

Отчет по лабораторной работе №2.5.1
Измерение коэффициента поверхностного
натяжения жидкости

Бичина Марина группа Б04-005 1 курса ФЭФМ

15.04.2021

1 Аннотация

Цель работы:

1. Измерить температурную зависимость коэффициента поверхностного натяжения дистиллированной воды с использованием известного коэффициента поверхностного натяжения спирта;
2. Определить полную поверхностную энергию и теплоту, необходимые для изотермического образования единицы поверхности жидкости при различной температуре

Оборудование:

1. прибор Ребиндера с термостатом и микроманометром
2. исследуемые жидкости
3. стаканы

2 Теоретическая часть

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:

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

где

1. σ – коэффициент поверхностного натяжения
2. $P_{\text{внутри}}, P_{\text{снаружи}}$ – давление внутри пузырька и снаружи
3. 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.

2.1 Описание установки:

Исследуемая жидкость (дистиллированная вода) наливается в сосуд (колбу) В (см рисунок 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 (по формуле 1), необходимого для прохождения пузырьков (при известном радиусе иглы).

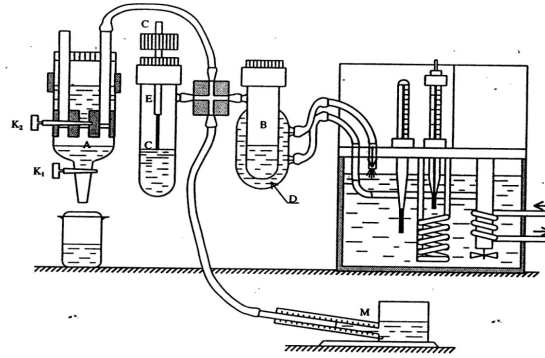


Рис. 1: Схема установки для измерения температурной зависимости коэффициента поверхностного натяжения

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. Полное давление, измеренное при этом микроманометром, равно $P = \Delta P + \rho gh$

2.2 Контрольные вопросы:

1. **Если пропускать несколько пузырьков в секунду, манометр показывает практически постоянное давление. Почему бы не измерять его?**
Если пропускать несколько пузырьков в секунду, то на манометре будет показано разряжение, при котором в равновесие приходит количество вещества, приходящее с пузырьками, и скорость создания разряжения. Для того, чтобы пузырьки быстро образовывались друг за другом, необходимо, чтобы воздух, приносимых одним пузырьком не уменьшал разряжение до уровня, недостаточного для создания пузырька, значит в этот момент будет создано разряжение большее, чем необходимо для создание одного пузырька
2. **Почему следует измерять именно максимальное давление?**
При максимальном давлении идет образование пузырька, поскольку при меньших давлениях не преодолевается разность между гидростатическим давлением и лапласовым. Далее энергия, которую пузырек несет в себе рассеивается, давление падает и мы не можем в таком случае точно установить коэффициент поверхностного натяжения.
3. **Почему погружение иглы уменьшает влияние теплового расширения?**
Гидростатическое давление ρgh от температуры практически не зависит, поскольку подъем уровня жидкости компенсируется уменьшением ее плотности (из закона сохранения массы)

4. Почему пузырьки не должны касаться дна?

В этом случае:

- а) происходят деформации пузырька, которые усложняют расчеты (например, придется учитывать коэффициент смачивания стекла водой)
- б) придется учитывать трение, которое может возникнуть между стенками сосуда и оболочкой пузырька

5. Можно ли не зная глубины погружения иглы, определить σ , измеряя максимальное и минимальное давление при проталкивании пузырька?

6. Пользуясь полученными результатами, оценить критическую температуру воды.

Критическую температуру можно рассчитать по формуле:

$$T_{kr} = T_1 - \frac{\sigma}{\frac{d\sigma}{dT}} = 294 + \frac{62,01}{0,09} = 980 \text{ K}$$

(На основании наших экспериментальных данных)

7. Позволяет ли проведенный эксперимент заметить нелинейность зависимости $\sigma(T)$?

Нет, в данном диапазоне температур данные хорошо аппроксимируются прямой $\sigma = a + bT$, поскольку температура довольно далека от критического значения

8. Какие погрешности преобладают в эксперименте: случайные или систематические?

