

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Физтех-школа электроники, фотоники и молекулярной физики

Лабораторная работа 2.4.1
Определение теплоты испарения жидкости

Салтыкова Дарья

Б04-105

Долгопрудный 2022

1 Введение

Цель работы: 1) измерение давления насыщенного пара жидкости при разной температуре; 2) вычисление по полученным данным теплоты испарения с помощью уравнения Клапейрона–Клаузиуса.

Оборудование: термостат; герметический сосуд, заполненный исследуемой жидкостью; отсчетный микроскоп.

2 Теоретические сведения

Теплоту парообразования жидкостей можно измерить непосредственно при помощи калориметра. Такой метод, однако, не позволяет получить точных результатов из-за неконтролируемых потерь тепла, которые трудно сделать малыми. В настоящей работе для определения теплоты испарения применен косвенный метод, основанный на формуле Клапейрона–Клаузиуса:

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

Здесь 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. Найдя из опыта $\frac{dP}{dT}$, T , V_2 и V_1 , можно определить L путем расчета. Величины L , V_2 и V_1 в формуле (1) должны относиться к одному и тому же количеству вещества; мы будем относить их к одному молю. В нашем приборе измерения производятся при давлениях ниже атмосферного. В этом случае задача существенно упрощается.

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

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

В таблице ниже приведены все значения параметров различных жидкостей уравнения Ван-дер-Ваальса в условиях данного опыта.

Вещество	$T_{\text{кип}}$ К	V_1 , 10^{-6} $\frac{\text{м}^3}{\text{моль}}$	V_2 , 10^{-3} $\frac{\text{м}^3}{\text{моль}}$	b , 10^{-6} $\frac{\text{м}^3}{\text{моль}}$	a $\frac{\text{Па} \cdot \text{м}^6}{\text{моль}^2}$	a/V_2^2 кПа
Вода	373	18	31	26	0,4	0,42
CCl_4	350	97	29	126	1,95	2,3
Этиловый эфир	307	104	25	137	1,8	2,9
Этиловый спирт	351	58	29	84	1,2	1,4

Откуда видно, что $\frac{V_1}{V_2} < 0.005$, а $\frac{a}{PV_2^2} < 0.03$, ошибка метода измерений равна 4%, тогда записав уравнение Клапейрона–Менделеева для насыщенного пара, получим: $V = \frac{RT}{P}$. Пренебрегая V_1 (который не превосходит 0,5% от V_2), запишем:

$$L = \frac{RT^2}{P} \frac{dP}{dT} = -R \frac{d(\ln P)}{d(1/T)} \quad (3).$$

Эта формула является окончательной.

3 Экспериментальная установка

Схема установки изображена на рисунке. Наполненный водой резервуар 1 играет роль термостата. Нагревание термостата производится спиралью 2, подогреваемой электрическим током. Для охлаждения воды в термостате через змеевик 3 пропускается водопроводная вода. Вода в термостате перемешивается воздухом, поступающим через трубку 4. Температура воды измеряется термометром 5. В термостат погружен запаянный прибор 6 с исследуемой жидкостью - водой. Над ней находится насыщенный пар (перед заполнением прибора воздух из него был откачан). Давление насыщенного пара определяется по ртутному манометру, соединенному с исследуемым объемом. Отсчет показаний манометра производится при помощи микроскопа.

Описываемый прибор обладает важным недостатком: термометр определяет температуру термостата, а не исследуемой жидкости (или ее пара). Эти температуры близки друг к другу, если нагревание происходит достаточно медленно. Убедиться в том, что нагревание не является слишком быстрым, можно, сравнивая результаты, полученные при нагревании и при остывании прибора.

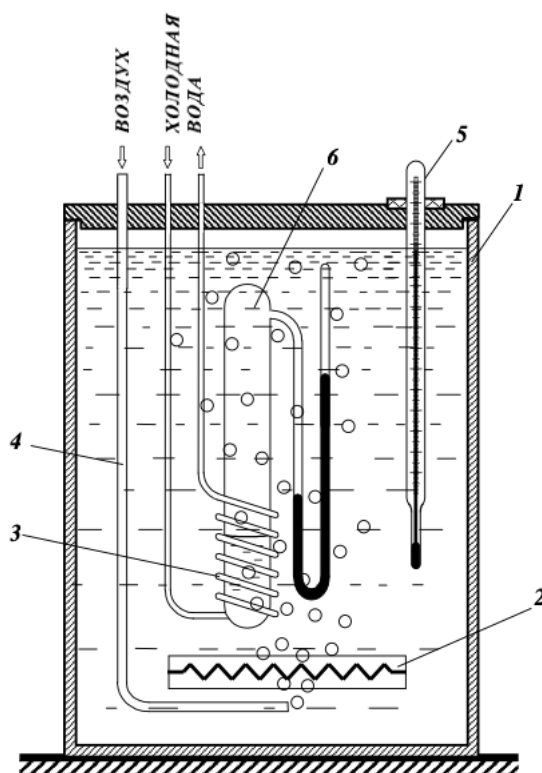


Рис. 1: Схема установки для определения теплоты испарения

4 Ход работы

1. Измерим разность уровней в ртутном U-образном манометре с помощью микроскопа и температуру по термометру.
2. Будем нагревать воду в калориметре, пропуская ток через нагреватель. Измерять давление будем с интервалом в 1°C .

