

Измерение коэффициента поверхностного натяжения жидкости (2.5.1)

Манро Эйден

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.

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

Теоретические сведения

Наличие поверхностного слоя приводит к разнице давлений по разные стороны от искривленной границы раздела двух сред. Для сферического пузырька с воздухом внутри жидкости избыточное давление рассчитывается с использованием формулы Лапласа,

$$\Delta P = \frac{2\sigma}{r}$$

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 является основой предложенного метода определения коэффициента поверхностного натяжения жидкости. Для этого измеряется давление ΔP , необходимое для выталкивания в жидкость пузырька воздуха.

Экспериментальная установка

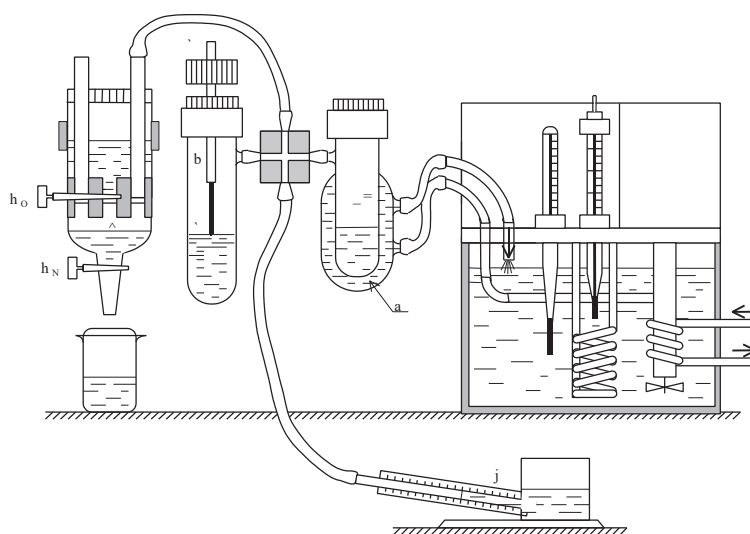


Рис. 1: Схема установки для измерения температурной зависимости коэффициента поверхностного натяжения.

Исследуемая жидкость (дистиллированная вода) наливается в сосуд (колбу) **В** (рис. ??). 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 разряжения воздуха в колбе с иглой пузырьки воздуха начинают пробулькивать через жидкость. Поверхностное натяжение можно определить по величине разряжения ΔP (??), необходимого для прохождения пузырьков (при известном радиусе иглы).

Разряжение 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. Разряжение 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 разряженным воздухом и атмосферой измеряется спиртовым микроманометром.

Погрешности

$$\sigma_{\text{микроскоп}} = 0,05 \text{ мм} \quad \sigma_{\text{линейка}} = 0,5 \text{ мм} \quad \sigma_{\text{манометр}} = 0,1 \text{ Па}$$

Ход работы

1. Проверим герметичность установки.
2. Откроем кран К1. Подберём частоту падения капель около одной капли в 5 секунд.
3. Измерим максимальное давление $\Delta P_{\text{спирт}}$ при пробулькивании пузырьков воздуха через спирт. Данные занесём в таблицу 1. По разбросу результатов оценим случайную погрешность измерения.

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
h , дел	46	45	46	45	45	45	45	45	45	45
$h_{\text{ср}} = 45,2$ дел					$\sigma_h = 0,3$ дел					

Таблица 1: Измерения для спирта ($h_{\text{сп}}$)

В таблице учтена только случайная погрешность величины h , которая составляет около 0,7 % в то время как приборная погрешность составляет две цены деления (1 деление – инструментальная погрешность и плюс ещё одно – моя реакция и способность зафиксировать правильное деление), то есть её относительный вклад $\approx 2/46 \approx 4.3\%$.

По формуле $\Delta P_{\text{спирт}} = 0.2 \cdot 9.81 \cdot h$ вычислим $\Delta P_{\text{спирт}}$.

$$\underline{\Delta P_{\text{спирт}} = (88.7 \pm 3.8) \text{ Па}}$$

Пользуясь табличным значением коэффициента поверхностного натяжения спирта, определим по формуле (1) диаметр иглы.