Случайные погрешности могут играть роль только в случае, если у нас всего 3 измерения. Если брать хотя бы 5 измерений, роль случайных погрешностей становится совсем невелика, поскольку мы не учитываем:

- а) неидеальность формы пузырька
- б) тепловое расширение иглы
- в) эффекты, связанные с теплопроводностью трубки, из-за которых температура на конце трубки заметно ниже, чем в глубине жидкости
- г) неполное тепловое равновесие воды и термостата

А значения почти не отклонялись друг от друга, поэтому случайная погрешность невелика

9. Какая величина должна стоять в формуле для высоты поднятия воды в стеклянном капилляре: $\sigma_{\text{вода - воздух}}$ или $\sigma_{\text{вода - стекло}}$?

$$h = \frac{2\sigma_{\text{вода - воздух}} \cos\theta}{r_0(\rho - \rho_0)g}$$

где:

ρ – плотность жидкости

ρ_0 – плотность пара над жидкостью

r_0 – радиус капилляра

3 Ход работы:

1. Чистую сухую иглу установим в сосуд со спиртом так, чтобы кончик иглы лишь касался поверхности спирта. Плотно закроем обе колбы В и Е пробками. Откроем кран K_1 аспиратора и добьемся пробулькивания пузырьков воздуха в колбе.
2. Начнем измерения. Откроем кран K_1 . Подберем частоту падения капель из аспиратора так, чтобы максимальное давление манометра не зависело от этой частоты (не чаще, чем 1 капля в 5 секунд)
3. Измерим максимальное давление $P_{\text{спирт}}$ при пробулькивании пузырьков воздуха через спирт. Перевод в паскали осуществим позже (таблица 1)

N	1	2	3
$P_{\text{спирт}}$	44	45	44

Осуществим перевод в паскали по формуле:

$$P = C \cdot h \cdot \frac{\gamma_{\text{спирт залитый}}}{\gamma_{\text{спирт приборный}}} \cdot K \cdot 9,80665 \quad (2)$$

где:

- 1) P - давление в Па
- 2) C - поправочный множитель, $C = 1,00$
- 3) h - отсчет по шкале
- 4) K - постоянная угла наклона, $K = 0,2$
- 5) $\gamma_{\text{спирт залитый}}$ - плотность спирта, залитого в прибор (из таблицы) $\gamma_{\text{спирт залитый}} = 0,80798 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$
- 6) $\gamma_{\text{спирт приборный}}$ - плотность спирта, указанная на приборе, $\gamma_{\text{спирт приборный}} = 0,80950 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$

$$P_1 = 1,00 \cdot 44 \cdot \frac{0,80798}{0,80950} \cdot 0,2 \cdot 9,80665 = 86,1365 \text{ Па}$$

$$P_2 = 1,00 \cdot 45 \cdot \frac{0,80798}{0,80950} \cdot 0,2 \cdot 9,80665 = 88,0941 \text{ Па}$$

$$P_{\text{спирт}} = \frac{\Sigma P}{N} = \frac{2 \cdot 86,1365 + 88,0941}{3} = 86,7890 \text{ Па} \approx 86,79 \text{ Па}$$

Далее перевод в Паскали будем осуществлять по формуле $P_{\text{Па}} = kP$, где $k = C \cdot \frac{\gamma_{\text{спирт залитый}}}{\gamma_{\text{спирт приборный}}} \cdot K \cdot 9,80665 = 1,9583$

По разбросу результатов оценим случайную погрешность измерения.

$$\sigma_{\text{случР}} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (x_i - x_{\text{ср}})^2}$$

$$\sigma_{\text{случР}} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot [2 \cdot (86,14 - 86,79)^2 + (88,9 - 86,79)^2]} = 1,6274 \approx 1,63 \text{ Па}$$

$$\sigma_{\text{систР}} = k\Delta h = 1,9583 \cdot 0,5 = 0,9791 \approx 0,98 \text{ Па}$$

Тогда:

$$\sigma_{\text{полнР}} = \sqrt{\sigma_{\text{систР}}^2 + \sigma_{\text{случР}}^2} = \sqrt{1,63^2 + 0,98^2} = 1,9 \text{ Па}$$

$$\varepsilon_P = \frac{\sigma_{\text{полнР}}}{P} = \frac{1,9}{86,79} \approx 0,02$$

Пользуясь табличным значением коэффициента поверхностного натяжения спирта, определим по формуле (1) диаметр иглы. При комнатной температуре $\sigma = 22,8 \text{ мН/м}$

$$d = \frac{4\sigma}{\Delta P}; \quad d = \frac{4 \cdot 22,8}{86,79} = 1,0508 \text{ мм} \approx 1,05 \text{ мм} \quad (3)$$

Рассчитаем погрешность по формуле

$$\sigma_d = d \cdot \varepsilon_P; \quad \sigma_d = 1,05 \cdot 0,02 \approx 0,02 \text{ мм} \quad (4)$$

Окончательно:

$$d = 1,05 \pm 0,02 \text{ мм}$$

Сравним полученный результат с диаметром иглы, измеренным по микроскопу.

$$d = 0,92 \pm 0,25 \text{ мм}$$

4. Перенесем предварительно промытую и просушенную от спирта иглу в колбу с дистиллированной водой. Измерим максимальное давление P_1 при пробульвании пузырьков, когда игла лишь касается поверхности воды. Аспиратор должен быть предварительно заполнен водой почти доверху.

