

Отчёт о выполненной лабораторной работе

Измерение коэффициента поверхностного натяжения жидкости (2.5.1)

Каплин Артём Б01-402

16 февраля 2025

1 Аннотация

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.

Оборудование: прибор Ребиндера с термостатом и микроманометром; исследуемые жидкости; стаканы.

2 Теоретические сведения

2.1 Термодинамика поверхностного натяжения

Поверхностным натяжением называется изотермическая работа, которую надо затратить, не меняя объёма жидкости, чтобы увеличить поверхность на единицу. Коэффициент поверхностного натяжения как обозначается σ . Коэффициент поверхностного натяжения равен силе, действующей на единицу длины контура поверхности жидкости. Эта сила направлена вдоль поверхности перпендикулярно линии контура.

$$\sigma = \frac{f}{L} \quad (1)$$

$$\delta A_T = -\sigma d\Pi$$

$$\Psi = U_{\Pi} - TS - \text{свободная энергия}$$

Используя первое и второе начало термодинамики, получим:

$$\delta Q = dU_{\Pi} - \sigma d\Pi, \quad (2)$$

$$dU_{\Pi} = TdS + \sigma d\Pi, \quad (3)$$

Теперь продифференцируем выражение с свободной энергией и подставим туда выражение (3):

$$d\Psi_{\Pi} = dU_{\Pi} - SdT - TdS = TdS + \sigma d\Pi - SdT - TdS = -SdT + \sigma d\Pi$$

Из предыдущего выражения получем:

$$S = -\left(\frac{\partial \Psi_{\Pi}}{\partial T}\right)_{\Pi}, \quad (4)$$

$$\sigma = \left(\frac{\partial \Psi_{\Pi}}{\partial \Pi} \right)_T. \quad (5)$$

Интегрируя последнюю формулу, полагая, что при $\Psi_{\Pi} = 0$, $\Pi = 0$, получаем

$$\Psi_{\Pi} = \sigma \Pi. \quad (6)$$

Теперь мы можем получить соотношение для внутренней поверхности слоя жидкости:

$$U_{\Pi} = \Psi_{\Pi} + TS = \sigma \Pi + T \left(-\frac{d\sigma}{dT} \Pi \right) = \left(\sigma - T \frac{d\sigma}{dT} \right) \Pi$$

Поскольку процесс расширения плёнки изотермический, то теплота, сообщаемая пленке при её расширении от площади Π_1 до Π_2 равна:

$$Q_T = T [S(T, \Pi_2) - S(T, \Pi_1)] = -T \frac{d\sigma}{dT} (\Pi_2 - \Pi_1)$$

где теплотой образования единицы поверхности называется:

$$q = -T \frac{d\sigma}{dT}$$

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 дается формулой Лапласа:

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

где σ – 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 ΔP , необходимое для выталкивания в жидкость пузырька воздуха.

3 Экспериментальная установка

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 разрежения воздуха в колбе с иглой пузырьки воздуха начинают пробулькивать через жидкость. Поверхностное натяжение можно определить по величине разрежения ΔP (2.1), необходимого для прохождения пузырьков (при известном радиусе иглы).

Разрежение в системе создается с помощью аспиратора A . 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 и , 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 непрерывно прогоняется вода из термостата.

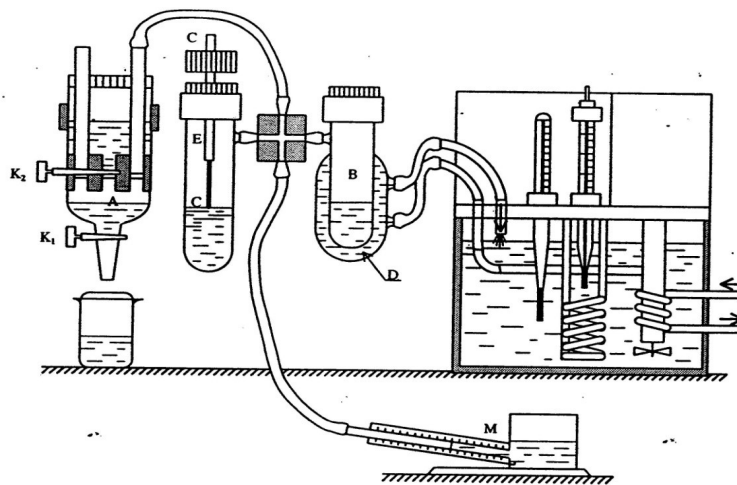


Рис. 1: Экспериментальная установка

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

$$\rho gh = P_2 - P_1.$$

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.

