

Измерение вязкости при помощи вискозиметра с падающим шариком (Item No.: P2140400)

Актуальность учебной программы



Сложность



Сложно

Время подготовки



1 час

Время выполнения



3 часа

Рекомендуемый размер группы



2 студента

Дополнительно требуется:

Варианты эксперимента:

Ключевые слова:

Жидкость, Ньютоновская жидкость, закон Стокса, текучесть, динамическая и кинематическая вязкость, измерения вязкости.

Обзор

Краткое описание

Вследствие внутреннего трения между частицами жидкости и газы имеют разную вязкость. Величину вязкости, зависящую от строения вещества и его температуры, можно определить экспериментально, например, измеряя скорость падения шарика в трубке, заполненной исследуемой жидкостью.



Рис. 1: Экспериментальная установка: Измерение вязкости при помощи вискозиметра с падающим шариком

Оборудование

№ п/п	Материалы	Номер артикля	Количество
1	Вискозиметр с падающим шариком	18220-00	1
2	Термометр, 24...+ 51 °С, для вискозиметра	18220-02	1
3	Прецизионные весы Sartorius ENTRIS623-1S, 620 г / 0,001 г	49294-99	1
4	Погружной термостат Alpha A, до 100 °С, 220 В	08493-93	1
5	Ванна для термостата, 6 л	08487-02	1
6	Охлаждающие приспособления для термостата Alpha A	08493-01	1
7	Насос для термостата Alpha A	08493-02	1
8	Подставка для горелки Бунзена, 210x130 мм, h=750 мм	37694-00	1
9	Универсальный зажим с шарниром	37716-00	1
10	Прямоугольный зажим	37697-00	1
11	Пикнометр, калиброванный, 25 мл	03023-00	1
12	Мерная колба, 100 мл, NS12/21	36548-00	9
13	Мензурка низкая, 250 мл, стекло	46054-00	1
14	Пипетки Пастера, l=145 мм, 250 шт.	36590-00	1
15	Мензурка высокая, 150 мл, стекло	46032-00	11
16	Резиновые наконечники для пипеток, 10 шт	39275-03	1
17	Секундомер цифровой, 1/100 с	03071-01	1
18	Хомут для трубки, d=5-12 мм	40997-00	10
19	Резиновые трубки, внутр d=10 мм	39290-00	1
20	Резиновые трубки, внутренний d=6 мм	39282-00	6
	Соединительный патрубок, d=6-10 мм	47516-01	2
22	Промывалка, пластмассовая, 500 мл	33931-00	2
	Дополнительно требуются расходные материалы		
1	Вода, дистиллированная		
2	Метанол		

Задания

Измерьте:

- вязкость смесей метанола и воды различного состава при постоянной температуре;
- зависимость вязкости воды от температуры
- зависимость вязкости метанола от температуры

Из температурной зависимости вязкости рассчитайте энергетический барьер для смещения воды и метанола.

Установка и порядок выполнения работы

Соберите установку, как показано на рис. 1. Подсоедините вискозиметр с падающим шариком к термостату при помощи резиновой трубки (закрепите соединения при помощи зажимов для трубок!). Заполните ванну термостата дистиллированной или деминерализированной водой. Подсоедините охлаждающий змеевик термостата к системе водоснабжения при помощи трубки (закрепите соединения при помощи зажимов для трубок!).

В соответствие с инструкцией по эксплуатации приведите вискозиметр в рабочее состояние, откалибруйте его и для каждого эксперимента заполняйте его исследуемой жидкостью (вода, метанол или смеси метанола и воды согласно табл. 1), следите, чтобы в жидкости не было пузырьков.

Шарик №1, изготовленный из боросиликатного стекла, подходит для исследований в заданном диапазоне вязкости. Его характеристики описаны в прилагаемом сертификате испытаний. Поместите шарик в трубку пикнометра, и подождите в течении 10 минут, пока в вискозиметре с заданной рабочей температурой T не установится тепловое равновесие, и только затем определите время падения t шарика (3-5 значений). Рассчитайте среднее арифметическое измеренных значений для каждого случая.

Для измерения вязкости смесей метанол-вода рекомендуется постоянная рабочая температура 298 К (Задание 1).

Исследуйте зависимость вязкости от температуры для чистых жидкостей (задания 2 и 3) в диапазоне температур 293-323 К с шагом в 5 К. Параллельно с этим определите плотность соответствующих жидкостей, необходимую для дальнейших расчетов. Для этого взвесьте чистый и сухой пикнометр, заполните его исследуемой жидкостью, закрепите на подставке под реторту и

приведите ее в равновесие с водяной баней (в течение 15 мин). После закрытия пробкой и быстрой внешней сушки повторно наполните пикнометр жидкостью без пузырьков. Из разности масс двух взвешиваний и объема пикнометра определите плотность жидкости. Тщательно прополаскивайте пикнометр и трубку новой исследуемой жидкостью перед тем, как заполнить нею пикнометр.

