

Московский физико-технический институт

**Лабораторная работа 2.5.1**  
**ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА**  
**ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ**

Отчёт студента группы Б02-303  
Долговой Екатерины

г.Долгопрудный, 2024

## Лабораторная работа 2.5.1

### Измерение коэффициента поверхностного натяжения жидкости

**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.

### 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:

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

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

### Экспериментальная установка

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 пробужливаться через жидкость. Поверхностное натяжение можно определить по величине разрежения  $\Delta P(1)$ , необходимого для прохождения пузырьков (при известном радиусе иглы).

Разрежение 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. Разрежение 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 разреженным воздухом и атмосферой измеряется спиртовым микроманометром.

Для стабилизации температуры исследуемой жидкости через рубашку D колбы В 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.

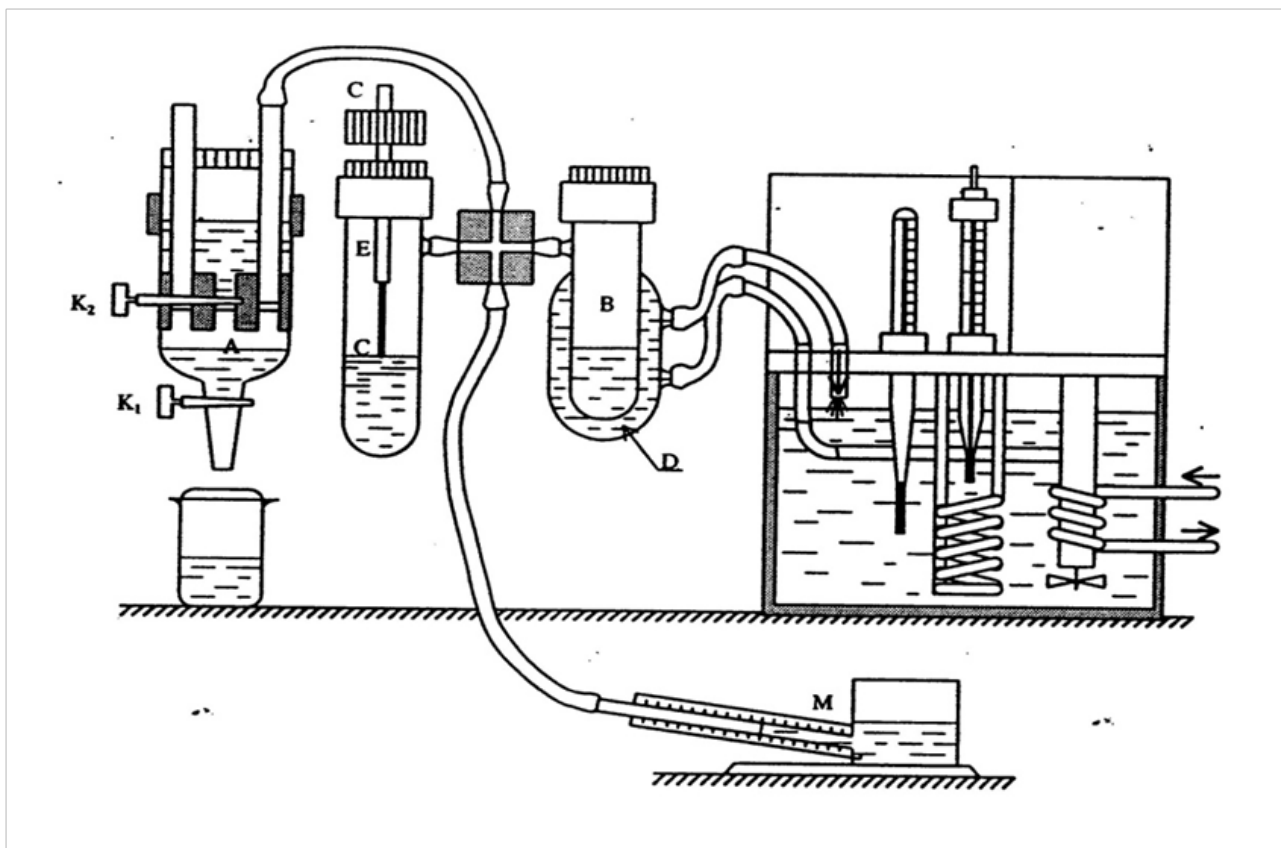


Рис. 1: Схема установки для измерения температурной зависимости коэффициента поверхностного натяжения

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 подъем уровня жидкости компенсируется уменьшением ее 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  $P_1$  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.