$T, ^\circ\text{C}$	21,1	22	23	24	25	26	27	28	29
T, K	294,1	295	296	297	298	299	300	301	302
σ_T, K	0,2								
$P', \text{мм рт ст}$	20,1	20,8	21,8	22,0	23,6	26,2	26,5	28,3	29,2
	20,1	20,8	21,8	22,1	23,7	26,2	26,6	28,3	29,2
	20,1	20,7	21,8	22,1	23,6	26,2	26,6	28,3	29,2
	20,0	20,8	21,8	22,1	23,6	26,2	26,6	28,3	29,2
	20,1	20,7	21,8	22,1	23,6	26,2	26,6	28,4	29,2
$\langle P \rangle, \text{Па}$	2659	2749	2887	2924	3128	3470	3520	2750	3867
$\sigma_P, \text{Па}$	26,59	26,65	26,48	26,60	26,60	26,48	26,59	26,59	26,48
$\ln P$	7,88	7,92	7,97	9,98	8,04	8,15	8,17	8,22	8,26
$\sigma_{\ln P}, *10^{-3}$	10,2	9,7	9,2	9,2	9,1	8,5	7,6	7,5	7,1
$1/T, 10^{-3} * K^{-1}$	3,40	3,39	3,378	3,367	3,356	3,344	3,33	3,322	3,311

$T, ^\circ\text{C}$	30	31	32	33	34
T, K	303	304	305	306	307
σ_T, K	0,2				
$P', \text{мм рт ст}$	31,3	33,4	34,8	35,1	39,8
	31,3	33,4	34,8	35,1	39,8
	31,2	33,4	34,8	35	39,8
	31,3	33,4	34,9	35,1	39,8
	31,3	33,4	34,9	35,1	39,8
$\langle P \rangle, \text{Па}$	4142	4423	4611	4640	5270
$\sigma_P, \text{Па}$	26,59	26,64	26,59	26,64	26,48
$\ln P$	8,32	8,39	8,43	8,44	8,57
$\sigma_{\ln P}, *10^{-3}$	6,8	6,4	5,9	5,7	5,1
$1/T, 10^{-3} * K^{-1}$	3,30	3,289	3,279	3,268	3,257

3. Проведем те же измерения при охлаждении жидкости.

$T, ^\circ\text{C}$	21	22	23	24	25	26	27	28	29
T, K	294	295	296	297	298	299	300	301	302
σ_T, K	0,2								
$P', \text{мм рт ст}$	20,5	21,2	22,5	23,3	25,2	26,4	27,3	28,4	30,3
	20,4	21,2	22,6	23,3	25,2	26,3	27,3	28,5	30,3
	20,4	21,2	22,5	23,3	25,3	26,4	27,3	28,5	30,2
	20,4	21,2	22,5	23,3	25,2	26,5	27,3	28,4	30,3
	20,5	21,2	22,5	23,3	25,2	26,4	27,3	28,4	30,2
$\langle P \rangle, \text{Па}$	2706	2807	2982	3085	3340	3496	3615	3766	4007
$\sigma_P, \text{Па}$	26,65	26,48	26,59	26,48	26,59	26,75	26,48	26,64	26,65
$\ln P$	7,90	7,94	8,00	8,03	8,11	8,15	8,19	8,23	8,29
$\sigma_{\ln P}, *10^{-3}$	6,6	7,1	7,6	7,9	8,6	8,9	9,4	9,8	9,8
$1/T, 10^{-3} * K^{-1}$	3,40	3,39	3,378	3,367	3,356	3,344	3,33	3,322	3,311

$T, ^\circ\text{C}$	30	31	32	33	34
T, K	303	304	305	306	307
σ_T, K	0,2				
$P', \text{мм рт ст}$	31,9	34,9	36,2	37,4	39,8
	32,0	34,9	36,2	37,4	39,8
	32,0	34,9	36,2	37,3	39,8
	32,0	34,9	36,3	37,4	39,8
	32,0	34,9	36,3	37,4	39,8
$\langle P \rangle, \text{Па}$	4235	4621	4799	4950	5271
$\sigma_P, \text{Па}$	26,59	26,48	26,64	26,59	26,49
$\ln P$	8,57	8,51	8,48	8,44	8,35
$\sigma_{\ln P}, *10^{-3}$	5,2	5,4	5,6	5,7	6,3
$1/T, 10^{-3} * \text{K}^{-1}$	3,30	3,289	3,279	3,268	3,257

