

Измерение вязкости жидкости капиллярным методом

Коэффициент внутреннего трения жидкости может быть определен измерением скорости течения жидкости по капиллярной трубке.

Пусть имеется высокий сосуд, сделанный из широкой стеклянной трубки. Высота уровня жидкости в этом сосуде поддерживается постоянной. Через дно сосуда пропущена вертикально капиллярная трубка, нижний конец которой закрыт пробкой (рис. 1). Когда пробка снимается, жидкость начинает течь по трубке, и если трубки не очень широкая, то течение жидкости можно считать установившимся, исключая случаи очень близкого положения уровня жидкости к концу трубки. При таком течении каждая частица жидкости движется вдоль трубки параллельно оси с постоянной скоростью.

Выделим мысленно в этой трубке цилиндр жидкости, коаксиальный (имеющий общую ось) с трубкой. Пусть λ - высота этого цилиндра и r - радиус основания (рис. 2).

Если нет скольжения между стенками трубки и соприкасающейся с ними жидкостью, то скорость возрастает от нуля на внутренней поверхности трубки до максимальной вдоль оси.

Тангенциальное напряжение на единицу площади кривой поверхности будет равно

$$-\eta \frac{dv}{dr},$$

знак минус показывает, что сила действует против течения.

Результирующая сила, направленная против движения жидкости вследствие вязкости, равна

$$-2\pi r \lambda \eta \frac{dv}{dr}.$$

Так как жидкость движется параллельно оси трубки, давление должно быть постоянно по сечению. Если p_1 и p_2 - давления на верхнюю и нижнюю поверхности цилиндра, то полное давление будет равно соответственно $\pi r^2 p_1$ и $\pi r^2 p_2$. Вес цилиндра жидкости равен $\pi r^2 \lambda \rho g$, где ρ - плотность жидкости. Так как ускорения нет, то равнодействующая сил, действующих на цилиндр, равна нулю.

Следовательно

$$2\pi r \lambda \eta \frac{dv}{dr} + (p_1 - p_2) \pi r^2 + \pi r^2 \lambda \rho g = 0,$$

или

$$\frac{dv}{dr} = -\frac{r}{2\eta} \left(\frac{p_1 - p_2}{\lambda} + \rho g \right),$$

где $(p_1 - p_2) \lambda$ - изменение давления на единицу расстояния вниз по сосуду, постоянное вдоль сосуда (рис. 2). Давление, под которым жидкость вытекает из трубки, превышает атмосферное давление на $h \rho g$, таким образом,

$$\frac{p_1 - p_2}{\lambda} = \frac{h \rho g}{l},$$

где l - длина капиллярной трубки. Следовательно,

$$\frac{dv}{dr} = -\frac{r}{2\eta} \frac{h+l}{l} \rho g.$$

Интегрируя, находим

$$v = -\frac{r^2(h+l)}{4\eta l} \rho g + c.$$

Когда $v = 0$, $r = a$, тогда

$$c = \frac{a^2}{4\eta} \frac{h+l}{l} \rho g$$

и, следовательно,

$$v = -\frac{(a^2 - r^2)}{4\eta} \frac{h+l}{l} \rho g.$$

Объем жидкости, проходящей некоторое сечение трубки в кольцеобразном пространстве между цилиндрическими поверхностями радиуса r и $r + dr$ за время t , равен

$$2\pi r dr vt,$$

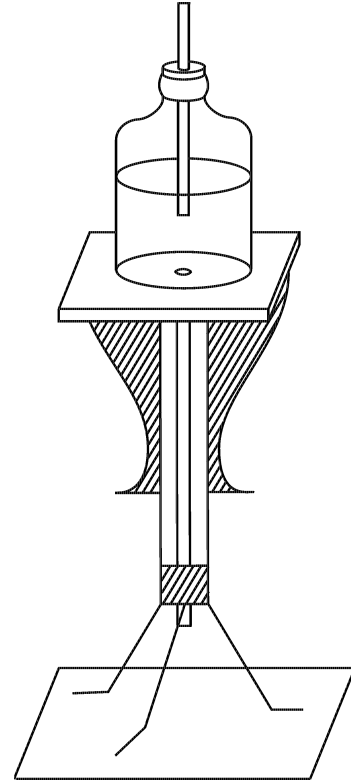


Рис. 1.

