

Московский физико-технический институт  
(государственный университет)

Лабораторная работа по общему курсу физики  
Термодинамика и молекулярная физика

### **2.5.1. Измерение поверхностного натяжения жидкости**

Глаз Роман Сергеевич  
Группа Б01-007

Долгопрудный  
2021

## Содержание

**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.

**Используемое оборудование:** прибор Ребиндера с термостатом и микроманометром; исследуемые жидкости; стаканы.

## 1. Теоретические сведения

Поверхностное натяжение имеет двойной физический смысл – энергетический (термодинамический) и силовой (механический). Энергетическое (термодинамическое) определение: поверхностное натяжение – это удельная работа увеличения поверхности при её растяжении при условии постоянства температуры. Силовое (механическое) определение: поверхностное натяжение – это сила, действующая на единицу длины линии, которая ограничивает поверхность жидкости

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  $\sigma$  – 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  $\Delta P$ , необходимое для выталкивания в жидкость пузырька воздуха.

## 2. Экспериментальная установка

Исследуемая жидкость (дистиллированная вода) наливается в сосуд (колбу) *B*. Тестовая жидкость (этиловый спирт) наливается в сосуд *E*. При измерениях колбы герметично закрываются пробками. Через одну из двух пробок проходит полая металлическая игла *C*. 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 пробулькивать через жидкость. Поверхностное натяжение можно определить по величине разряжения  $\Delta P$  (??), 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.

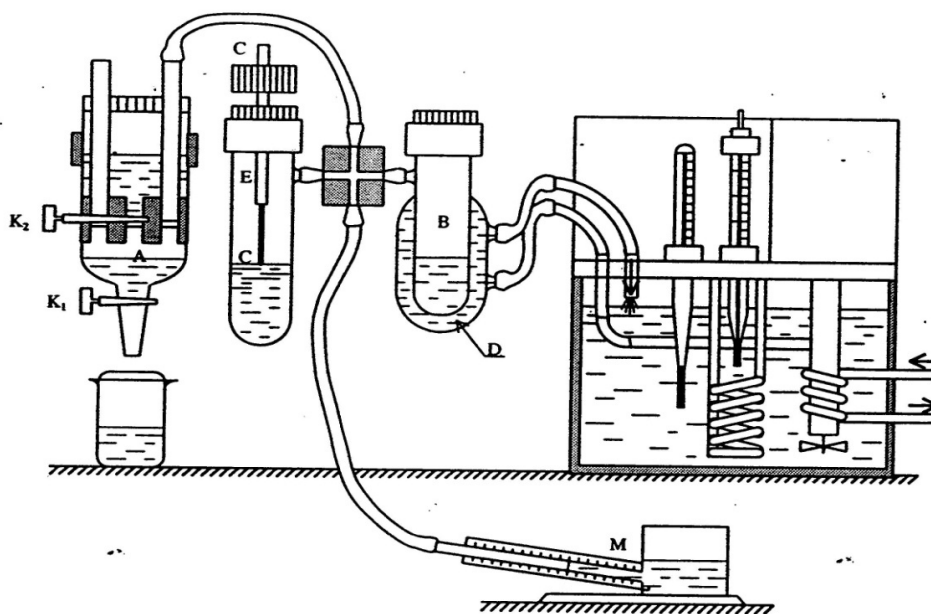


Рис. 1: Схема установки для измерения поверхностного натяжения

Обычно кончик иглы лишь касается поверхности жидкости, чтобы исключить влияние гидростатического давления столба жидкости. Од-

нако 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  $\rho gh$  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 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 1 и 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.

### 3. Измерения

Проведем измерения для спирта. Для этого установим частоту падения капель из аспиратора около 1 капли в 5 секунд. Измерим максимальное добавочное давление в системе. Полученный результат  $\Delta p = 42 \pm 1 \Rightarrow \Delta P = 81 \pm 2$  Па ( $p$  – единица длины на микробарометре, а  $P$  уже искомое давление).

Далее вынем иглу, просушим ее и измерим микроскопом ее диаметр (внутренний):

$$d = 1.2 \pm 0.05 \text{ мм}, \quad (2)$$

из табличного значения коэффициента поверхностного натяжения спирта  $\sigma = 22.3$  мН/м, теперь по формуле (??) получим:

$$r = \frac{2\sigma}{\Delta P} = 0,643 \text{ мм} \quad (3)$$

$$\Delta r = 0,015 \text{ мм} \quad (4)$$

Как можно увидеть экспериментальный результат совпал с прямым измерением с учётом погрешностей, что говорит о применимости нашей модели.

Затем установим иглу в воду так, чтобы она едва касалась воды. Измерим значение давления. Далее опустим иглу до дна, предварительно измерив высоту. Получим значение разности высот, измеренных линейкой:

$$h_1 = 20 \pm 1 \text{ мм}; h_2 = 6 \pm 1 \text{ мм} \Rightarrow \Delta h = 14 \pm 2 \text{ мм}. \quad (5)$$

Теперь посчитаем разность высот из измеренных давлений:  $\Delta P = 122 \pm 1,5 \text{ Па}$ , откуда  $h = 12,4 \pm 0,2 \text{ мм}$ . Видно, что значение получилось немного меньше, чем измеренное линейкой, но в пределах погрешности значения совпадают.