- $\sigma_{\text{спирт, табл.}} = 22,4 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2}$.
- $d_{\text{рассч.}} = \frac{4\sigma_{\text{спирт, табл.}}}{\Delta P_{\text{спирт}}} \approx 1.01 \text{ мм.}$
- $\frac{\sigma_d}{d} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\Delta P}}{\Delta P}\right)^2} \approx 4.3\%$.

Тогда итоговое значение:

$$\underline{d_{\text{рассч.}} = (1.01 \pm 0.05) \text{ мм.}}$$

Теперь воспользуемся микроскопом чтобы измерить диаметр иглы и сравним его с рассчитанным.

$$\underline{d_{\text{изм.}} = (1.00 \pm 0.05) \text{ мм.}}$$

Как видно, в пределах погрешности величины диаметра иглы совпали, что говорит о хорошо проведённых измерениях.

4. Теперь перенесём иглу в колбу с водой, предварительно промыв её. Измерим максимальное давление P_1 при пробулькивании пузырьков, когда игла лишь касается поверхности воды. Отрегулируем скорость поднятия уровня спирта в манометре (около одной капли в 5 секунд) и будем сохранять её в течение всех экспериментов.

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
h , дел	138	137	137	137	138	137	137	137	137	137
$h_{\text{ср}} = 137,2$ дел					$\sigma_h = 0,4$ дел					

Таблица 2: Измерения для воды ($h_{\text{ср}}$)

Аналогично п.3 основной вклад в погрешность величины h определяется инструментальной погрешностью, которая равна $\approx 2/137 \approx 1.5\%$. Аналогично п.3 вычислим давление и в результате получим:

$$\underline{P_1 = (268.8 \pm 4.0) \text{ Па.}}$$

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

$$\underline{h_1 = (2.70 \pm 0.05) \text{ см.}}$$

5. Утопим иглу до предела. Аналогично п.4 измерим h_2 и P_2 .

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
h , дел	230	229	229	229	229	229	229	229	229	230
$h_{\text{ср}} = 239,2$ дел					$\sigma_h = 0,4$ дел					

Таблица 3: Измерения давления P_2

$$\underline{P_2 = (469.3 \pm 3.9) \text{ Па.}}$$

$$\underline{h_2 = (0.60 \pm 0.05) \text{ см.}}$$

По разности давлений $\Delta P = P_2 - P_1$ определим глубину погружения Δh_1 иглы и сравним с $\Delta h_2 = h_1 - h_2$. Погрешности при этом получаются по формулам $\frac{\sigma_{\Delta h_1}}{\Delta h_1} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{P_1}}{P_1}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{P_2}}{P_2}\right)^2}$ и $\frac{\sigma_{\Delta h_2}}{\Delta h_2} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{h_1}}{h_1}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{h_2}}{h_2}\right)^2}$

$$\underline{\Delta h_2 = h_1 - h_2 = (2.10 \pm 0.08) \text{ см.}}$$

$$\underline{\Delta h_1 = \frac{P_2 - P_1}{\rho g} = (2.04 \pm 0.06) \text{ см.}}$$

Полученные значения для глубины погружения сходятся, соответственно все было грамотно измерено.

6. Снимем температурную зависимость $h(T)$ дистиллированной воды. Для этого включим термостат и подождём, пока нужная нам температура не стабилизируется. После этого проведём измерение давления. И так будем снимать показания через каждые 3 градуса. Результаты измерений занесены в Таблицу 4.

