

Лабораторная работа 2.5.1

Измерение коэффициента поверхностного натяжения жидкости

Шерхалов Денис Б02-204

13 марта 2023 г.

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.

В работе используются: прибор Ребиндера с термостатом и микроманометром; исследуемые жидкости; стаканы.

1. Введение

Из-за поверхностного натяжения возникают разные давления с разных сторон искривленной поверхности жидкости:

$$\Delta P = P_{\text{внутри}} - P_{\text{снаружи}} = \frac{2\sigma}{r} \text{ (формула Лапласа)} \quad (1)$$

σ - коэффициент поверхностного натяжения, r - радиус кривизны поверхности.

Экспериментальная установка: Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 1. Исследуемая жидкость (дистиллированная вода) наливается в сосуд B . Тестовая жидкость (этиловый спирт) наливается в сосуд E , через пробку в него входит полая металлическая игла C . Колбы герметично закрываются. Верхний конец иглы открыт, а нижний погружен в жидкость. При создании достаточно разреженного воздуха в колбе, пузырьки воздуха начинают пробулькивать. Поверхностное натяжение можно определить по величине разряжения ΔP , необходимого для прохождения пузырьков (при известном радиусе иглы).

Разряжение в системе создается с помощью аспиратора A . Кран $K2$ разделяет две полости аспиратора. Верхняя полость при закрытом кране $K2$ заполняется водой. Затем кран $K2$ открывают и заполняют водой нижнюю полость аспиратора. Разряжение воздуха создается в нижней полости при открывании крана $K1$, когда вода вытекает из неё по каплям. В колбах B и C , соединённых трубками с нижней полостью аспиратора, создается такое же пониженное давление. Разность давлений в полостях с разреженным воздухом и атмосферой измеряется спиртовым микроманометром.

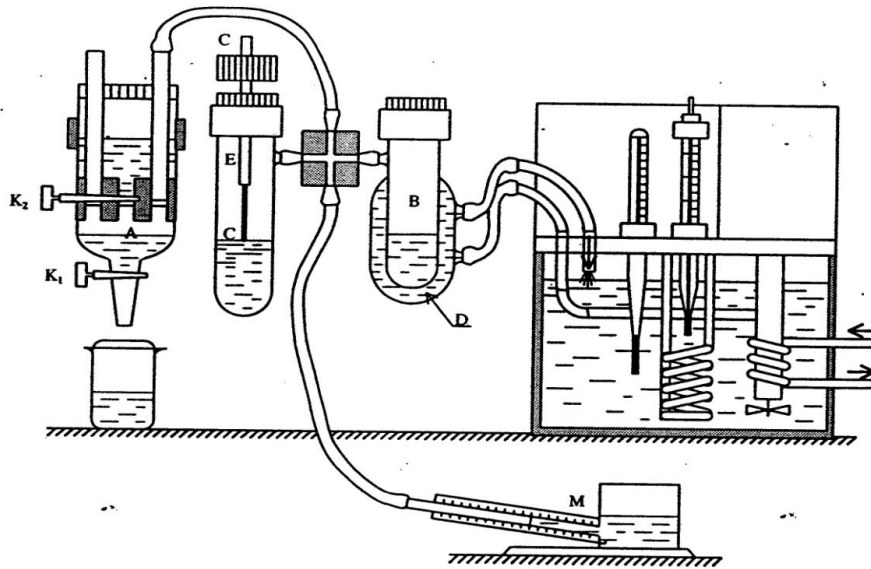


Рис. 1: Схема установки для измерения температурной зависимости коэффициента поверхностного натяжения

Для стабилизации температуры исследуемой жидкости через рубашку D колбы B непрерывно прогоняется вода из термостата. Для стабилизации температуры через рубашку колбы с исследуемой жидкостью прогоняется вода из термостата. Из-за большой теплопроводности трубки температура в разных частях трубки заметно различна и ввиду теплового расширения поднимается уровень жидкости при изменении температуры. Поэтому при температурном измерении кончик иглы опускают до самого дна сосуда, тогда:

$$\Delta P = P - \rho gh \quad (2)$$

ρ - плотность жидкости, h - высота погружения иглы.

