

Работа 2.16

Исследование зависимости вязкости аморфного вещества от температуры и определение энергии активации его молекул

Оборудование: консистометр, секундомер, исследуемое аморфное тело, вода.

Введение

При перемещении двух соседних слоев жидкости друг относительно друга слой жидкости, который имеет большую скорость, ускоряет слой, движущийся с меньшей скоростью, который в свою очередь тормозит движение первого. Изменение скоростей слоев обусловлено действием сил внутреннего трения. *Внутренним трением (или вязкостью)* называется явление возникновения касательных сил, препятствующих перемещению частей одного и того же тела относительно друг друга. Физические причины возникновения этих сил в жидкостях и газах разные. Основной причиной возникновения сил внутреннего трения в жидкостях является взаимодействие молекул, находящихся в соседних слоях этой жидкости, в газах — перенос импульса в направлении, перпендикулярном движению слоев газа.

Однако как в газах, так и в жидкостях силы внутреннего трения подчиняются одному и тому же закону Ньютона:

$$dF = \eta dS \frac{dv}{dx}, \quad (1)$$

где η — коэффициент пропорциональности, который называется *коэффициентом внутреннего трения (или динамической вязкости)*, dv/dx — *градиент скорости* в направлении, перпендикулярном к направлению движения слоев, dS — площадь соприкасающихся слоев.

В соответствии с законом Ньютона коэффициент динамической вязкости численно равен силе внутреннего трения, действующей на единицу площади поверхности слоя при градиенте скорости, равном единице. В СИ динамическая вязкость измеряется в Па·с.

Согласно молекулярно-кинетической теории, тепловое движение молекул жидкости вдали от критической температуры, имеет следующий характер: каждая молекула на протяжении некоторого времени колеблется около определенного положения равновесия. Затем она скачком перемещается в некоторое новое положение равновесия, отстоящее от предшествующего на расстоянии, сравнимом с размерами молекул. Иначе говоря, молекула медленно перемещается внутри

жидкости, пребывая некоторое время в состоянии равновесия, в «оседлом» состоянии. Среднее время «оседлого» существования молекул называется *временем релаксации* τ . Для того чтобы перейти в новое «оседлое» состояние, молекуле надо нарушить связи с прежними молекулами и установить их с новыми. Для этого необходимо затратить энергию W , которая называется *энергией активации*. Средняя кинетическая энергия теплового движения молекул жидкости меньше энергии активации, но благодаря флуктуации она в некоторый момент времени оказывается достаточной для того, чтобы молекула смогла перескочить в новое положение равновесия. Время релаксации τ и коэффициент вязкости η связаны с энергией активации W соотношениями:

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{W}{kT}\right), \quad (2)$$

а

$$\eta = A \exp\left(\frac{W}{kT}\right), \quad (3)$$

где A — множитель, который зависит от природы жидкости и прямо пропорционален температуре.

Очевидно, что коэффициент вязкости в значительной степени зависит от температуры жидкости: при уменьшении температуры T множитель A уменьшается, а множитель $\exp\left(\frac{W}{kT}\right)$ увеличивается (в сравнении с первым он изменяется намного быстрее). В небольшом интервале температур первый множитель можно считать практически постоянным ($A = \text{const}$), это значит, изменение коэффициента η будет зависеть от множителя $\exp\left(\frac{W}{kT}\right)$. С уменьшением температуры вязкость сильно возрастает и в переохлажденных жидкостях достигает очень высокой величины. В этом состоянии молекулы теряют свою подвижность, а жидкость — обычное свойство текучести, она делается твердой. Такие сильно переохлажденные жидкости и называются аморфными телами.

Аморфные тела по своим физическим свойствам резко отличаются от кристаллических твердых тел. Частицы (молекулы или атомы) аморфных тел расположены хаотически, не образуя правильных кристаллических решеток. Исследования показали, что в аморфных телах размещение частиц не является полностью хаотическим. В них наблюдается определенная упорядоченность в расположении ближайших частиц, на больших расстояниях подобной упорядоченности нет. Это означает, что дальний порядок, типичный для монокристаллов, отсутствует. Аналогичное размещение частиц характерно для жидкостей. При повышении температуры аморфных тел они постепенно

размягчаются и становятся жидкостями, при этом у аморфных тел отсутствует определенная температура плавления, характерная для кристаллических тел.