Формула для пересчета давления в микроманометре:

$$\Delta P = C \cdot l \cdot \frac{\gamma_{\text{залит}}}{\gamma_{\text{указ}}} \cdot K \cdot 9,80665, \quad (2)$$

где  $C$  — поправочный множитель, равный 1 в нашем случае,  $l$  — показание шкалы в мм,  $\gamma_{\text{залит}}$  — плотность спирта, залитого в прибор (при 24°C для 96%-ого раствора спирта в нашем эксперименте — 0,80397 г/см<sup>3</sup>),  $\gamma_{\text{указ}}$  — плотность спирта, указанная на приборе (равна 0,8095 г/см<sup>3</sup>),  $K$  — постоянная угла наклона (равна 0,2).

Формула расчета  $h$  — глубины погружения кончика иглы в воду:

$$h = \frac{\Delta P}{\rho g}, \quad (3)$$

где  $\Delta P$  — разность показаний микроманометра на поверхности и на глубине,  $\rho$  — плотность воды при 24°C (она составила, согласно табличным данным, 997,2 кг/м<sup>3</sup>).

Данными формулами будем пользоваться при выполнении эксперимента и обработке данных.

### Ход работы

1. Проверим герметичность установки. Чистую сухую иглу установим в сосуд со спиртом так, чтобы кончик иглы лишь касался поверхности спирта. Замерим показания микроманометра.
2. Убедившись в герметичности системы, начнем измерения. Откроем кран и подберем частоту падения капель из аспиратора так, чтобы максимальное давление манометра не зависело от этой частоты (не чаще, чем 1 капля в 5 секунд). Результаты измерений занесем в таблицу 1.

№ опыта	1	2	3	4	5
$l, \text{мм}$	42	42	42	42	42

Таблица 1: Показания для спирта

3. Измерим максимальное давление  $\Delta P$  при пробулькивании пузырьков воздуха через спирт, воспользуясь формулой (2). По разбросу результатов оценим случайную погрешность измерения.

$$\bar{l} = \frac{1}{5} \sum_i l_i = 42 \text{ мм}$$

$$\sigma_l^{\text{случ}} = \sqrt{\frac{1}{4 \cdot 5} \sum_i (l_i - \bar{l})^2} = 0 \text{ мм}$$

$$\sigma_l^{\text{приб}} = 1 \text{ мм}$$

$$\sigma_l = \sqrt{(\sigma_l^{\text{случ}})^2 + (\sigma_l^{\text{приб}})^2} = 1 \text{ мм}$$

$$\Delta \bar{P} = 81,813 \text{ Па}$$

$$\sigma_{\Delta P} = \frac{\sigma_l}{\bar{l}} \Delta \bar{P} = 1,947 \text{ Па} \approx 2 \text{ Па}$$

окончательный результат:

$$\Delta P = (82 \pm 2) \text{ Па}$$

Пользуясь табличным значением коэффициента поверхностного натяжения спирта (для температуры в комнате 24°C величина составляет  $\sigma = 22,428 \text{ мН/м}$ ), определим по формуле (1) диаметр иглы.

$$\bar{d} = \frac{4\sigma}{\Delta \bar{P}} = 1,096 \text{ мм}$$

$$\sigma_d = \frac{\sigma_{\Delta P}}{\Delta \bar{P}} \bar{d} = 0,027 \text{ мм} \approx 0,03 \text{ мм}$$

окончательный результат:

$$d = (1,10 \pm 0,03) \text{ мм}$$

Сравним полученный результат с диаметром иглы, измеренным по микроскопу:

$$d_{\text{микроскоп}} = (1,10 \pm 0,05) \text{ мм.}$$

Видим, что область значений косвенных измерений лежит внутри области прямых, что говорит о достоверном результате и достаточной точности.

