

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Физтех-школа электроники, фотоники и молекулярной физики

Лабораторная работа 2.5.1
Измерение коэффициента поверхностного
натяжения жидкости

Салтыкова Дарья

Б04-105

1 Введение

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.

Оборудование: прибор Ребиндера с термостатом и микроманометром; исследуемые жидкости; стаканы.

2 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:

$$\Delta P = P_{\text{внутри}} - P_{\text{снаружи}} = \frac{2\sigma}{r},$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения, $P_{\text{внутри}}$ и $P_{\text{снаружи}}$ – 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.

3 Экспериментальная установка

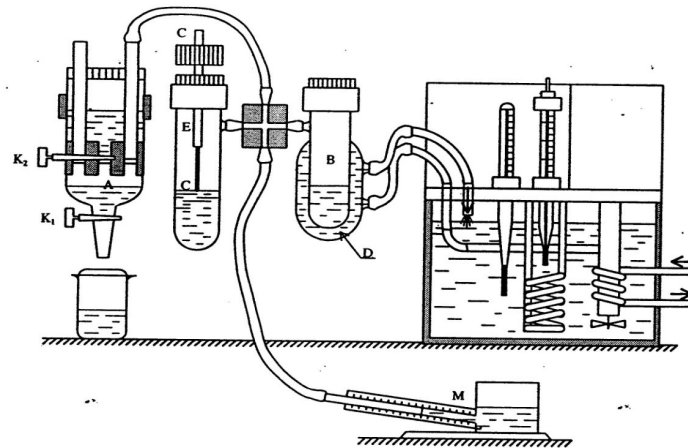


Рис. 1: Схема установки для измерения температурной зависимости коэффициента поверхностного натяжения.

Исследуемая жидкость (дистиллированная вода) наливается в сосуд (колбу) В (Рис.1). 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 разрежения воздуха в колбе с иглой пузырьки воздуха начинают пробулькивать через жидкость. Поверхностное натяжение можно определить по величине разрежения ΔP , необходимого для прохождения пузырьков (при известном радиусе иглы).

Разряжение в системе создается с помощью аспиратора A . 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 B и C , соединённых трубками с нижней полостью аспиратора, создается такое же пониженное давление. Разность давлений в полостях с разряженным воздухом и атмосферой измеряется спиртовым микроманометром.

Для стабилизации температуры исследуемой жидкости через рубашку D колбы B 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. Замечание. Чувствительность микроманометра высока, поэтому правильность его работы существенно зависит от правильности эксплуатации прибора. Все изменения в установке необходимо проводить, предварительно поставив переключатель микроманометра на атмосферу.

В частности подобную же операцию необходимо сделать и при заполнении водой аспиратора A . В противном случае при заполнении аспиратора водой давление воздуха в системе повышается, спирт из трубки микроманометра выдавливается, в узлах соединений микроманометра образуются воздушные пузыри. Наличие этих пузырей приводит к полному нарушению калибровки манометра и невозможности измерений.

4 Ход работы

1. Проверим герметичность установки. Для этого заполним аспиратор водой. Чистую сухую иглу установим в сосуд со спиртом так, чтобы кончик иглы лишь касался поверхности спирта. Плотнo закроем обе колбы B и E пробками. Откроем кран K_1 аспиратора и добьемся пробукливания пузырьков воздуха в колбе. Замерим показания микроманометра. Закроем кран K_1 . Наблюдаем за показаниями манометра: столбик спирта в манометре неподвижен - течь в установке отсутствует.

2. Проведем измерения для спирта. Подберем частоту падения капель из аспиратора так, чтобы максимальное давление манометра не зависело от этой частоты (примерно 1 капля в 5 секунд). Измерим максимальное давление $\Delta P_{\text{спирта}}$ при пробукливании пузырьков воздуха через спирт.

№	1	2	3	4	5
$\Delta P_{\text{спирта}}, \text{ мм вод ст}$	42	43	42	42	43
$\Delta P_{\text{спирта}}, \text{ Па}$	82,4	84,3	82,4	82,4	84,3
$\langle \Delta P_{\text{спирта}} \rangle, \text{ Па}$	82,8				
$\sigma_P, \text{ Па}$	2,0				

Случайную погрешность измерений оценим по формуле

$$\sigma_P^{\text{случ}} = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{k=1}^N (\Delta P_{\text{спирта}_k} - \langle \Delta P_{\text{спирта}} \rangle)^2} \approx 0,5 \text{ Па.}$$

Будем считать, что систематическая погрешность измерения составила 1 мм вод ст, т. е. $\sigma_P^{\text{сист}} \approx 1,9 \text{ Па}$.

