

Работа 2.4.1

Определение теплоты испарения жидкости

Андрей Киркича, Б01-202, МФТИ, 2023

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

В работе используются: термостат; герметический сосуд, заполненный исследуемой жидкостью; отсчётный микроскоп.

Теоретические сведения

Переход части молекул из жидкости в пар приводит к охлаждению жидкости, так как это обедняет её молекулами с большой кинетической энергией.

Молярная теплота испарения - количество теплоты, необходимое для изотермического испарения одного моля жидкости при внешнем давлении, равном упругости её насыщенных паров.

Методика измерений

Теплоту испарения сложно посчитать непосредственно при помощи калориметра из-за неконтролируемых потерь тепла.

Будем использовать уравнение Клапейрона-Клаузиуса:

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

где P - давление насыщенного пара при температуре жидкости (и пара) T ,
 L - теплота испарения, V_1 - объём жидкости, V_2 - объём пара

V_1, V_2 относятся к одному молю вещества.

Справочные данные показывают, что $V_1 \ll V_2$, поэтому объёмом V_1 можно пренебречь.

Уравнение Ван-дер-Ваальса:

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

Из справочных данных видно, что величиной b также можно пренебречь и при давлении меньше атмосферного поправка $\frac{a}{V^2}$ незначительна.

Будем описывать состояние газа следующим уравнением:

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

Тогда

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

В работе температура жидкости измеряется термометром, давление пара определяется манометром.

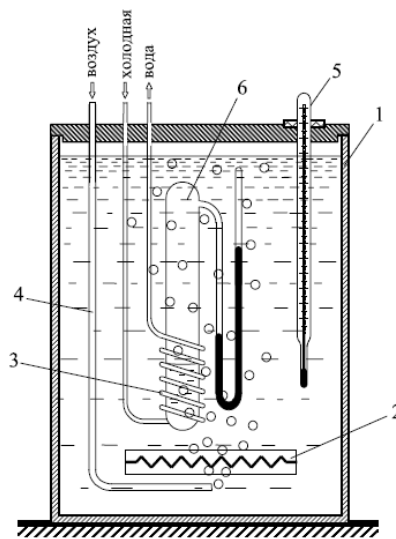


Рисунок 1: схема экспериментальной установки

$$P = \rho g \Delta h \quad (5)$$

Результаты измерений

Сначала температура повышалась с начальных 14°C до 31°C (пока хватало измерительной шкалы штангенциркуля, при помощи которого измерялась высота столба ртути), а затем понижалась. Через каждый градус Цельсия снимались показания. Было принято во внимание то, что термометр показывал температуру в термостате, но не внутри сосуда с исследуемой жидкостью. Мы ждали ещё порядка минуты после достижения нужной температуры перед тем, как снять показания. Из-за этого погрешность измерения температуры допускается больше, чем цена деления прибора.

Над одним столбиком ртути был маленький слой воды, но его высота пренебрежимо мала по сравнению с высотой самого столбика. Плотность воды отличается от плотности ртути в порядок, поэтому с учётом вышесказанного можно считать, что его вкладом в давление можно пренебречь.

Также было сделано предположение (исходя из справочных данных), что плотность ртути прямо пропорциональна температуре. При расчётах эта зависимость учитывалась.

Повышение температуры						Понижение температуры					
h_1 , мм	h_2 , мм	ρ , кг/м ³	T , °C	Δh , мм	P , Па	h_1 , мм	h_2 , мм	ρ , кг/м ³	T , °C	Δh , мм	P , Па
57	24	13561	13.8	33	43900	82	0	13518	31	82	108700
57	24	13558	15	33	43900	79	3	13521	30	76	100800
58	23	13555	16	35	46500	77	6	13523	29	71	94200
59	22	13552	17	37	49200	75	7	13526	28	68	90200
60	21	13549	18	39	51800	73	8	13529	27	65	86300
61	20	13547	19	41	54500	72	10	13531	26	62	82300
63	19	13546	20	44	58500	70	11	13534	25	59	78300
64	17	13543	21	47	62400	69	14	13536	24	55	73000
65	16	13540	22	49	65100	67	15	13538	23	52	69100
66	15	13538	23	51	67700	66	16	13540	22	50	66400
69	14	13536	24	55	73000	65	17	13543	21	48	63800
70	12	13534	25	58	77000	64	18	13546	20	46	61100
72	10	13531	26	62	82300	62	19	13547	19	43	57100
74	8	13529	27	66	87600	61	20	13549	18	41	54500
76	6	13526	28	70	92900	60	21	13552	17	39	51900
78	5	13523	29	73	96800	59	22	13555	16	37	49200
80	3	13521	30	77	102100	58	23	13558	15	35	46600
82	0	13518	31	82	108700	59	24	13561	14	35	46600

Таблица 1: результаты измерений

Повышение температуры			Понижение температуры		
$T, ^\circ\text{C}$	$1/T, \text{K}$	$\ln P$	$T, ^\circ\text{C}$	$1/T, \text{K}$	$\ln P$
13.8	0.003487	10.68969	31	0.032258	11.59673
15	0.003472	10.68947	30	0.033333	11.52096
16	0.003460	10.74809	29	0.034483	11.45306
17	0.003448	10.80344	28	0.035714	11.41011
18	0.003436	10.85586	27	0.037037	11.36521
19	0.003425	10.90572	26	0.038462	11.31811
20	0.003413	10.97627	25	0.040000	11.26873
21	0.003401	11.04200	24	0.041667	11.19867
22	0.003390	11.08346	23	0.043478	11.14273
23	0.003378	11.12331	22	0.045455	11.10366
24	0.003367	11.19867	21	0.047619	11.06306
25	0.003356	11.25164	20	0.050000	11.02072
26	0.003344	11.31811	19	0.052632	10.95335
27	0.003333	11.38048	18	0.055556	10.90587
28	0.003322	11.43910	17	0.058824	10.85608
29	0.003311	11.48084	16	0.062500	10.80366
30	0.003300	11.53404	15	0.066667	10.74831
31	0.003289	11.59673	14	0.071429	10.74853

Таблица 2: зависимость $\ln P$ от $1/T$

По приведённым выше данным построены графики. Зависимость $\ln P$ от $1/T$ - линейная.