Отрегулируем скорость поднятия уровня спирта в манометре и сохраним её в течение всех экспериментов.

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

$$h_1 = 19 \text{ мм}$$

5. Утопим иглу до предела. в данном положении:

$$h_2 = 6 \text{ мм}$$

Измерим максимальное давление в пузырьках P_2 :

По разности давлений определим глубину погружения Δh иглы

$$\Delta P = k(P_2 - P_1) = 1,9583(183 - 122) = 1,9583 \cdot 61 \approx 119,46 \text{ Па}$$

$$\Delta h = \frac{\Delta P}{\rho g} = \frac{119,46}{1000 \cdot 9,81} = 12,2 \text{ мм}$$

Погрешность:

$$\sigma_h = h \cdot \varepsilon_p = 12,2 \cdot 0,02 = 0,244 \approx 0,24$$

$$\Delta h = 12,20 \pm 0,24$$

Сравним ее с измеренным значением $\Delta h = h_1 - h_2 = 12 \text{ мм}$. Тогда значение $\rho g h = 1000 \cdot 9,81 \cdot 12 \cdot 10^{-3} = 117,72 \text{ Па}$

6. Занесем значения давления для различных температур в таблицу 1:

$T_1 = 30,1^0 c$	P_1/k	183	182	183	183	183	183
$T_2 = 35^0 c$	P_2/k	183	183	183	183	183	183
$T_3 = 40^0 c$	P_3/k	181	181	182	182	182	182
$T_4 = 45^0 c$	P_4/k	181	181	181	181	180	181
$T_5 = 50^0 c$	P_5/k	180	180	180	180	180	180
$T_6 = 55^0 c$	P_6/k	179	179	179	179	178	179
$T_7 = 60^0 c$	P_7/k	178	178	178	178	178	178

Таблица 1: снятые показания

Переведем в Паскали и вычтем значение $\rho g \Delta h$:

$P_1 - \rho g \Delta h$ Па	240,65	238,69	240,65	240,65	240,65	240,65
$P_2 - \rho g \Delta h$ Па	240,65	240,65	240,65	240,65	240,65	240,65
$P_3 - \rho g \Delta h$ Па	236,73	236,73	238,69	238,69	238,69	238,69
$P_4 - \rho g \Delta h$ Па	236,73	236,73	236,73	236,73	234,77	236,73
$P_5 - \rho g \Delta h$ Па	234,77	234,77	234,77	234,77	234,77	234,77
$P_6 - \rho g \Delta h$ Па	232,82	232,82	232,82	232,82	230,86	232,82
$P_7 - \rho g \Delta h$ Па	230,86	230,86	230,86	230,86	230,86	230,86

Средние значения давлений для каждой из температур запишем в таблицу 2:

$T, ^0 c$	30,1	35	40	45	50	55	60
$\langle P \rangle$, Па	240,32	240,65	238,04	236,40	234,77	232,49	230,86

Таблица 2: зависимость среднего давления от температуры

По формуле (1) найдем $\sigma = \frac{d}{4} \cdot \langle \Delta P \rangle$.

Результаты занесем в таблицу 3:

$T, ^0 c$	30,1	35	40	45	50	55	60
σ , мН/м	63,08	63,17	62,48	62,06	61,63	61,03	60,60

Таблица 3: Зависимость коэффициента поверхностного натяжения от температуры

Расчитаем погрешность измерений для

$$\sigma_\sigma = \sigma \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_p}{P}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_d}{d}\right)^2} = 63,08 \cdot \sqrt{\frac{0,02^2}{230,86^2} + \frac{0,02^2}{1,05^2}} = 0,02 \cdot 63,08 = 1,26$$

7. Построим график зависимости $\sigma(T)$, пользуясь методом наименьших квадратов $y = a + bx$

$$b = \frac{\langle xy \rangle - \langle x \rangle \langle y \rangle}{\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2} \quad a = \langle y \rangle - b \cdot \langle x \rangle \quad (5)$$

