

Отчет о выполнении работы №2.4.1.  
Определение теплоты испарения жидкости

Воейко Андрей Александрович, Б01-109

Долгопрудный, 2021

## 1 Аннотация.

В работе измеряется давление насыщенного пара жидкости при разной температуре. На основании этих данных при помощи уравнения Клапейрона-Клаузиуса вычисляется теплота парообразования.

## 2 Теоретические сведения.

Вычислить теплоту преобразования жидкости напрямую мы не будем, ведь сделать тепловые потери пренебрежимо малыми в условиях институтской лаборатории довольно сложно. Для вычисления теплоты парообразования  $L$  воспользуемся уравнением Клапейрона-Клаузиуса, представленного в формуле 1.

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

где  $T$  – температура пара,  $P$  – давление насыщенного пара,  $L$  – теплота парообразования жидкости,  $V_2$  – объем пара,  $V_1$  – объем жидкости. В нашем случае  $V_1$  составляет  $18 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^3}{\text{моль}}$ , а  $V_2 = 31 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{моль}}$ .  $V_1$  составляет примерно 0,05% от  $V_2$ , так что величиной  $V_1$  можно пренебречь. Таким образом формула 1 принимает вид:

$$\frac{dP}{dT} = \frac{L}{TV}, \quad (2)$$

где  $V$  – объем пара. Для того, чтобы выразить это  $V$ , воспользуемся уравнением Ван-дер-Ваальса:

$$(P + \frac{a}{V^2})(V - b) = RT. \quad (3)$$

Поскольку в работе в качестве рабочего тела используется вода, коэффициенты  $a$  и  $b$  соответственно равны  $0,4 \frac{\text{Па} \cdot \text{м}^6}{\text{моль}^2}$  и  $26 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^3}{\text{моль}}$ . Поскольку  $b$  составляет менее десятой доли процента от  $V$ , можно ей пренебречь. Пренебрежение величиной  $\frac{a}{V^2}$  приведет к возникновению ошибки менее 3%, а при давлении меньше атмосферного – еще меньше. Таким образом, уравнение Ван-дер-Ваальса для давления менее атмосферного мало отличается от уравнения Менделеева-Клапейрона.

$$V = \frac{RT}{P}. \quad (4)$$

Совмещая уравнения 1 и 4, получаем:

$$L = \frac{RT^2}{P} \frac{dP}{dT} = -R \frac{d(\ln P)}{d(1/T)}. \quad (5)$$

Производные можно найти, как угловые коэффициенты к касательным к, соответственно, кривой  $P(T)$  или кривой, у которой по оси абсцисс отложено  $1/T$ , а по оси ординат –  $\ln P$ .

### 3 Экспериментальная установка.

#### 3.1 Описание экспериментальной установки.

Экспериментальная установка изображена на рисунке 1. Жидкости и ее пары находятся в ёмкости Ж. К ней-же для измерения давления подключена U-образная трубка У со ртутью в ней. Обе они герметичны и находятся в воде, температуру в которой поддерживает и измеряет термостат А. Для измерения высоты используется труба Т, закрепленная на штангенциркуле Ш. Совмещая отметку на стекле трубы со столбиками ртути путем изменения высоты трубки, можно измерить разность высот этих столбиков, тем самым определяя давление жидкости.

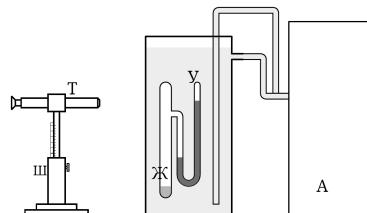


Рис. 1: Экспериментальная установка.

#### 3.2 Погрешности.

- Штангенциркуль:  $\delta_{шт} = \pm 0,1 \text{ мм}$ .
- Термометр термостата:  $\delta_T = \pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### 4 Результаты измерений и обработка данных.

#### 4.1 Результаты измерений.

Проведем измерения температуры и давления. Для этого сначала постепенно нагревая воду до примерно 40 градусов, а потом остужая до комнатной температуры, будем измерять разность высот ртутных столбиков. Результаты измерений, а также разность высот столбиков и давление пара, представлены в таблице 1.