Таблица 4: Измерение давления в зависимости от температуры

$T, ^\circ C$	h , дел										$h_{\text{ср}}$, дел	σ_h , дел
23,5	230	229	229	229	229	229	229	229	229	230	229,2	0,17
28,9	228	228	228	228	227	227	227	227	227	227	227,4	0,26
34,4	227	227	227	227	226	226	226	226	226	227	226,5	0,27
39,5	225	225	225	225	225	224	224	224	225	225	224,7	0,23
45,2	224	224	224	224	224	224	223	223	223	223	223,6	0,26
50,1	223	222	222	223	223	222	222	222	222	222	222,3	0,23
55,1	221	221	221	221	221	221	220	220	220	220	220,6	0,26
59,0	219	219	219	219	219	219	218	218	218	218	218,6	0,26

7. Оценим погрешность измерения давления и температуры. Для давления погрешность вычисляется аналогично п.3, а температура измерена с точностью около $0.2^\circ C$, что составляет около 0.1%, поэтому данная погрешность учитываться не будет ввиду её малости рассчитаем величину коэффициента поверхностного натяжения воды σ , используя формулу, которая следует из (1):

$$\frac{\Delta P_{\text{ср}}}{\Delta P} = \frac{\sigma_{\text{ср}}}{\sigma}.$$

Поскольку $P \propto h$, то для вычисления σ возьмём h из Таблиц 1 и 2. При этом относительная погрешность величины σ складывается из относительных погрешностей измерения давления: $\varepsilon_\sigma = \sqrt{\varepsilon_{h_1}^2 + \varepsilon_{h_2}^2} \approx 4.4\%$, в результате чего получаем:

$$\sigma = \sigma_{\text{ср}} \frac{h}{h_{\text{ср}}} \approx (67,9 \pm 3,0) \cdot 10^{-3} \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2}.$$

В то время как табличное значение коэффициента поверхностного натяжения воды при $25^\circ C$ составляет $71.8 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2}$, что почти перекрывается с полученным нами значением.

8. По данным Таблицы 4 построим график зависимости $h(T)$ (Рис. 2).

Используя МНК определим коэффициент наклона $k = -0,28 \frac{\text{дел}}{^\circ C}$. Определим по графику температурный коэффициент:

$$\alpha = -\frac{d\sigma}{dT} = -\frac{\sigma_{\text{ср}}}{h_{\text{ср}}} \cdot \frac{dh}{dT} = -\frac{\sigma_{\text{ср}}}{h_{\text{ср}}} \cdot k \approx 0,14 \frac{\text{мДж}}{\text{м}^2} \cdot K.$$

Оценим точность результата. Пренебрежём погрешностью, вносимой инструментальной погрешностью термометра (почему это можно сделать описано ранее), поэтому итоговая погрешность величины складывается из погрешности, возникающей из-за аппроксимацией прямой (вычисляется по формуле из МНК $\sigma_k = \frac{1}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{\langle h^2 \rangle}{\langle t^2 \rangle} - k^2} \approx 0.04 \frac{\text{мДж}}{\text{м}^2} \cdot K$, то есть $\varepsilon_k = 12\%$) Поскольку величина h измерена с точностью не менее 4% (по оценкам выше), то будем учитывать вклад только погрешности, возникающей из МНК. Тогда итоговый результат:

$$\alpha = (1,40 \pm 0,18) \cdot 10^{-4} \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2} \cdot K.$$

Это значение перекрывается с табличным $1.54 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2} \cdot K$ в пределах погрешности.

9. На других графиках построим зависимость от температуры

а) теплоты образования единицы поверхности жидкости $q = -T \frac{d\sigma}{dT} = \alpha T$ (Рис. 3)

б) поверхностной энергии U единицы площади $F : \frac{U}{F} = \sigma - T \frac{d\sigma}{dT}$ (Рис. 4).

Обсуждение результатов

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 23°C до 60°C с коэффициентом наклона $d\sigma/dT = (-0,14 \pm 0,18)$ мН/м·°C. Мы получили вполне естественный результат, потому что с увеличением температуры интенсивность межмолекулярного взаимодействия уменьшается, поэтому снижается и поверхностное натяжение жидкостей на границе с воздухом или с собственным паром. Вдали от критической температуры поверхностное натяжение уменьшается прямо пропорционально росту температуры. Стоит отметить, что наш результат в пределах погрешности совпадает с табличным значением $d\sigma/dT \approx -0,15$.

