

ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Кафедра общей физики

Лабораторная работа 2.5.1

Измерение коэффициента поверхностного натяжения жидкости

Преподаватель: доцент Игуменов А.Ю.

Обучающийся: Готов А.А.

Долгопрудный
2022

1 Введение

1.1 Аннотация

Данная работа посвящена изучению явления поверхностного натяжения жидкостей. В работе используются следующие методы: построение и анализ графика зависимости $p(T)$, пересчитанный из значений показания манометра.

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; микроскоп.

1.2 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:

$$\Delta P = P_{int} - P_{ext} = \frac{2\sigma}{r}, \quad (1)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения, P_{int} и P_{ext} – 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 ΔP , необходимое для выталкивания в жидкость пузырька воздуха.

1.3 Схема эксперимента

Поверхностное натяжение можно определить по величине разряжения ΔP (1), 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 и , соединённых трубками с нижней полостью аспиратора, создается такое же пониженное давление. Разность давлений в полостях с разряженным воздухом и атмосферой измеряется спиртовым микроманометром.

Для стабилизации температуры исследуемой жидкости через рубашку D колбы непрерывно прогоняется вода из термостата.

1.4 Методика измерений

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, равно

$$P = \Delta P + \rho gh.$$

Заметим, что ρgh от температуры практически не зависит, так как подъём уровня жидкости компенсируется уменьшением её плотности (произведение ρg определяется массой всей жидкости и поэтому постоянно). Величину ρgh 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

$$\rho gh = P_2 - P_1. \quad (2)$$

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.

1.5 Экспериментальная установка

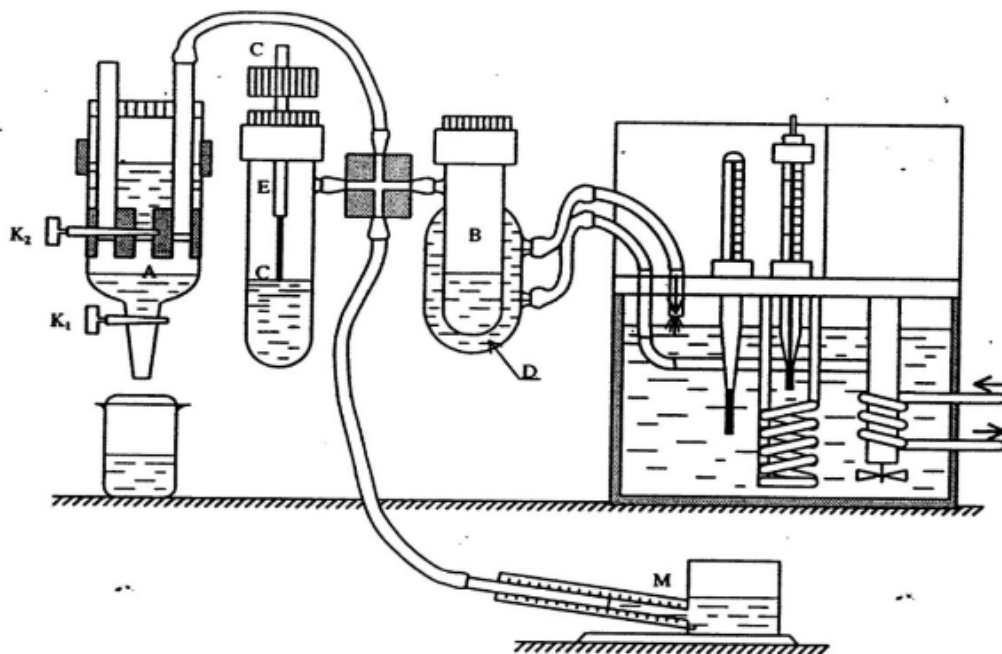


Рис. 1: Рисунок экспериментальной установки

Исследуемая жидкость (дистиллированная вода) наливается в сосуд (колбу) B (рис. 1). Тестовая жидкость (этиловый спирт) наливается в сосуд E . При измерениях колбы герметично закрываются пробками. Через одну из двух пробок проходит полая металлическая игла. 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.

2 Результаты измерений и обработка данных

2.1 Измерение диаметра иглы

Измерим максимальное давление ΔP при пробулькивании пузырьков воздуха через спирт. Результаты измерений занесём в таблицу.

