

Отчет по лабораторной работе №2.4.1  
Определение теплоты испарения жидкости

Бичина Марина группа Б04-005 1 курса ФЭФМ

02.03.2021

# 1 Аннотация

## Цель работы:

1. Измерить давление насыщенного пара жидкости при разной температуре
2. Вычислить по полученным данным теплоты испарения с помощью уравнения Клапейрона-Клаузиуса

## Оборудование:

1. термостат
2. герметичный сосуд, заполненный исследуемой жидкостью
3. отсчетный микроскоп

# 2 Теоретическая часть

Испарением называется переход вещества из жидкого в газообразное состояние. Оно происходит на свободной поверхности жидкости. При испарении с поверхности вылетают молекулы, образуя над ней пар. Для выхода из жидкости молекулы должны преодолеть силы молекулярного сцепления. Кроме того, при испарении совершается работа против внешнего давления  $P$ , поскольку объем жидкости меньше объема пара. Не все молекулы жидкости способны совершить эту работу, а только те из них, которые обладают достаточной кинетической энергией. Поэтому переход части молекул в пар приводит к обеднению жидкости быстрыми молекулами, т. е. к ее охлаждению. Чтобы испарение проходило без изменения температуры, к жидкости нужно подводить тепло. Количество теплоты, необходимое для изотермического испарения одного моля жидкости при внешнем давлении, равном упругости ее насыщенных паров, называется *молярной теплотой испарения (парообразования)*.

Измерение с помощью калориметра является весьма неточной из-за неконтролируемых потерь тепла, которые трудно сделать малыми. Поэтому в настоящей работе для определения теплоты испарения применен косвенный метод, основанный на формуле Клапейрона-Клаузиуса

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

Где  $P$  — давление насыщенного пара жидкости при температуре  $T$ ,  $T$  — абсолютная температура жидкости и пара,  $L$  — теплота испарения жидкости,  $V_2$  — объем пара,  $V_1$  — объем жидкости.

С помощью уравнения Ван-дер-Ваальса можно получить зависимость  $P(T)$ , с помощью которой определить искомую величину.

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

В нашем приборе измерения производятся при давлениях ниже атмосферного. В этом случае задача существенно упрощается. В таблице (1) для ряда жидкостей приведены: температура, при которой давление насыщенных паров равно атмосферному, величины  $V_2$  и  $V_1$ , входящие в (1), а также константы  $a$  и  $b$  в уравнении Ван-дер-Ваальса.



3. Змеевик, через который происходит охлаждение
4. Труба, через которую поступает воздух
5. Термометр
6. Прибор с исследуемой жидкостью

На рисунке 2 представлена другая версия установки, где:

А – термостат, В – экспериментальный прибор, С – отсчетный микроскоп. Экспериментальный прибор В и отсчетный микроскоп С представляют собой:

12. Емкость, заполненную водой
13. Запаянный прибор
14. Исследуемая жидкость
15. Ртутный манометр
16. Отсчетный микроскоп
17. Шкала, по которой снимаются показания

У нас была 1 установка

## 2.2 Контрольные вопросы:

1. В справочниках приводится теплота испарения, измеренная при давлении 760 мм рт. ст. Совпадает ли эта величина с измеренной нами на опыте? Какая из них больше? Оценить разницу между ними

Полученные в ходе эксперимента данные получились больше табличных на 13%:

$$L = 45200 \pm 600 \frac{\text{Дж}}{\text{моль}}, L = 40680 \frac{\text{Дж}}{\text{моль}}$$

2. Указать, исходя из теоретических соображений, в какую сторону должна меняться теплота испарения с увеличением температуры.

Уменьшается, так как состояние жидкости приближается к критическому, в котором фазовый переход происходит без затрат энергии.

## 3 Ход работы:

1. Измерим разность уровней в ртутном U-образном манометре с помощью микроскопа и температуру по термометру или индикаторному табло. У нас это

$$\Delta h_0 = 18 \pm 0,1 \text{ мм}$$

2. Включим термостат. Поскольку мы работаем по схеме на рис. 1, то подогреем воду в калориметре, пропуская ток через нагреватель. Через каждый градус измеряем давление и температуру. Продолжаем повышать температуру в течение половины имеющегося у нас времени.
3. Проведем те же измерения при охлаждении жидкости. Установим такой поток воды, чтобы охлаждение шло примерно тем же темпом, что и нагревание.

