

Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)  
Физтех-школа физики и исследований им.Ландау

Лабораторная работа №2.4.1

(Лабораторный практикум по общей физике)

## **Определение теплоты испарения жидкости**

Работу выполнил:  
Климанов Даниил, группа Б02-115

г. Долгопрудный, 2022

**Цель работы:** измерение давления насыщенного пара при разной температуре; вычисление по измеренным данным теплоты испарения с помощью уравнения Клапейрона-Клаузиуса

**Оборудование:** термостат; герметический сосуд, заполненный исследуемой жидкостью; отсчётный микроскоп

## 1 Теоретическое введение:

Испарение - переход вещества из жидкого в газообразное состояние. При испарении с поверхности жидкости вылетают молекулы, образуя пар над ней. Эти молекулы должны обладать достаточно большой кинетической энергией, так как им предстоит совершить работу против сил поверхностного натяжения и внешнего давления. Следовательно, в процессе испарения жидкость постепенно охлаждается, теряя самые быстрые частицы.

По этой причине для поддержания постоянства температуры жидкости в процессе испарения к ней необходимо подводить тепло. Количество теплоты, необходимое для термического испарения одного моля жидкости при внешнем давлении, равном упругости её насыщенных паров, называется молярной теплотой парообразования.

В настоящей работе для измерения теплоты испарения используется косвенный метод, использующий формулу Клапейрона-Клаузиуса:

$$\frac{dP}{dT} = \frac{L}{T \cdot (V_2 - V_1)} \quad (1)$$

, где  $P$  - давление паров при температуре  $T$ ,  $L$  - теплота парообразования жидкости,  $V_2$  - объём пара,  $V_1$  - объём жидкости. Величины  $L$ ,  $V_1$ ,  $V_2$  будем относить к одному молю вещества.

Рассмотрим уравнение состояния реального газа Вандер-Ваальса (для одного моля):

$$\left(P + \frac{a}{V^2}\right) \cdot (V - b) = RT \quad (2)$$

, причём  $b \sim V_1$ , а объём жидкости много меньше объёма пара; Моном  $\frac{a}{V^2}$  можно выбросить по аналогичным причинам, поэтому уравнение можно переписать в виде:

$$V = \frac{RT}{P} \quad (3)$$

, откуда уравнение (1) получает следующий вид:

$$L = \frac{dP}{dT} \cdot \frac{RT^2}{P} = -R \cdot \frac{d(\ln P)}{d\left(\frac{1}{T}\right)} \quad (4)$$

## 2 Экспериментальная установка

Давление насыщенных паров равно давлению столба ртути, который пары вытесняют при расширении. Его высоту можно измерить с помощью шкалы штангенциркуля, погрешность измерений которого равна 0.01 см.

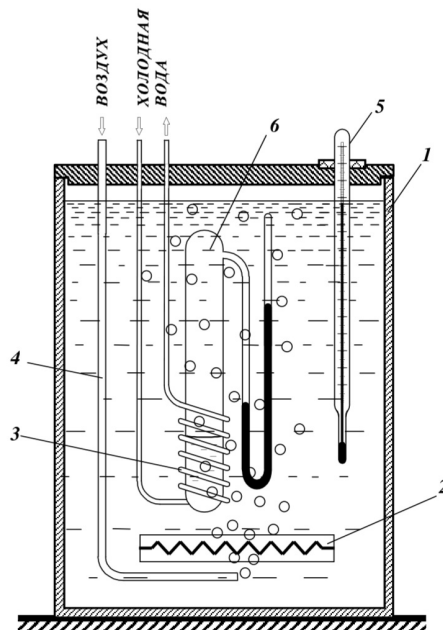


Рис. 1. Схема установки для определения теплоты испарения

Figure 1: Установка для измерения зависимости давления насыщенных паров от температуры

### 3 Выполнение измерений

Цель - измерить давление паров при каждой конкретной температуре, значение которой будет варьироваться от  $296K$  до  $316K$ . Так как термометр измеряет температуру установки, а не сосуда с жидкостью и её паром, то для повышения точности эксперимента измерения будут проводиться сначала при нагревании, а затем при охлаждении сосуда с жидкостью. Зависимость высоты ртутного столба от температуры представлена в таблице ниже(в двух колонках справа представлен пересчёт в единицы давления):