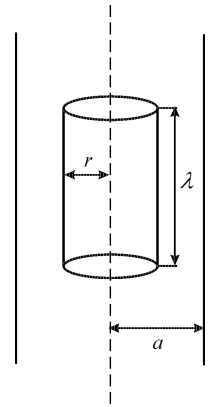


Рис. 2.

или

$$\frac{\pi t}{2\eta} \frac{h+l}{l} \rho g (a^2 r - r^3) dr.$$

Полный объем жидкости V , проходящий трубку за время t , следовательно, равен:

$$V = \frac{\pi t}{2\eta} \frac{h+l}{l} \rho g \int_0^a (a^2 r - r^3) dr = \frac{\pi a^4 t (h+l)}{8\eta l} \rho g,$$

откуда

$$\eta = \frac{\pi a^4 t}{8V} \frac{h+l}{l} \rho g.$$

Описание прибора

Определение коэффициента вязкости воды при комнатной температуре производится при помощи прибора, показанного на рис. 3. Капиллярную трубку одинакового сечения пропускают через пробку, которой закрывают конец широкой трубки АВ, и удерживают обе трубки в вертикальном положении особым приспособлением. Перед опытом капиллярную трубку закрывают резиновой пробкой. Трубка CD, идущая от сосуда Мариотта М, опускается в широкую трубку. Открывают капиллярную трубку EF и дают возможность воде вытекать из трубки EF; воздух через трубку К поступает в сосуд Мариотта, и уровень воды в АВ можно считать практически постоянным.

Вода, вытекающая из капилляра, собирается в сосуд, причем замечается время вытекания некоторого количества жидкости. Расстояние h может быть измерено при помощи стальной линейки, помещенной позади широкой трубки. Термометр G должен быть погружен в широкий сосуд АВ и температура тщательно измерена.

Длина l трубки EF должна быть измерена перед опытом. Если t измеряется в секундах, радиус a трубки в сантиметрах, объем V - в куб. сантиметрах, ρ выражается в $г/см^3$ и g - в $см/сек^2$, то η можно найти по формуле:

$$\eta = \frac{\pi a^4 t (h+l)}{8Vl} \rho g$$

в динах на квадратный сантиметр при градиенте скорости, равном единице.

В этих опытах температура воды должна быть тщательно определена, так как при низких температурах коэффициент вязкости быстро уменьшается при подъеме температуры. Около $15^\circ C$ коэффициент вязкости уменьшается на 2,5 % - на градус подъема температуры. В очень тщательных опытах трубка должна быть калибрована, и нанесена поправка на неоднородность сечения.

Строго говоря, должны быть также учтены поправки, нами опускаемые: во-первых, на кинетическую энергию, приобретаемую жидкостью при вытекании, во-вторых, на разницу в атмосферном давлении в точках G и F, и, в-третьих, на эффект, вызываемый капиллярностью, если жидкость капает из конца капиллярной трубки.

Длина трубки $l = (22, 15 \pm 0, 01)$ см.

Радиус капилляра определяют с помощью отсчетного устройства. Капилляр помещают в штатив горизонтально и освещают лампой. Микроскоп наводят на конец капилляра и отмечают, какому количеству делений окулярной шкалы микроскопа соответствует диаметр капилляра. После этого определения в той плоскости, где находился конец капилляра, устанавливают шкалу, разделенную на десятые доли миллиметра и определяют цену деления окулярной шкалы микроскопа. Измерение производится несколько раз, вращая трубку микроскопа и вместе с ней окулярную шкалу на различные углы.

Порядок работы

В начале опыта взвешивают сосуд для воды, ставят трубку К на какой-либо высоте и, открыв пробку у капилляра и винт у сосуда Мариотта (полностью), наблюдают течение жидкости и установившийся уровень. Вода стекает в запасной сосуд. Когда уровень жидкости установится, наблюдают температуру воды и измеряют высоту h . При этом для исключения параллакса отсчет верхнего конца капилляра EF производится по металлическому кольцу, надеваемому на трубку АВ. Кольцо укрепляется так, чтобы кромки его (позади и перед трубкой) и конец капилляра находились в одной плоскости. Отсчет производится при помощи стальной линейки.

Затем берут другой сосуд для воды, подставляют под струю и наблюдают время истечения некоторого объема жидкости, делая поправку плотности на температуру. Производят несколько измерений с одной и той же высотой трубки К. Меняют высоту трубки и снова производят наблюдения.

