

Московский физико-технический институт (МФТИ-Физтех)

Лабораторная работа 2.5.1:  
Измерение коэффициента поверхностного натяжения жидкости

Иванов Артём, Б05-409

19 мая 2025 г.

# 1 Аннотация

## Цель работы.

1. Измерение коэффициента поверхностного натяжения исследуемой жидкости при разных температурах.
2. Определение полной поверхностной энергии и теплоты, необходимой для изотермического образования единицы поверхности жидкости.

**Оборудование.** Прибор Ребиндера с термостатом; исследуемые жидкости; стаканы.

## 2 Теоретическая часть

Наличие поверхностного слоя приводит к различию давлений по разные стороны от искривлённой границы раздела двух сред. Для сферического пузырька внутри жидкости избыточное давление даётся формулой Лапласа (5.15):

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

Эта формула лежит в основе предлагаемого метода определения коэффициента поверхностного натяжения жидкости. Измеряется давление, необходимое для выталкивания в жидкость пузырька газа.

Таким образом, по формуле 1 можно найти коэффициент поверхностного натяжения по разности давлений.

**Термодинамика поверхностного натяжения.** Запишем первое начало термодинамики для пленки:

$$\delta Q = dU - \sigma d\Pi \quad (2)$$

Введем энтропию:

$$dU = TdS + \sigma d\Pi \quad (3)$$

Для свободной энергии:

$$dF = -SdT + \sigma d\Pi, \quad (4)$$

отсюда

$$S = - \left( \frac{\partial F}{\partial T} \right)_{\Pi}, \quad (5)$$

$$\sigma = - \left( \frac{\partial F}{\partial \Pi} \right)_T. \quad (6)$$

Проинтегрируем 6, считая  $F = 0$  при  $\Pi = 0$ :

$$F = \sigma \Pi \quad (7)$$

Подставим это в формулу 5:

$$S = -\Pi \frac{d\sigma}{dT} \quad (8)$$

Тогда формула 3 примет вид:

$$U = \left( \sigma - T \frac{d\sigma}{dT} \right) \Pi \quad (9)$$

Можно ввести теплоту образования поверхности на единицу площади

$$q = -T \frac{d\sigma}{dT} \quad (10)$$

### 3 Экспериментальная установка

Исследуемая жидкость (этиловый спирт) наливается в сосуд В. Дистиллированная вода наливается в сосуд Е. Сосуды закрыты пробками. Через пробку сосуда, в котором проводятся измерения, проходит полая металлическая игла С, нижний конец которой погружен в жидкость, а верхний открыт в атмосферу. Если другой сосуд герметично закрыт, то в сосуде с иглой создается разрежение, и пузырьки воздуха начинают пробулькивать через жидкость.

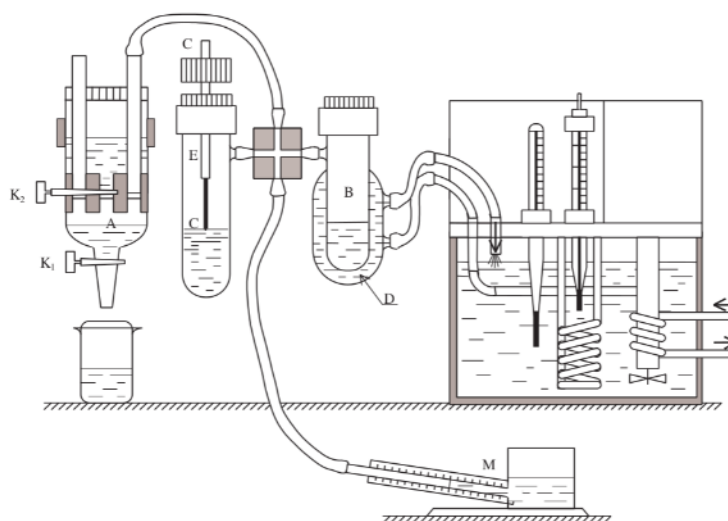


Рис. 1: Схема установки для измерения температурной зависимости коэффициента поверхностного натяжения

Для стабилизации температуры исследуемой жидкости через рубашку D 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. Это гидростатическое давление вычитается из падения лапласова давления вследствие уменьшения  $\sigma$ , и в опыте с анилином, например, наблюдаемый эффект меняет знак при высоте столба жидкости порядка пяти сантиметров.