2. Выполнение

1. Проверим герметичность установки. Наблюдение за показаниями манометра показало отсутствие течи в установке
2. Начнём измерения. Откроем кран K_1 . Подберём частоту падения капель из аспиратора так, чтобы максимальное давление манометра не зависело от этой частоты (порядка 1 капля в 5 секунд).
3. Измерим максимальное давление $\Delta P_{\text{спирт}}$ при пробулькивании пузырьков воздуха через спирт.

$$x_0 = 41.0 \pm 0.5 \text{ мм} \Rightarrow \Delta P_{\text{спирт}} = 9.81 \cdot 0.2 \cdot x_0 = 80.4 \pm 1.0 \text{ Па}$$

Табличное значение коэффициента поверхностного натяжения спирта $\sigma_{\text{сп}} = 22.78 \frac{\text{мН}}{\text{м}}$, значит, по формуле (1), диаметр иглы.

$$r = \frac{2\sigma_{\text{сп}}}{\Delta P} = 0.567 \text{ мм}, \quad \Delta r = \frac{2\sigma_{\text{сп}} \delta P}{\Delta P^2} = 0.007 \text{ мм}$$

Диаметр иглы, измеренный по микроскопу получился порядка $d = 1.15 \pm 0.05 \text{ мм}$, а значит, косвенное измерение радиуса совпадает с прямым в пределах погрешности.

4. Промоем и просушим от спирта иглу, вставим её в колбу с дистиллированной водой. Измерим максимальное давление P_1 при пробулькивании пузырьков, когда игла лишь касается поверхности воды.

$$x_1 = 129.0 \pm 0.5 \text{ мм} \Rightarrow \Delta P_1 = 9.81 \cdot 0.2 \cdot x_1 = 253.1 \pm 1.0 \text{ Па}$$

Измерим расстояние между верхним концом иглы и неподвижной частью прибора $h_1 = 17.5 \pm 0.5 \text{ мм}$.

5. Утопим иглу до предела (так, чтобы образующийся пузырёк не касался дна). Измерим $h_2 = 7.5 \pm 0.5 \text{ мм}$. Измерим максимальное давление в пузырьках P_2 .

$$x_2 = 179.0 \pm 0.5 \text{ мм} \Rightarrow \Delta P_2 = 9.81 \cdot 0.2 \cdot x_2 = 351.2 \pm 1.0 \text{ Па}$$

По разности давлений $\Delta P_{12} = P_2 - P_1 = 98.1 \pm 1.0 \text{ Па}$ определим глубину погружения иглы косвенно:

$$\Delta h_{12} = \frac{\Delta P_{12}}{\rho g} = \frac{98.1}{998.2 \cdot 9.81} = 10.0 \pm 0.1 \text{ мм}$$

Что совпадает с прямым измерением погружения иглы $\Delta h_{12}^* = h_1 - h_2 = 10.0 \pm 0.5 \text{ мм}$.

6. Снимем температурную зависимость $\sigma(T)$ дистиллированной воды. Для этого включим термостат и подождём, пока нужная температура не стабилизируется. После этого проведём измерение давления. (Таблица №1, график №1).