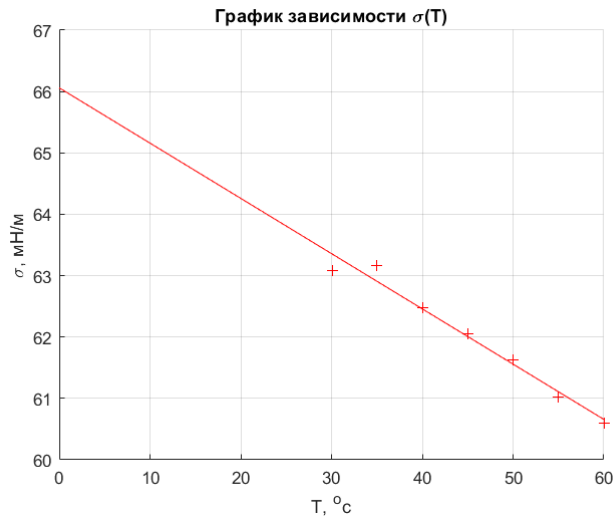
Погрешность в этом случае можно найти по формуле:

$$\sigma_b \approx \frac{1}{\sqrt{N}} \sqrt{\frac{\langle y^2 \rangle - \langle y \rangle^2}{\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2} - b^2}; \quad \sigma_a \approx \sigma_b \sqrt{\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2} \quad (6)$$

Для графика $\sigma(T)$ $x \rightarrow T$, $y \rightarrow \sigma$

$\langle T \rangle$	$\langle \sigma \rangle$	$\langle T^2 \rangle$	$\langle \sigma^2 \rangle$	$\langle T\sigma \rangle$
45,01	62,01	2126	3846	2782

$$b = \frac{2782 - 45,01 \cdot 62,01}{2126 - 45,01^2} = -0,09 \quad a = 62,01 + 0,09 \cdot 45,01 = 66,06$$

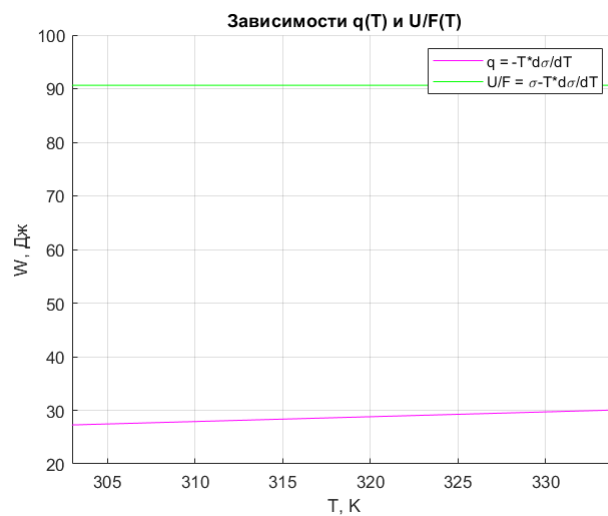


Константа b в данной задаче определяет температурный коэффициент $\frac{d\sigma}{dT}$,

$$\frac{d\sigma}{dT} = -0,09 \frac{\text{мН}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}$$

8. На другом графике построим зависимость от температуры

- 1) теплоты образования единицы поверхности жидкости $q = -T \cdot \frac{d\sigma}{dT}$
- 2) поверхностной энергии U единицы площади F : $\frac{U}{F} = \sigma - T \cdot \frac{d\sigma}{dT}$



4 Вывод:

1. Рассчитали диаметр иглы по формуле (1) и по известному коэффициенту поверхностного натяжения спирта

$$d = 1,05 \pm 0,02 \text{ мм}$$

2. Установили линейную зависимость коэффициента поверхностного натяжения от температуры в данном диапазоне температур с погрешностью $\varepsilon = 2\%$
3. Рассчитали температурных коэффициент

$$\frac{d\sigma}{dT} = -0,09 \frac{\text{мН}}{\text{м} \cdot \text{К}}$$

Табличное значение данного коэффициента равняется

$$\frac{d\sigma_T}{dT} = -0,17 \frac{\text{мН}}{\text{м} \cdot \text{К}}$$

Расхождение в $\approx 50\%$, вероятно, вызвано из-за того, что у нас не устанавливалось тепловое равновесие воды в термостате и воды, где происходил опыт. Также мы могли неточно рассчитать диаметр иглы или микроманометр был неисправен