Обе погрешности можно устранить, погрузив кончик трубки до самого дна. Полное давление, измеренное при этом микроманометром,  $P = \Delta P + \rho gh$ . Заметим, что  $\rho gh$  от температуры практически не зависит, так как подъём уровня жидкости компенсируется уменьшением её плотности (произведение  $\rho h$  определяется массой всей жидкости и поэтому постоянно). Величину  $\rho gh$  следует измерить экспериментально двумя методами. Во-первых, замерить величину  $\Delta P_1 = \Delta P'$ , когда кончик трубки только касается поверхности жидкости. Затем при этой же температуре опустить иглу до дна и замерять  $P_2 = \rho gh + \Delta P''$ . 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  $h_1$  и  $h_2$ . Это легко сделать, замеряя расстояние между верхним концом иглы и любой неподвижной частью прибора.

## 4 Ход работы

1. Убедимся в исправности установки.
2. Подберем частоту падения капель так, чтобы максимальное давление оставалось постоянным (примерно по 1 капле в 5 секунд).
3. Опустим иглу так, чтобы она коснулась поверхности спирта. Откроем кран К1 и измерим максимальное давление 3 раза. При этом погрешность считаем равной  $\Delta P = 1$  мм, а манометр установлен с угловым коэффициентом  $K = 0.2$ . Плотность спирта в манометре указана  $\rho_{\text{спирта}} = 809.5 \text{ кг/м}^3$ .

$N$	1	2	3
$P_{\text{спирта}}, \text{ мм}$	41	42	43

Таблица 1: Измерения давления при пробулькивании через спирт

Отсюда получим  $\langle P_{\text{спирта}} \rangle = 42 \text{ мм}$ ,  $\Delta P_{\text{спирта}} = \sigma_P^{\text{случ}} + \Delta P = 2 \text{ мм}$ .

4. Вычислим по полученному значению радиус иглы с помощью формулы 1, получим  $r = (0.68 \pm 0.02) \text{ мм}$ ,  $\varepsilon_r = 3\%$ .
5. При помощи микроскопа получим  $r = (0.53 \pm 0.03) \text{ мм}$ ,  $\varepsilon_r = 5\%$ .
6. Очевидно, что измерение радиуса через поверхностное натяжение спирта получилось неточным. Возможно, это связано с загрязнением иглы.
7. Достанем иглу из спирта, прочистим ее и вставим в воду. Сначала проведем измерения аналогично п. 3, получим  $P_1 = 113 \text{ мм}$  при  $h_1 = 60 \text{ мм}$ . Потом погрузим иглу до упора, получим давление  $P_2 = 186 \text{ мм}$  при  $h_2 = 46 \text{ мм}$ . Считаем  $\Delta h = 1 \text{ мм}$ .
8. Через разность давлений получим значение  $\Delta h = (12 \pm 1) \text{ мм}$ ,  $\varepsilon_h = 3\%$ . При помощи линейки добиваемся  $\Delta h = (14 \pm 2) \text{ мм}$ ,  $\varepsilon_h = 14\%$ . Как видно, в пределах погрешностей значения совпадают, при этом гораздо точнее метод измерения по разности давлений.
9. Включим термостат.

10. Измерим зависимость давления, которое показывает манометр, от температуры при нагревании термостатом. Данные занесем в таблицу 2.

$T, ^\circ\text{C}$	$P, \text{мм}$	$\sigma, \text{мН/м}$	$\Delta\sigma, \text{мН/м}$	$q, \text{мН/м}$	$\Delta q, \text{мН/м}$	$U/\Pi, \text{мН/м}$	$\Delta(U/\Pi), \text{мН/м}$
18.3	186	76.7	0.4	52.4	3.1	129.2	3.6
25.0	182	75.1	0.4	53.6	3.2	128.7	3.6
30.1	180	74.3	0.4	54.6	3.3	128.8	3.7
35.0	178	73.4	0.4	55.4	3.3	128.9	3.7
40.1	176	72.6	0.4	56.4	3.4	129.0	3.8
44.4	174	71.8	0.4	57.1	3.4	128.9	3.8
49.5	172	71.0	0.4	58.1	3.5	129.0	3.9
54.5	170	70.1	0.4	58.9	3.5	129.1	3.9
59.8	167	68.9	0.4	59.9	3.6	128.8	4.0

Таблица 2: Зависимости  $\sigma(T)$ ,  $q(T)$  и  $U/\Pi(T)$

11. Вычислим поверхностное натяжение  $\sigma(T)$  по формуле 1 теплоту образования единицы площади поверхности  $q(T)$  по формуле 10 и поверхностную энергию единицы площади  $U/\Pi(T)$  по формуле 9. Данные занесем в таблицу 2.