Погрешность измерения давления оценим по формулам

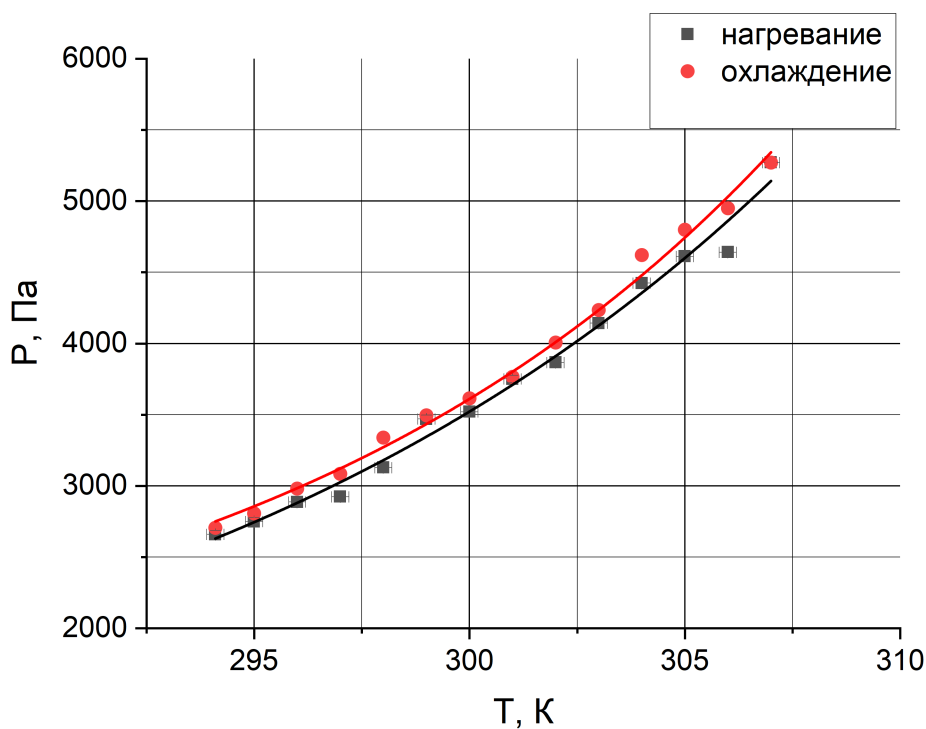
$$\sigma_P^{\text{случ}} = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{k=1}^N (P_k - \langle P \rangle)^2}$$

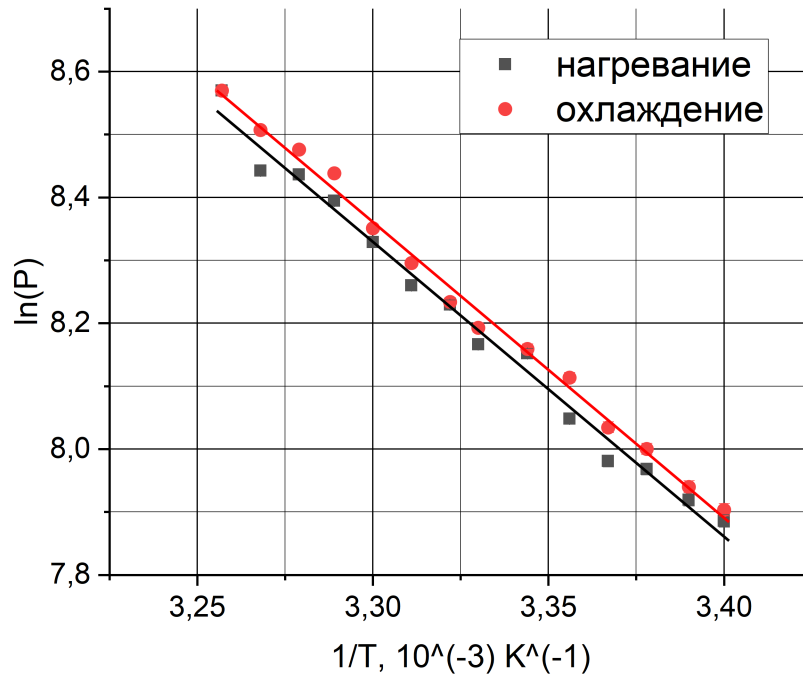
$$\sigma_P^{\text{сист}} \approx 0,2 \text{ мм рт ст} = 2,65 \text{ Па}$$

$$\sigma_P = \sqrt{(\sigma_P^{\text{сист}})^2 + (\sigma_P^{\text{случ}})^2}$$

$$\sigma_{\ln \frac{P}{P_0}} = \frac{\sigma_P}{P}$$

4. Построим графики в координатах T, P и в координатах $\frac{1}{T}, \ln P$. На графики нанесём точки, полученные при нагревании и охлаждении жидкости.