№	$T$ , К	$\Delta h$ , см	$P$ , Па	№	$T$ , К	$\Delta h$ , см	$P$ , Па
1	294	2,20	2919,2	-	-	-	-
2	296	2,46	3264,2	1	296	2,49	3304
3	298	2,70	3582,7	2	298	2,73	3622,5
4	300	2,99	3967,5	3	300	3,03	4020,6
5	302	3,31	4387	4	302	3,37	4471,7
6	304	3,66	4856,5	5	304	3,73	4949,4
7	306	4,02	5334,2	6	306	4,13	5480,2
8	308	4,42	5865	7	308	4,54	6024,2
9	310	4,88	6475,4	8	310	5,01	6647,9
10	312	5,42	7191,9	9	312	5,54	7351,1
11	314	5,99	7948,3	10	314	6,11	8107,5
12	316	6,59	8744,4	11	316	6,59	8744,4

В расчётах использовалась плотность ртути, равная  $13596 \text{ кг/м}^3$

## 4 Обработка измерений

### 4.1 Графики в координатах $P$ , $T$

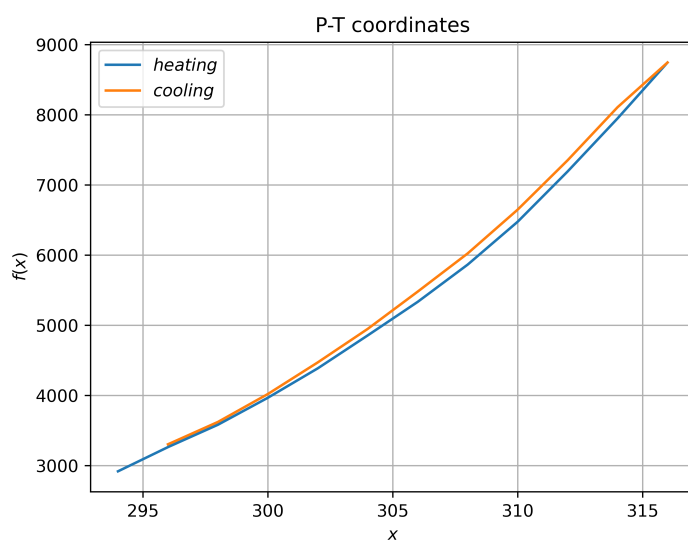


Figure 2: График в естественных координатах

В выбранном диапазоне температур график представляет собой участок кривой с практически постоянной производной, то есть график можно приблизить прямой,

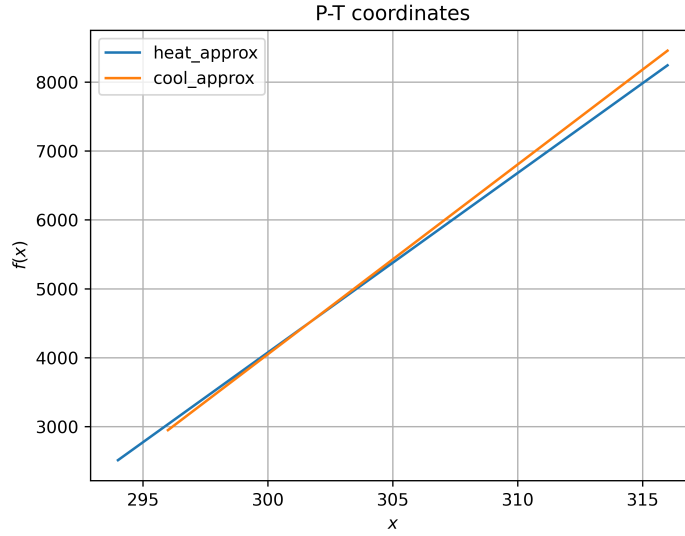


Figure 3: Приближение прямыми

тем самым узнав коэффициент наклона  $\frac{dP}{dT}$  в соотношении (4). Если  $P \cong a + b \cdot T$ , то задача состоит в оценке коэффициента  $b$  по МНК:

$$b = \frac{\langle PT \rangle - \langle P \rangle \cdot \langle T \rangle}{\langle T^2 \rangle - \langle T \rangle^2} \quad (5)$$

$$\sigma b = \sqrt{\frac{\langle P^2 \rangle - \langle P \rangle^2}{\langle T^2 \rangle - \langle T \rangle^2} - b^2} \quad (6)$$