№ эксперимента	1	2	3	4	5
h, мм	43	43	43	43	43
p, Па	67,8	67,8	67,8	67,8	67,8

Учтём, что показания микроманометра связаны с давлением следующим соотношением:

$$P = h \cdot 0,2 \cdot 9,8 \cdot 805 \quad (3)$$

где 0.805 – плотность спирта, определяемая при данной температуре по паспорту прибора, а константы 0,2 и 9,8 являются константами работы, связывающие наклон манометра с законом гидростатического давления

Отметим, что расхождения в результатах измерения не наблюдается, что говорит о малости случайной погрешности по сравнению с приборной, а полная погрешность будет определяться только погрешностью прибора

Систематическую погрешность определим из расчёта, что погрешность измерения составила 1 деление прибора, или же $\sigma_P^{\text{сист}} \approx 1,6$ Па.

Полная погрешность измерений определяется по формуле:

$$\sigma_P = \sqrt{(\sigma_P^{\text{сист}})^2 + (\sigma_P^{\text{случ}})^2} \approx \sigma_P^{\text{сист}} = 1,6 \text{ Па.} \quad (4)$$

Итого получаем $\Delta P = (63,5 \pm 1,6) \text{ Па}$, ($\varepsilon = 2,5\%$).

Согласно табличным данным, коэффициент поверхностного натяжения этилового спирта при комнатной температуре равен $\sigma_{alc} = 22,4 \text{ мН/м}$. По полученным результатам измерения и при помощи (1) вычисляем диаметр иглы по формуле:

$$d = \frac{4\sigma}{\Delta P} \approx 1,41 \text{ мм.} \quad (5)$$

Также вычисляем погрешность полученного результата:

$$\sigma_d = d \cdot \varepsilon_{\Delta P_{alc}} \approx 0,04 \text{ мм.} \quad (6)$$

Таким образом, получаем окончательный результат измерения диаметра иглы косвенным способом:

- $d = (1,41 \pm 0,04) \text{ мм}$, ($\varepsilon = 2,5\%$).

Проведём измерение диаметра иглы при помощи оптического микроскопа.

По результатам прямого измерения получаем $d = (1,10 \pm 0,05) \text{ мм}$, ($\varepsilon = 4,5\%$).

2.2 Определения поправки при измерении давления для погруженной в воду иглы

Перенесём 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. Измерите расстояние между верхним концом иглы и любой неподвижной частью прибора h_1 .

Утопим иглу в воду. Измерим h_2 . Также измерим максимальное давление в пузырьках P_2 . Полученные результаты запишем.

H, мм	25.0	7.0
h, мм	106	215
p, Па	166.6	339.5

Отметим, что все данные снимались по 5 измерений, но в связи с малостью случайной погрешностью по сравнению с приборной (значения всех измерений одинаковы), в таблицу заносилось только среднее значение

Исходя из экспериментальных данных, определяем среднее значение давления $\langle P \rangle$ и погрешность измерения σ_P по формулам (1), (2) и (3).

По полученным данным определяем

$$P_2 - P_1 = 172.9 \text{ Па.}$$

Также вычисляем погрешность:

$$\sigma_{\Delta P} = \sqrt{\sigma_{P_1}^2 + \sigma_{P_2}^2} \approx 2,3 \text{ Па.} \quad (7)$$

Таким образом, получаем $\Delta P = (172,9 \pm 2,3) \text{ Па}$, ($\varepsilon = 1,3\%$).

По полученному значению ΔP можем рассчитать Δh по следующей формуле:

$$\Delta h = \frac{\Delta P}{\rho g} \approx 17,6 \text{ мм,}$$

где $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ – плотность воды и $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения.

При этом погрешность нашего измерения равна

$$\sigma_{\Delta h} = \Delta h \cdot \varepsilon_{\Delta P} \approx 0,2 \text{ мм.}$$

Таким образом, получаем $\Delta h = (17,6 \pm 0,2) \text{ мм}$, ($\varepsilon = 1,1\%$).

По результатам измерений, необходимая поправка будет $\Delta P = (172.5 \pm 1.9) \text{ Па}$

2.3 Измерение температурной зависимости коэффициента поверхностного натяжения

Снимем температурную зависимость $\sigma(T)$ дистиллированной воды.

Исходя из экспериментальных данных, определяем среднее значение давления $\langle P' \rangle$ и погрешность измерения $\sigma_{P'}$

Учтём поправку к измеренному давлению, которая была вычислена в ???. Полученные результаты также заносим в таблицу.

