

Лабораторная работа 2.5.1

Измерение коэффициента поверхностного натяжения жидкости.

10 Февраля 2021 г.

Старченко Иван Александрович

Цель работы:

- 1) измерение температурной зависимости коэффициента поверхностного натяжения дистиллированной воды с использованием известного коэффициента поверхностного натяжения спирта;
- 2) определение полной поверхностной энергии и теплоты, необходимой для изотермического образования единицы поверхности жидкости при различной температуре.

Теоретические сведения

Наличие поверхностного слоя приводит к различию давлений по разные стороны от искривленной границы раздела двух сред. Для сферического пузырька с воздухом внутри жидкости избыточное давление даётся формулой Лапласа:

$$\Delta P = P_{inside} - P_{outside} = \frac{2\sigma}{r}, \quad (1)$$

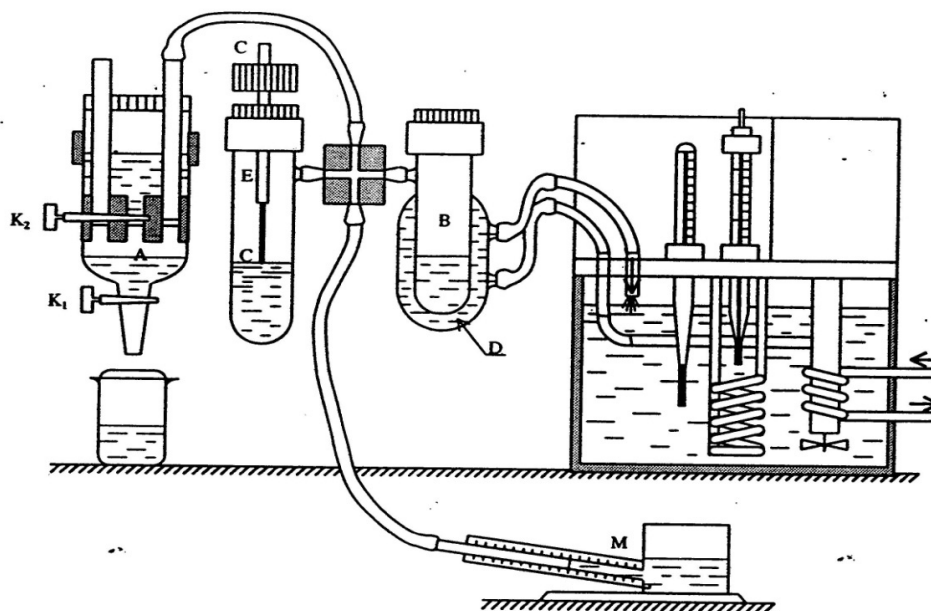
где σ – коэффициент поверхностного натяжения, P_{inside} и $P_{outside}$ – давление внутри пузырька и снаружи, r – радиус кривизны поверхности раздела двух фаз. Эта формула лежит в основе предлагаемого метода определения коэффициента поверхностного натяжения жидкости. Измеряется давление ΔP , необходимое для выталкивания в жидкость пузырька воздуха.

Экспериментальная установка

Исследуемая жидкость (дистиллированная вода) наливается в сосуд (колбу) В. Тестовая жидкость (этиловый спирт) наливается в сосуд Е.

При измерениях колбы герметично закрываются пробками. Через одну из двух пробок проходит полая металлическая игла С. Этой пробкой закрывается сосуд, в котором проводятся измерения. Верхний конец иглы открыт в атмосферу, а нижний погружен в жидкость. Другой сосуд герметично закрывается второй пробкой. При создании достаточного разряжения воздуха в колбе с иглой пузырьки воздуха начинают пробуживать через жидкость. Поверхностное натяжение можно определить по величине разряжения P_1 , необходимого для прохождения пузырьков (при известном радиусе иглы).

Разряжение в системе создается с помощью аспиратора А. Кран K_2 разделяет две полости аспиратора. Верхняя полость при закрытом кране K_2 заполняется водой. Затем кран K_2 открывают и заполняют водой нижнюю полость аспиратора. Разряжение воздуха создается в нижней полости при открывании крана K_1 , когда вода вытекает из неё по каплям. В колбах В и С, соединённых трубками с нижней полостью аспиратора, создается такое же пониженное давление. Разность давлений в полостях с разряженным воздухом и атмосферой измеряется спиртовым микроманометром (устройство микроманометра описано в Приложении). Для стабилизации температуры исследуемой жидкости через рубашку D колбы В непрерывно прогоняется вода из термостата.