Посчитаем погрешности. Приборные:

$$\Delta t = 0.1^\circ \text{C}, \quad \Delta H = 0.5 \text{ мм}$$

Далее:

$$\delta P = 0.2 \cdot 9.81 \cdot \Delta H \approx 1.0 \text{ Па}, \quad \Delta(\rho g h) = \rho g \Delta h_{12} \approx 1.0 \text{ Па}, \quad \Delta(\Delta P) = \frac{1}{2}(\delta P + \Delta(\rho g h)) = 1.0 \text{ Па}$$

$$\Delta \sigma = 0.5 (\Delta(\Delta P) r + \Delta P \Delta r) \approx 1.14 \text{ мН/м}$$

Таблица 1: Измерение $\sigma(t)$

$t, ^\circ \text{C}$	$H, \text{ мм}$	$P, \text{ Па}$	$\rho_{\text{вода}}, \text{ кг/м}^3$	$\rho g h, \text{ Па}$	$\Delta P, \text{ Па}$	$\sigma, \text{ мН/м}$
30.0	179	351.2	995.6	97.7	253.5	71.87 ± 1.17
40.0	176	345.3	992.2	97.4	247.9	70.28 ± 1.15
45.0	174	341.4	990.2	97.2	244.2	69.23 ± 1.14
50.0	173	339.4	988.0	97.0	242.4	68.72 ± 1.13
60.0	169	331.6	983.2	96.5	235.1	66.65 ± 1.11

7. По графику найдём температурный коэффициент $\frac{d\sigma}{dT} = -0.17 \pm 0.07 \text{ мН/м}^\circ \text{C}$. Для нахождения погрешности проведём прямую МНК (красный цвет) и крайние варианты (серый цвет).

$$k_{\max} \approx -0.10 \text{ мН/м}^\circ \text{C}, \quad k_{\min} = -0.25 \text{ мН/м}^\circ \text{C} \Rightarrow \Delta \left(\frac{d\sigma}{dT} \right) = \frac{|k_{\max} - k_{\min}|}{2} = 0.7 \text{ мН/м}^\circ \text{C}$$

Несмотря на сильную погрешность результата, он идеально совпадает с табличным $\frac{d\sigma^*}{dT} = -0.17 \text{ мН/м}^\circ \text{C}$

Таблица 2: Таблица теоретической зависимости плотности ρ , $\text{кг}/\text{м}^3$ от температуры t , $^{\circ}\text{C}$ воды и спирта

t , $^{\circ}\text{C}$	$\rho_{\text{вода}}$, $\text{кг}/\text{м}^3$	$\rho_{\text{спирт}}$, $\text{кг}/\text{м}^3$	σ^* , $\text{мН}/\text{м}$
30	995.6	781.0	71.20
40	992.2	772.2	69.60
45	990.2	767.8	68.78
50	988.0	763.3	67.94
60	983.2	754.1	66.24

