

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; «рубашка» для термостатируемой колбы из теплоизоляционного материала. исследуемые жидкости; стаканы.

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 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.

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 пробулькивать через жидкость. Поверхностное натяжение можно определить по величине разрежения ΔP (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. Разряжение 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 разряженным 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.

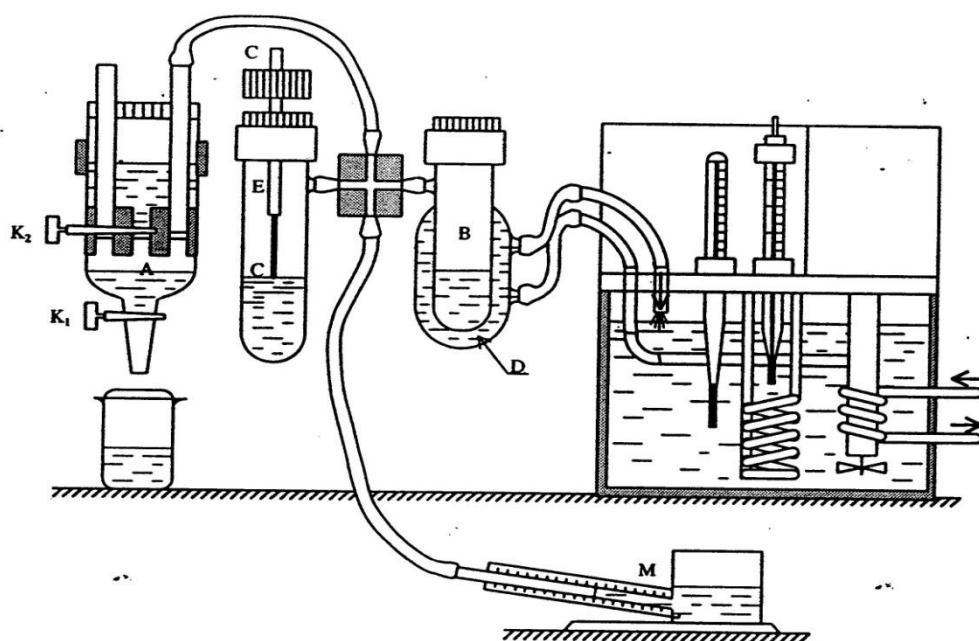


Рис. 1 Схема установки для измерения температурной зависимости коэффициента поверхностного натяжения.

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, $P = \Delta P + \rho gh$. Заметим, что ρgh от температуры практически не зависит, так как подъём уровня жидкости компенсируется уменьшением её плотности (произведение ρh 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.

Замечание. Чувствительность микроманометра высока, поэтому правильность его работы существенно зависит от правильности эксплуатации прибора. **Все изменения в установке необходимо проводить, предварительно поставив переключатель микроманометра на атмосферу.**

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 невоспроизводимости измерений.

ЗАДАНИЕ.

1. Проверьте герметичность установки. Для этого заполните аспиратор водой. Чистую сухую иглу установите в сосуд со спиртом так, чтобы кончик иглы лишь касался поверхности спирта. Плотнo закройте обе колбы В и Е пробками. Откройте кран K_1 аспиратора и добейтесь пробулькивания пузырьков воздуха в колбе. Замерьте показания микроманометра. Закройте кран K_1 . Наблюдайте за показаниями манометра: при отсутствии течи в установке столбик спирта в манометре будет неподвижен. При наличии течи следует обратиться к преподавателю или лаборанту.
2. Убедившись в герметичности системы, начните измерения. Откройте кран K_1 . Подберите частоту падения капель из аспиратора так, чтобы максимальное давление манометра не зависело от этой частоты (не чаще, чем 1 капля в 5 секунд).

3. Измерьте максимальное давление $\Delta P_{\text{спирт}}$ при пробулькивании пузырьков воздуха через спирт. По разбросу результатов оцените случайную погрешность измерения. Пользуясь табличным значением коэффициента поверхностного натяжения спирта, определите по формуле (1) диаметр иглы. Сравните полученный результат с диаметром иглы, измеренным по микроскопу.

4. Перенесите предварительно промытую и просушенную от спирта иглу в колбу с дистиллированной водой. Измерьте максимальное давление P_1 при пробулькивании пузырьков, когда игла лишь касается поверхности воды. Аспиратор должен быть предварительно заполнен водой почти доверху. Отрегулируйте скорость поднятия уровня спирта в манометре и сохраняйте её в течение всех экспериментов. Измерьте расстояние между верхним концом иглы и любой неподвижной частью прибора h_1 .

