

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ (НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Факультет общей и прикладной физики

**Отчет о выполнении работы 2.2.5.
Определение вязкости жидкости по скорости
истечения через капилляр**

Выполнил:
Студент гр. Б02-304
Головинов. Г.А.



Долгопрудный, 2024

Аннотация

Цель работы: 1) измерить коэффициент поверхностного натяжения в зависимости от температуры; 2) определение полной поверхностной энергии и теплоты, необходимой для изотермического образования единицы поверхности жидкости.

В работе используются: прибор Ребиндера с термостатом; исследуемые жидкости; стаканы; линейка.

Основные теоретические сведения.

Рассмотрим пузырь воздуха в некоторой жидкости. Если он имеет сферическую форму и радиус r , то внутри него давление на Δp выше, чем в жидкости. Δp находится из следующего соотношения, которое называется формулой Лапласа:

$$\Delta p = \frac{2\sigma}{r} \quad (1)$$

Определять коэффициент поверхностного натяжения будем как раз с помощью нее: зная разницу давления и радиус иглы (который можно измерить двумя способами: прямо и косвенно) мы можем найти искомый коэффициент. В работе предлагается исследовать зависимость коэффициента поверхностного натяжения от температуры жидкости.

Термодинамика поверхностного натяжения. Из первого начала термодинамики и определения коэффициента σ :

$$\delta Q = dU_{\Pi} - \sigma d\Pi$$

где dU_{Π} — полная поверхностная энергия. Далее запишем через энтропию:

$$dU_{\Pi} = TdS + \sigma d\Pi \quad (2)$$

Перейдем к свободной энергии F , которая по определению:

$$F = U_{\Pi} - TS \quad (3)$$

Подставляя (2) в предыдущее выражение получим:

$$dF = -SdT + \sigma d\Pi \quad (4)$$

Откуда

$$S = -\left(\frac{\partial F}{\partial T}\right)_{\Pi}, \quad \sigma = \left(\frac{\partial F}{\partial \Pi}\right)_T. \quad (5)$$

Последнее можно проинтегрировать, учитывая как граничные условия, что $F = 0$ при $\Pi = 0$. Получим:

$$F = \sigma \Pi \quad (6)$$

Это можно подставить в первое из двух соотношений в (5) и получить

$$S = -\Pi \frac{d\sigma}{dT}$$

Тогда получим выражение для энергии:

$$U_{\Pi} = \left(\sigma - T \frac{d\sigma}{dT}\right) \Pi \quad (7)$$

При изотермическом процессе полная энергия увеличивается только из-за увеличения площади поверхности, при этом к ней нужно подвести тепло

$$Q = \Delta U_{\Pi} - \sigma \Delta \Pi = -T \frac{d\sigma}{dT} \Delta \Pi$$

На единицу площади:

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

А энергия на единицу площади:

$$\frac{\Delta U_{\Pi}}{\Delta \Pi} = q + \sigma$$

Экспериментальная установка — Обработка результатов.

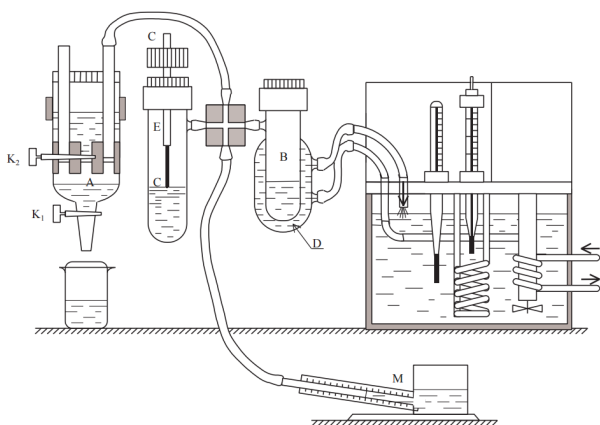


Рис. 1: Схема установки

Температура исследуемой жидкости (воды) поддерживается установленной с помощью термостата. Когда мы открываем кран K_1 , из аспиратора А вытекает вода. Это создает падение давления внутри системы, которое можно измерить манометром М.

Верхний конец иглы открыт, внутри иглы атмосферное давление p_0 . Так как давление в системе $p' < p_0$, на конце иглы начинает образовываться пузырь. Давление внутри пузыря остается атмосферным, значит внутри системы новое давление $p_0 - \Delta p = p_0 - 2\sigma/r$. Манометр измеряет разницу давления внутри системы и атмосферы, причем в этом случае он будет показывать давление внутри пузыря.

Если мы находимся на глубине h под поверхностью жидкости, то давление в жидкости на этом же уровне будет $\rho gh - 2\sigma/r$, на поверхности и в системе тогда $p_0 - 2\sigma/r$. Поэтому максимальное показание манометра и есть добавочное давление Δp . Максимальным оно будет в момент, когда радиус пузырька равен радиусу иглы. Поэтому нас интересует именно максимальное давление.

Для начала стоит сравнить внутренний радиус иглы прямым и косвенным методом. С помощью микроскопа получено значение $r = 0.6 \text{ mm}$. С помощью пробуживания спирта (коэффициент поверхностного натяжения для него будем считать $\sigma_{C_2H_5OH} \approx 0.022 \text{ N/m}$).

По полученным точкам (см. таблицы в приложении) построим зависимость $\sigma(T)$, аппроксимируем ее по методу МНК прямой $y = kx + b$. Наклон этой прямой $d\sigma/dT$ можно будет сравнить с табличным (так же как и сами значения σ).