Зная температурный коэффициент поверхностного натяжения, можно исследовать зависимость теплоты образования единицы поверхности жидкости $q = q(T)$ и поверхностной энергии единицы площади U/Π от температуры. Если коэффициент поверхностного натяжения линейно зависит от температуры, то очевидно, что функция $q = -T \frac{d\sigma}{dT}$ является линейной. Менее тривиальным является вопрос о независимости внутренней энергии поверхности U/Π от температуры. Для теоретического подтверждения экспериментального результата запишем уравнение Гиббса-Гельмгольца для поверхностного слоя $U/\Pi = \sigma - T \frac{d\sigma}{dT}$ и продифференцируем его по температуре: $\frac{\partial U/\Pi}{\partial T} = -T \frac{\partial^2 \sigma}{\partial T^2}$, но так как первая производная σ по T есть величина постоянная, то вторая производная обнуляется, следовательно, внутренняя энергия поверхностного слоя не зависит от температуры.

Вывод

В ходе работы был измерен коэффициент поверхностного натяжения воды, который почти совпал с табличным, так же было вычислено значение температурного коэффициента поверхностного натяжения воды, которое уже совпало с табличным. Так же в ходе работы мы попробовали двумя способами измерить диаметр иглы, как выяснилось, если делать это с помощью косвенных измерений (сначала измерять разность давлений, а затем через неё и известный коэффициент поверхностного натяжения спирта вычислить диаметр) то точность будет примерно такой же, если измерять диаметр напрямую с помощью микроскопа (относительная погрешность при этом около 5%). На самом деле стоило измерить диаметр с помощью микроскопа дважды: в двух поперечных направлениях и взять среднее, тогда может быть результаты совпали бы ещё точнее с расчётными.

