

Московский Физико-технический Институт  
(Национальный исследовательский университет)

## Отчет о выполнении работы 2.5.1

Измерение коэффициента поверхностного натяжения  
жидкости

Выполнили студентки 1 курса  
ФБМФ, группа Б06-103  
Попеску Полина  
Фитэль Алёна

Долгопрудный, 2022 г.

# 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.

**В работе используются:** прибор Ребиндера с термостатом и микроманометром; исследуемые жидкости; стаканы.

## 2 Теоретический материал

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, необходимое для выталкивания в жидкость пузырька воздуха.

## 3 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 пробульживать через жидкость. Поверхностное натяжение можно определить по величине разрежения  $P$  (1), необходимого для прохождения пузырьков (при известном радиусе иглы). Разрежение в системе создается с помощью аспиратора А. Кран К2 разделяет две полости аспиратора. Верхняя полость при закрытом кране К2 заполняется водой. Затем кран К2 открывают и заполняют водой нижнюю полость аспиратора. Разрежение воздуха создается в нижней полости при открывании крана К1, 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 (устройство микроманометра описано в Приложении). 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. 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,  $P = P + \rho gh$ .

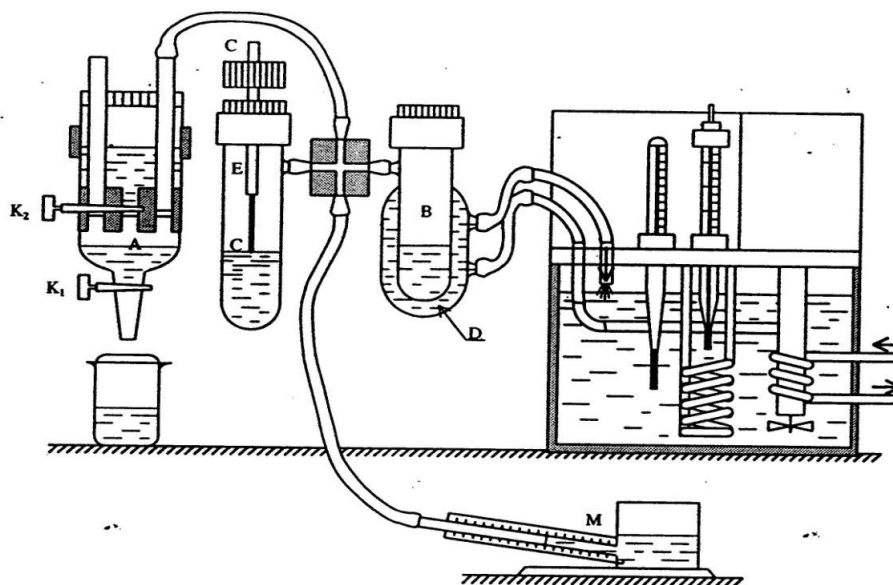


Рис. 1: Схема установки для измерения температурной зависимости коэффициента поверхностного натяжения

Заметим, что  $\rho gh$  от температуры практически не зависит, так как подъём уровня жидкости компенсируется уменьшением её плотности (произведение  $\rho gh$  определяется массой всей жидкости и поэтому постоянно). Величину  $\rho gh$  следует измерить двумя способами. Во-первых, замерить величину  $P_1 = P'$ , когда кончик трубки только касается поверхности жидкости. Затем при этой же температуре опустить иглу до дна и замерить  $P_2 = \rho gh + P''$  ( $P'$ ,  $P''$  – давление Лапласа). Из-за несжимаемости жидкости можно положить  $P' = P''$  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.

В частности подобную же операцию необходимо сделать и при заполнении водой аспиратора А. 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 Обработка результатов измерений

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 В и Е пробками. Откроем кран  $K_1$  аспиратора и добьемся пробуживания пузырьков воздуха в колбе. Замерим показания микроманометра. Закроем кран  $K_1$ . Наблюдаем за показаниями манометра: при отсутствии течи в установке столбик спирта в манометре неподвижен.
2. Убедившись в герметичности системы, 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  $\Delta P_{\text{спирт}}$  при пробулькивании пузырьков воздуха через спирт. По разбросу результатов оценим случайную погрешность измерения. Пользуясь табличным значением коэффициента поверхностного натяжения спирта, определим по формуле (1) диаметр иглы, приняв значение  $\sigma_{\text{спирт}}$  при  $T = 20^\circ\text{C}$  равным  $22,8 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$ . Сравним полученный результат с диаметром иглы, измеренным по микроскопу.