Обычно кончик иглы лишь касается поверхности жидкости, чтобы исключить влияние гидростатического давления столба жидкости. Однако при измерении температурной зависимости коэффициента поверхностного натяжения возникает ряд сложностей. Во-первых, большая теплопроводность металлической трубки приводит к тому, что температура на конце трубки заметно ниже, чем в глубине жидкости. Во-вторых, тепловое расширение поднимает уровень жидкости при увеличении температуры.

Обе погрешности можно устранить, погрузив кончик трубки до самого дна. Полное давление, измеренное при этом микроманометром, $P = \Delta P + \rho gh$. Заметим, что ρgh от температуры практически не зависит, так как подъём уровня жидкости компенсируется уменьшением её плотности (произведение ρh определяется массой всей жидкости и поэтому постоянно). Величину ρgh следует измерить двумя способами. Во-первых, замерить величину $P_1 = \Delta P'$, когда кончик трубки только касается поверхности жидкости. Затем при этой же температуре опустить иглу до дна и замерить $P_2 = \rho gh + \Delta P''$ ($\Delta P'$, $\Delta P''$ – давление Лапласа). Из-за несжимаемости жидкости можно положить $\Delta P' = \Delta P''$ и тогда $\rho gh = P_2 - P_1$. Во-вторых, при измерениях P_1 и P_2 замерить линейкой глубину погружения иглы h . Это можно сделать, замеряя расстояние между верхним концом иглы и любой неподвижной частью прибора при положении иглы на поверхности и в глубине колбы.

Измерения

1) Убедившись в герметичности системы, начал измерения. Открыл кран К1. Подобрал частоту падения капель не чаще, чем 1 капля в 5 секунд.

2) Измерил высоту подъема спирта Δh при пробулькивании пузырьков воздуха на поверхности спирта. Снятые данные занёс в таблицу:

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Δh , мм	47	46	47	48	47	47	47	48	47	46

Таблица 1: Измерение давления пузырьков на поверхности спирта

Посчитал среднее значение и оценил случайную и систематическую погрешность:

$$\langle \Delta h \rangle = \frac{47 + 46 + 47 + 48 + 47 + 47 + 47 + 48 + 47 + 46}{10} = 47.0 \text{ мм}$$

$$\delta_{<\Delta h>\text{случ}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (\Delta h_i - <\Delta h>)^2} = \sqrt{\frac{1}{10(10-1)} \sum_{i=1}^{10} (\Delta h_i - 47.0)^2} = 0.2 \text{ мм}$$

$$\delta_{<\Delta h>\text{сист}} = 1.0 \text{ мм}$$

Полная погрешность измерения:

$$\delta_{<\Delta h>} = \sqrt{\delta_{<\Delta h>\text{сист}}^2 + \delta_{<\Delta h>\text{случ}}^2} \approx 1.0 \text{ мм}$$

Перейдем по формуле (1): $P = C \cdot \frac{\gamma_{\text{сп. залит}}}{\gamma_{\text{сп. пр}}} \cdot K \cdot h \cdot 9.81$ (где P – давление в Па, C – поправочный множитель, h – отсчет по шкале, K – постоянная ушла наклона, $\gamma_{\text{сп. залит}}$ – плотность спирта залитого в прибор, $\gamma_{\text{сп. пр}}$ – плотность спирта указанного на приборе) от высоты к давлению:

$$P = 1.0 \cdot \frac{0.8066}{0.8095} \cdot 0.2 \cdot 47.0 \cdot 9.81 \approx 91.88 \text{ Па}$$

$$\delta_P = 1.0 \cdot \frac{0.8066}{0.8095} \cdot 0.2 \cdot 1.0 \cdot 9.81 \approx 1.95 \text{ Па}$$

Тогда получаем:

$$P = (91.88 \pm 1.95) \text{ Па}$$

Приняв за табличное значение коэффициента поверхностного натяжения спирта величину $\sigma = 0,0228 \text{ Н/м}$, рассчитаем диаметр иглы:

$$d = \frac{4\sigma}{P} = 0.99 \text{ мм}$$

$$\delta_d = d \cdot \frac{\sigma_P}{P} \approx 0.02 \text{ мм}$$

$$d = (0.99 \pm 0.02) \text{ мм}$$

Диаметр трубки, измеренный с помощью микроскопа и линейки, равен $(0.97 \pm 0.01) \text{ мм}$. В дальнейшем будем пользоваться им. Также стоит отметить, что косвенное измерение диаметра достаточно близко к прямому измерению, что говорит о применимости данного метода.