4. Перенесем предварительно промытую и просушенную от спирта иглу в колбу с дистиллированной водой. Результаты измерений при пробулькивании пузырьков, когда игла лишь касается поверхности воды, занесем в таблицу 2.

№ опыта	1	2	3	4	5
$l_1, \text{мм}$	118	118	119	118	118
$l_2, \text{мм}$	153	152	153	152	152

Таблица 2: Показания для воды

Получим по ним максимальное давление  $P_1$ :

$$\bar{l}_1 = \frac{1}{5} \sum_i l_{1i} = 118,2 \text{ мм}$$

$$\sigma_{l_1}^{\text{случ}} = \sqrt{\frac{1}{4 \cdot 5} \sum_i (l_{1i} - \bar{l}_1)^2} = 0,2 \text{ мм}$$

$$\sigma_{l_1}^{\text{приб}} = 1 \text{ мм}$$

$$\sigma_{l_1} = \sqrt{(\sigma_{l_1}^{\text{случ}})^2 + (\sigma_{l_1}^{\text{приб}})^2} = 1,019 \text{ мм} \approx 1 \text{ мм}$$

$$\bar{P}_1 = 230,245 \text{ Па}$$

$$\sigma_{P_1} = \frac{\sigma_{l_1}}{\bar{l}_1} \bar{P}_1 = 1,986 \text{ Па} \approx 2 \text{ Па}$$

окончательный результат:

$$P_1 = (230 \pm 2) \text{ Па}$$

Измерим расстояние между верхним концом иглы и любой неподвижной частью прибора  $h_1 = (1,25 \pm 0,05) \text{ см}$ .

5. Утопим иглу до предела. Измерим  $h_2 = (0,65 \pm 0,05) \text{ см}$  (как в п. 4). Снимем показания для максимального давления в пузырьках  $P_2$ . Результаты также занесем в таблицу 2.

$$\bar{l}_2 = \frac{1}{5} \sum_i l_{2i} = 152,4 \text{ мм}$$

$$\sigma_{l_2}^{\text{случ}} = \sqrt{\frac{1}{4 \cdot 5} \sum_i (l_{2i} - \bar{l}_2)^2} = 0,244 \text{ мм}$$

$$\sigma_{l_2}^{\text{приб}} = 1 \text{ мм}$$

$$\sigma_{l_2} = \sqrt{(\sigma_{l_2}^{\text{случ}})^2 + (\sigma_{l_2}^{\text{приб}})^2} = 1,029 \text{ мм} \approx 1 \text{ мм}$$

$$\bar{P}_1 = 296,864 \text{ Па}$$

$$\sigma_{P_1} = \frac{\sigma_{l_2}}{\bar{l}_2} \bar{P}_1 = 2,005 \text{ Па} \approx 2 \text{ Па}$$

окончательный результат:

$$P_1 = (297 \pm 2) \text{ Па}$$

По разности давлений  $\Delta P = P_2 - P_1$  определим с помощью формулы (3) глубину погружения  $\Delta h'$  иглы и сравним с  $\Delta h = h_1 - h_2$ :

$$\Delta \bar{P} = \bar{P}_2 - \bar{P}_1 = 67 \text{ Па}$$

$$\sigma_{\Delta P} = \sqrt{(\sigma_{P_1})^2 + (\sigma_{P_2})^2} = 2,828 \text{ Па} \approx 3 \text{ Па}$$

$$\Delta \bar{h}' = 0,681 \text{ см}$$

$$\sigma_{\Delta h'} = \frac{\sigma_{\Delta P}}{\Delta \bar{P}} = 0,031 \text{ см} \approx 0,03 \text{ см}$$

окончательный результат:

$$\Delta h' = (0,68 \pm 0,03) \text{ см}$$

$$\Delta \bar{h} = 0,6 \text{ см}$$

$$\sigma_{\Delta h} = \sqrt{(\sigma_{h_1})^2 + (\sigma_{h_2})^2} = 0,071 \text{ см} \approx 0,07 \text{ см}$$

окончательный результат:

$$\Delta h = (0,60 \pm 0,07) \text{ см}$$

Видим, что  $\Delta h$  и  $\Delta h'$  имеют общее пересечение, хоть оно и достаточно мало.