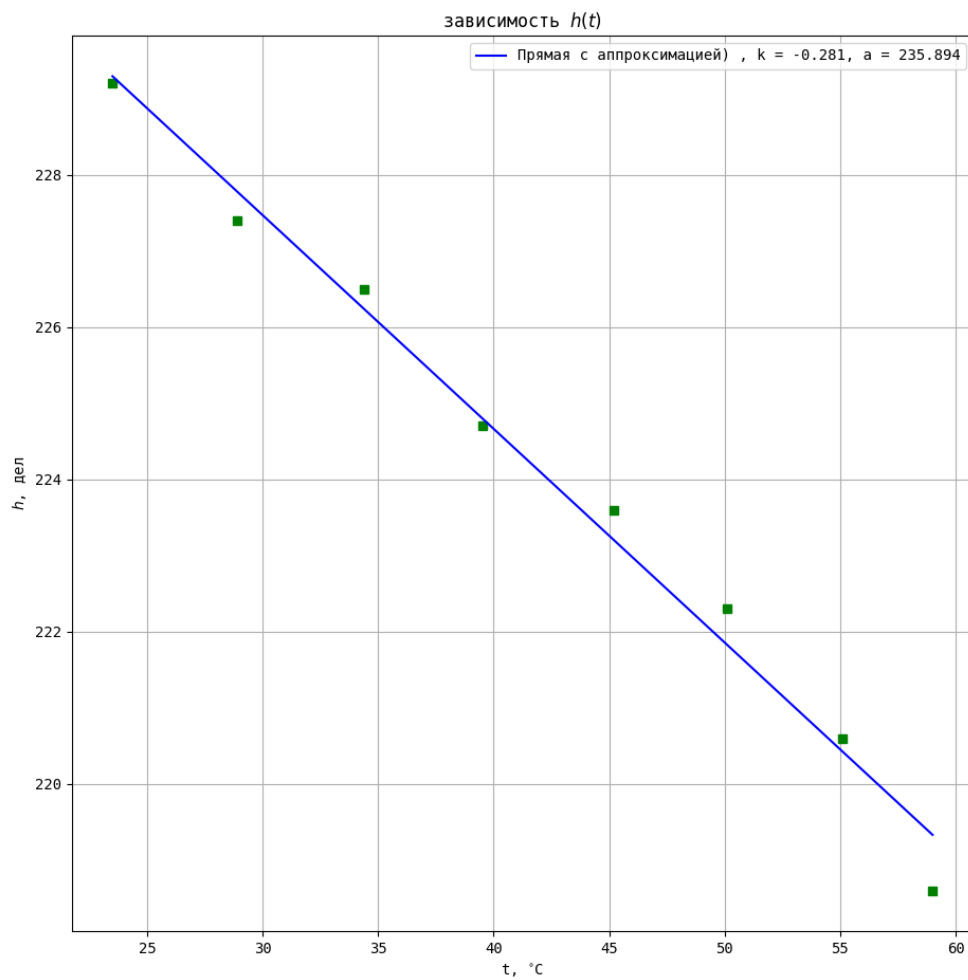


Рис. 2: График, демонстрирующий измеренную зависимость давления от температуры

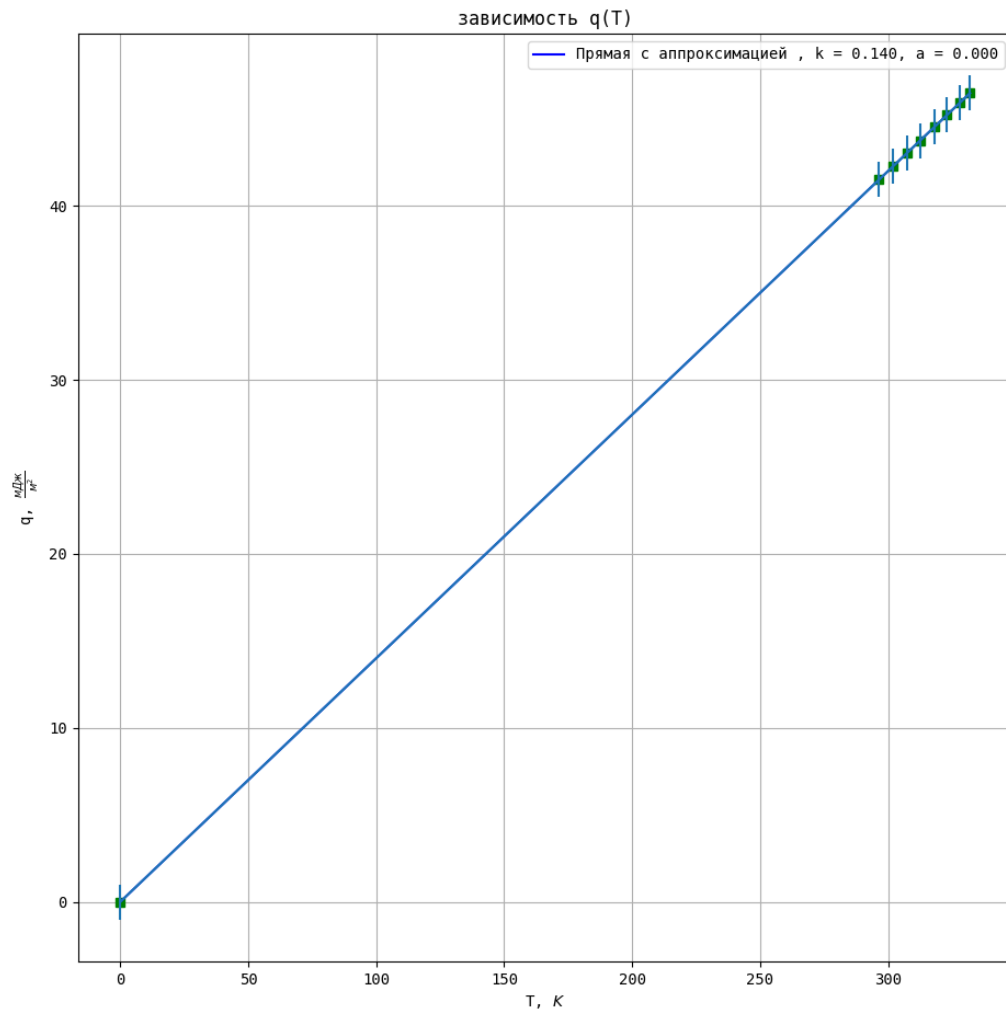


Рис. 3: График зависимости теплоты образования единицы поверхности жидкости от температуры