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

6. Снимите температурную зависимость $\sigma(T)$ дистиллированной воды. Для этого включите термостат и подождите, пока нужная вам температура не стабилизируется. Следует заметить, что термометр показывает температуру воды в термостате. Время установления заданной температуры в колбе с исследуемой жидкостью довольно большое, поэтому после установления заданной температуры в термостате дождитесь прогрева исследуемой жидкости в колбе в течение нескольких минут (5-7 минут). На время измерений для более быстрого и точного установления теплового равновесия колбу с термостатируемой жидкостью дополнительно оберните специальной легко снимаемой «рубашкой» из теплоизоляционного материала. После этого проведите измерение давления. Для уменьшения погрешности опыта замер давления при фиксированной температуре следует проводить несколько раз.

Проводить измерение температурной зависимости рекомендуется в диапазоне $20^{\circ}\text{C} - 60^{\circ}\text{C}$ через 5° . Запрещается нагревать воду в термостате выше 60°C .

7. Оцените погрешность измерения давления и температуры. Рассчитайте величину коэффициента поверхностного натяжения воды $\sigma(T)$, используя

значение диаметра иглы, полученное при измерениях на спирте (или измеренное на микроскопе).

8. Постройте график зависимости σ (Т) и определите по графику температурный коэффициент $\frac{d\sigma}{dT}$. Оцените точность результата.

9. На другом графике постройте зависимость от температуры

а) теплоты образования единицы поверхности жидкости $q = -T \cdot \frac{d\sigma}{dT}$ и

б) поверхностной энергии U единицы площади F: $\frac{U}{F} = (\sigma - T \cdot \frac{d\sigma}{dT})$.

10*. Снимите температурную зависимость $\sigma(T)$ дистиллированной воды в более широком диапазоне температур от 2 °С до 70 °С. Для этого дополнительно проведите измерение температурной зависимости в диапазонах 2°С – 20°С и 60°С – 70°С. Постройте график зависимости $\sigma(T)$ в программе OriginPro (Piton, Exel и т.д.) и аппроксимируйте его прямой и параболой. Сравните соответствующие коэффициенты корреляции и сделайте вывод о том, какая из аппроксимируемых кривых лучше описывает экспериментальные данные. Используя аппроксимацию экспериментальной кривой $\sigma(T)$ параболой, определите удельную поверхностную теплоемкость $C_{II} = \frac{1}{II} \left(\frac{\partial Q}{\partial T} \right)_{II}$. Оцените толщину поверхностной пленки воды, ответственной за явление поверхностного натяжения.

Контрольные вопросы.

1. Если пропускать несколько пузырьков в секунду, манометр показывает практически постоянное давление. Почему бы не измерять его?
2. Почему следует измерять именно максимальное давление?
3. Почему погружение иглы уменьшает влияние теплового расширения?
4. Почему пузырьки не должны касаться дна?
5. Можно ли не зная глубины погружения иглы, определить σ , измеряя максимальное и минимальное давление при проталкивании пузырька?

* Дополнительное задание. Выполняется по указанию преподавателя на установке, оснащенной термостатом WITEG.

6. Пользуясь полученными результатами, оценить критическую температуру воды.
7. Позволяет ли проведенный эксперимент заметить нелинейность зависимости $\sigma(T)$?
8. Какие погрешности преобладают в эксперименте: случайные или систематические?
9. Какая величина должна стоять в формуле для высоты поднятия воды в стеклянном капилляре: $\sigma_{\text{вода} - \text{воздух}}$ или $\sigma_{\text{вода} - \text{стекло}}$?
10. Аппроксимируйте табличные значения зависимости коэффициента объемного расширения (α) воды от температуры соответствующей кривой $\alpha(T)$ и пользуясь этой зависимостью оцените подъём уровня воды в колбе при ее нагревании от 20°C до 60 °C.

Приложение 1

Разложение температурной зависимости $\sigma(T)$ в ряд Тейлора

Разложим функцию $\sigma(T)$ в ряд Тейлора в окрестности точки $T=T_0$ с точностью до квадратичного слагаемого:

$$\sigma(T) = \sigma(T_0) + \left. \frac{d\sigma}{dT} \right|_{T=T_0} \cdot (T - T_0) + \frac{1}{2} \left. \frac{d^2\sigma}{dT^2} \right|_{T=T_0} \cdot (T - T_0)^2 \quad (1)$$

Энтропия поверхностной пленки как функция температуры и площади её поверхности определяется формулой:

$$S(T, \Pi) = -\Pi \frac{d\sigma}{dT} \quad (2)$$

Тогда из термодинамического определения энтропии:

$$\delta Q = T dS = -T \left(\Pi \frac{d^2\sigma}{dT^2} dT + \frac{d\sigma}{dT} d\Pi \right) \quad (3)$$