6. Снимем температурную зависимость  $\sigma(T)$  дистиллированной воды. Результаты измерения микроманометром запишем в таблицу 3.

$T, ^\circ\text{C}$	$l, \text{см}$			$l, \text{см}$	$\Delta P, \text{Па}$	$\Delta P', \text{Па}$	$\sigma, \text{мН/м}$	$q, \text{мДж/м}^2$	$U/F, \text{мДж/м}^2$
30,6	154	153	153	153	299	239	66	4,9	70,58
35,2	152	152	152	152	296	236	65	5,6	70,61
40,1	151	151	151	151	294	234	64	6,3	70,69
45,0	150	150	149	150	292	232	64	7,0	70,73
50,3	148	147	148	148	288	228	63	8,0	70,64
54,9	146	147	147	147	286	226	62	8,6	70,74
60,2	144	145	144	144	281	221	61	9,7	70,59

Таблица 3: Данные для температурной зависимости

7. Оценим погрешность измерения давления и температуры.

$$\bar{T} = \frac{1}{7} \sum_i T_i = 45,2^\circ\text{C}$$

$$\sigma_T = 0,1^\circ\text{C}$$

$$\varepsilon_T = \frac{\sigma_T}{\bar{T}} = 0,002$$

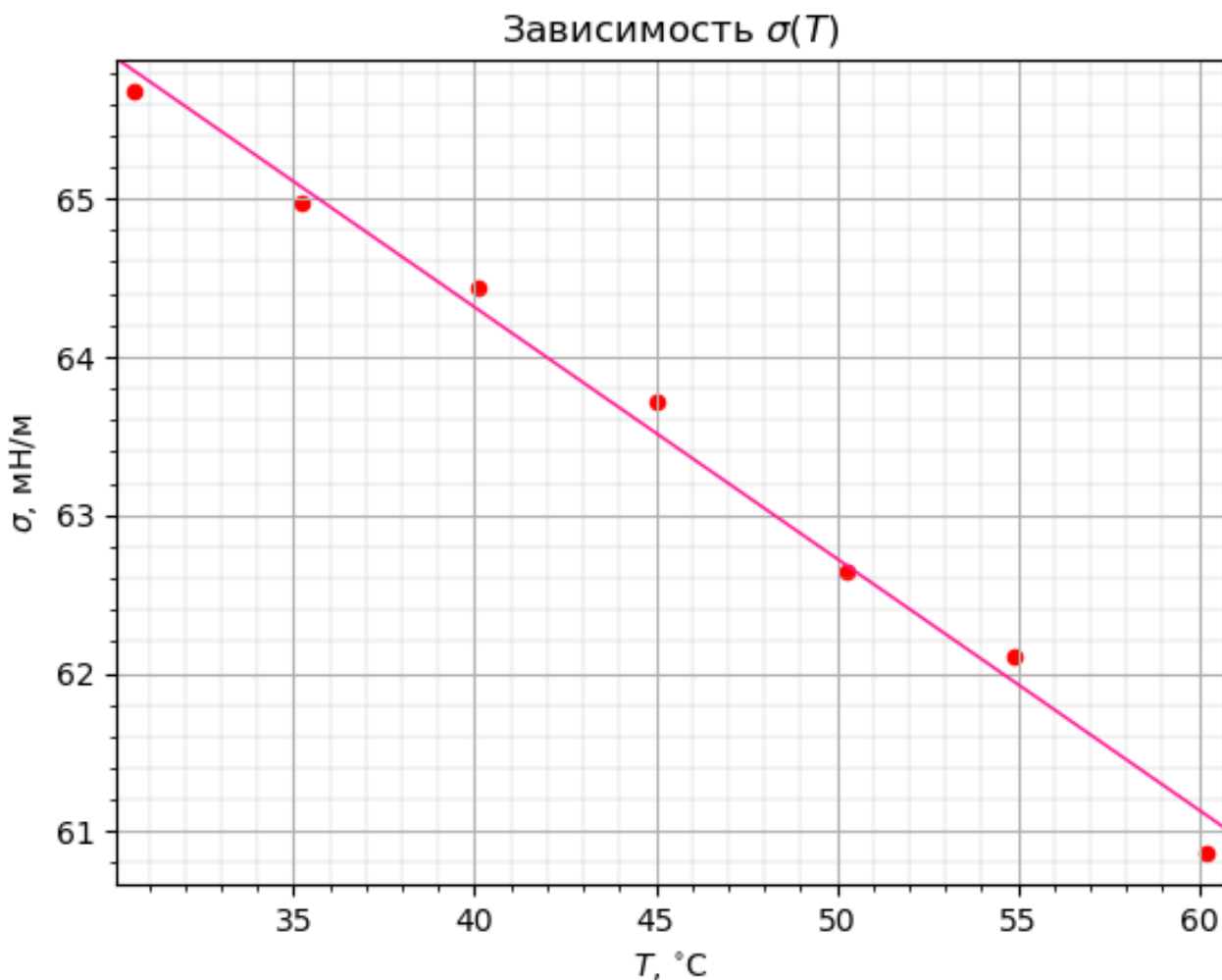
$$\Delta\bar{P}' = 289 \text{ Па}$$

$$\sigma_{\Delta P'} = \sqrt{(\sigma_{\Delta P})^2 + (\sigma_{\rho g \Delta h})^2} = \sqrt{(\Delta\bar{P}' \frac{\sigma_l}{\bar{l}})^2 + (\rho g \sigma_{\Delta h})^2} = 7 \text{ Па}$$