T, K	h, мм	P' , Па	P, Па	$\sigma, \frac{\text{мН}}{\text{м}}$	$\sigma_{\sigma}, \frac{\text{мН}}{\text{м}}$
298	217	342,4	169.5	46.6	2.1
303	216	340,8	167.9	46.2	2.1
308	215	339,2	166.3	45.7	2.1
313	214	337,6	164.7	45.3	2.0
318	213	336,1	163.2	44.9	2.0
323	212	334,5	161.6	44.4	2.0
328	211	332,9	160.0	44.0	2.0
333	210	331,3	158.4	43.6	2.0

Отметим, что все данные снимались по 5 измерений, но в связи с малостью случайной погрешностью по сравнению с приборной (значения всех измерений одинаковы), в таблицу заносилось только среднее значение

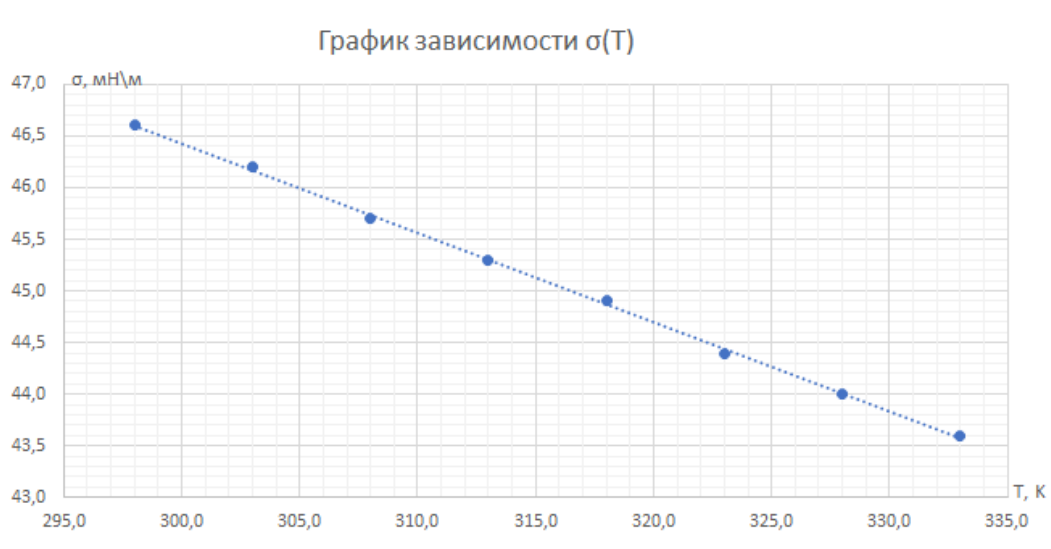
По полученным данным вычислим коэффициент поверхностного натяжения для каждой из температур по формуле

$$\sigma = \frac{Pd}{4}, \quad (8)$$

где d – диаметр иглы, вычисленный в 2.1. Погрешность такого результата вычисляется по следующей формуле:

$$\sigma_\sigma = \sigma \sqrt{\varepsilon_P^2 + \varepsilon_d^2}. \quad (9)$$

Полученные результаты заносим в таблицу.



Полученную зависимость наносим на график. Вычислим коэффициенты аппроксимирующей прямой $\sigma = kT + b$, где $k = \frac{d\sigma}{dT}$, используя метод наименьших квадратов:

$$k = \frac{\langle T\sigma \rangle - \langle T \rangle \langle \sigma \rangle}{\langle T^2 \rangle - \langle T \rangle^2} \approx -0,086 \frac{\text{мН}}{\text{м} \cdot \text{К}},$$

$$b = \langle \sigma \rangle - k \langle T \rangle \approx 72,4 \frac{\text{мН}}{\text{м}}.$$

Случайные погрешности определения этих коэффициентов вычислим по следующим формулам:

$$\sigma_k^{\text{случ}} = \sqrt{\frac{1}{N-2} \left(\frac{\langle (\sigma - \langle \sigma \rangle)^2 \rangle}{\langle (T - \langle T \rangle)^2 \rangle} \right) - k^2} \approx 0,003 \frac{\text{мН}}{\text{м} \cdot \text{К}},$$

$$\sigma_b^{\text{случ}} = \sigma_k^{\text{случ}} \sqrt{\langle x^2 \rangle} \approx 1,2 \frac{\text{мН}}{\text{м}}.$$

Систематические погрешности оценим по следующим формулам:

$$\sigma_k^{\text{сист}} = |k| \sqrt{\varepsilon_T^2 + \varepsilon_\sigma^2} \approx |k| \varepsilon_\sigma = 0,004 \frac{\text{мН}}{\text{м} \cdot \text{К}},$$

$$\sigma_b^{\text{сист}} = b\sqrt{\varepsilon_T^2 + \varepsilon_\sigma^2} \approx b\varepsilon_\sigma = 2,8 \frac{\text{мН}}{\text{м}}.$$

