

**Отчет о выполнении лабораторной
работы 2.4.1 "Определение теплоты
испарения жидкости"**

Калашников Михаил, Б03-205

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

Оборудование:

- герметичный сосуд, заполненный исследуемой жидкостью;
- термостат ($\sigma_T = 0,01 \text{ K}$);
- отсчетный микроскоп ($\sigma_h = 0,3 \text{ mm}$: погрешность микроскопа равна $0,1 \text{ mm}$, штангенциркуля $-0,05 \text{ mm}$; прибор используется для нахождения разницы значений, погрешность удваивается).

1. Теоретическая часть

Теплота испарения жидкости может быть измерена непосредственно в процессе парообразования, однако такой метод оказывается неточен из-за потерь тепла. Другой метод, использующий формулу Клапейрона-Клаузиуса позволяет достичь большей точности. Данная формула связывает производную давления насыщенного пара P по температуре T , теплоту испарения жидкости L , объем пара V_2 и объем жидкости V_1 :

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

При нашей точности опытов величиной V_1 можно пренебречь, а в виду того, что эксперимент проводится при пониженном давлении, можно принять газ за идеальный. Поэтому

$$V_2 = \frac{RT}{P}$$

Подставляя это в формулу Клапейрона-Клаузиуса, получим:

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

Таким образом, теплоту испарения можно найти как касательную к графику зависимости $\ln P$ от $1/T$, построенного с помощью метода наименьших квадратов.

С другой стороны, мы можем построить параболу через каждые три соседние точки на графике $P(T)$, провести к ней касательную и на основе этой касательной вычислить теплоту испарения. Далее усредним полученную теплоту испарения, а случайную погрешность определим как среднеквадратическое отклонение.

В работе я попытаюсь определить теплоту парообразования обоими методами.

2. Экспериментальная установка

Лабораторная установка представлена на рис. 1. Установка включает термостат А, экспериментальный прибор В и отсчетный микроскоп С. 1 – блок терморегулирования; 2 – ванна; 3 – индикаторное табло; 4 – ручка установки температуры; 5 – кнопка переключения режимов установки/контроля температуры; 6 – индикатор уровня жидкости; 7 – индикатор включения нагревателя; 8 – сетевой выключатель прибора; 9 – крышка; 10 – входной и выходной патрубки насоса; 11 – входной и выходной патрубки теплообменника (вода из водопровода). Экспериментальный прибор В представляет собой емкость 12, заполненную водой. В нее погружен запаянный прибор 13 с исследуемой жидкостью 14. Перед заполнением исследуемой жидкостью воздух из запаянного прибора был удален, так что над жидкостью находится только её насыщенный пар. Давление пара определяется по ртутному манометру 15, соединенному с емкостью 13. Численная величина давления измеряется по разности показаний отсчетного микроскопа 16, настраиваемого последовательно на нижний и верхний уровни столбика ртути манометра. Показания микроскопа снимаются по шкале 17.

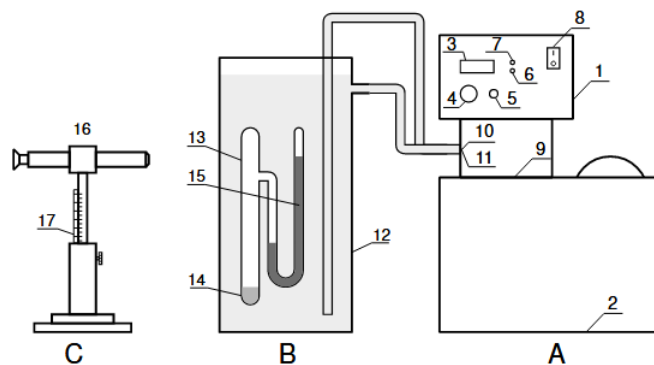


Рис. 1: Схема установки

3. Проведение эксперимента

1. Измерим разность уровней ртути с помощью микроскопа и температуру при выключенном термостате.
2. Включим термостат. Начнем постепенно нагревать газ, измеряя через каждый градус его высоту столбиков ртути с помощью отсчетного микроскопа. Для повышения надежности эксперимента каждое измерение было проведено трижды. При каждом измерении так же отметим температуру. Все полученные данные занесем в таблицу 1.
3. В ходе эксперимента термостат был нагрет с 20 до 38 градусов Цельсия. Провести измерения при охлаждении термостата не удалось ввиду нехватки времени.