$$\varepsilon_{\Delta P'} = \frac{\sigma_{\Delta P'}}{\Delta\bar{P}'} = 0,02$$

Рассчитаем величину коэффициента поверхностного натяжения воды  $\sigma(T)$ , используя значение диаметра иглы, полученное при измерениях на спирте (или измеренное на микроскопе). Результаты занесем в таблицу 3.

8. Построим график зависимости  $\sigma(T)$  и определим по графику температурный коэффициент  $\alpha = \frac{d\sigma}{dT}$ . Оценим точность результата.



$$\alpha = -0,158 \frac{\text{мН}}{\text{м} \cdot ^\circ \text{C}}$$

$$\sigma_\alpha^{\text{МНК}} = 0,006 \frac{\text{мН}}{\text{м} \cdot ^\circ \text{C}}$$

$$\varepsilon_\alpha^{\text{МНК}} = 0,04$$

$$\varepsilon_\alpha^{\text{КОСВ}} = \sqrt{(\varepsilon_\sigma)^2 + (\varepsilon_T)^2} = \sqrt{(\varepsilon_{\Delta P})^2 + (\varepsilon_r)^2 + (\varepsilon_T)^2} = 0,05$$

$$\varepsilon_\alpha = \sqrt{(\varepsilon_\alpha^{\text{МНК}})^2 + (\varepsilon_\alpha^{\text{КОСВ}})^2} = 0,07$$