4. Вычислим изменение разности уровней в манометре при нагревании и при охлаждении
5. Посчитаем давление в мм рт. ст.  $\Delta h = \Delta h_0 + 2(h - h_0)$  где  $h$  – высота правого столбца, который измеряется,  $h_0 = 64,5$  мм  
Осуществим перевод в паскали:  $P = (\Delta h * 133.32)$ , где 133.32 – константа для перевода из мм рт. ст в Па
6. Далее для всех  $P$  найдем  $\ln(\frac{P}{P_0})$ , где  $P_0$  – давление при первоначальной температуре.
7. Посчитаем  $1/(T+273)$ , где 273 – константа для перевода в К из  $^{\circ}C$ , измеряется в  $K^{-1} * 10^3$

Все полученные данные сведем в таблицу 1

N	T, $^{\circ}C$	$h_{\uparrow}$ , мм	$h_{\downarrow}$ , мм	$\Delta h_{\uparrow}$ , мм	$\Delta h_{\downarrow}$ , мм	$P_{\uparrow}$ , Па	$P_{\downarrow}$ , Па	$T^{-1}$ , $K^{-1} * 10^3$	$\ln \frac{P_{\uparrow}}{P_0}$	$\ln \frac{P_{\downarrow}}{P_0}$
1	20	64,5	63,8	18	16,6	2400	2213	3,413	0	-0,0811
2	21	64,3	64,6	17,6	16,2	2346	2426	3,4014	-0,228	0,0108
3	22	65,2	65,1	19,4	19,2	2586	2560	3,3898	0,0746	0,0645
4	23	65,2	66,2	19,4	21,4	2586	2853	3,3784	0,0746	0,1729
5	24	65,9	66,6	20,8	22,2	2773	2960	3,3670	0,1445	0,2097
6	25	66,4	67,2	21,8	23,4	2906	3120	3,3557	0,1913	0,2624
7	26	67,1	67,8	23,2	24,6	3093	3280	3,3445	0,2537	0,3124
8	27	68,0	68,7	25	26,4	3333	3520	3,3333	0,3284	0,3830
9	28	68,7	69,5	26,4	28	3520	3733	3,3223	0,3830	0,4417
10	29	70,0	70,2	29	29,4	3866	3920	3,3113	0,4768	0,4906
11	30	71,2	71,0	31,4	31	4186	4133	3,3003	0,5563	0,5435
12	31	72,0	71,9	33	32,8	4400	4373	3,2895	0,6061	0,6000
13	32	72,8	73,6	34,6	36,2	4613	4826	3,2787	0,6534	0,6985
14	33	73,9	74,0	36,8	37	4906	4933	3,2680	0,7150	0,7205
15	34	75,3	75,6	39,6	40,2	5280	5360	3,2573	0,7883	0,8033
16	35	76,4	76,8	41,8	42,6	5573	5679	3,2468	0,8425	0,8613
17	36	77,3	-	43,6	-	5813	-	3,2362	0,8846	-

Таблица 1: Результаты измерений и их первичная обработка

8. Построим графики в координатах  $T$ ,  $P$ , и в координатах  $1/T$ ,  $\ln P$ . Для этого воспользуемся методом наименьших квадратов  $y = a + bx$ :

$$b = \frac{\langle xy \rangle - \langle x \rangle \langle y \rangle}{\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2} \quad (3)$$

**График зависимости  $P(T)$ :** Построим график по всем значениям (нагревание + охлаждение)(график 1). Здесь  $x \Rightarrow T, y \Rightarrow P$ . Для этого сперва определим константы, необходимые для подсчета коэффициента  $b_1$ :