Таким образом, полные погрешности измерений определяются следующими соотношениями:

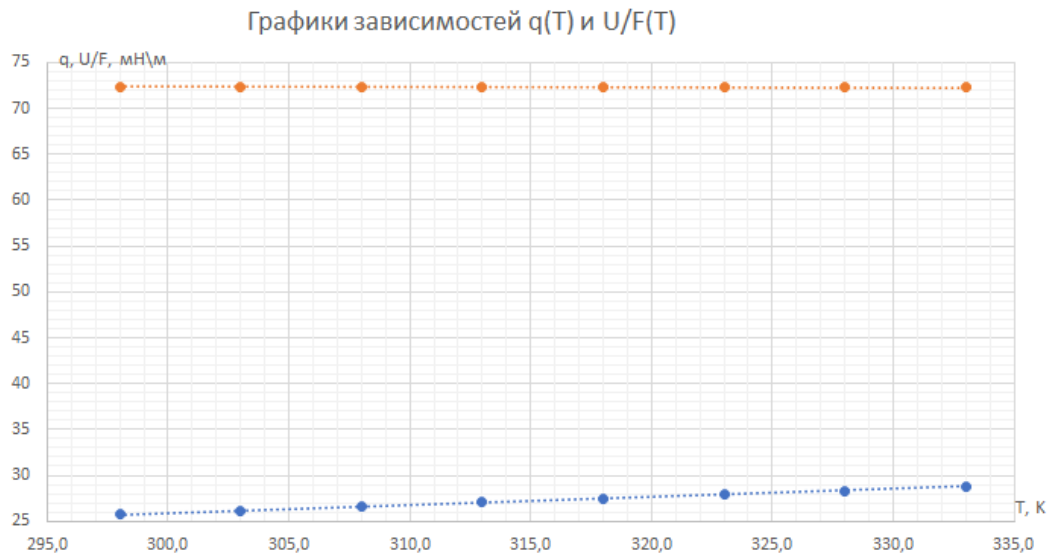
$$\sigma_k = \sqrt{(\sigma_k^{\text{сист}})^2 + (\sigma_k^{\text{случ}})^2} \approx 0,006 \frac{\text{мН}}{\text{м} \cdot \text{К}},$$

$$\sigma_b = \sqrt{(\sigma_b^{\text{сист}})^2 + (\sigma_b^{\text{случ}})^2} \approx 3,3 \frac{\text{мН}}{\text{м}}.$$

Таким образом, окончательно получаем:

- $k = \frac{d\sigma}{dT} = (-0,086 \pm 0,005) \frac{\text{мН}}{\text{м} \cdot \text{К}}, (\varepsilon = 5,8\%);$
- $b = (72,4 \pm 3,0) \frac{\text{мН}}{\text{м}}, (\varepsilon = 4,2\%).$

По полученным данным получим зависимости от температуры коэффициента поверхностного натяжения, теплоты образования единицы поверхности жидкости $q = -T \frac{d\sigma}{dT}$ и поверхностной энергии U единицы площади F : $\frac{U}{F} = \left(\sigma - T \frac{d\sigma}{dT} \right).$



3 Обсуждение результатов и выводы

В ходе работы были достигнуты следующие цели:

- Различными способами измерен диаметр иглы, используемой в работе
- Экспериментально подтверждено существование явления поверхностного натяжения жидкостей
- Экспериментально получены и обработаны зависимости коэффициента поверхностного натяжения, теплоты образования единицы поверхности жидкости и поверхностной энергии на единицу площади от температуры.

В ходе работы с неплохой точностью (4,5% и 1,1 %) были получены значения внутреннего диаметра иглы, используемой в работе. Следует отметить, что несмотря на близость результатов, они не лежат в пределах погрешности друг друга. ($1,41 \pm 0.04$ и 1.10 ± 0.05 мм), что говорит о том, что в первом методе не были учтены какие-то величины и явления, и метод требует дополнительного внимания

Также в ходе работы были определены значения коэффициента поверхностного натяжения анилина. Табличные значения при комнатной температуре равно $42.9 \frac{\text{мН}}{\text{м}}$. Полученное нами значение равно $(46.6 \pm 2.1 \frac{\text{мН}}{\text{м}})$. Видно, что значения достаточно близки друг к другу, а расхождения можно списать, например, на наличие примесей воды в анилине.

Нами были установлены зависимости 3 величин от температуры (см. достигнутые цели). Для каждой из них была подтверждена линейная зависимость с сохранением предсказанного теоретически характера монотонности (убывание, возрастание и постоянная величина; перечисление в порядке, указанном в достигнутых целях)