$$\sigma_\alpha = 0,011 \frac{\text{мН}}{\text{м} \cdot ^\circ \text{C}}$$

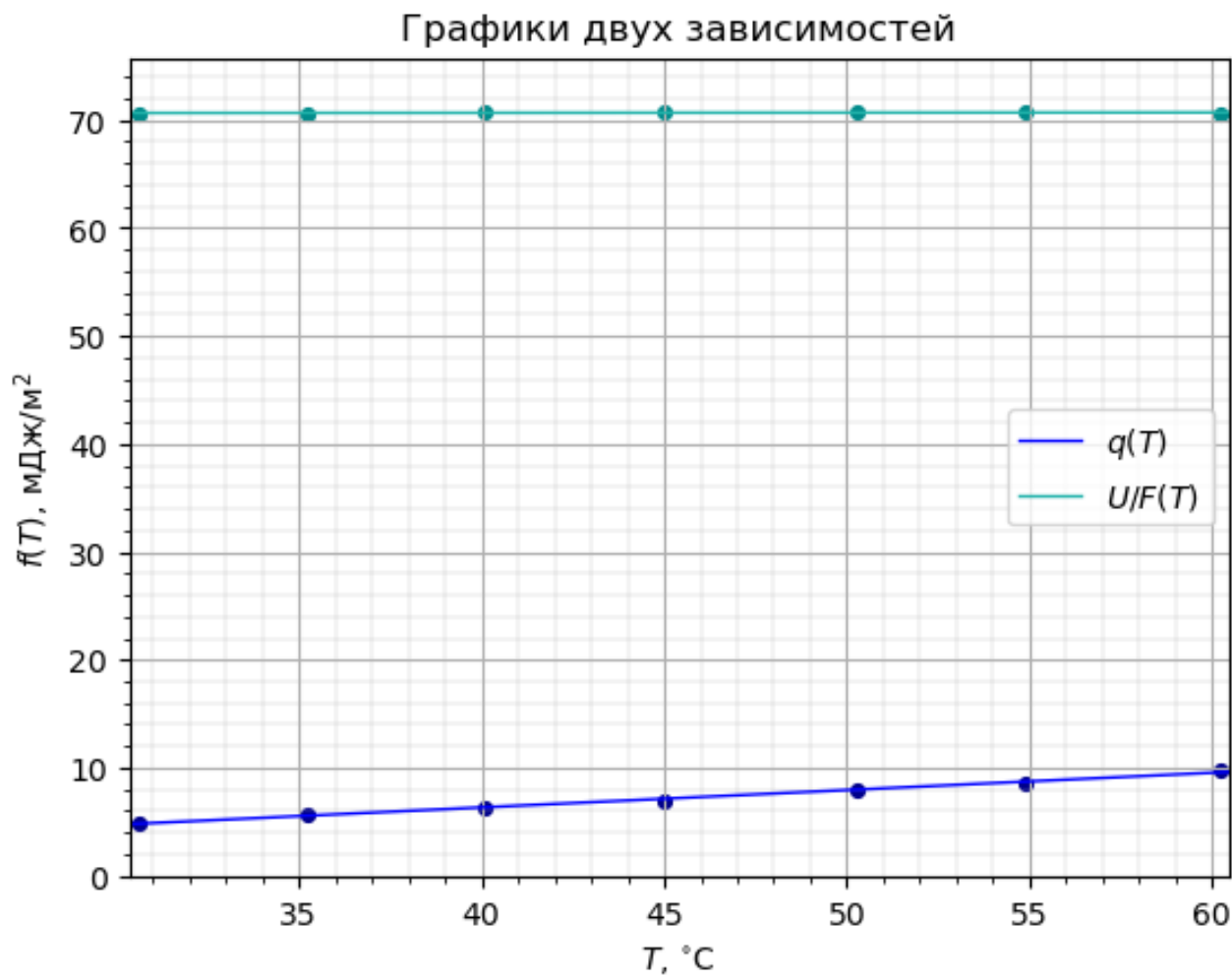
окончательный результат:

$$\frac{d\sigma}{dT} = -(0,158 \pm 0,011) \frac{\text{мН}}{\text{м} \cdot ^\circ \text{C}}$$

9. На другом графике построим зависимость от температуры

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

Рассчитанные значения для построения данных зависимостей занесем в таблицу 3.





Для зависимости  $q(T)$ :

$$k = 0,16 \frac{\text{мДж}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ \text{С}}$$

$$b = -0,09 \frac{\text{мДж}}{\text{м}^2}$$

Для зависимости  $U/F(T)$ :

$$k = 0,0016 \frac{\text{мДж}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ \text{С}}$$

$$b = 70,58 \frac{\text{мДж}}{\text{м}^2}$$

## Вывод

Мы измерили температурную зависимость коэффициента поверхностного натяжения дистиллированной воды с использованием известного коэффициента поверхностного натяжения спирта, а также определили полную поверхностную энергию и теплоту, необходимую для изотермического образования единицы поверхности жидкости при различной температуре.