Погрешность δT примем за 0.2 K , так как термостат часто «перескакивал» заданные значения на несколько долей градуса. Погрешность коэффициента поверхностного натяжения складывается из приборной и случайной составляющей.

Приборная обусловлена погрешностью измерения с помощью манометра, положим $\delta_p = 0.5$ делений, что равно $\approx 1 \text{ Pa}$. Кроме того в приборную погрешность входит погрешность измерения высоты: 0.5 mm . Оценим каждое значение максимальной погрешностью. Итого $\delta_{\text{приборная}} \approx 0.6 \text{ mN/m}$.

Для оценки случайной погрешности мы провели по 5 измерений для каждой температуры. Посчитаем стандартное отклонение:

$$\delta_{\text{случайная}} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \langle x \rangle)^2}$$

Некоторые точки получились без случайной погрешности, так как там все измерения совпали, другие точки получились с погрешностью вплоть до 0.32 mN/m . Итоговые значения с погрешностями приведены в таблице в приложении.

Получена зависимость, которая, как видно, плохо аппроксимируется прямой: достаточно

большой изгиб не позволяет провести прямую так, чтобы она прошла через кресты погрешностей. Квадратичной зависимостью она аппроксимируется лучше, однако мы не знаем, какая степень (если вообще степень) должна быть у этой зависимости. Квадрат был выбран лишь потому, что у него не будет неприятных «сюрпризов» со знаками на бесконечности. Так можно лучше определить критическую температуру воды.

Линейная зависимость дает нам температуру $T_c \approx 776.5$ К, квадратичная зависимость дает

$T_c \approx 437.2$ К. Согласно таблице для воды этот показатель составляет ≈ 647 К, что больше, чем предсказывает квадратичная зависимость и меньше, чем предсказывает линейная.

Наклон линейной аппроксимации $d\sigma/dT \approx (-1.7 \pm 0.2) \cdot 10^{-4}$ Н/(м·К). Табличное значение $-1.7 \cdot 10^{-4}$ Н/(м·К) практически совпадает с полученным.

По формулам из теоретического введения получим теплоту образования единицы площади поверхности q .

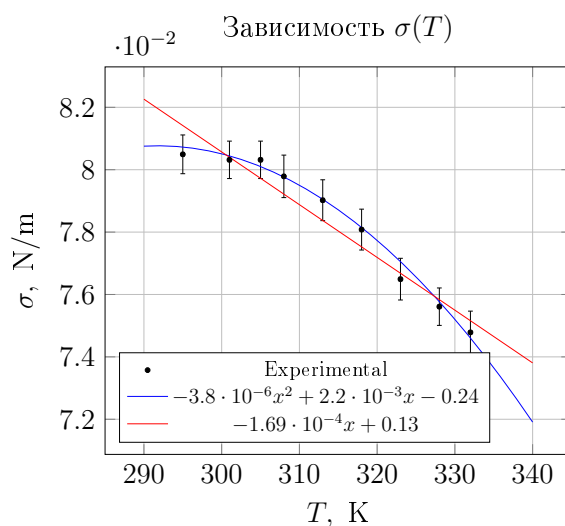


Рис. 2: Зависимость коэффициента поверхностного натяжения от температуры

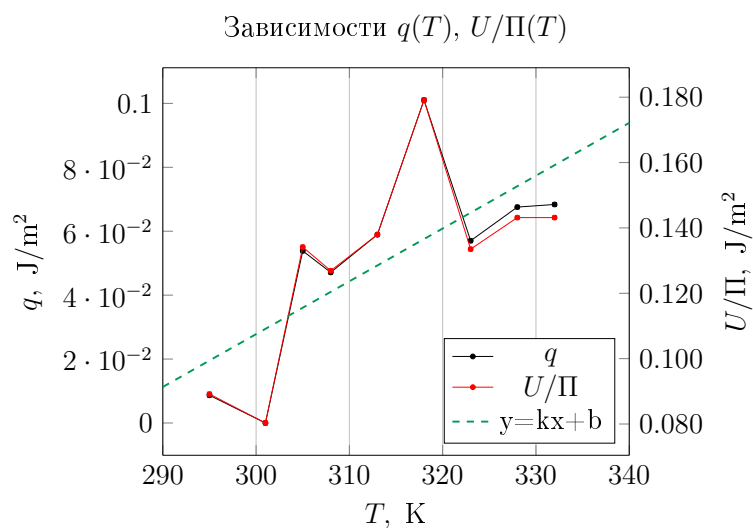


Рис. 3: Зависимость теплоты образования единицы площади и поверхностной энергии единицы площади от температуры

Эта картинка была получена соединением двух точек из рис. 2 и получением $d\sigma/dT$ для каждой температуры. Конечно, учитывая разброс и неточность полученных σ , полученная зависимость тоже имеет большой разброс. Прибавляя σ к полученным q получим вторую зависимость.

Как и ожидалось, графики имеют практически одинаковую форму. Линейными их назвать сложно, однако это более интересный результат, чем просто подстановка итогового значения $d\sigma/dT$ (тогда мы бы получили, ожидаемо, просто прямую линию).

Обсуждение результатов и выводы.

В ходе работы мы получили зависимость коэффициента поверхностного натяжения от температуры, полученные значения хорошо соотносятся с табличными, относительная погрешность $\varepsilon < 10\%$.

Получено также соотношение $d\sigma/dT$ из линейной аппроксимации $\sigma(T)$. Результат с учетом округления совпадает с табличным. Любопытно, что даже при достаточно малом количестве точек и малом разбросе температур видна нелинейность полученной зависимости. Однако линейная аппроксимация дает более точные результаты для критической температуры воды.