3) Промоем, высушим и перенесем иглу в колбу с дистиллированной водой. Теперь измерим максимальное давление P_1 при пробулькивании

пузырьков, когда игла лишь касается поверхности воды, также измерим расстояние между верхним концом иглы и пробкой пробирки h_1 .

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Δh_1 , мм	119	119	119	120	119	119	119	118	119	119

Таблица 2: Измерение давления пузырьков на поверхности воды

Аналогично пункту 2 найдем полную погрешность:

$$\langle \Delta h_1 \rangle = \frac{119 + 119 + 119 + 120 + 119 + 119 + 119 + 118 + 119 + 119}{10} = 119.0 \text{ мм}$$

$$\delta_{\langle \Delta h_1 \rangle \text{случ}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (\Delta h_i - \langle \Delta h_1 \rangle)^2} = \sqrt{\frac{1}{10(10-1)} \sum_{i=1}^{10} (\Delta h_i - 119.0)^2} = 0.2 \text{ мм}$$

$$\delta_{\langle \Delta h_1 \rangle \text{сист}} = 1.0 \text{ мм}$$

Полная погрешность измерения:

$$\delta_{\langle \Delta h_1 \rangle} = \sqrt{\delta_{\langle \Delta h_1 \rangle \text{сист}}^2 + \delta_{\langle \Delta h_1 \rangle \text{случ}}^2} \approx 1.0 \text{ мм}$$

Перейдем по формуле (1): от высоты к давлению:

$$P_1 = 1.0 \cdot \frac{0.8066}{0.8095} \cdot 0.2 \cdot 119.0 \cdot 9.81 \approx 232.64 \text{ Па}$$

$$\delta_{P_1} = 1.0 \cdot \frac{0.8066}{0.8095} \cdot 0.2 \cdot 1.0 \cdot 9.81 \approx 1.95 \text{ Па}$$

Тогда получаем:

$$P_1 = (232.64 \pm 1.95) \text{ Па}$$

Расстояние между верхним концом иглы и пробкой пробирки h_1 равно $(5.5 \pm 0.1) \text{ см}$

4) Опустим теперь иглу практически до дна, расстояние между верхним концом иглы и пробкой пробирки h_2 равно $(6.8 \pm 0.1) \text{ см}$, тогда:

$$\Delta h_1 = h_2 - h_1 = (1.3 \pm 0.1) \text{ см}$$

Аналогично предыдущим пунктам найдем давление пузырьков на дне воды:

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Δh_2 , мм	181	181	181	181	181	181	181	181	181	181

Таблица 3: Измерение давления пузырьков на дне пробирки

$$\langle \Delta h_2 \rangle = \frac{181 + 181 + 181 + 181 + 181 + 181 + 181 + 181 + 181 + 181}{10} = 181.0 \text{ мм}$$

$$\delta_{\langle \Delta h_2 \rangle \text{случ}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (\Delta h_i - \langle \Delta h_1 \rangle)^2} = \sqrt{\frac{1}{10(10-1)} \sum_{i=1}^{10} (\Delta h_i - 181.0)^2} = 0.0 \text{ мм}$$

$$\delta_{\langle \Delta h_2 \rangle \text{сист}} = 1.0 \text{ мм}$$

Полная погрешность измерения:

$$\delta_{\langle \Delta h_2 \rangle} = \sqrt{\delta_{\langle \Delta h_2 \rangle \text{сист}}^2 + \delta_{\langle \Delta h_2 \rangle \text{случ}}^2} \approx 1.0 \text{ мм}$$

Перейдем по формуле (1): от высоты к давлению:

$$P_2 = 1.0 \cdot \frac{0.8066}{0.8095} \cdot 0.2 \cdot 181.0 \cdot 9.81 \approx 353.85 \text{ Па}$$

$$\delta_{P_2} = 1.0 \cdot \frac{0.8066}{0.8095} \cdot 0.2 \cdot 1.0 \cdot 9.81 \approx 1.95 \text{ Па}$$

Тогда получаем:

$$P_2 = (353.85 \pm 1.95) \text{ Па}$$

Найдем Δh_2 косвенным методом:

$$\Delta h_2 = \frac{P_2 - P_1}{\rho g},$$

где $\rho = 998,2 \text{ кг/м}^3$ – плотность дистиллированной воды, а $g = 9.81 \text{ Н/м}$ – ускорение свободного падения.

$$\Delta h_2 = 1.24 \text{ см}$$

$$\delta_{\Delta h_2} = \Delta h \cdot \frac{\delta_P}{P_2 - P_1}$$

$$\delta_{\Delta h_2} = 1.2 \cdot \frac{1.95}{121.20} = 0.02 \text{ см}$$

Сравним значения Δh_1 и Δh_2 . $\Delta h_1 = (1.3 \pm 0.1)$ см, а $\Delta h_2 = (1.24 \pm 0.02)$ см. Значение Δh_2 более точное, при надобности будем пользоваться им.