№	$T$ , К	$l_{\text{ниж}}$ , см	$l_{\text{верх}}$ , см	$\Delta l$ , см	$p$ , Па
1	$297,19 \pm 0,1$	$6,60 \pm 0,01$	$8,80 \pm 0,01$	$2,20 \pm 0,02$	$2930 \pm 3$
2	$298,19 \pm 0,1$	$6,55 \pm 0,01$	$8,87 \pm 0,01$	$2,32 \pm 0,02$	$3090 \pm 3$
3	$299,19 \pm 0,1$	$6,48 \pm 0,01$	$8,92 \pm 0,01$	$2,44 \pm 0,02$	$3250 \pm 3$
4	$300,19 \pm 0,1$	$6,34 \pm 0,01$	$8,95 \pm 0,01$	$2,61 \pm 0,02$	$3476 \pm 3$
5	$301,19 \pm 0,1$	$6,24 \pm 0,01$	$9,00 \pm 0,01$	$2,76 \pm 0,02$	$3676 \pm 3$
6	$302,19 \pm 0,1$	$6,14 \pm 0,01$	$9,09 \pm 0,01$	$2,95 \pm 0,02$	$3929 \pm 3$
7	$303,19 \pm 0,1$	$6,08 \pm 0,01$	$9,14 \pm 0,01$	$3,06 \pm 0,02$	$4075 \pm 3$
8	$304,19 \pm 0,1$	$6,00 \pm 0,01$	$9,26 \pm 0,01$	$3,26 \pm 0,02$	$4342 \pm 3$
9	$305,19 \pm 0,1$	$5,93 \pm 0,01$	$9,32 \pm 0,01$	$3,39 \pm 0,02$	$4515 \pm 3$
10	$306,19 \pm 0,1$	$5,83 \pm 0,01$	$9,46 \pm 0,01$	$3,63 \pm 0,02$	$4835 \pm 3$
11	$307,19 \pm 0,1$	$5,73 \pm 0,01$	$9,57 \pm 0,01$	$3,84 \pm 0,02$	$5114 \pm 3$
12	$308,19 \pm 0,1$	$5,70 \pm 0,01$	$9,65 \pm 0,01$	$3,95 \pm 0,02$	$5261 \pm 3$
13	$309,19 \pm 0,1$	$5,50 \pm 0,01$	$9,73 \pm 0,01$	$4,23 \pm 0,02$	$5634 \pm 3$
14	$310,19 \pm 0,1$	$5,39 \pm 0,01$	$9,90 \pm 0,01$	$4,51 \pm 0,02$	$6007 \pm 3$
15	$311,19 \pm 0,1$	$5,25 \pm 0,01$	$10,00 \pm 0,01$	$4,75 \pm 0,02$	$6327 \pm 3$
16	$312,19 \pm 0,1$	$5,13 \pm 0,01$	$10,22 \pm 0,01$	$5,09 \pm 0,02$	$6779 \pm 3$
17	$313,19 \pm 0,1$	$5,00 \pm 0,01$	$10,28 \pm 0,01$	$5,28 \pm 0,02$	$7032 \pm 3$
18	$312,19 \pm 0,1$	$5,15 \pm 0,01$	$10,19 \pm 0,01$	$5,04 \pm 0,02$	$6713 \pm 3$
19	$309,89 \pm 0,1$	$5,39 \pm 0,01$	$9,94 \pm 0,01$	$4,55 \pm 0,02$	$6060 \pm 3$
20	$308,49 \pm 0,1$	$5,58 \pm 0,01$	$9,75 \pm 0,01$	$4,17 \pm 0,02$	$5554 \pm 3$
21	$306,88 \pm 0,1$	$5,72 \pm 0,01$	$9,60 \pm 0,01$	$3,88 \pm 0,02$	$5168 \pm 3$
22	$305,83 \pm 0,1$	$5,83 \pm 0,01$	$9,50 \pm 0,01$	$3,67 \pm 0,02$	$4888 \pm 3$
23	$304,00 \pm 0,1$	$6,03 \pm 0,01$	$9,30 \pm 0,01$	$3,27 \pm 0,02$	$4362 \pm 3$
24	$299,44 \pm 0,1$	$6,20 \pm 0,01$	$9,11 \pm 0,01$	$2,91 \pm 0,02$	$3876 \pm 3$
25	$297,69 \pm 0,1$	$6,58 \pm 0,01$	$8,81 \pm 0,01$	$2,23 \pm 0,02$	$3023 \pm 3$

Таблица 1: Результаты измерения разницы высот столбиков.

## 4.2 Обработка данных.

### 4.2.1 Графики.

Построим график  $P(T)$  на рисунке 2.