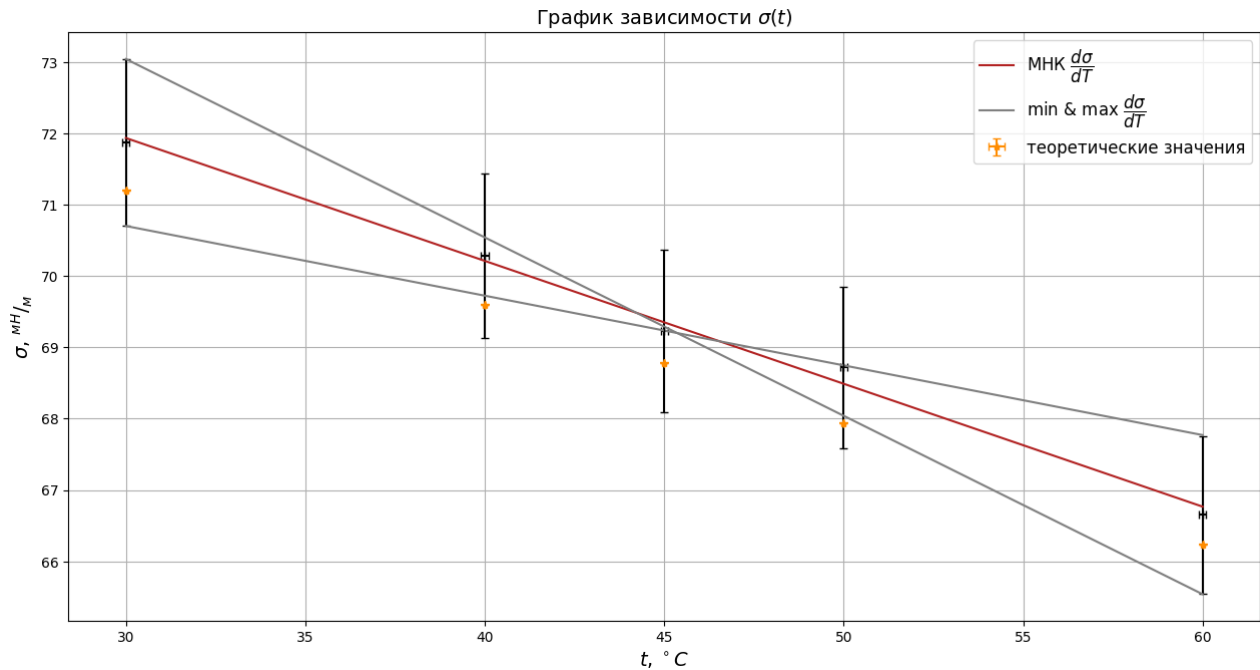


Рис. 2: График №1

8. Построим теперь график теплоты образования единицы поверхности жидкости от температуры $q = -T \frac{d\sigma}{dT}$. (График №2).

9. И график поверхностной энергии U единицы площади F : $\frac{U}{F} = (\sigma - T \frac{d\sigma}{dT})$. (График №3).

3. Вывод

В интервале температур от 30°C до 60°C зависимость $\sigma = \sigma(T)$ является линейной с коэффициентом наклона $\frac{d\sigma}{dT} = -0.17 \pm 0.07 \text{ мН}/\text{м}^{\circ}\text{C}$. Стоит отметить, что наш результат в пределах погрешности совпадает с табличным значением $\frac{d\sigma}{dT} \approx -0.16 \text{ мН}/\text{м}^{\circ}\text{C}$.

Теплоты образования единицы поверхности жидкости $q = q(T)$ линейно зависит от температуры на исследуемом интервале температур.

Внутренняя энергия поверхности $\frac{U}{F}$ не зависит от температуры и есть константа $U = 77$
 $\text{мДж} / \text{м}^2$.