Снимим температурную зависимость $\sigma(T)$ дистиллированной воды. Для расчета используем формулу, при этом d будет та, которую мы меряли с помощью микроскопа и линейки, а именно $d = (0.97 \pm 0.01)$ мм:

$$\sigma(T) = \frac{(P - \Delta P) \cdot d}{4}$$

N	T, C°	T, K	$\Delta h, \text{ мм}$	$P, \text{ Па}$	$\Delta P, \text{ Па}$	$P - \Delta P, \text{ Па}$	$\sigma \text{ Дж/м}^2$
1	20.1	293.3	181	353.85	121.21	232.64	0.0564
2	30.2	303.4	180	351.89	121.21	230.68	0.0559
3	35.2	308.4	178	347.98	121.21	226.77	0.0550
4	40.2	313.4	177	346.02	121.21	224.81	0.0545
5	45.2	318.4	176	344.07	121.21	223.86	0.0542
6	50.2	323.4	175	342.11	121.21	220.90	0.0536
7	55.2	328.4	174	340.16	121.21	218.95	0.0531

Таблица 4: Температурная зависимость коэффициента поверхностного натяжения

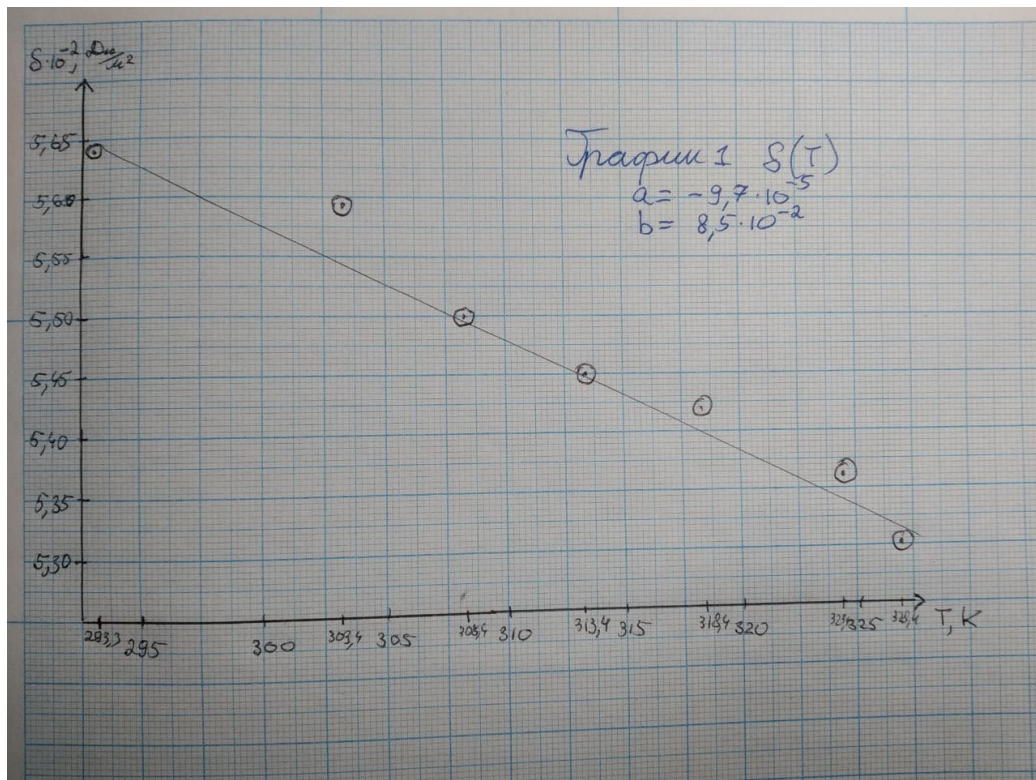
Расчитаем погрешность:

$$\delta_\sigma = \frac{1}{4} \cdot \sqrt{\left(\frac{\delta P}{\langle P \rangle}\right)^2 + \left(\frac{\delta d}{\langle d \rangle}\right)^2}$$

$$\delta_\sigma = \frac{1}{4} \cdot \sqrt{\left(\frac{1.95}{225.38}\right)^2 + \left(\frac{0.01}{0.97}\right)^2} \approx 0.0034 \text{ Дж/м}^2$$

$$\epsilon = \frac{\delta_\sigma}{\langle \sigma \rangle} \cdot 100\%$$

$$\epsilon = \frac{0.0034}{54.69} \cdot 100\% \approx 6\%$$



Найдем коэффициент наклона a по МНК:

$$a = \frac{d\sigma}{dT} = \frac{\sum_i T_i \sum_i \sigma_i - n \sum_i \sigma_i T_i}{(\sum_i T_i)^2 - n \sum_i T_i^2} \approx -9,7 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