12. Построим на одном графике полученные зависимости (см. рис. 2).

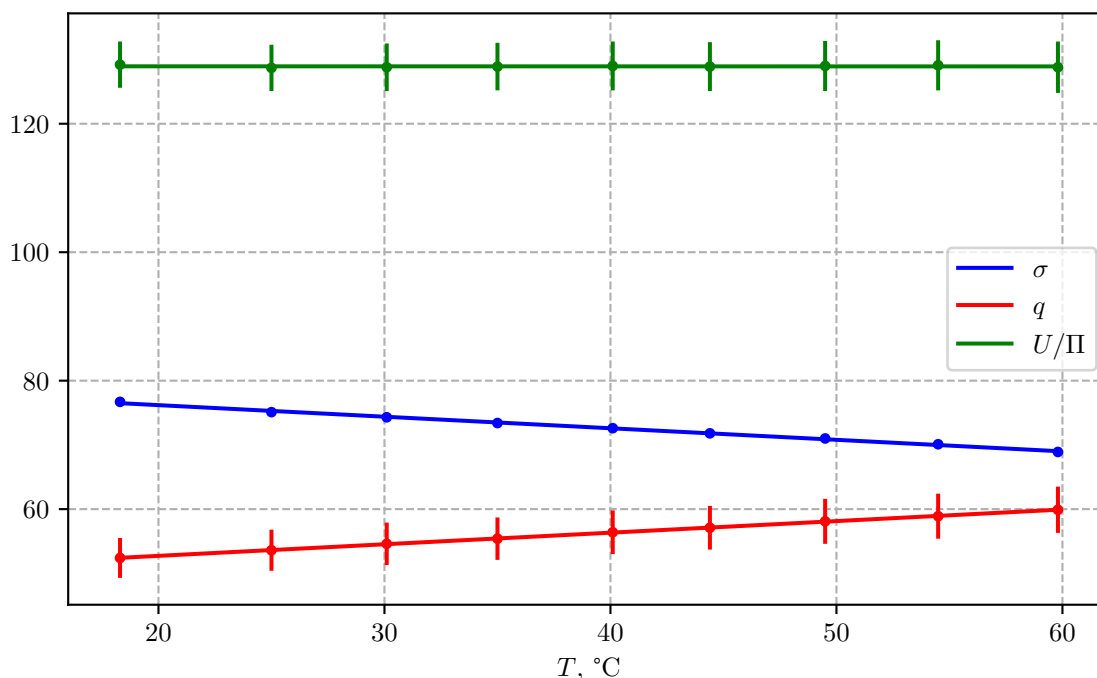


Рис. 2: Графики  $\sigma(T)$ ,  $q(T)$ ,  $U/\Pi(T)$

13. Видно, что точки  $\sigma(T)$  хорошо ложатся на прямую, так что имеет смысл провести линейную аппроксимацию всех представленных зависимостей. Угловые коэффициенты

и их погрешность считаем по формулам:

$$\frac{d\sigma}{dT} = \frac{\langle T\sigma \rangle}{\langle T^2 \rangle}, \quad (11)$$

$$\sigma_{d\sigma/dT}^{\text{случ}} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \left( \frac{\langle \sigma^2 \rangle}{\langle T^2 \rangle} - \left( \frac{d\sigma}{dT} \right)^2 \right)}. \quad (12)$$

14. Вычисленные по формулам 11 и 12 угловые коэффициенты и их погрешности представлены в таблице:

	$d\sigma/dT$	$dq/dT$	$d(U/\Pi)/dT$
Значение, мН/(м·К)	$-0.18 \pm 0.01$	$0.18 \pm 0.01$	$0.00 \pm 0.02$
$\varepsilon$ , %	3	6	

## 5 Вывод

В результате данной работы мы:

1. Зафиксировали эффект поверхностного натяжения.
2. Измерили радиус иглы 2 методами.
3. Получили зависимость коэффициента поверхностного натяжения  $\sigma(T)$  для воды в диапазоне от 20 до 60 °С, а также показали линейность зависимости на данном температурном диапазоне.
4. Вычислили зависимость теплоты образования на единицу площади  $q(T)$ .
5. Сложением получили  $U/\Pi(T)$ , доказали, что ее можно считать постоянной. Таким образом, внутренняя энергия единицы площади пленки не зависит от температуры.