4. Обработка данных

4. Давление газа определяется формулой $P = \rho g \Delta h$, где $\Delta h = B - H$, ρ – плотность ртути, g – ускорение свободного падения ($\sigma_P = \rho_{Hg} g \sigma_h \approx 40 \text{ Pa}$). По усредненным разностям высот найдем давление и занесем его в таблицу 2, а вычисленные значения $\ln P$ и $1/T$ – в таблицу 3. Построим график зависимости $\ln P$ от $1/T$ (рис. 1) и $P(T)$ (рис. 2).

Проведем через точки таблицы 2 прямую с помощью метода наименьшего квадратов. Угловой коэффициент k данной прямой позволяет вычислить теплоту испарения: $L = -Rk$.

Теперь найдем теплоту испарения с помощью второго метода. Для каждой касательной посчитаем теплоту и занесем в таблицу 4. По данным таблицы видно, что большой разброс данных не позволяет выделить зависимость $L(T)$.

5. Расчет погрешностей

Теперь определим погрешность измерений. В обоих способах расчета L полная погрешность ищется по формуле:

$$\sigma_L = \sqrt{\sigma_{rand}^2 + \sigma_{inst}^2}$$

Далее формулы для погрешности будут зависеть от метода обработки.

Первый метод.

Найдем случайную погрешность углового коэффициента проведенной прямой σ_k и с помощью нее посчитаем случайную погрешность L :

$$\sigma_{rand} = R\sigma_k$$

Приборная погрешность определяется по формуле погрешности косвенных измерений:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{inst,1} &= \sqrt{\varepsilon_{\Delta \ln P}^2 + \varepsilon_{\Delta 1/T}^2} = 2\sqrt{\varepsilon_{\ln P}^2 + \varepsilon_{1/T}^2} = 2\sqrt{\left(\frac{\sigma_P}{P \ln P}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_T}{T}\right)^2} = \\ &= 2\sqrt{\left\langle \frac{\varepsilon_P}{\ln P} \right\rangle^2 + \left\langle \varepsilon_T \right\rangle^2} = 0,3\% \end{aligned}$$

В качестве P и T возьмем наименьшие соответствующие значения из таблицы 2.

Второй метод: Случайную погрешность σ_{rand} определим как среднеквадратическое отклонение угловых коэффициентов касательных, а приборную аналогично с первым способом по формуле погрешности косвенных измерений:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{inst,2} &= \sqrt{\varepsilon_P^2 + 4\varepsilon_T^2 + \varepsilon_{\Delta P}^2 + \varepsilon_{\Delta T}^2} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_P}{P}\right)^2 + 4\left(\frac{\sigma_T}{T}\right)^2 + \left(\frac{2\sigma_P}{P}\right)^2 + \left(\frac{2\sigma_T}{T}\right)^2} = \\ &= \sqrt{5\left\langle \varepsilon_P \right\rangle^2 + 8\left\langle \varepsilon_T \right\rangle^2} = 2,7\% \end{aligned}$$

$$\sigma_L = \sqrt{\sigma_{rand}^2 + (\varepsilon_{inst} \cdot L)^2}$$

В результате обработки данных первым способом было получено значение $L_1 = 48,2 \pm 0,7 \frac{kJ}{mol}$, а вторым $L_2 = 47 \pm 9 \frac{kJ}{mol}$.