$$\langle T \rangle = 301$$

$$\langle P \rangle = 3820$$

$$\langle T^2 \rangle = 90625$$

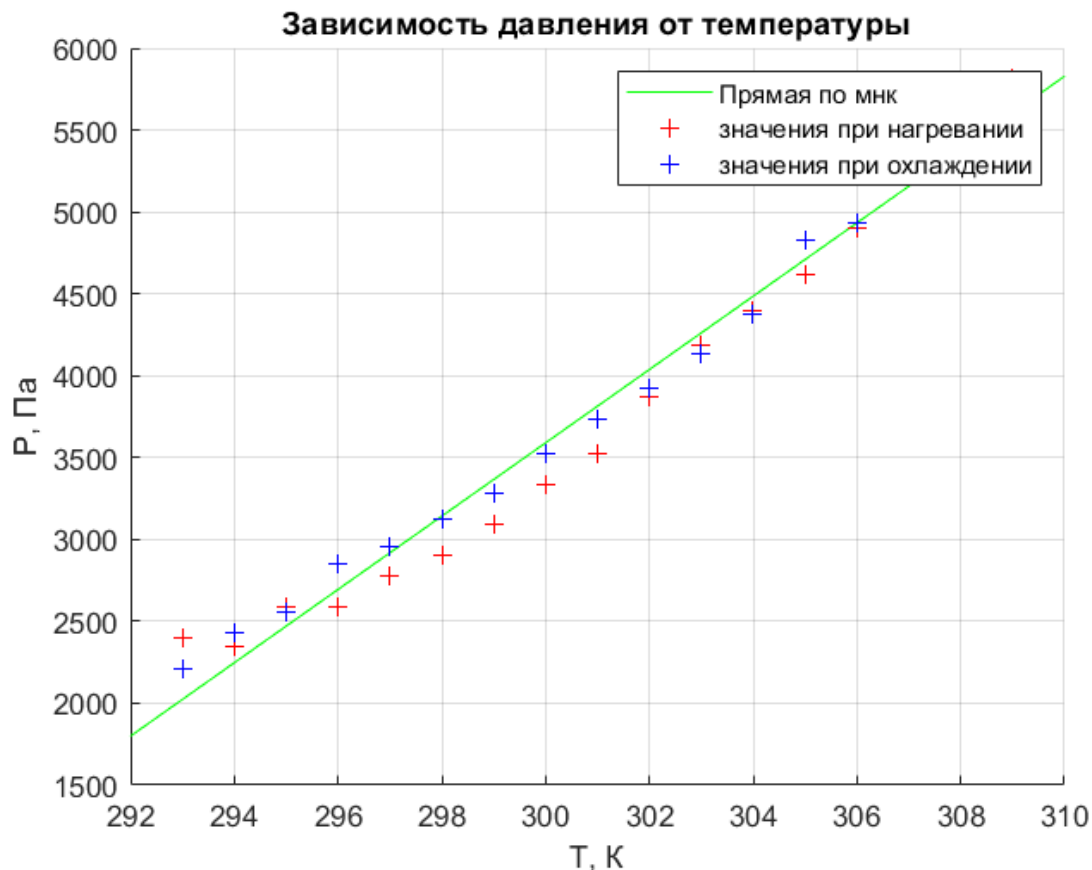
$$\langle P^2 \rangle = 15845510$$

$$\langle T * P \rangle = 1155243$$

Всего бралось  $N = 33$  точек для аппроксимации.

Найдем константу:

$$b_1 = \frac{1155243 - 301 * 3820}{90625 - 301^2} \approx 226 \text{ Па/К},$$



**График зависимости  $\ln \frac{P}{P_0}(T^{-1})$ :** Аналогично построим график по всем значениям (нагревание + охлаждение) для зависимости  $\ln \frac{P}{P_0}(T^{-1})$  (график 2). Здесь  $x \Rightarrow (1/T), y \Rightarrow \ln(P/P_0)$  Определим константы, необходимые для подсчета коэффициента  $b_2$  в этом случае:

$$\langle 1/T \rangle = 3,323$$

$$\langle \ln(P/P_0) \rangle = 0,422$$

$$\langle 1/T^2 \rangle = 11,046$$

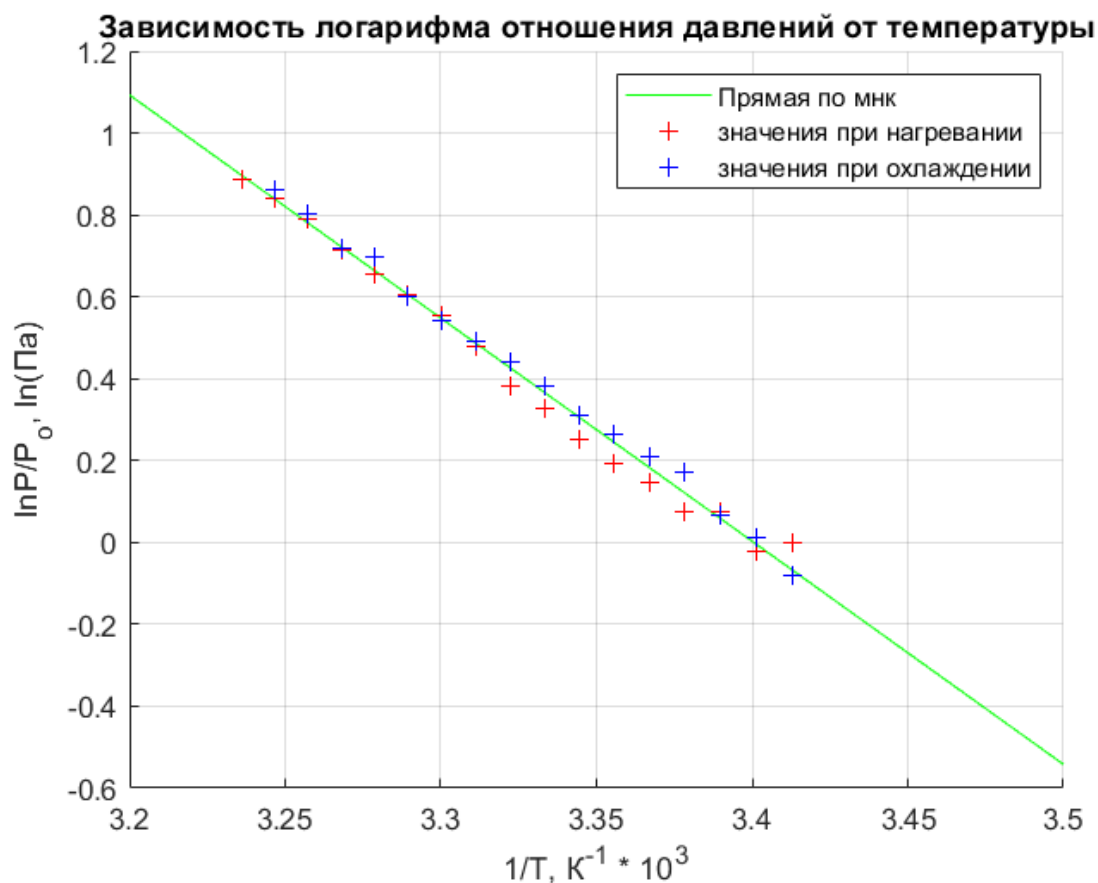
$$\langle \ln(P/P_0)^2 \rangle = 0,265$$