4 Ход работы

4.1 Проверка герметичности установки

Для проверки опускаем чистую сухую иглу в сосуд со спиртом так, чтобы кончик иглы лишь касался поверхности спирта. Плотнo закрываем обе колбы и открываем кран аспиратора для пробулькивания пузырьков воздуха в колбе. Замеряем показания микроманометра, они не должны меняться.

4.2 Начало измерений

Положением крана аспиратора подбираем частоту падения капель так, чтобы максимальное давление манометра не зависело от этой частоты (не чаще чем 1 капля в 5 секунд).

4.3 Определение диаметра иглы

Параметры при измерениях:

$$t = 22,3 \text{ } ^\circ\text{C} \qquad \sigma = 22.78 \frac{\text{мН}}{\text{м}}$$

Измеряем максимальное давление ΔP при пробулькивании пузырьков воздуха через спирт. Провели 5 измерений. Показания манометра для всех $h = 49,5\text{мм}$. Значит случайная погрешность измерений равна 0. То есть погрешность измерений будет определяться погрешностью микроманометра (класс точности — 1,0):

$$\Delta P = C \cdot h \cdot \frac{\gamma_{\text{сп. залит.}}}{\gamma_{\text{сп. пр.}}} \cdot K \cdot 9,81 = (97,119 \pm 1,94) \text{ Па}$$

где $C = 1,00$ — поправочный множитель; $K = 0,2$ — постоянная угла наклона; $\gamma_{\text{сп. залит.}} = 0,8095$ — плотность прибора, залитого в прибор; $\gamma_{\text{сп. пр.}} = 0,8095$ — плотность спирта, указанная на прибора

$$d = \frac{4\sigma_{\text{спирт}}}{\Delta P} = (0,938 \pm 0,0187) \text{ мм}$$

Измеряем диаметр внутреннего отверстия иглы при помощи микроскопа:

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

Результат, измеренный микроскопом больше экспериментального значения на 0,122 мм. Такое расхождение можно объяснить несколькими причинами:

- во время эксперимента за короткий промежуток времени из иглы пробулькивало сразу по 2 пузырька воздуха;
- игла может быть загрязнена жиром (или чем то другими).

Далее будем использовать диаметр иглы, измеренный микроскопом, как более точный.

4.4 Измерения для дистиллированной воды с иглой на поверхности

Промываем и просушиваем иглу. Далее приводим её в соприкосновение с поверхностью дистиллированной воды. Регулируем скорость поднятия уровня спирта в манометре и измеряем максимальное давление пробулькивания пузырьков P_1 . Также измеряем расстояние между верхним концом иглы и неподвижным торцом сосуда h_2 .

$$P_1 = (229,5 \pm 4,6) \text{ Па}$$
$$h_1 = (21,0 \pm 0,5) \text{ мм}$$

4.4.1 Измерения для дистиллированной воды с погружённой иглой

Иглу опускаем максимально вниз. Измеряем расстояние h_2 как в предыдущем пункте. Посчитаем максимальное давление P_2 .

$$P_2 = (361,99 \pm 7,24) \text{ Па}$$

$$h_2 = (7,5 \pm 0,5) \text{ мм}$$

По разности давлений $\Delta P = P_2 - P_1 = (132,49 \pm 2,65) \text{ Па}$ определим глубину погружения Δh иглы и сравним с $\Delta h = h_1 - h_2$. Плотность воды при комнатной температуре (25°C) $\rho_{\text{вода}} = 997,0 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$

$$\Delta h = \frac{\Delta P}{\rho g} = (13,5 \pm 0,4)$$

$$\Delta h = h_1 - h_2 = (13,5 \pm 0,5)$$

Значения Δh полностью совпали.

4.5 Температурная зависимость $\sigma(T)$

Включаем термостат, надеваем рубашку на колбу с водой, чтобы уменьшить теплопотери, уходящие в окружающую среду. Дожидаемся установления температуры около 25°C в течение 5 минут. Проводим несколько измерений давления. Далее снимаем показатели давления с микроманометра через каждые $\Delta T = 5 \text{ K}$.

$$\sigma_P = P \sqrt{\left(\frac{\sigma_h}{h}\right)^2} = 3,69 \text{ Па}$$

Посчитали погрешность учитывая случайную. Результаты измерений приведены в таблице 1.