Полная погрешность измерений определяется по формуле:

$$\sigma_P = \sqrt{(\sigma_P^{\text{сист}})^2 + (\sigma_P^{\text{случ}})^2} \approx 2,0 \text{ Па.}$$

Итого $\Delta P_{\text{спирта}} = (82,8 \pm 2,0) \text{ Па}$, ($\varepsilon_{\Delta P_{\text{спирта}}} = 2,4\%$).

3. Вытащим иглу, просушим ее и измерим микроскопом ее диаметр:

№	1	2	3	4	5
$d, \text{ мм}$	1	0,9	0,9	0,8	0,9
$\langle d \rangle, \text{ мм}$	0,9				
$\sigma_d, \text{ мм}$	0,06				

Случайную погрешность измерений оценим по формуле

$$\sigma_d^{\text{случ}} = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{k=1}^N (d_k - \langle d \rangle)^2} \approx 0,03 \text{ мм.}$$

$$\sigma_d^{\text{сист}} \approx 0,05 \text{ мм}$$

$$\sigma_d = \sqrt{(\sigma_d^{\text{сист}})^2 + (\sigma_d^{\text{случ}})^2} \approx 0,06 \text{ мм.}$$

Получаем $d = (0,9 \pm 0,06) \text{ мм}$, ($\varepsilon_d = 6,6\%$).

Из табличного значения коэффициента поверхностного натяжения спирта $\sigma = 22,4 \text{ мН/м}$ получим:

$$d = \frac{4\sigma}{\Delta P} = 1,08 \text{ мм}$$

$$\sigma_d = d\varepsilon_{\Delta P} \approx 0,03 \text{ мм.}$$

Получаем $d = (1,08 \pm 0,03) \text{ мм}$, ($\varepsilon_d = 2,7\%$).

Таким образом, в пределах погрешности диаметры иглы, измеренные разными способами, совпадают.

4. Перенесем предварительно промытую и просушенную от спирта иглу в колбу с дистиллированной водой. Измерим максимальное давление P_1 при пробулькивании пузырьков, когда игла лишь касается поверхности воды.

№	1	2	3	4	5
P_1 , мм вод ст	133	133	132	133	134
P_1 , Па	261	261	259	261	263
$\langle P_1 \rangle$, Па	261				
σ_{P_1} , Па	2,00				

Измерим расстояние между верхним концом иглы и неподвижной частью прибора h_1 .

№	1	2	3	4	5
h_1 , мм	48	47	48	47	47
$\langle h_1 \rangle$, мм	47,40				
σ_{h_1} , мм	1,03				

Утопим иглу до предела. Измерим максимальное давление в пузырьках P_2 .

№	1	2	3	4	5
P_2 , мм вод ст	210	208	209	209	208
P_2 , Па	412	408	410	410	408
$\langle P_2 \rangle$, Па	409,6				
σ_{P_2} , Па	2,0				

Измерим h_2 .

№	1	2	3	4	5
h_2 , мм	64	65	66	65	65
$\langle h_2 \rangle$, мм	65				
σ_{h_2} , мм	1				

По полученным данным определяем

$$\Delta P = P_2 - P_1 = 148,6 \text{ Па}$$

$$\sigma_{\Delta P} = \sqrt{\sigma_{P_1}^2 + \sigma_{P_2}^2} \approx 2,8 \text{ Па}, (\varepsilon_{\Delta P} = 0,02 \text{ Па})$$

$$\Delta h = h_1 - h_2 = 17,6 \text{ мм}$$

$$\sigma_{\Delta h} = \sqrt{\sigma_{h_1}^2 + \sigma_{h_2}^2} \approx 1,4 \text{ мм}$$

Получим $\Delta h = (17,6 \pm 1,4) \text{ мм}$, $(\varepsilon_{\Delta h} = 7,9\%)$.

По полученному значению ΔP вычислим Δh :

$$\Delta h = \frac{\Delta P}{\rho g} = 18,2 \text{ мм},$$

где $\rho = 0,8095 \text{ г/м}^3$ — плотность этилового спирта при данной температуре.

$$\sigma_{\Delta h} = \Delta h \varepsilon_{\Delta P} \approx 0,3 \text{ мм}$$

Итого $\Delta h = (18,2 \pm 0,3) \text{ мм}$, $(\varepsilon_{\Delta h} = 1,6\%)$.

Таким образом, в пределах погрешности Δh , вычисленные прямо и косвенно, совпадают.

5. Снимем температурную зависимость $\sigma(T)$ дистиллированной воды. При измерении давления будем делать поправку на добавочное давление со стороны столба жидкости, полученную в предыдущем пункте: $\Delta P = (148,6 \pm 0,02)$ Па.