При $T=\text{const}$:

$$(\delta Q)_T = -T \frac{d\sigma}{dT} (d\Pi)_T \quad (4)$$

Теплота образования единицы поверхности жидкости с учетом (4):

$$q = \left(\frac{\delta Q}{d\Pi} \right)_T = -T \frac{d\sigma}{dT} \Rightarrow \frac{d\sigma}{dT} = -\frac{q}{T}$$

Из (3) при $\Pi = \text{const}$:

$$(\delta Q)_\Pi = -T\Pi \frac{d^2\sigma}{dT^2} (dT)_\Pi \quad (5)$$

Удельная поверхностная теплоемкость с учетом (5):

$$C_\Pi = \frac{1}{\Pi} \left(\frac{\delta Q}{dT} \right)_\Pi = -T \frac{d^2\sigma}{dT^2} \Rightarrow \frac{d^2\sigma}{dT^2} = -\frac{C_\Pi}{T}$$

Таким образом, искомое разложение функции $\sigma(T)$ в ряд Тейлора будет иметь следующий вид:

$$\sigma(T) = \sigma(T_0) - \frac{q}{T_0} \cdot (T - T_0) - \frac{C_\Pi}{2T_0} \cdot (T - T_0)^2 \quad (6)$$

Найдем связь между удельной поверхностной теплоемкостью пленки C_Π с удельной теплоемкостью жидкости C . Для этого рассмотрим поверхностную пленку толщины h и площади Π . Тогда с учетом того, что у пленки две поверхности:

$$C_\Pi = \frac{C\rho h\Pi}{2\Pi} = \frac{C\rho h}{2} \quad (7)$$

Формула (7) позволяет оценить толщину поверхностной пленки воды, ответственной за явление поверхностного натяжения.

Приложение 2

Таблицы

Таблица 1

Плотность (ρ), коэффициенты поверхностного натяжения (σ) и объемного расширения (α), удельная теплоемкость (C_p) воды при различных температурах

t, °C	ρ , кг/м ³	σ , мН/м	$\alpha \cdot 10^4$, K ⁻¹	C_p , Дж/(кг·K)
2	999,9	75,36	-0,328	4210,7
4	1000,0	75,08	0,003	4204,8

6	999,9	74,79	0,313	4199,9
10	999,7	74,23	0,880	4192,1
15	999,1	73,50	1,509	4185,6
20	998,2	72,75	2,068	4181,7
25	997,0	71,99	2,572	4179,5
30	995,6	71,20	3,033	4178,5
35	994,0	70,41	3,457	4178,2
40	992,2	69,60	3,853	4178,6
45	990,2	68,78	4,224	4179,4
50	988,0	67,94	4,575	4180,7
55	985,7	67,1	4,909	4182,35
60	983,2	66,24	5,230	4184,4
65	980,6	65,36	5,539	4186,85
70	977,8	64,47	5,838	4189,7
80	971,8	62,67	6,411	4196,5
90	965,3	60,82	6,962	4205,0
100	958,4	58,91	7,500	4216,4

Таблица 2

Плотность (ρ), коэффициенты поверхностного натяжения (σ) и объемного расширения (α), удельная теплоемкость (C_p) этанола при различных температурах.

t, °C	ρ , кг/м ³	σ , мН/м	$\alpha \cdot 10^3$, K ⁻¹	C_p , Дж/(кг·K)
10	797,9	23,63	1,059	2321
20	789,5	22,78	1,079	2398
30	781,0	21,90	1,103	2483
40	772,2	21,00	1,133	2576
50	763,3	20,10	1,170	2677
60	754,1	19,20	1,217	2785
70	744,6	18,30	1,275	2902
80	734,8	17,39	1,346	3027
90	725,1	16,45	1,346	3160
100	715,7	15,48	1,534	3302

Таблица 3

Плотность (ρ), коэффициенты поверхностного натяжения (σ) и объемного расширения (α), удельная теплоемкость (C_p) анилина при различных температурах

t, °C	ρ , кг/м ³	σ , мН/м	$\alpha \cdot 10^4$, K ⁻¹	C_p , Дж/(кг·K)
10	1029,9	44,27	0,739	2051
20	1022,5	43,05	0,766	2074
30	1015,2	41,87	0,794	2096
40	1007,0	40,70	0,822	2119

50	999,0	39,53	0,851	2141
60	990,1	38,36	0,880	2166
70	981,3	37,20	0,911	2194
80	971,8	36,04	0,942	2229
90	962,5	34,88	0,973	2273
100	952,4	33,71	1,006	2330