$m(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH})/\text{г}$	$m(\text{H}_2\text{O})/\text{г}$	$\rho/\text{г}\cdot\text{см}^{-3}$	$\eta/\text{мПа}\cdot\text{с}$
0	100	0.9970	0.897
10	90	0.9804	1.178
20	80	0.9649	1.419
30	70	0.9492	1.581
40	60	0.9316	1.671
50	50	0.9122	1.577
60	40	0.8910	1.427
70	30	0.8675	1.234
80	20	0.8424	1.025
90	10	0.8158	0.788
100	0	0.7867	0.557

Таблица 1: Табличные значения плотности и динамической вязкости смесей различных составов при постоянной температуре ($T = 298,15\text{ К}$)

$T/\text{К}$	Вода		Метанол	
	$\rho/\text{г}\cdot\text{см}^{-3}$	$\eta/\text{мПа}\cdot\text{с}$	$\rho/\text{г}\cdot\text{см}^{-3}$	$\eta/\text{мПа}\cdot\text{с}$
293.15	0.9982	1.002	0.7915	0.608
298.15	0.9970	0.897	0.7868	0.557
303.15	0.9956	0.797	0.7819	0.529
308.15	0.9940	0.726	0.7774	0.487
313.15	0.9922	0.653	0.7729	0.458
218.15	0.9902	0.597	0.7690	0.425
323.15	0.9880	0.548	0.7650	0.396

Таблица 2: Табличные значения плотности и динамической вязкости смесей различных составов при различной температуре

Замечание

Тщательное выполнение эксперимента занимает много времени (приблизительно 10 часов). Поэтому целесообразно разделить эксперимент на части в соответствии с тремя заданиями или выполнить их произвольно. Другой вариант - провести полный эксперимент в течение двух лабораторных дней.

Теория и оценка результатов

Динамическая вязкость η жидкости (1) зависит от силы F , необходимой для сдвига двух параллельных слоев жидкости, имеющих площадь A и разделенных dx со скоростью $d\omega$ относительно друг друга:

$$\eta = \frac{F}{A \frac{d\omega}{dx}} \quad (1)$$

Связывая динамическую вязкость с плотностью жидкости ρ , получим кинематическую вязкость ν (2); значение обратное динамической вязкости называется текучестью φ (3).

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (2)$$

$$\varphi = \frac{1}{\eta} \quad (3)$$

Частица сферообразной формы с радиусом r движется в жидкости с вязкостью η под действием силы F и с постоянной скоростью ω .

$$\omega = \frac{F}{6\pi\eta r} \quad (4)$$

(закон Стокса)

Если шар падает в гравитационном поле Земли, его движущая сила F равна произведению ускорения свободного падения g и эффективной массы m' , которая выражается разностью плотностей шарика (ρ_1) и жидкости (ρ_2).

$$F = m'g = \frac{4}{3}\pi r^3 g(\rho_1 - \rho_2) \quad (5)$$

Отношение (6) для вычисления вязкости, полученное из выражений (4) и (5), рассматривается только как ограничение закона для расширенных сред (радиусом можно пренебречь по сравнению с радиусом трубки пикнометра); в противном случае, отношение может быть аппроксимировано поправками (поправки Ладенбурга).

$$\eta = \frac{2r^2(\rho_1 - \rho_2)g}{g\omega} \quad (6)$$

Для серийных шариковых вискозиметров с наборами откалиброванных шаров постоянные в выражении (6) совмещаются с аппаратными коэффициентами и дают сферическую константу K ; это облегчает процесс расчета:

$$\eta = Kt(\rho_1 - \rho_2) \quad (7)$$

(t = скорость падения шара на расстояние $s = 100$ мм)

Плотность ρ_2 жидкости при температуре T из уравнения (7) рассчитывается из зависимости

$$\rho_2 = \frac{m}{V} \quad (8)$$

(m = масса жидкости; V = объем пикнометра)

используя экспериментально определенные данные при помощи пикнометра или, альтернативно, полученные из таблиц 1 и 2.