Логарифмируя выражение (3), получим:

$$\ln \eta = \ln A + \frac{W}{k} \cdot \frac{1}{T}. \quad (4)$$

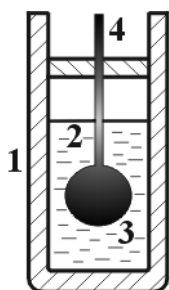


Рис. 2.22

При $A = \text{const}$ уравнение (4) представляет собой уравнение прямой $\ln \eta = f\left(\frac{1}{T}\right)$. Исследования показали, что эта формула справедлива для небольшого интервала температур, что свидетельствует о приближенном ее характере.

Описание метода и установки. Существует несколько способов определения вязкости жидкости. Один из этих способов позволяет находить коэффициент вязкости высоковязких жидкостей и аморфных тел. Сущность метода заключается в следующем. В цилиндрический сосуд 1 (рис. 2.22) заливается исследуемое вещество 2 в жидком или расплавленном состоянии.

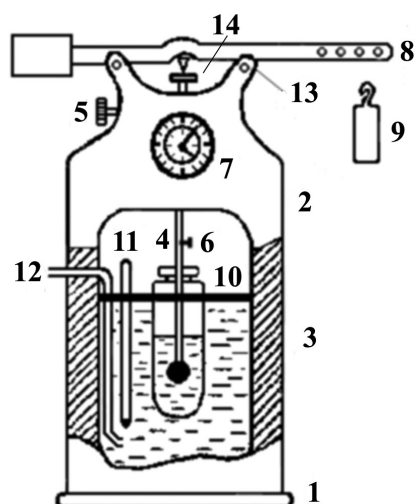


Рис. 2.23

Внутри исследуемого вещества вдоль оси цилиндра движется шар 3 под воздействием направляющего стержня 4. Жидкость (вещество) ламинарно протекает через концентрическую кольцевую щель между шаром и стенками цилиндра. Зная силу, действующую на шар при его движении (при равномерном движении шара она равна силе внутреннего трения), перемещение шара, время этого перемещения, можно вычислить коэффициент вязкости исследуемого вещества.

Коэффициент вязкости аморфного вещества в данной работе определяется с помощью *консистометра* (рис. 2.23). Он состоит из плиты — основания 1, на которой находятся: Х-образная стойка 2 и водяная баня 3. На Х-образной стойке находится направляющий стержень 4, который можно фиксировать арретировочным винтом 5. Направляющий стержень с помощью винта 6 соединяется со стержнем шара (он вставляется в специальное гнездо направляющего стержня) и при помощи постоянного магнита соединяется со счетчиком 7, при помощи которого можно определять перемещение шара в исследуемом веществе под действием внешних сил.

Сила, необходимая для перемещения стержня и шара, создается воздействием на направляющий стержень 4 рычага 8, за соответствующие

штифты которого с помощью крючков можно подвешивать грузы 9 массой 3 и 4 кг, и вычисляется по формуле:

$$F = mgn,$$

где m — масса подвешиваемого груза, n — множитель, указанный на штифте, к которому подвешивается груз.

Измерительный сосуд 10 с исследуемым веществом и шаром помещен в водяную баню 3, в которую налита вода, нагреваемая электрическим нагревателем. Нагреватель с помощью шнура соединен с автотрансформатором. Подавая на нагреватель напряжение, можно нагреть воду до требуемой температуры, контроль за изменением которой осуществляется термометром 11, снабженным смотровой линзой. Перемешивание воды в водяной бане осуществляется продуванием сквозь нее воздуха насосом, соединенным шлангом со штуцером 12.

В исходном положении направляющий стержень с шаром должен находиться в верхнем положении и закреплен винтом 5.