6. Вывод

Оба метода обработки данных дали примерно одинаковый результат, однако точность первого метода оказалась выше более чем на порядок. Полученное значение не сильно отличается от табличного, равного $41,4 \frac{kJ}{mol}$.

7. Приложения

N	$t_1, ^\circ C$	B_1, mm	H_1, mm	$t_2, ^\circ C$	B_2, mm	H_2, mm	$t_3, ^\circ C$	B_3, mm	H_3, mm
1	20,00	97,00	82,60	20,00	96,85	81,70	20,00	96,90	81,45
2	21,00	97,15	81,40	21,00	97,05	81,85	21,00	96,75	81,75
3	21,99	98,50	81,00	22,01	97,55	81,50	22,02	97,55	81,50
4	23,01	97,95	81,10	23,01	98,15	80,70	23,00	97,95	80,70
5	24,00	98,80	80,15	24,02	98,70	80,35	24,03	98,75	80,00
6	25,05	99,35	79,65	25,06	99,75	79,65	25,07	99,55	79,65
7	26,03	100,50	79,15	26,05	99,80	79,60	26,06	100,00	78,95
8	27,04	101,30	77,80	27,05	101,50	77,95	27,08	101,45	78,10
9	28,04	102,30	77,15	28,05	102,15	77,05	28,06	102,00	77,70
10	29,06	103,10	76,20	29,07	102,70	76,65	29,08	103,20	76,45
11	30,04	104,30	75,35	30,06	104,30	75,40	30,06	104,50	75,50
12	31,06	104,95	74,55	31,06	105,00	75,00	31,06	104,85	74,90
13	32,03	105,60	73,90	32,04	105,75	73,95	32,06	105,75	74,00
14	33,04	106,40	72,70	33,05	106,70	73,00	33,05	106,60	72,60
15	34,03	107,95	71,60	34,05	107,65	71,85	34,05	107,70	71,25
16	35,05	109,00	70,40	35,05	108,70	70,60	35,05	109,00	70,80
17	36,04	110,25	70,00	36,05	110,00	70,00	36,05	110,35	69,80
18	37,04	110,70	69,00	37,04	110,50	68,70	37,05	110,40	69,15
19	38,04	112,00	67,75	38,04	112,40	67,35	38,04	112,70	67,20

Таблица 1: Измерения высот ртутных столбиков

T, K	P, Pa	T, K	P, Pa	T, K	P, Pa	T, K	P, Pa
293,15	2150	298,21	2850	303,20	4150	308,20	5490
294,15	2200	299,20	2990	304,21	4310	309,20	5770
295,16	2370	300,21	3360	305,19	4550	310,19	5960
296,16	2460	301,20	3560	306,20	4840	311,19	6440
297,17	2660	302,22	3800	307,19	5190		

Таблица 2: Усреднение измеренных параметров

$\frac{1}{T}, \frac{10^3}{K}$	$\ln P$	$\frac{1}{T}, \frac{10^3}{K}$	$\ln P$	$\frac{1}{T}, \frac{10^3}{K}$	$\ln P$	$\frac{1}{T}, \frac{10^3}{K}$	$\ln P$
3,41	7,67	3,35	7,96	3,30	8,33	3,24	8,61
3,40	7,69	3,34	8,00	3,29	8,37	3,23	8,66
3,39	7,77	3,33	8,12	3,28	8,42	3,22	8,69
3,38	7,81	3,32	8,18	3,27	8,49	3,21	8,77
3,37	7,89	3,31	8,24	3,26	8,55		

Таблица 3: Обработка усредненных параметров

T, K	$L, kJ/mol$	T, K	$L, kJ/mol$	T, K	$L, kJ/mol$
294,15	36	300,21	63	306,20	51
295,16	40	301,20	47	307,19	49
296,16	43	302,22	59	308,20	42
297,17	53	303,20	48	309,20	33
298,21	42	304,21	36	310,19	45
299,20	63	305,19	45		

