, то

$$\frac{\Delta p}{\Delta p_0} = \frac{\rho}{\rho_0}, \quad (9)$$

где  $\rho_0$  и  $\rho$  — плотности эталонной и исследуемой жидкости.

С учетом соотношения (9) зависимость (8) примет вид:

$$\frac{\eta}{\eta_0} = \frac{t \rho}{t_0 \rho_0}.$$

Откуда

$$\eta = \frac{\eta_0}{\rho_0} \cdot \frac{t\rho}{t_0} \quad (10)$$

Таким образом, если известно время вытекания жидкостей  $t_0$  и  $t$ , их плотности  $\rho_0$  и  $\rho$ , и вязкость эталонной жидкости  $\eta_0$ , можно определить коэффициент вязкости исследуемой жидкости. Такой метод определения вязкости называется *относительным*.

Из формулы (10) вытекает, что

$$\frac{\eta}{\rho} = \frac{\eta_0}{\rho_0} \cdot \frac{t}{t_0} \quad (11)$$

Величина отношения

$$\frac{\eta}{\rho} = \nu \quad (12)$$

называется *кинематической вязкостью жидкости*. Поэтому формулу (11) можно записать в виде:

$$\nu = \nu_0 \frac{t}{t_0} \quad (13)$$

Таким образом, с помощью вискозиметра относительным методом удобно непосредственно измерить коэффициент кинематической вязкости. Поскольку  $\nu = \eta / \rho$ , то за единицу коэффициента кинематической вязкости в СИ принимается величина  $1 \text{ Па}\cdot\text{с}/(\text{кг}/\text{м}^3) = 1 \text{ м}^2/\text{с}$ . Из уравнения (13) следует, что

$$\nu = ct, \quad (14)$$

где  $c = \nu_0/t_0$  так называемая постоянная вискозиметра. Ее обычно определяют при изготовлении вискозиметра и указывают в его техническом паспорте.

Для определения энергии активации используем формулу (2):

$$\eta = A \exp\left(\frac{W}{kT}\right)$$

или

$$\nu = \frac{A}{\rho} \exp\left(\frac{W}{kT}\right).$$

Зная кинематические вязкости  $\nu_1$  и  $\nu_2$  при двух близких значениях температуры, можно записать:

$$\frac{\nu_1}{\nu_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1} \exp\left[\frac{W}{k} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)\right].$$

После логарифмирования этого выражения получим:

$$\ln \frac{\nu_1}{\nu_2} = \ln \frac{\rho_2}{\rho_1} + \frac{W}{k} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right).$$

Откуда

$$W = \frac{\left( \ln \frac{v_1}{v_2} - \ln \frac{\rho_2}{\rho_1} \right) k T_1 T_2}{T_2 - T_1}. \quad (15)$$

Плотность исследуемой жидкости можно определить при помощи ареометра. Для этого пробирку с жидкостью и ареометром помещают в тот же термостат, что и вискозиметр.

При исследовании зависимости вязкости жидкости от температуры вискозиметр с исследуемой жидкостью помещают в термостат, в котором есть возможность регулировать температуру (рис. 2.26).

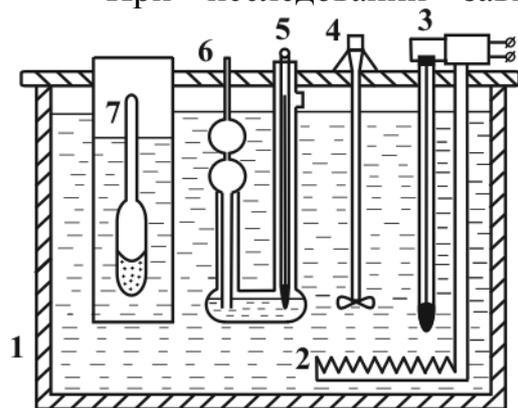


Рис. 2.26

Термостат состоит из стеклянного сосуда 1 с водой, для нагревания которой используется электрическая спираль 2. Необходимая температура в термостате устанавливается посредством контактного термометра 3. Вода в термостате перемешивается с помощью электрической мешалки 4. Температура контролируется контрольным термометром 5. Измеряя время вытекания исследуемой жидкости через капилляр вискозиметра 6 при разных температурах, по формуле (14) можно определить величину кинематической вязкости жидкости при разных температурах и величину динамической вязкости по формуле (12).

### Порядок выполнения работы

1. При помощи контрольного термометра определите первоначальную температуру  $T_1$  воды в термостате, ареометром 7 — плотность исследуемой жидкости в пробирке.

2. К узкому колену вискозиметра присоедините насос и с его помощью поднимите уровень жидкости выше отметки  $a$ , (рис. 2.26). Наблюдая за тем, чтобы в капилляре  $A$  и в рабочем объеме  $C$  вискозиметра не было пузырьков воздуха, заполните жидкостью весь рабочий объем  $C$ .

3. После отсоединения насоса уровень жидкости начнет опускаться. При помощи секундомера определите время  $t_1$  прохождения жидкости между отметками  $a$  и  $b$  при температуре  $T_1$ . Опыт повторите несколько раз и определите  $\bar{t}_1$ .

4. Вычислите кинематическую и динамическую вязкости по формулам  $v_1 = c t_1$  и  $\eta = v_1 \rho_1$ .

5. Установите указатель контактного термометра на 5 — 10 К выше первоначальной температуры и включите термостат в электрическую сеть.

6. После нагревания воды в термостате до заданной температуры  $T_2$  (определяется по контрольному термометру) выдержите исследуемую жидкость при достигнутой температуре на протяжении 5 — 10 мин.

7. Определите  $\bar{t}_2$ ,  $\rho_2$  и вычислите значения  $\nu_2$ ,  $\eta_2$  при температуре  $T_2$  так же, как и при первоначальной температуре  $T_1$  (пп. 2, 3).

8. Сделайте аналогичные измерения и вычисления  $\rho$ ,  $\nu$ ,  $\eta$  при разных значениях температуры  $T$  жидкости (не менее чем для 3 — 5 значений температуры), каждый раз увеличивая ее на 5 — 10 К.

9. Вычислите среднее значение энергии активации молекул исследуемой жидкости в указанном интервале температур по формуле (15) или

$$W = \frac{kT_1T_2 \ln \frac{\eta_1}{\eta_2}}{T_2 - T_1}$$

10. Определите точность результатов измерений  $\nu$ ,  $\eta$  и  $W$ .

11. Результаты измерений и вычислений запишите в таблицу:

№ п/п	$T$ , К	$t$ , с	$\bar{t}$ , с	$\nu$ , м <sup>2</sup> /с	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\eta$ , Па·с	$W$ , Дж	$\bar{W}$ , Дж
-------	---------	---------	---------------	---------------------------	----------------------------	---------------	----------	----------------

12. По полученным результатам постройте графики зависимостей  $\nu = f(T)$ ,  $\eta = f(T)$  и  $\ln \eta = f\left(\frac{1}{T}\right)$  и объясните их.



### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каковы основные свойства и особенности строения жидкостей?
2. Что называется вязкостью жидкости?
3. Объясните механизм возникновения вязкости жидкости.
4. От чего зависит вязкость жидкости?
5. Какие вязкости различают у жидкостей? Назовите единицы вязкости. Каков их физический смысл?
6. Что называется энергией активации молекул жидкости?
7. Расскажите об устройстве и принципе работы капиллярного вискозиметра.
8. Каково назначение термостата в данной работе?
9. Какую роль в установке играет контактный термометр?