, где в  $\langle \rangle$  взяты средние обозначенных величин;  $N$  - число точек в исследуемой зависимости.

За итоговое значение  $b$  возьмём среднее арифметическое коэффициентов наклона прямых, приближающих зависимость для нагревания и охлаждения (коэффициенты  $b_1$  и  $b_2$  соответственно):

$$b_1 = \frac{1652710,1 - 305 \cdot 5378}{93072,7 - 305^2} = (260,4 \pm 11,3) \quad (7)$$

$$b_2 = \frac{1755864,8 - 306 \cdot 5702,1}{93676 - 306^2} = (275,3 \pm 9,7) \quad (8)$$

, следовательно, средний коэффициент  $b^{av}$  определён как:  
 $b_{av} = \frac{b_1 + b_2}{2} = (267,8 \pm 10,5) \text{ Па/К}.$

## 4.2 Графики в координатах $\ln P, \frac{1}{T}$

Аналогичное происходит в координатах  $\ln P, \frac{1}{T}$ , но зависимость получается более похожая на линейную. Результат обработки измерений по МНК даёт следующий

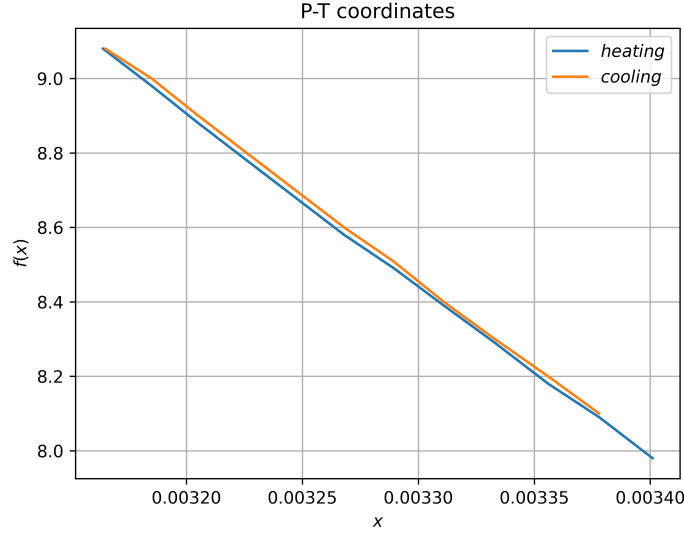


Figure 4: График в логарифмических координатах

коэффициент наклона графика  $\frac{d \ln P}{d \frac{1}{T}}$  :

$$b_3 = \frac{0.0279 - 0.0033 \cdot 8.53}{1.076 \cdot 10^{-5} - 0.0032^2} \approx (-4620.9 \pm 22.5) \quad (9)$$

$$b_4 = \frac{0.0281 - 0.0033 \cdot 8.6}{1.07 \cdot 10^{-5} - 0.0033^2} \approx (-4643.9 \pm 20.5) \quad (10)$$

$$b_{av2} \approx (-4632.4 \pm 21.5)$$

### 4.3 Оценка значения $L$ с помощью полученных коэффициентов

#### 4.3.1 Первый метод

Рассмотрим первое равенство. Удельная теплота испарения в данном случае зависит от температуры и давления, а поскольку во всех предыдущих пунктах рассчитывались средние значения величин на выбранном диапазоне температур, то в формуле положим  $T^2$  и  $P$  равными  $\langle T^2 \rangle$  и  $\langle P \rangle$ :