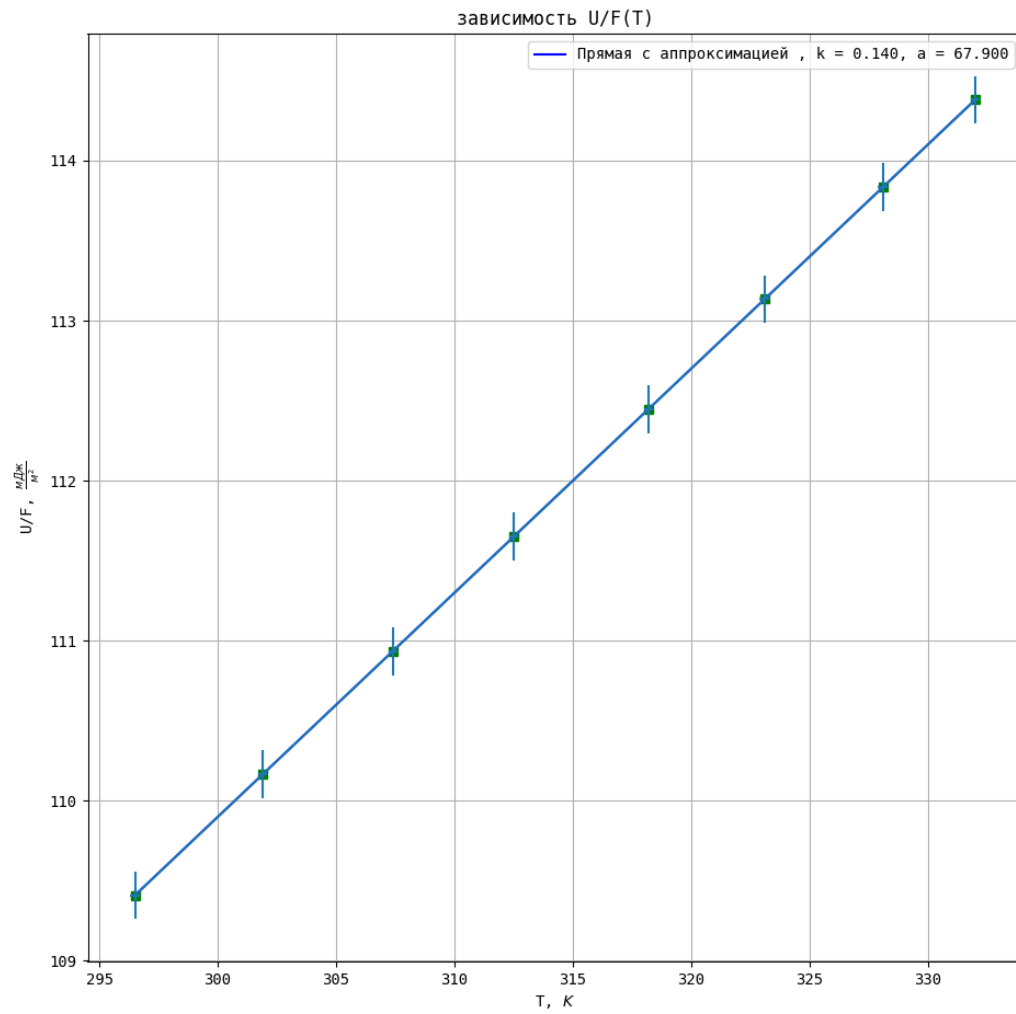


Рис. 4: График зависимости поверхностной энергии U единицы площади F от температуры