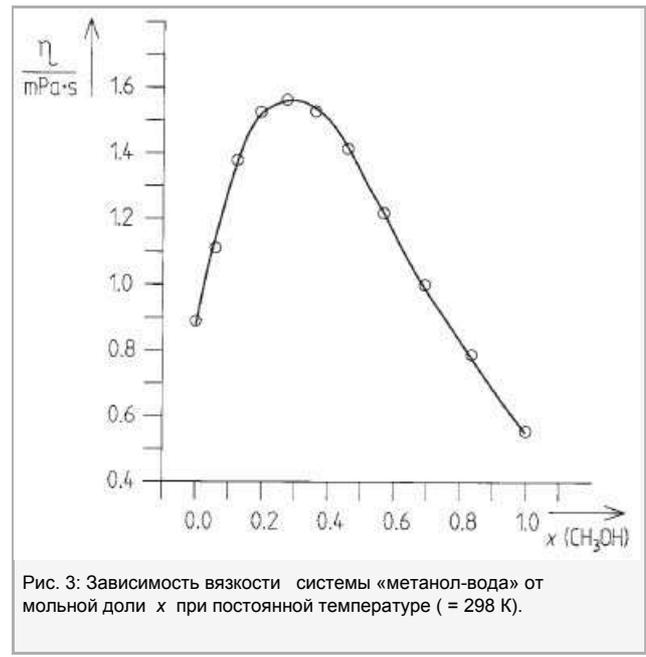
Вязкость зависит от структуры системы и ее температуры. Изменение в измеренной вязкости, при которой состав смеси метанола и воды зависит от массовой доли ω (9.1) или мольной доли x (9.2), является неидеальным поведением жидкостей. Оно соответствует дополнительным явлениям смешивания, таким как объем смешивания (сжатие объема) или энтальпия смешивания.

$$\omega_1 = \frac{m_1}{m_1 + m_2} \quad (9.1)$$

(ω_1 = массовая доля, m_1 = масса вещества 1)

$$x_1 = \frac{n_1}{n_1 + n_2} = \frac{\frac{m_1}{M_1}}{\frac{m_1}{M_1} + \frac{m_2}{M_2}} \quad (9.2)$$

(x_1 = мольная доля, n_1 - количество вещества, m_1 = масса вещества 1, M_1 = молярная масса вещества 1)



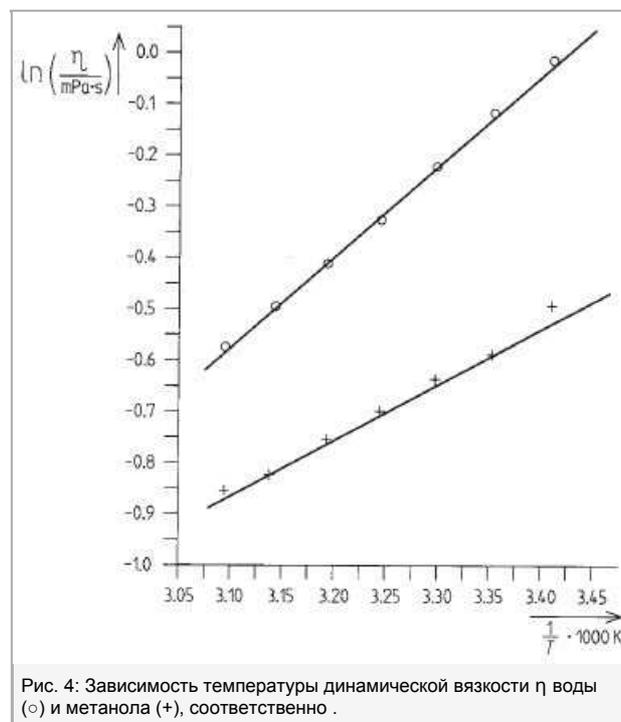
Для большинства жидкостей уменьшение вязкости с температурой описывается эмпирически определенной экспоненциальной функцией (10).

$$\frac{1}{\eta} = \varphi = Ce - \frac{E}{RT} \quad (10)$$

$R = 8.31441 \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1} \cdot \text{моль}^{-1}$, универсальная газовая постоянная.

В данной формуле, аналогичной формуле Аррениуса, C - константа, зависящая от системы; E - выражение для молярной энергии, необходимой для преодоления внутреннего трения. Эта энергия активации определяется из тангенса угла наклона кривой, полученной из линейной зависимости (10.1) $\ln \eta$ и $1/T$ (рис. 4).

$$\ln \eta = \frac{E}{R} \frac{1}{T} - \ln C \quad (10.1)$$



Данные и результаты

На рис. 2-4 в графическом виде представлены зависимости экспериментально найденных значений вязкости от состава смеси метанола и воды или от температуры.

Для линейных зависимостей $\ln \eta$ и $1/T$ ниже представлены полученные значения:

$$\Delta(\ln \eta) / \Delta(1/T) = 1.799 \cdot 10^3 \text{ К (H}_2\text{O) и}$$

$$\Delta(\ln \eta) / \Delta(1/T) = 1.134 \cdot 10^3 \text{ К (CH}_3\text{OH)}$$

Заменяя эти значения в уравнении 10.1, получим соответствующие значения энергетических барьеров:

$$E = 14.8 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1} \text{ (H}_2\text{O) и } E = 9.4 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1} \text{ (CH}_3\text{OH)}.$$

Значения энергетических барьеров, рассчитанные с табличными данными η (см. таблицу 2), равны $E = 15.9 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$ и $E = 11.1 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$.