$$L_1 = \frac{RT^2}{P} \cdot \frac{dP}{dT} = \frac{8,31 \cdot 93676}{5702} \cdot 267,8 \approx 36560 \quad (11)$$

$$\sigma L_1 = \frac{RT}{P} \sqrt{4\left(\frac{dP}{dT}\right)^2 \sigma T^2 + \left(\frac{T}{P} \frac{dP}{dT}\right)^2 \sigma P^2 + T^2 \sigma \left(\frac{dP}{dT}\right)^2} = \quad (12)$$

$$= \frac{RT}{P} \sqrt{4(b_{av})^2 \sigma T^2 + \left(\frac{T}{P} (b_{av})^2 \sigma P^2 + T^2 \sigma^2 (b_{av})^2}\right)} \approx 1427 \quad (13)$$

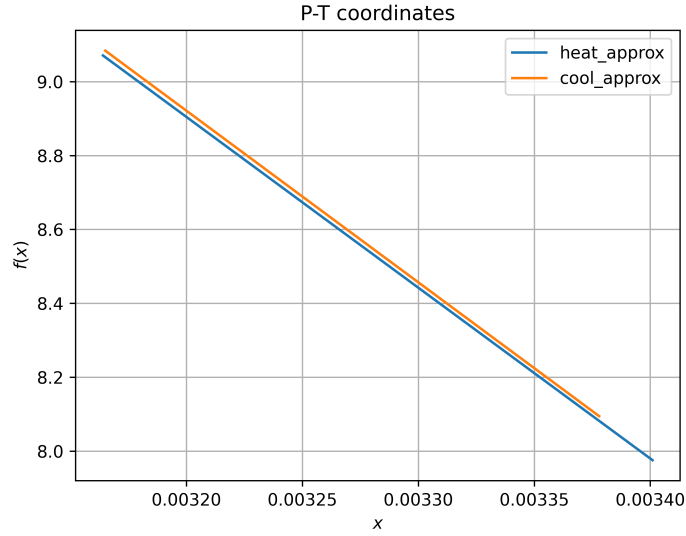


Figure 5: Аппроксимация прямыми

Чтобы узнать теплоту испарения 1кг вещества, нужно умножить полученное значение на  $\frac{1000}{46}$ , так как масса одного моля спирта равна  $\approx 46$ г:

$$L_1 = (794795 \pm 31021) \quad (14)$$

#### 4.3.2 Второй метод

Во втором равенстве удельная теплота испарения постоянна на всём интервале, поэтому аналогично посчитаем сначала её значение и погрешность, а затем переведём в значение для 1кг вещества:

$$L_2 = -R \cdot \frac{d(\ln P)}{d\frac{1}{T}} = R \cdot b_{av2} \approx 38387 \quad (15)$$

$$\sigma L_2 = R \cdot \sigma\left(\frac{d(\ln P)}{d\frac{1}{T}}\right) = R \cdot \sigma(b_{av2}) \approx 179 \quad (16)$$

Домножим на  $\frac{1000}{46}$ , получим теплоту испарения 1кг вещества:

$$L_2 = (834500 \pm 3891) \quad (17)$$

Оценим относительные погрешности  $L_1$  и  $L_2$ :

$$\begin{cases} \varepsilon_{L_1} = \frac{\sigma L_1}{L_1} = \frac{31021}{794795} \approx 0.04 \\ \varepsilon_{L_2} = \frac{\sigma L_2}{L_2} = \frac{3891}{834500} \approx 0.005 \end{cases} \quad (18)$$

Второй способ даёт меньшую относительную погрешность, хотя и не позволяет определить теплоту парообразования для каждого значения температуры.

## 5 Итоги

В работе с помощью полученных экспериментальных данных мы измерили удельную теплоту парообразования спирта двумя способами, которые основаны на применении уравнения Клапейрона-Клаузиуса. Первый способ оказался менее точным, чем второй, но оба метода дают теплоту парообразования, меньшую, чем табличное значение в [1](Таблица 8, стр. 271) : 855 кДж.

## References

- [1] Под редакцией проф. А.Д. Гладуна - Лабораторный практикум по термодинамике. Том 1