$\Delta P$ , Па	$\sigma_P$ , Па	$d$ , мм	$\sigma_d$ , мм
92,2	2,0	0,99	0,03

Таблица 1: Диаметр иглы при измерении  $\Delta P$

Значение диаметра иглы, полученное через микроскоп, в пределах погрешности совпадает с рассчитанным:  $d = (1,00 \pm 0,05) \text{ мм}$ .

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. 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  $h_1$ .
5. Утопим иглу до предела (между концом иглы и дном необходимо оставить небольшой зазор, чтобы образующийся пузырёк не касался дна). Измерим  $h_2$  (как в пункте 4) и максимальное давление в пузырьках  $P_2$ . По разности давлений  $\Delta P = P_2 - P_1$  определим глубину погружения  $\Delta h$  иглы и сравним с  $\Delta h = h_1 - h_2$ .

$P_1$ , Па	$P_2$ , Па	$\sigma_P$ , Па	$\Delta P$ , Па	$\sigma_{\Delta P}$ , Па	$\Delta h$ , см	$\sigma_{\Delta h}$ , см
262,4	366,0	2,0	104	3	1,06	0,03

Таблица 2: Глубина погружения через разницу давлений

$h_1$ , см	$h_2$ , см	$\sigma_h$ , см	$\Delta h$ , см	$\sigma_{\Delta h}$ , см
6,1	5,0	0,1	1,10	0,14

Таблица 3: Измерение глубины погружения

Полученные разными методами данные о глубине погружения иглы отличаются друг от друга в пределах погрешности. При дальнейших измерениях, будем использовать значение, полученное экспериментально, так как его относительная погрешность ( $\epsilon = 2,8\%$ ) меньше, чем погрешность измерения глубины погружения, измеренная с помощью линейки ( $\epsilon = 13\%$ ).

6. Снимем температурную зависимость  $\sigma(T)$  дистиллированной воды. Для этого включим термостат и подождём, пока нужная вам температура не стабилизируется. После этого проведем измерение давления. Для уменьшения погрешности опыта замер давления при фиксированной температуре проводим несколько раз. Проводить измерение температурной зависимости рекомендуется в диапазоне  $25^\circ\text{C} - 55^\circ\text{C}$  через  $5^\circ\text{C}$ . Оценим погрешность измерения давления и температуры. Рассчитаем величину коэффициента поверхностного натяжения воды  $\sigma(T)$ , используя значение диаметра иглы, полученное при измерениях на спирте (относительная погрешность при этом способе измерения ( $\epsilon = 3\%$ ) меньше, чем относительная погрешность измерения с помощью микроскопа ( $\epsilon = 5\%$ )).

$T, ^\circ C$	$\sigma_T, ^\circ C$	$\Delta P, \text{Па}$	$\sigma_P, \text{Па}$	$\sigma(T), 10^{-3}, \text{Н/м}$	$\sigma_\sigma, 10^{-3} \text{ Н/м}$
25,2	0,2	262	4	90	5
30,4	0,2	259	4	90	5
35,2	0,2	255	4	90	5
40,0	0,2	251	4	88	4
45,1	0,2	248	4	87	4
50,0	0,2	244	4	86	4
55,0	0,2	243	4	85	4

Таблица 4: Измерение коэффициента поверхностного натяжения воды

7. Построим график зависимости  $\sigma(T)$  и определим по графику температурный коэффициент  $d\sigma/dT$ .

По МНК получаем, что коэффициент наклона  $\frac{d\sigma}{dT} = (-0,238 \pm 0,009) \frac{\text{мН}}{\text{м}\cdot\text{К}}$ . Табличное значение  $\frac{d\sigma}{dT} = -0,160 \frac{\text{мН}}{\text{м}\cdot\text{К}}$ .