Для работы необходимы:

- 1) прибор, изображенный на рис. 3;
- 2) термометр;
- 3) весы и разновес;
- 4) сосуд и жидкости;
- 5) секундомер.

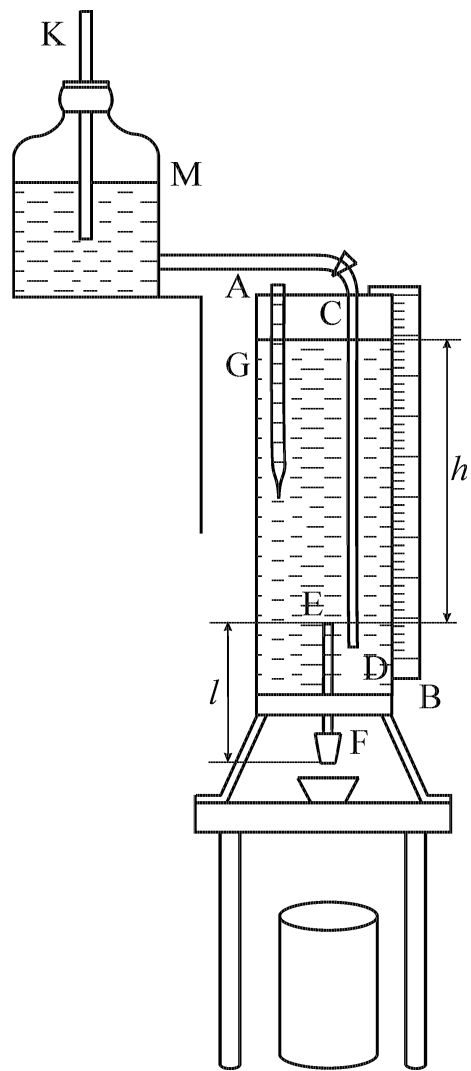


Рис. 3.

Определение коэффициента внутреннего трения жидкости вискозиметром Оствальда.

Коэффициент внутреннего трения жидкостей η можно определить опытным путем по методу Оствальда. Теория движения жидкости по капиллярной трубке в случае полного смачивания дает следующую формулу для объема вытекшей жидкости V за время t при длине трубки l , радиусе ее сечения r и давлении p , под которым находится жидкость:

$$V = \frac{\pi p r^4}{8 \eta l} t, \quad (1)$$

где η - вязкость жидкости. Это соотношение известно под названием закона Пуазейля. Пользуясь уравнением (1) и зная величины V , r , l , p , можно вычислить значение коэффициента η .

Формулой Пуазейля пользуются для определения относительного коэффициента вязкости. В самом деле, если взять две жидкости (например, воду и спирт) и измерить время истечения одинаковых объемов этих жидкостей через один и тот же капилляр (одинаковых r и l), то будем иметь, то будем иметь, согласно формуле (1) для опыта с водою:

$$V = \frac{\pi p_0 r^4}{8 \eta_0 l} t_0, \quad (2)$$

где V - объем вытекшей воды, t_0 - время истечения, η_0 - вязкость воды при данной температуре.

Применяя ту же формулу для опыта с испытуемой жидкостью, имеем:

$$V = \frac{\pi p_1 r^4}{8 \eta_1 l} t_1, \quad (3)$$

где t_1 - время истечения, η_1 - коэффициент вязкости испытуемой жидкости.

Разделив уравнение (3) на уравнение (2), получим:

$$1 = \frac{p_1}{p_0} \cdot \frac{t_1}{t_0} \cdot \frac{\eta_0}{\eta_1},$$

или

$$\eta_1 = \eta_0 \frac{p_1}{p_0} \cdot \frac{t_1}{t_0}. \quad (4)$$

Если жидкость вытекает под действием силы тяжести, то

$$\frac{p_1}{p_0} = \frac{d_1}{d_0},$$

где d_0 и d_1 - плотности жидкостей, и соотношение (4) можно написать в виде:

$$\eta_1 = \eta_0 \frac{d_1}{d_0} \cdot \frac{t_1}{t_0}. \quad (5)$$

Таким образом, зная время истечения взятых жидкостей t_0 и t_1 и их плотности d_0 и d_1 , можно определить относительный коэффициент внутреннего трения η_1/η_0 , а найдя из таблиц значение η_0 , вычислить и абсолютную величину η_1 .