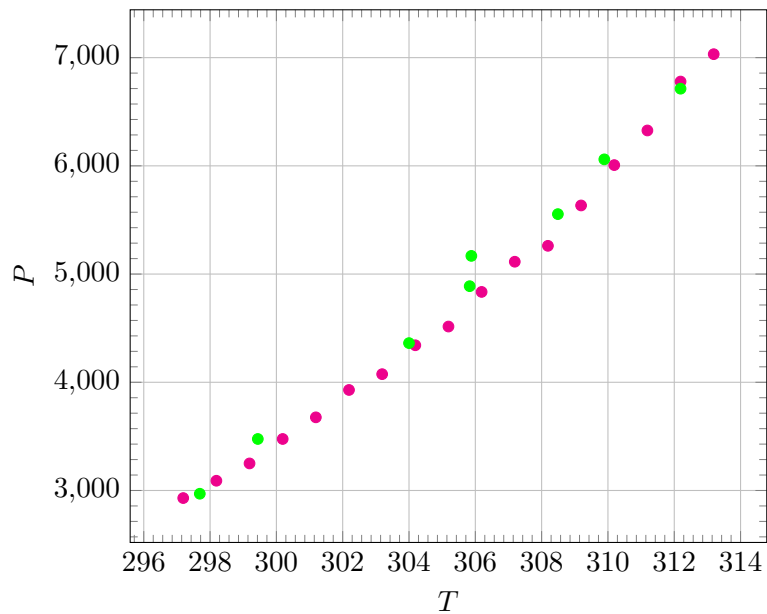


Рис. 2: График зависимости давления пара от его температуры.

Теперь подготовим данные построения графика с  $1/T$  на оси абсцисс и  $\ln P$  в качестве ординат. На основании этих данных построим график (рис. 3).

№	$1/T \cdot 10^{-3}$	$\ln P$	№	$1/T \cdot 10^{-3}$	$\ln P$
1	3,3365	7,983	14	3,3224	8,701
2	3,3354	8,036	15	3,3213	8,753
3	3,3342	8,086	16	3,3204	8,822
4	3,3331	8,154	17	3,3193	8,858
5	3,3332	8,210	18	3,3203	8,811
6	3,3309	8,276	19	3,3227	8,706
7	3,3298	8,313	20	3,3242	8,622
8	3,3287	8,376	21	3,3258	8,550
9	3,3277	8,415	22	3,3268	8,494
10	3,3265	8,484	23	3,3289	8,381
11	3,3255	8,540	24	3,3313	8,263
12	3,3245	8,568	25	3,3359	7,996
13	3,3234	8,637			

Таблица 2: Результаты измерения разницы высот столбиков.

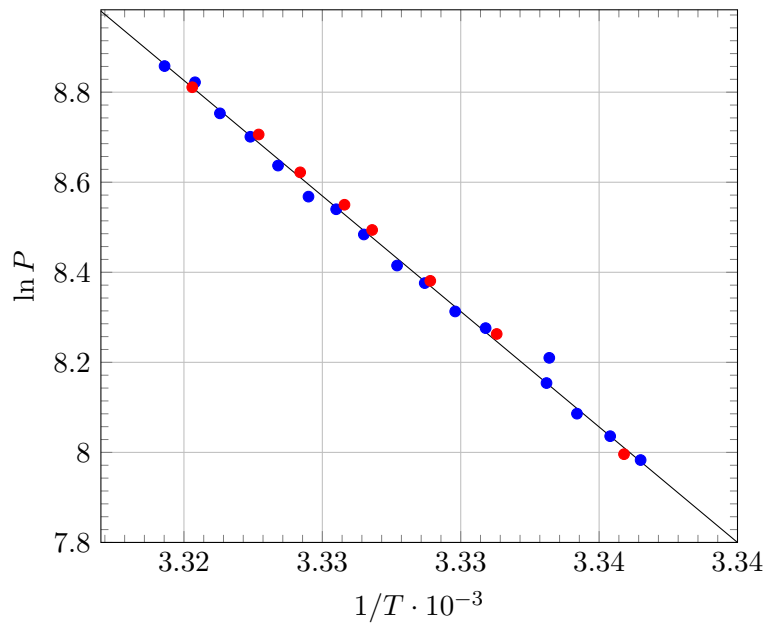


Рис. 3: График зависимости  $\ln P$  от  $1/T$ .

Как видно, второй график куда лучше подходит для вычислений, так как и в теории, и на практике представляет из себя прямую, что позволяет найти искомую производную путем аппроксимации. Аппроксимируем график к прямой и найдем угловой коэффициент:

$$b = \frac{\langle xy \rangle - \langle x \rangle \langle y \rangle}{\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2} = -5130 \pm 100.$$

$$L_{\text{моль}} = b \cdot R = 4267 \pm 83 \frac{\text{Дж}}{\text{моль}}.$$

$$L_{\text{кг}} = L_{\text{моль}} / \mu_{\text{в}} = 237000 \pm 4600 \frac{\text{Дж}}{\text{г}}.$$

## 5 Выводы.

В ходе работы косвенным методом была вычислена удельная теплота парообразования воды. Табличное значение находится в пределах погрешности, а сама относительная погрешность составляет 2%, что позволяет считать расчеты достаточно точными.