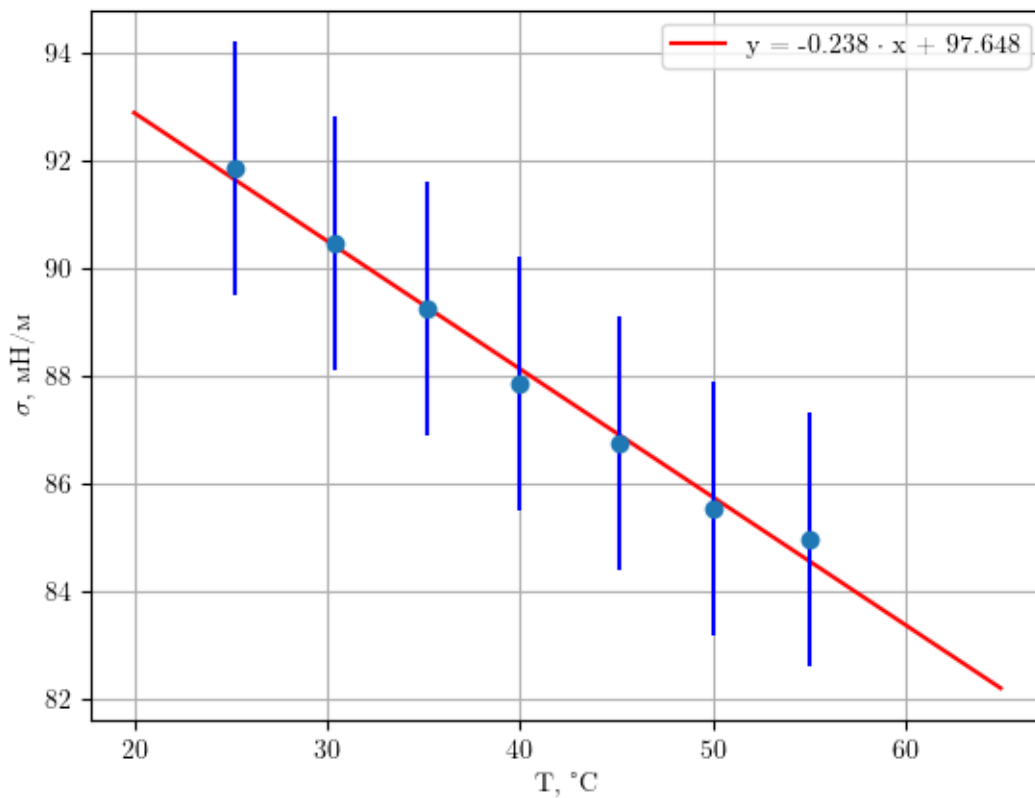


Рис. 2: График зависимости  $\sigma(T)$

8. Построим график зависимости от температуры теплоты образования единицы поверхности жидкости  $q = -T \cdot d\sigma/dT$  и график зависимости от температуры поверхностной энергии  $U$  единицы площади  $F$ :  $U/F = (\sigma - T \cdot d\sigma/dT)$ . Значение  $U/F$  постоянно и равно  $(162,6 \pm 2,4) \frac{\text{мН}}{\text{м}\cdot\text{К}}$ .