По формуле (3) вычислим L .

Сначала воспользуемся данными первого графика. Аппроксимируем методом наименьших квадратов полученные на этом участке температур зависимости функциями вида

$$P = ae^{bT},$$

где a и b – неизвестные параметры.

$$b = \frac{\langle \ln P \cdot T \rangle - \langle T \rangle \langle \ln P \rangle}{\langle T^2 \rangle - \langle T \rangle^2},$$

$$\ln a = \langle \ln P \rangle - b \langle T \rangle.$$

Случайные погрешности вычисления этих величин находим по следующим формулам:

$$\sigma_b^{\text{случ}} = \sqrt{\frac{1}{N-2} \left(\frac{\langle (\ln P - \langle \ln P \rangle)^2 \rangle}{\langle (T - \langle T \rangle)^2 \rangle} \right) - b^2},$$

$$\sigma_{\ln a}^{\text{случ}} = \sigma_b^{\text{случ}} \sqrt{\langle T^2 \rangle}.$$

Вкладом систематической погрешности в общую можно пренебречь в виду её малости по сравнению со случайной погрешностью определения коэффициентов. Поэтому будем считать, что

$$\sigma_b \approx \sigma_b^{\text{случ}},$$

$$\sigma_{\ln a} \approx \sigma_{\ln a}^{\text{случ}}.$$

Получаем:

$$a_{\text{нагр}} = 7,9 * 10^{-6} \text{ Па}, a_{\text{охл}} = 5,7 * 10^{-6} \text{ Па}$$

$$b_{\text{нагр}} = 6,6 * 10^{-2} K^{-1}, b_{\text{охл}} = 8,1 * 10^{-2} K^{-1}$$

$$\sigma_{a_{\text{нагр}}} = 0,47 * 10^{-6} \text{ Па}, \sigma_{a_{\text{охл}}} = 0,24 * 10^{-6} \text{ Па}$$

$$\sigma_{b_{\text{нагр}}} = 1,9 * 10^{-2} \text{ К}^{-1}, \sigma_{b_{\text{охл}}} = 1,3 * 10^{-2} \text{ К}^{-1}$$

Используя полученные результаты, можно получить формулу для производной давления по температуре:

$$\frac{dP}{dT} = abe^{bT}.$$

Получаем:

$$L = \frac{RT^2 ab}{P} e^{bT}.$$

Вычисляем теплоту парообразования воды. Погрешность вычисления этой величины можно оценить формулам:

$$\sigma_L = L \varepsilon_{\frac{dP}{dT}},$$

$$\sigma_{\frac{dP}{dT}} = \sqrt{\left(\frac{\partial \frac{dP}{dT}}{\partial a} \sigma_a\right)^2 + \left(\frac{\partial \frac{dP}{dT}}{\partial b} \sigma_b\right)^2}$$

Таким образом,

$$L_{\text{нагр}} = 41,7 \pm 4,8 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}, L_{\text{охл}} = 40,4 \pm 5,1 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}.$$

Теперь вычислим L , пользуясь данными, полученными из второго графика. $\frac{d(\ln P)}{d(1/T)} = k$ - коэффициент наклона графика ($k_{\text{нагр}} = -4,68 * 10^3 \text{ К}$, $k_{\text{охл}} = -4,70 * 10^3 \text{ К}$).

$$L_{\text{нагр}} = 38,9 \pm 0,8 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}, L_{\text{охл}} = 39,1 \pm 1,2 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}.$$

Погрешности взяты из ошибок в определении коэффициентов аппроксимирующих прямых с помощью МНК.

5 Вывод

В ходе работы было измерено давление насыщенного пара воды при разной температуре. По полученным данным была вычислена теплота испарения. Значения, полученные экспериментально, в пределах погрешности согласуются с табличным ($L = 40,7 \text{ кДж/моль}$). Для нагревания и охлаждения значения L приблизительно равны, что свидетельствует о том, что нагревание и охлаждение происходили примерно в одном темпе.

Точности методов измерения значительно отличаются. У поточечного измерения теплоты парообразования высокая случайная погрешность. График в координатах $1/T, \ln P$ позволяет вычислить L с лучшей точностью, поскольку происходит усреднение по множеству точек.