Прибор Оствальда для определения коэффициента вязкости представляет собой стеклянную трубку abc , широкое колено ab которой заканчивается внизу расширением b , а другое колено состоит из капилляра e , заканчивающегося сверху расширением c , который переходит в более широкую трубку d (рис. 4).

Под расширением и над ним на трубках d и e нанесены две метки m и n , ограничивающие собой вполне определенный объем жидкости, время истечения которого измеряется опытным путем.

Порядок работы

1. Для выполнения работы прибор сначала хорошенько промывают водой, а затем небольшим количеством исследуемой жидкости. После этого прибор закрепляют в зажимах на штативе S и опускают в сосуд с водой так, чтобы уровень воды был выше верхней отметки m ; прибор при помощи отвеса должен быть установлен вертикально. В сосуд опускается термометр T .

2. Установив прибор, впускают при помощи пипетки в широкое колено ab определенный, постоянный при всех опытах объем испытуемой жидкости. Далее осторожно всасывают жидкость через резиновую трубку f , надетую на трубку d и наполняют расширение c выше метки m . Снимают грушу и наблюдают истечение жидкости. Пускают секундомер в ход в тот момент, когда мениск проходит через метку m , а в момент, когда мениск проходит через метку n , останавливают секундомер.

3. Опыт повторяется несколько раз. Таким образом определяется время t_1 истечения объема исследуемой жидкости.

4. После этого проделывают тот же опыт с водой и для нее также определяют время истечения t_0 .

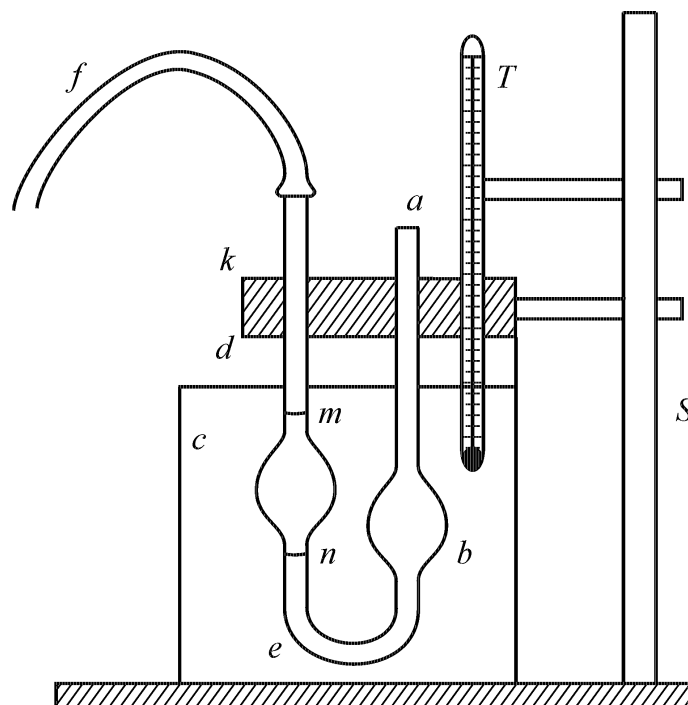


Рис. 4.

5. Определяется температура и плотность d_0 . Зная плотности жидкостей d_0 и d_1 и время истечения t_0 и t_1 , вычисляют для жидкостей коэффициент вязкости по формуле:

$$\eta_1 = \eta_0 \frac{d_1 t_1}{d_0 t_0}.$$

Коэффициент трения η_0 для воды находится из таблиц. Плотности исследуемых жидкостей определяются на весах Вестфаля.

Для работы необходимы:

- 1) вискозиметр Оствальда;
- 2) водяной термостат с термометром;
- 3) исследуемая жидкость и дистиллированная вода;
- 4) весы Вестфаля;
- 5) секундомер;
- 6) резиновая груша.

Работа состоит из трех частей:

- 1) Абсолютное измерение вязкости воды методом Пуазейля.
- 2) Калибровка капиллярного вискозиметра.
- 3) Измерения вязкости какой-либо жидкости (по указанию преподавателя) в зависимости от температуры.