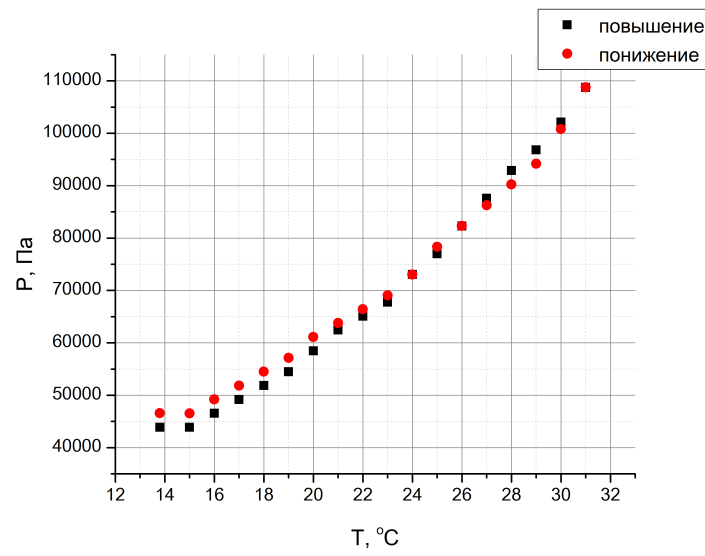


Рисунок 2: графики зависимости давления от температуры при повышении и понижении температуры

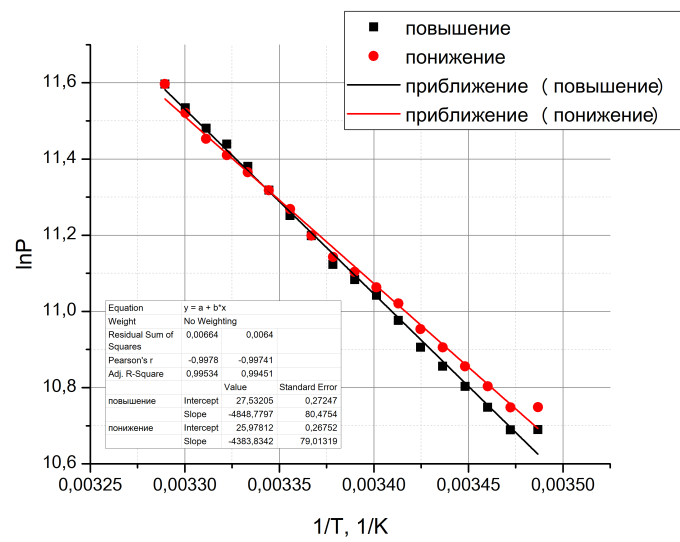


Рисунок 3: графики зависимости $\ln P$ от $1/T$ при повышении и понижении температуры

По этим графикам, используя формулу (4), можно найти значения L :

- $L_{\text{пов}} = 40300 \frac{\text{Дж}}{\text{моль}}$
- $L_{\text{пон}} = 36400 \frac{\text{Дж}}{\text{моль}}$

Переводя в удельные теплоты делением на молярную массу исследуемой жидкости ($\mu = 46.07 \frac{\text{г}}{\text{моль}}$), получим:

- $L_{\text{пов}} = 875000 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$
- $L_{\text{пон}} = 791000 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$

Расчёт погрешностей

- R, ρ, g, μ считаем константами без погрешности
- $\sigma_h = 1 \text{ мм}$
- $\sigma_{\Delta h} = \sqrt{2}\sigma_h \approx 1.5 \text{ мм}$
- $\sigma_T = 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$
- $\sigma_P = \rho g \sigma_{\Delta h} \approx 200 \text{ Па}$
- $\sigma_{\frac{d(\ln P)}{d(1/T)}}$ определяется программно методом наименьших квадратов
- $\sigma_{L_{\text{мол}}} = R \cdot \sigma_{\frac{d(\ln P)}{d(1/T)}} \approx 700 \frac{\text{Дж}}{\text{моль}}$
- $\sigma_{L_{\text{уд}}} = \frac{1}{\mu} \cdot \sigma_{L_{\text{мол}}} \approx 15000 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$

Вывод

В ходе эксперимента были получены два значения удельной теплоёмкости спирта: $L_{\text{пов}} = (875 \pm 15) \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ и $L_{\text{пон}} = (791 \pm 15) \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$. Табличное значение $L = 837 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ в пределах погрешности не сходится ни с одним полученным значением. Сами найденные величины также сильно отличаются друг от друга. Расхождение можно объяснить методом измерения температуры. Требовалось некоторое время для установления равновесия между термостатом и исследуемой жидкостью. Мы попытались учесть это и измеряли давление при температуре выше (при нагревании) или ниже (при охлаждении) требуемой температуры на $\approx 0.3 - 0.5^\circ\text{C}$. Такая оценка была сделана наугад и могла не соответствовать реальности. Охлаждение происходило быстрее, поэтому,

возможно, стоило ожидать чуть меньше. Ещё одной причиной может быть качество сборки установки. Крышка термостата была приподнята, из-за этого ртутный манометр был наклонён на небольшой угол, который мог повлиять в конечном счёте на показания давления. Значение, полученное на подъёме температуры, находится ближе к табличному.