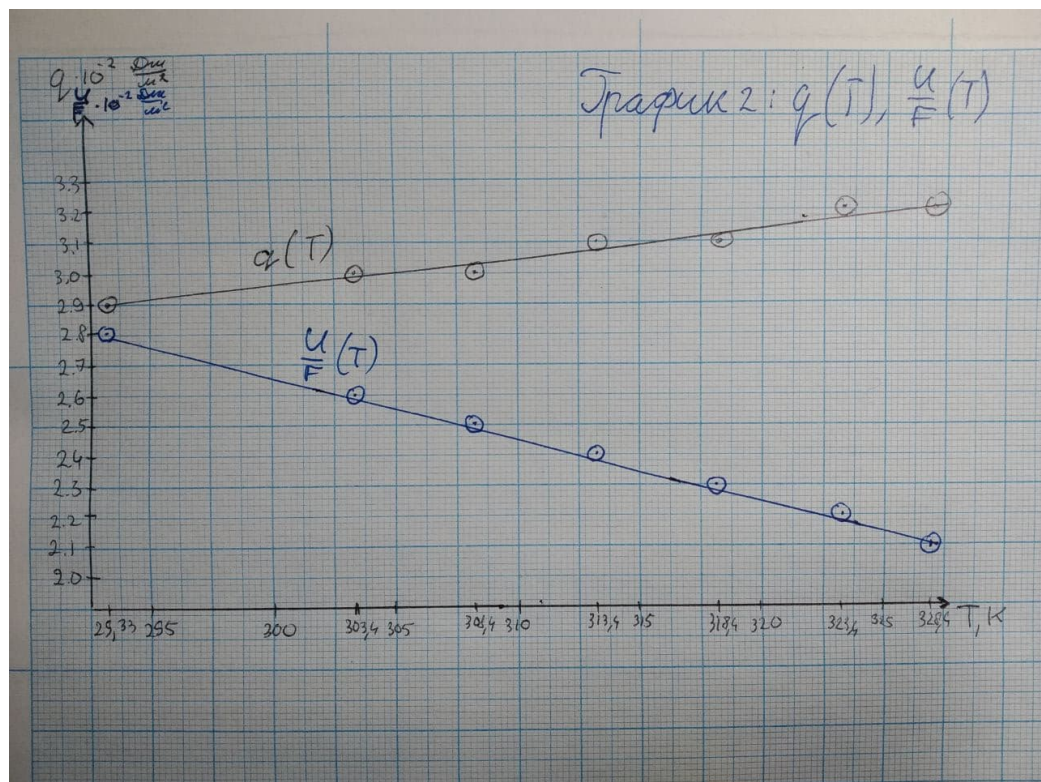
$$\delta_a = \sqrt{\frac{1}{n-2} \cdot \frac{\sum_i (\sigma_i - \langle \sigma_i \rangle)^2}{1}} = 6 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

$$\frac{d\sigma}{dT} = (-9,7 \pm 0,6) \cdot 10^{-5} \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Построим зависимость от температуры теплоты образования единицы поверхности жидкости $q = -T \cdot \frac{d\sigma}{dT}$ и поверхностной энергии U единицы площади F : $\frac{U}{F} = \sigma - T \cdot \frac{d\sigma}{dT}$.

N	T, K	$q, \frac{Дж}{м^2}$	$\frac{U}{F}, \frac{Дж}{м^2}$
1	293.3	0.029	0.028
2	303.4	0.030	0.026
3	308.4	0.030	0.025
4	313.4	0.031	0.024
5	318.4	0.031	0.023
6	323.4	0.032	0.022
7	328.4	0.032	0.021

Таблица 5: Температурная зависимость коэффициента поверхностного натяжения



Вывод

В работе экспериментально был измерен коэффициент поверхностного натяжения воды, с учетом известного коэффициента поверхностного натяжения спирта. Полученное значение совпадает с табличным по порядку величины, но не совпадает в пределах погрешности. Сильное влияние могло оказать низкая точность поправочного давления на глубине сосуда, неидеальность иглы.

Во второй части была экспериментально установлена линейная зависимость коэффициента поверхностного натяжения от температуры.