$$\langle 1/T * \ln(P/P_0) \rangle = 1,385$$

Бралось  $N = 33$  точек для аппроксимации.

По формуле 3 рассчитаем коэффициент  $b$ :

$$b_2 = \frac{1,385 - 3,323 * 0,422}{11,046 - 3,323^2} \approx -5,41 * 10^3 \text{ К},$$



По формуле (2) вычислим  $L$ , пользуясь данными 1 и 2 графиков.

$$L = \frac{RT^2}{P} \frac{dP}{dT} = b_1 \frac{RT^2}{P} = 226 \frac{8,31 * 301^2}{3820} \approx 44500 \frac{\text{Дж}}{\text{моль}}$$

$$L = -R \frac{d(\ln P)}{d(\frac{1}{T})} = -R * b_2 = 8,314 * 5,41 * 10^3 \approx 45200 \frac{\text{Дж}}{\text{моль}}.$$

**Найдем погрешности:**

Погрешности коэффициентов и  $b_i$  находим по формуле:

$$\sigma_b \approx \frac{1}{\sqrt{N}} \sqrt{\frac{\langle y^2 \rangle - \langle y \rangle^2}{\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2} - B^2} \quad (4)$$

$$\sigma_{b_1} \approx \frac{1}{\sqrt{N}} \sqrt{\frac{\langle P^2 \rangle - \langle P \rangle^2}{\langle T^2 \rangle - \langle T \rangle^2} - b_1^2} = \frac{1}{\sqrt{33}} \sqrt{\frac{15845510 - 3820^2}{90625 - 301^2} - 206^2} \approx 6$$

$$\sigma_{b_2} \approx \frac{1}{\sqrt{33}} \sqrt{\frac{0,265 - 0,422^2}{11,046 - 3,323^2} - (5,31^2 * 10^6)} \approx 9 * 10^5$$

Для  $L$ , подсчитанной 1 способом погрешность можно рассчитать по формуле:

$$\sigma_L = L \sqrt{4 \left( \frac{\sigma_T}{T} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_P}{P} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_{b_1}}{b_1} \right)^2} = 44500 \sqrt{4 \left( \frac{0.1}{301} \right)^2 + \left( \frac{13}{3820} \right)^2 + \left( \frac{6}{226} \right)^2} \approx 1200 \frac{\text{Дж}}{\text{моль}}.$$

Во 2 случае погрешность можно рассчитать таким способом:

$$\sigma_L = L \frac{\sigma_{b_2}}{b_2} = 45200 \frac{0,07}{5,31} \approx 600 \frac{\text{Дж}}{\text{моль}}.$$

Окончательно получим:

$$L = 44500 \pm 1200 \frac{\text{Дж}}{\text{моль}}, \quad L = 44200 \pm 600 \frac{\text{Дж}}{\text{моль}}$$

Погрешность составила:

$$\epsilon_1 = 3\% \text{ и } \epsilon_2 = 1,5\%$$

соответственно

## 4 Вывод:

1. Мы получили значения для молярной теплоемкости, равные  $L = 44500 \pm 1200 \frac{\text{Дж}}{\text{моль}}$ ,  $L = 44200 \pm 600 \frac{\text{Дж}}{\text{моль}}$  с погрешностями  $\epsilon_1 = 3\%$ ,  $\epsilon_2 = 1,5\%$ , что является хорошей точностью
2. Видим, что в графике  $\ln \frac{P}{P_0}(T^{-1})$  присутствует линейная зависимость
3. Получили более точные значение в координатах  $\ln \frac{P}{P_0}(T^{-1})$
4. Получили разницу между полученным и табличным значениями. Возможно, это связано с недостаточно медленным нагреванием воды.