Таблица 4: Величины L , найденные вторым методом обработки

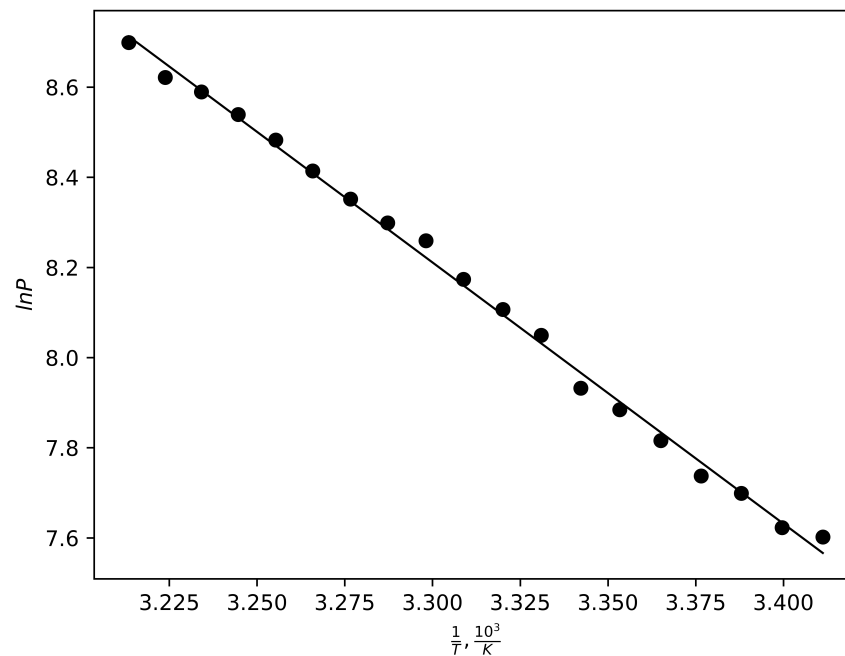


Рис. 2: График зависимости $\ln P$ от $1/T$

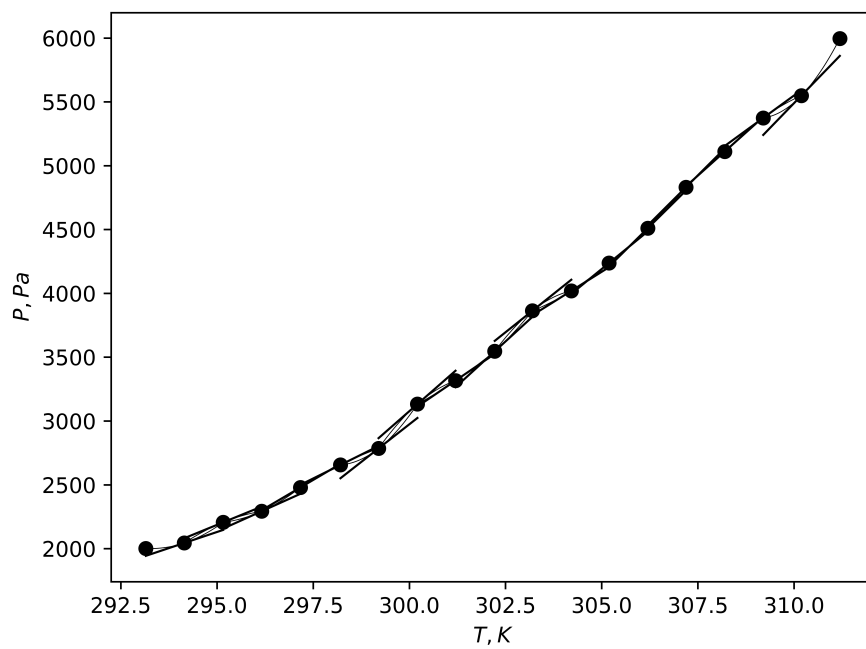


Рис. 3: График зависимости $P(T)$