Метод Пуазейля требует значительного расхода жидкости, так что его рационально применять только для измерения вязкости воды. Кроме того, в этом методе трудно измерять температуру изучаемой жидкости. Поэтому для практических измерений пользуются обычно капиллярными вискозиметрами (вискозиметром Оствальда или его разновидностями), которые лишены этих недостатков. Но такие вискозиметры не позволяют непосредственно вычислять вязкость жидкости в абсолютной мере, так как за время протекания жидкости по капилляру разность уровней не остается постоянной. Вискозиметр позволяет проводить только относительные измерения, т.е. сравнивать вязкости разных жидкостей. Поэтому он должен быть предварительно прокалиброван по какой-либо жидкости с известной вязкостью.

В нашей работе абсолютным методом Пуазейля измеряется вязкость водопроводной воды при комнатной температуре. Затем та же вода используется для калибровки капиллярного вискозиметра.

Зная кинематическую вязкость воды $\nu = \eta/\rho$ (ρ - плотность) и время ее протекания в вискозиметре t , следует вычислить постоянную вискозиметра, т.е. коэффициент пропорциональности в формуле $\nu = ct$.

Калибровка должна выполняться при той же температуре, при которой проводилось абсолютное измерение вязкости воды. Найденное для этой температуры значение постоянной вискозиметра можно использовать и для других температур. Действительно, время протекания жидкости обратно пропорционально четвертой степени радиуса капилляра и пропорционально объему резервуара, т.е. кубу линейных размеров¹. Таким образом, тепловое расширение стекла

¹Почему в этой оценке не нужно учитывать зависимости от длины капилляра?

изменяет это время обратно пропорционально первой степени линейных размеров, т.е. на величину порядка 10^{-5} . Если температура повысится на 100° , то время истечения жидкости с неизменной кинематической вязкостью уменьшится на 0,1%, что значительно ниже погрешности измерений.

Вязкость указанной преподавателем жидкости измеряется при 5 - 6 температурах в интервале $+5 - +60^\circ\text{C}$.

Плотность жидкости находится из таблиц или измеряется с помощью пикнометра. По результатам измерений строится график зависимости вязкости от температуры. Следует также проверить выполнение зависимости

$$\eta \sim e^{\Delta E/RT}$$

и вычислить энергию активации ΔE . Для этого строится график зависимости $\ln \eta$ от $1/T$; экспериментальные точки должны ложиться на прямую, наклон которой определяется величиной ΔE :

$$\Delta E = 2303 R \frac{\Delta(\ln \eta)}{\Delta(1/T)},$$

где R - газовая постоянная. Величину ΔE принято выражать в *кал/моль*.

Регулировка температуры. Для поддержания температуры жидкости в вискозиметре, он погружен в простейший водяной термостат - стеклянную банку с мешалкой и нагревательной спиралью. Спираль включается в сеть 120 вольт постоянного тока через реостаты и амперметр. Регулировка температуры производится вручную, реостатом. При таком способе регулировки трудно устанавливать точно заданную температуру, и к этому не следует даже стремиться; нужно только, чтобы температуры, при которых производятся измерения, приблизительно равномерно заполняли заданный интервал ($+5 - +60^\circ\text{C}$). Только при калибровке вискозиметра температура воды должна иметь точно то же значение, что и при абсолютном измерении вязкости (допустимы отклонения не более $0,2 - 0,3^\circ\text{C}$). Для измерения необходимо, чтобы жидкость в вискозиметре приняла температуру термостата. Для этого нужно, чтобы температура жидкости в термостате оставалась неизменной в течение 2 - 5 минут до измерения, а также, конечно, и во время измерения, которое требует нескольких минут. выполнение этих требований при отсутствии автоматического терморегулирования требует некоторого навыка. Нагревать воду в термостате можно быстро, т.е. большим током; когда температура приблизится к нужному значению, надо резко уменьшить ток, а затем отрегулировать его так, чтобы температура перестала изменяться. Выдерживая постоянную температуру, следует внимательно следить за небольшими колебаниями столбика ртути в термометре и сразу же исправлять начинающиеся изменения температуры.

Для получения температур ниже комнатной следует бросить в воду термостата небольшое количество льда. Регулировка температуры производится в этом случае с помощью нагревательной спирали (разумеется, этот метод годится только до тех пор, пока не весь лед расплавился). Можно также проводить измерения в момент достижения минимальной температуры (когда почти весь лед расплавится).