$T, ^\circ\text{C}$	24	30	35	40	45	50	55	60
$P', \text{мм вод ст}$ (без учета ΔP)	210	207	203	200	199	198	197	194
	208	206	203	200	200	198	197	195
	209	207	202	200	199	198	197	195
	209	207	203	200	199	198	196	196
	208	206	203	199	199	198	197	196
$\langle P \rangle, \text{Па}$	261	256	249	244	242	241	238	234
$\sigma_P, \text{Па}$	2,0	2,0	1,9	1,9	1,9	0	1,9	2,1
$\sigma, \text{мН/м}$	70,5	69,2	67,2	65,8	65,3	65,1	64,3	63,2
$\sigma_\sigma, \text{мН/м}$	1,5	1,5	1,4	1,4	1,4	1,5	1,5	1,4

Вычислим коэффициент поверхностного натяжения для каждой из температур по формуле

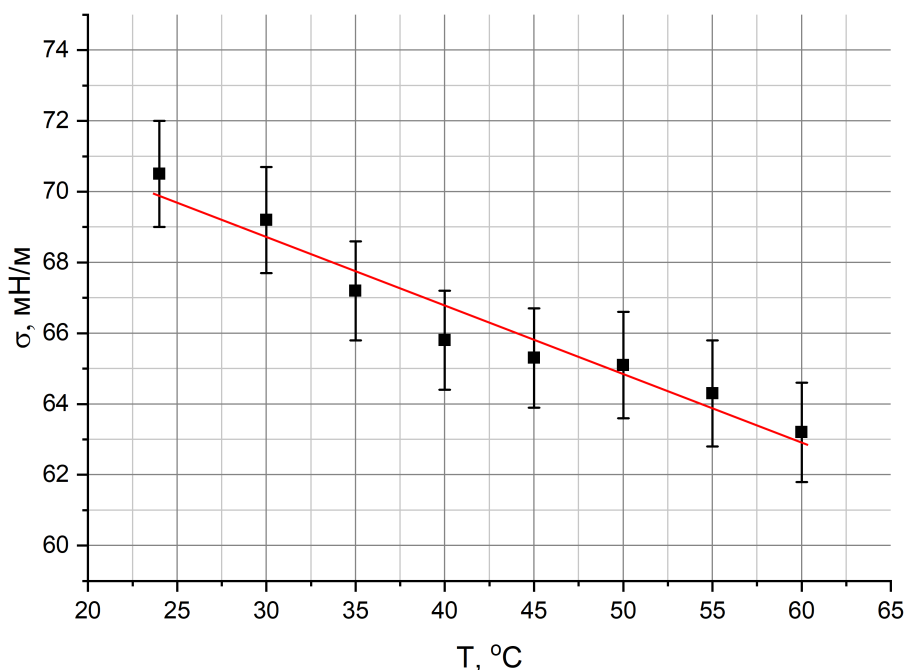
$$\sigma = \frac{Pd}{4},$$

где d – диаметр иглы.

Погрешность вычисляется по следующей формуле:

$$\sigma_\sigma = \sigma \sqrt{\varepsilon_P^2 + \varepsilon_d^2}.$$

Полученную зависимость нанесем на график.



Вычислим коэффициенты аппроксимирующей прямой $\sigma = kT + b$, где $k = \frac{d\sigma}{dT}$, используя метод наименьших квадратов:

$$k = \frac{\langle T\sigma \rangle - \langle T \rangle \langle \sigma \rangle}{\langle T^2 \rangle - \langle T \rangle^2} \approx -0,194 \frac{\text{мН}}{\text{м} \cdot \text{К}},$$

$$b = \langle \sigma \rangle - k \langle T \rangle \approx 74,5 \frac{\text{мН}}{\text{м}}.$$

Случайные погрешности оценим по следующим формулам:

$$\sigma_k^{\text{случ}} = \sqrt{\frac{1}{N-2} \left(\frac{\langle (\sigma - \langle \sigma \rangle)^2 \rangle}{\langle (T - \langle T \rangle)^2 \rangle} \right) - k^2} \approx 0,008 \frac{\text{мН}}{\text{м} \cdot \text{К}},$$

$$\sigma_b^{\text{случ}} = \sigma_k^{\text{случ}} \sqrt{\langle T^2 \rangle - \langle T \rangle^2} \approx 1,6 \frac{\text{мН}}{\text{м}}.$$

Систематические погрешности оценим по следующим формулам:

$$\sigma_k^{\text{сист}} = |k| \sqrt{\varepsilon_T^2 + \varepsilon_\sigma^2} \approx 0,004 \frac{\text{мН}}{\text{м} \cdot \text{К}},$$

$$\sigma_b^{\text{сист}} = |b| \sqrt{\varepsilon_T^2 + \varepsilon_\sigma^2} \approx 3,2 \frac{\text{мН}}{\text{м}}.$$