4.6 Расчёт величины коэффициента поверхностного натяжения

Посчитаем коэффициент поверхностного натяжения для каждой из температур, из уравнения (2.1):

$$\sigma = \frac{d_{\text{игла}} \cdot P}{4}$$

$$\sigma_\sigma = \sigma \sqrt{\left(\frac{\sigma_P}{P}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_d}{d}\right)^2} = 4,82 \text{ мН/м}$$

Результаты в таблице 1.

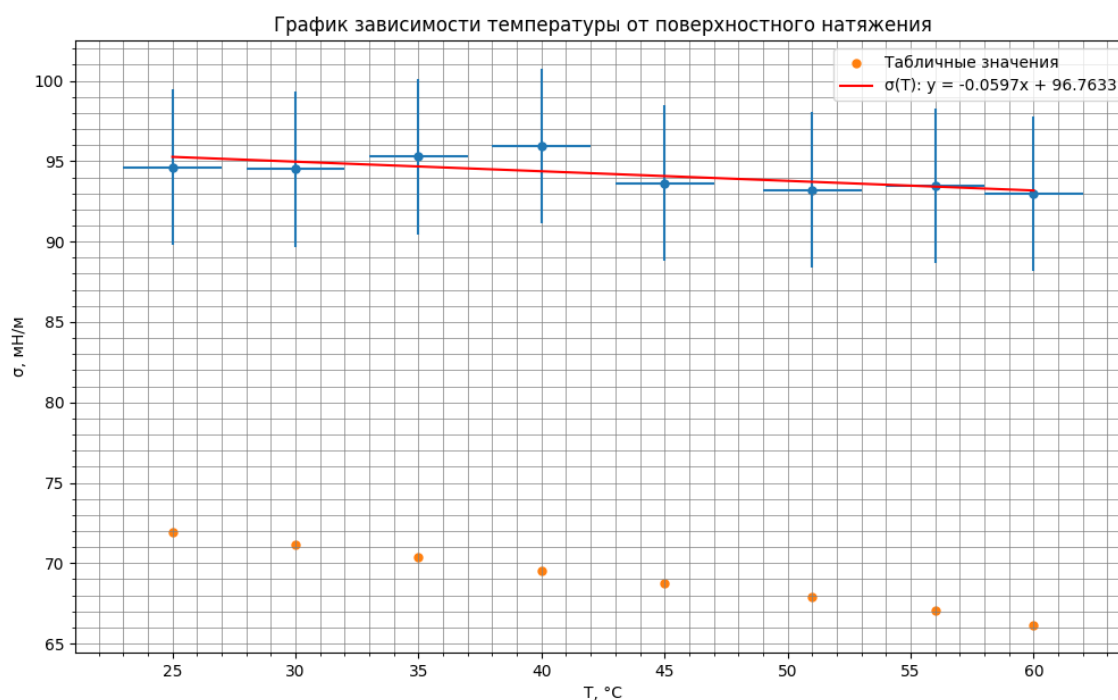
$T, \text{ K}$	$h, \text{ мм}$	$P, \text{ Па}$	$\sigma, \text{ мН/м}$
298 ± 2	$183,75 \pm 1$	360,52	94,64
303 ± 2	$183,50 \pm 1$	360,03	94,50
308 ± 2	$185,00 \pm 1$	362,97	95,28
313 ± 2	$186,33 \pm 1$	365,59	95,97
318 ± 2	$181,83 \pm 1$	356,76	93,65
324 ± 2	$181,00 \pm 1$	355,12	93,22
329 ± 2	$181,50 \pm 1$	356,10	93,48
333 ± 2	$180,50 \pm 1$	354,14	92,96

Таблица 1: Результаты измерений зависимости $\sigma(T)$

Результаты измерений оказались весьма неточными, это мы можем увидеть в таблице. Давление не падало равномерно с повышением температуры, его значения прыгали на микроманометре то вверх, то вниз. Установка была полностью проверена на корректность работы, однако это не помогло стабилизировать давление. Могу предположить, что это может быть связано с условиями перечисленными в пункте 4.3.