Порядок выполнения работы

1. Подвесьте к рычагу за один из штифтов с множителями 4, 5, 6 груз массой 3 кг.

2. Поддерживая рычаг рукой, достаньте фиксирующую шпонку 13, на которой удерживается рычаг, и плавно опустите его до соприкосновения с головкой 14 направляющего стержня.

3. Запишите начальное положение счетчика перемещения и показания термометра. Немного отверните винт 5 и через некоторое время включите секундомер, измерьте время перемещения направляющего стержня, а по счетчику — величину этого перемещения.

Примечание. Перемещение шара в аморфном теле — очень медленный процесс. Поэтому рекомендуется измерять время перемещения стержня 4 с шаром на одно деление.

4. Зафиксируйте стержень винтом 5 и, приподняв рычаг с грузом, вставьте шпонку 13 в гнездо, плавно опустите на нее рычаг с грузом.

5. Повторяя действия, описанные в пп. 1 — 4, снимите показания при разных массах груза и разных значениях множителя n .

6. Вычислите вязкость исследуемого вещества по формуле:

$$\eta = \frac{bFt}{s} = \frac{bmgt n}{s},$$

где η — динамическая вязкость, s — перемещение, t — время перемещения, F — сила, m — масса подвешиваемого груза, n — множитель, $b = 0,1 \text{ Па} \cdot \text{с} \cdot \text{м} / \text{Н} \cdot \text{с}$ — аппаратная константа.

7. Найдите среднее значение динамической вязкости при комнатной температуре.

8. Включите нагреватель консистометра в сеть через регулятор напряжения.

9. Контролируя температуру по термометру, перемешивайте нагреваемую воду медленным продуванием воздуха насосом.

10. Нагрев воду на $2 — 3^{\circ}$ выше комнатной температуры, отключите регулятор напряжения от сети.

11. Выдержите установку при этой температуре 10 — 15 мин, для того чтобы исследуемое вещество в измерительном сосуде приняло температуру воды в бане консистометра.

12. Повторите действия, описанные в пп. 1 — 3 и найдите вязкость исследуемого вещества при достигнутой температуре.

13. Включите нагреватель и, увеличивая температуру исследуемого вещества на $2 — 3^{\circ}$, найдите 5 — 7 значений динамической вязкости.

14. Результаты измерений и вычислений запишите в таблицу:

№ п/п	m , кг	n	t , с	s , м	η , Па·с	$\bar{\eta}$, Па·с
-------	----------	-----	---------	---------	---------------	---------------------

15. По полученным данным постройте графики зависимости $\eta = f(T)$ и $\ln \eta = f\left(\frac{1}{T}\right)$ и объясните их.

16. Вычислите среднее значение энергии активации молекул исследуемого вещества по формуле:

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

где k — постоянная Больцмана.

17. Произведите оценку погрешностей результатов измерений η и W .

18. После окончания измерений верните направляющий стержень в исходное положение (приподнимите его).

ЗАДАНИЕ ДЛЯ УИР

Сила сопротивления F , действующая со стороны вязкой жидкости на шар радиуса r , который движется равномерно, определяется по формуле Стокса:

$$F = 6\pi \eta r v,$$

где η — коэффициент вязкости жидкости, v — скорость движения шара.

Предложите схему опыта и выведите формулу, при помощи которой можно определить коэффициент вязкости жидкости. Найдите значение коэффициента вязкости исследуемой жидкости.



КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие вещества называются аморфными?
2. В чем причина вязкости аморфных тел? От чего она зависит?
3. Запишите формулу закона Ньютона для силы внутреннего трения жидкости и поясните ее.
4. Что называется энергией активации молекул?
5. Как зависит коэффициент вязкости аморфного тела от температуры?
6. С какой целью строится график зависимости $\ln \eta = f\left(\frac{1}{T}\right)$?
7. Для чего служит консистомер?
8. Расскажите о сути метода определения вязкости аморфного вещества в данной работе.
9. Какие методы определения коэффициента вязкости жидкости вы знаете?