Тогда полные погрешности составляют:

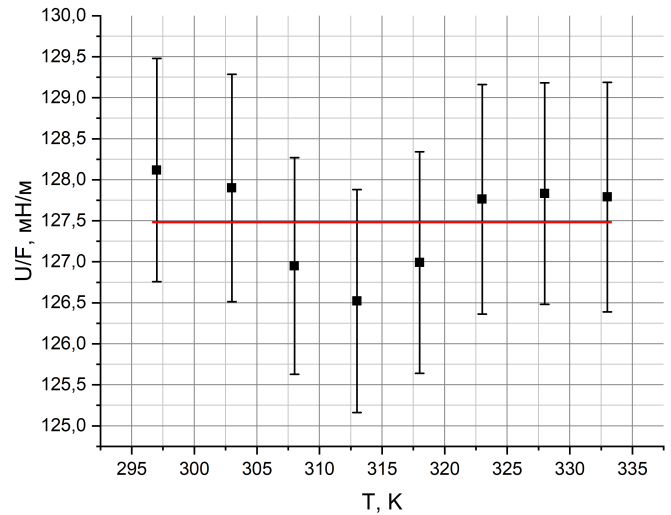
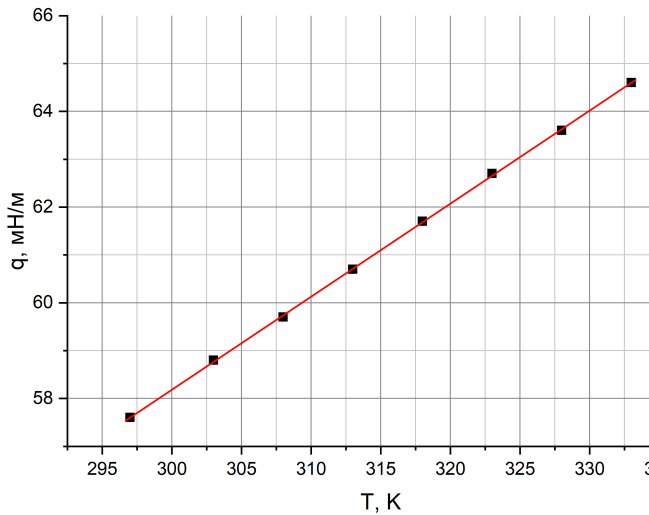
$$\sigma_k = \sqrt{(\sigma_k^{\text{сист}})^2 + (\sigma_k^{\text{случ}})^2} \approx 0,009 \frac{\text{мН}}{\text{м} \cdot \text{К}},$$

$$\sigma_b = \sqrt{(\sigma_b^{\text{сист}})^2 + (\sigma_b^{\text{случ}})^2} \approx 3,6 \frac{\text{мН}}{\text{м}}.$$

Окончательно:

$$k = \frac{d\sigma}{dT} = (-0,194 \pm 0,009) \frac{\text{мН}}{\text{м} \cdot \text{К}}, \quad (\varepsilon = 4,6\%); \quad b = (74,5 \pm 3,6) \frac{\text{мН}}{\text{м}}, \quad (\varepsilon = 4,8\%).$$

Построим графики зависимости от температуры теплоты образования единицы поверхности жидкости $q = -T \frac{d\sigma}{dT}$ и поверхностной энергии U единицы площади F : $\frac{U}{F} = \left(\sigma - T \frac{d\sigma}{dT} \right)$.



5 Вывод

В ходе работы:

- Был получен диаметр иглы двумя способами: с использованием табличного значения коэффициента поверхностного натяжения спирта ($d = (1,08 \pm 0,03)$ мм, $(\varepsilon = 2,7\%)$) и с помощью микроскопа ($d = (0,90 \pm 0,06)$ мм, $(\varepsilon = 6,6\%)$). В пределах погрешности результаты совпадают.
- Был экспериментально получен коэффициент поверхностного натяжения воды при различных её температурах, построен график зависимости коэффициента поверхностного натяжения воды от температуры (коэффициент пропорциональности линейной зависимости $k = \frac{d\sigma}{dT} = (-0,194 \pm 0,009) \frac{\text{мН}}{\text{м} \cdot \text{К}}$, $(\varepsilon = 4,6\%)$).
- Были построены графики зависимости от температуры теплоты образования единицы поверхности жидкости и поверхностной энергии единицы площади.

Полученные значения коэффициента поверхностного натяжения воды почти совпадают с табличными данными. Незначительную неточность можно объяснить несовершенной чистотой дистиллята.