5 Построим графики различных зависимостей от температуры

5.0.1 График зависимости температуры от коэффициента поверхностного натяжения



Коэффициент наклона графика $k_1 = -0,058$, отсюда мы найдём $\frac{d\sigma}{dT} = k_1 = -0,058$

$$\sigma_{k_1} = 0,021 \text{ мН/м} \quad \varepsilon_{\sigma_{k_1}} = 35,87\%$$

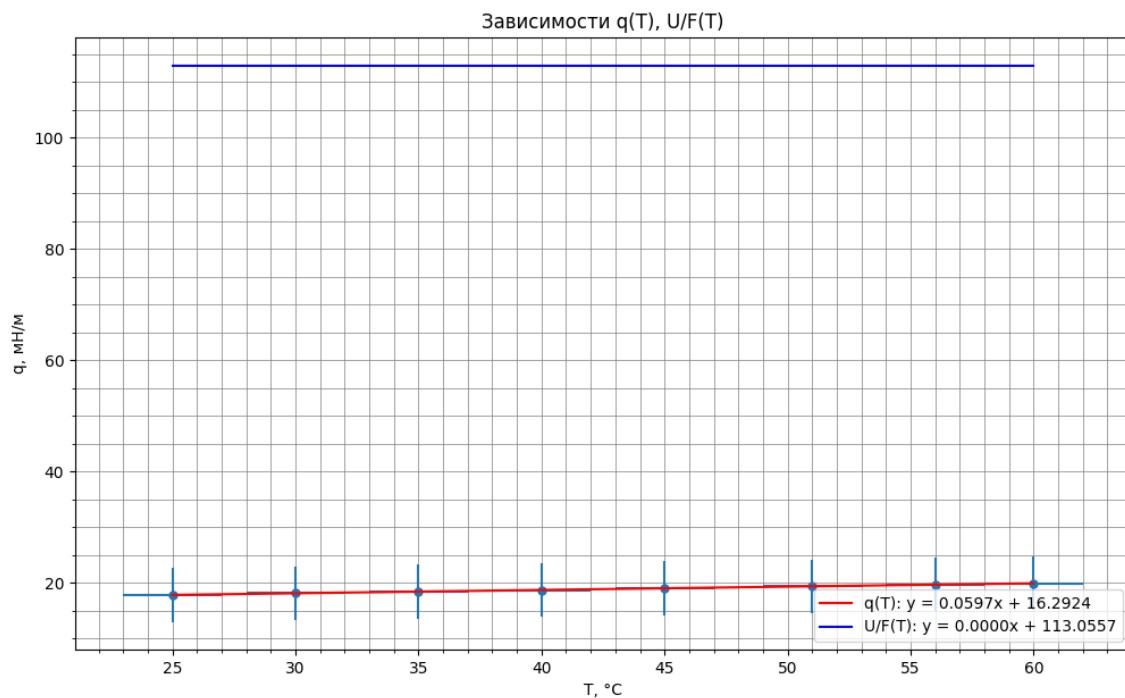
Такая большая относительная погрешность связана, опять же, с теми условиями, которые перечислены в пункте 4.3.

5.0.2 График зависимости теплоты образования единицы поверхности жидкости и поверхностной энергии U единицы площади F от температуры

Коэффициент наклона графика $k_2 = 0,058$

$$\sigma_{k_1} = 0,021 \text{ мН/м} \quad \varepsilon_{\sigma_{k_1}} = 35,87\%$$

На втором графике получили также зависимость поверхностной энергии U единицы площади F от температуры, её коэффициент наклона $k_3 = 0$.



6 Выводы

Таблица 2: Сравнение

	d , мм	Δh , мм
экспериментальное	0,938	13,5
измеренное прибором	1,05	13,5

В ходе лабораторной работы мы измерили температурную зависимость коэффициента поверхностного натяжения дистиллированной воды, определили полную поверхностную энергию и теплоту, которую необходимо для изотермического образования единицы поверхностного натяжения. Определили экспериментально диаметр иглы, а также измерили его под микроскопом, результаты приведены в таблице 2 выше. Также измерили и посчитали Δh двумя способами. Оба измерения полностью совпали. Неточными оказались измерения коэффициента поверхностного натяжения воды, это связано с возможной разностью температур иглы и воды, а также с плохим качеством дистиллята. Для установления равновесия в системе необходимо, чтобы прошло большое количество времени, что также могло повлиять на неточность результата.