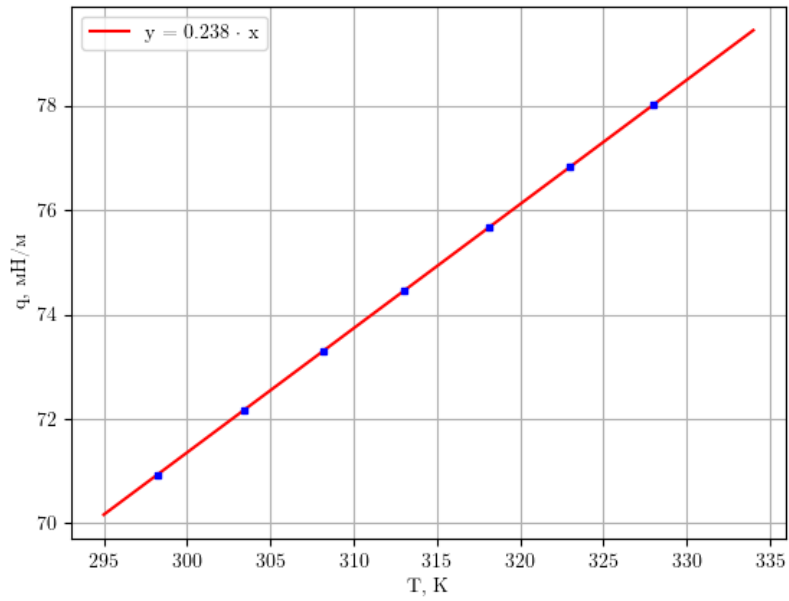


Рис. 3: График зависимости  $q(T)$

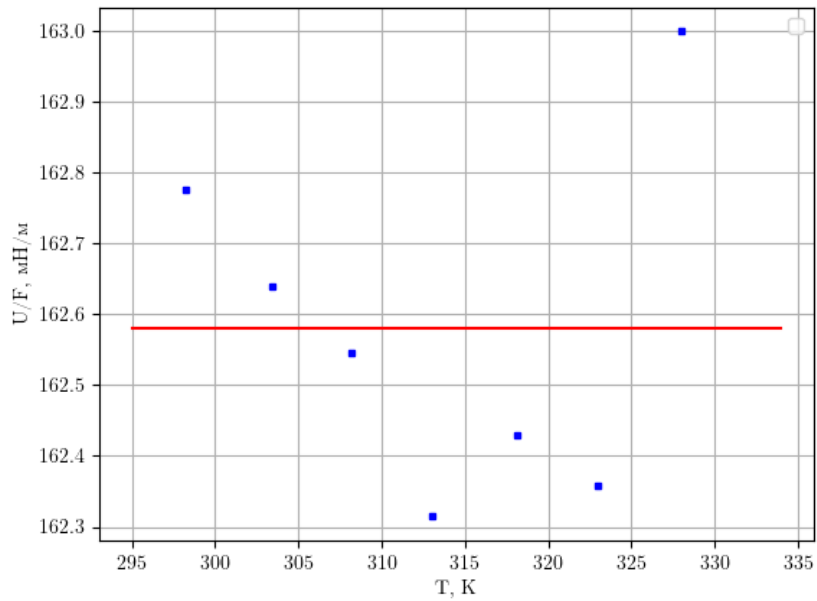


Рис. 4: График зависимости  $U/F(T)$

## 5 Обсуждение результатов и выводы

В ходе данной лабораторной работы мы исследовали температурную зависимость коэффициента поверхностного натяжения дистиллированной воды от температуры. Полученная зависимость оказалась линейной в интервале рабочих температур от  $25^{\circ}\text{C}$  до  $55^{\circ}\text{C}$ . Полученный результат вполне естественен, потому что с увеличением температуры интенсивность межмолекулярного взаимодействия уменьшается, вследствие чего снижается и поверхностное натяжение жидкостей на границе с воздухом или с собственным паром. Вдали от критической температу-

ры поверхностное натяжение уменьшается прямо пропорционально росту температуры. Стоит отметить, что наш результат в пределах погрешности не совпадает с табличным значением. Это обуславливается несколькими факторами. Во-первых, диаметр образующихся пузырей не обязан совпадать с диаметром иглы. Во-вторых, температура термостата не совпадает в реальности с температурой воды вследствие теплового взаимодействия колбы с окружающей средой. В-третьих, тепловое расширение поднимает уровень жидкости, вследствие чего увеличивается добавочное давление  $\rho gh$ , и тогда  $\Delta P$  уменьшается. Из этого следует, что рассчитываемое нами по формуле Лапласа (1) поверхностное натяжение должно уменьшиться. В-четвертых, большую погрешность мог внести тот факт, что исследуемая в ходе эксперимента «дистиллированная» вода, имела примеси спирта, которые попали туда в результате некачественной очистки иглы от остатков этанола после первой части работы. Поэтому полученные значения для поверхностного натяжения разумно интерпретировать как значения поверхностного натяжения раствора, а не чистого вещества.

Зная температурный коэффициент поверхностного натяжения, можно исследовать зависимость теплоты образования единицы поверхности жидкости  $q = q(T)$  и поверхностной энергии единицы площади  $U/\Pi$  от температуры. Если коэффициент поверхностного натяжения линейно зависит от температуры, то функция  $q = -T \frac{d\sigma}{dT}$  является линейной, что отражено на графике зависимости  $q(T)$ .

Для теоретического подтверждения экспериментального результата, показывающего независимость внутренней энергии поверхности  $U/\Pi$  от температуры, запишем уравнение Гиббса-Гельмгольца для поверхностного слоя:  $U/\Pi = \sigma - T \frac{d\sigma}{dT}$ . Продифференцируем его по температуре:  $\frac{\partial U/\Pi}{\partial T} = -T \frac{\partial^2 \sigma}{\partial T^2}$ . Так как первая производная  $\sigma$  по  $T$  есть величина постоянная, то вторая производная равна нулю, следовательно, внутренняя энергия поверхностного слоя не зависит от температуры, что хорошо отражает график  $U/F(T)$ .