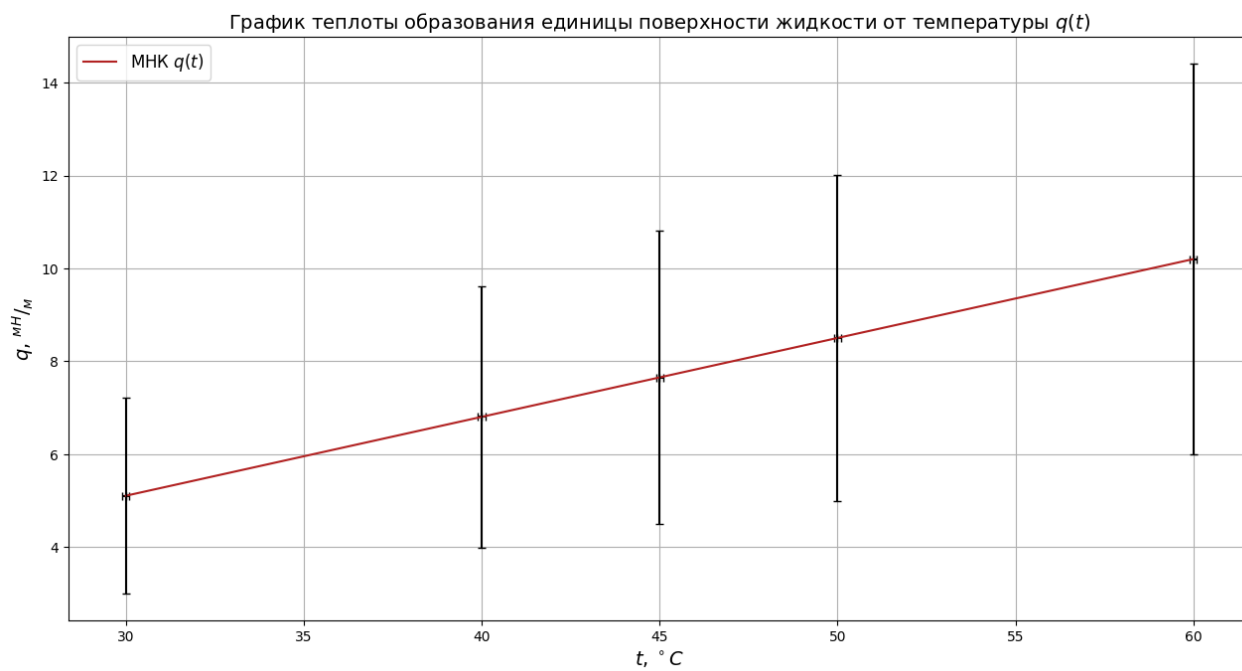


Рис. 3: График №2

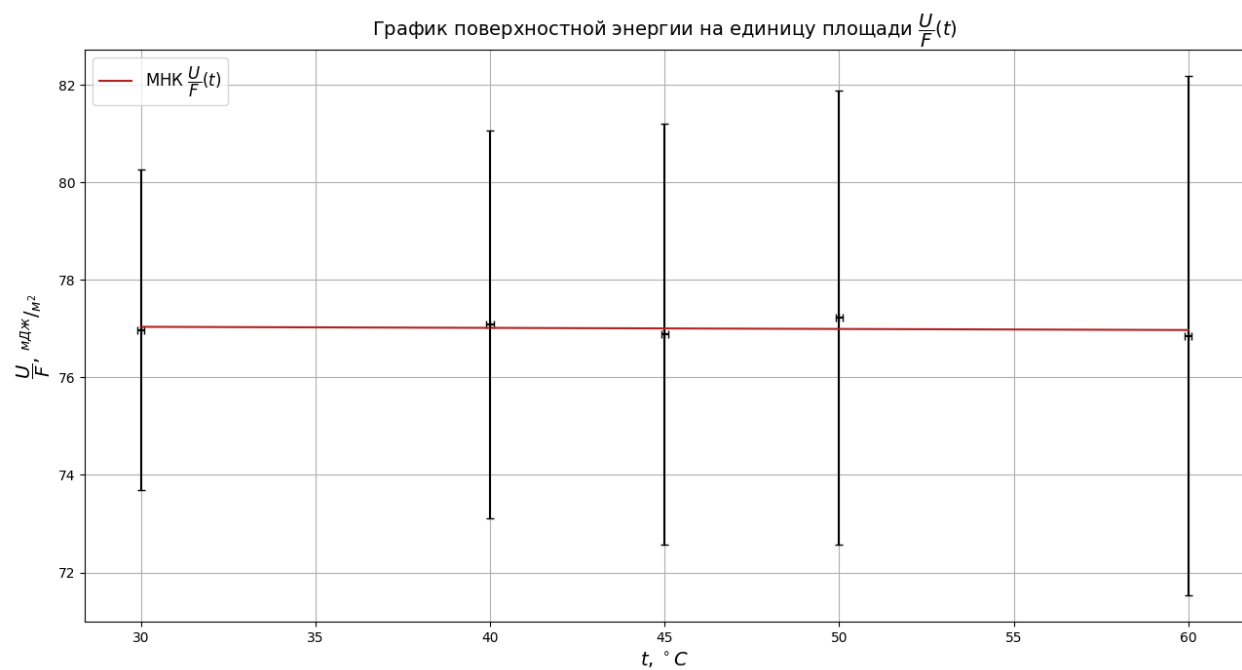


Рис. 4: График №3