№	$\langle h_1 \rangle$ , мм	$\langle h_2 \rangle$ , мм
1	112	187
2	112	187
3	111	186
4	111	186
5	111	186
$\langle h \rangle$ , мм	111	187
$\langle P \rangle$ , Па	177	299

Проведем серию измерений разности давлений  $\Delta P$  для различных температур воды в интервале  $[20-60]^\circ\text{C}$  (шаг  $\simeq 5^\circ\text{C}$ ), регулируемых термостатом, занесем результаты в таблице ниже

$t, ^\circ\text{C}$	20,5	25	30	35	40	45	50,6	55
$h$ , мм	132	131	130	129	128	127	125	124
$h$ , мм	132	131	130	129	127	126	125	124
$h$ , мм	132	131	130	128	127	126	125	124
$h$ , мм	132	130	129	128	127	126	125	124
$h$ , мм	131	130	129	128	127	126	125	123
$\langle h \rangle$ , мм	131,8	130,6	129,6	128,4	127,2	126,2	125	123,8
$\Delta h$ , мм	1,2	1,28	1,34	1,4	1,2	1,2	1	1,2
$\langle P \rangle$ , Па	210,7	208,8	207,23	205,31	203,40	201,80	199,88	196,96
$\Delta P$ , Па	1,93	2,06	2,16	2,26	1,93	1,93	2,06	1,93

По полученным данным можно вычислить значение  $\sigma = \frac{p \cdot R}{2}$

$t, ^\circ C$	20,5	25	30	35	40	45	50,6	55
$\langle P \rangle$	210,7	208,8	207,23	205,31	203,40	201,80	199,88	196,96
$\Delta P, \text{Па}$	1,93	2,06	2,16	2,26	1,93	1,93	2,06	1,93
$\sigma \cdot 10^2, \text{Н/м}$	6,77	6,71	6,66	6,60	6,54	6,48	6,42	6,36
$\Delta \sigma \cdot 10^2, \text{Н/м}$	0,154	0,164	0,171	0,181	0,154	0,154	0,164	0,154

При подсчёте погрешностей поверхностного натяжения были учтены погрешности определения радиуса иглы.

## 4. Обработка данных

Построим график зависимости  $\sigma(T)$

Из графика *методом хи-квадрат* найдем коэффициент наклона:

$$\frac{d\sigma}{dT} = -0.137 \text{ мН} \cdot \text{м}/K \quad (6)$$

$$\Delta \frac{d\sigma}{dT} = 0,0067 \text{ мН} \cdot \text{м}/K \quad (7)$$

Сравним с табличным:

$$\frac{d\sigma_t}{dT} = -0.154 \text{ мН} \cdot \text{м}/K \quad (8)$$

В целом значения сходятся, однако теоретическое значение вышло больше, чем полученное экспериментальное.

Теперь, зная все нужные значения, построим графики зависимостей  $q(t) = -T \frac{d\sigma}{dT}$  и  $\frac{U}{F}(T) = \sigma - T \frac{d\sigma}{dT}$ . Видно, что в последнем графике значение поверхностной энергии на единицу площади почти не меняется.

## 5. Заключение

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.

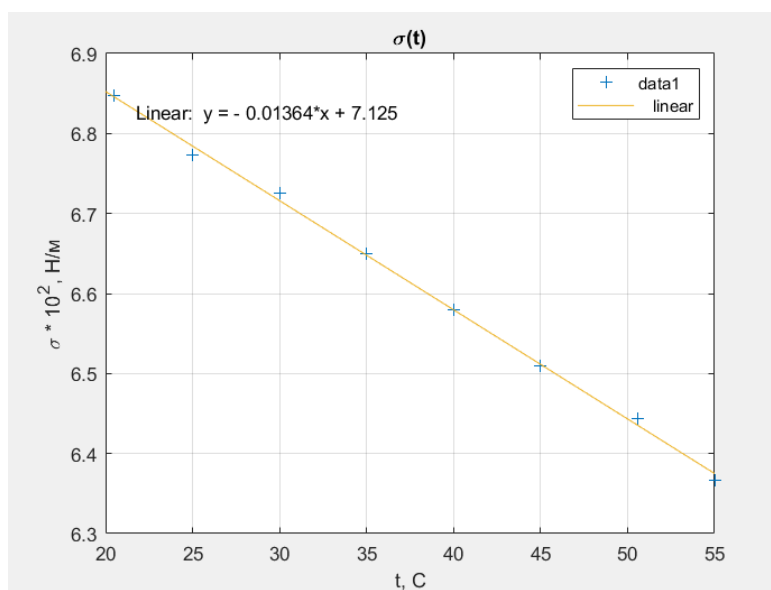


Рис. 2: Зависимость коэффициента поверхностного натяжения от температуры

## 6. Список используемой литературы

- Гладун А. Д. Лабораторный практикум по общей физике. Термодинамика и молекулярная физика
- [Описание лабораторных работ на кафедре общей физики МФТИ](#)



