

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОТЫ ИСПАРЕНИЯ ЖИДКОСТИ

Выполнил:
Деревянченко Михаил
Группа:
Б03-106

Долгопрудный, 2022

Оглавление

1. Аннотация.....	3
2. Теоретические сведения.....	4
3. Методика измерений.....	5
4. Используемое оборудование:.....	8
5. Результаты измерений и обработка данных.....	9

1. Аннотация

Целями данной работы являются:

1. Измерение давления насыщенного пара жидкости при разной температуре;
2. Вычисление по полученным данным теплоты испарения с помощью уравнения Клапейрона-Клаузиуса.

2. Теоретические сведения

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 объём жидкости меньше объёма пара. Не все молекулы жидкости способны совершить эту работу, а только те из них, кто обладает достаточной кинетической энергией. Поэтому переход части молекул в пар приводит к обеднению жидкости быстрыми молекулами, т.е. к её 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 её насыщенных паров, называется её молярной теплотой испарения (парообразования).

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 – объём пара, V_1 – объём жидкости. Найдя из опыта dP/dT , T , V_2 и V_1 , можно

определить L путём расчёта. 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 проводятся при давлениях ниже атмосферного. В этом случае задача существенно упрощается.

В таблице для ряда жидкостей приведены: температура, при которой давление насыщенных паров равно атмосферному, величины V_1 и V_2 , входящие в (1), а так же константы a и b в уравнении Ван-дер-Ваальса.

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

Из таблицы видно, что V_1 не превосходит 0,5% от V_2 . При нашей точности опытов величиной V_1 в (1) можно пренебречь.

Обратимся теперь к V_2 , которое в дальнейшем будем обозначать просто V . Объём V связан с давлением и температурой уравнением Ван-дер-Ваальса:

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

Из таблицы можно видеть, что b одного порядка с V_1 . В уравнении Ван-дер-Ваальса величиной b следует пренебречь. Пренебрежение членом a/V^2 по сравнению с P вносит ошибку меньше 3% . При давлении ниже атмосферного ошибки становятся ещё меньше. Таким образом, при давлениях ниже атмосферного уравнение Ван-дер-Ваальса для насыщенного пара мало отличается от уравнения Менделеева-Клапейрона. Положим поэтому

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

Подставляя (3) в (1), пренебрегая V_1 и разрешая уравнение относительно L , найдём

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

Эта формула является окончательной.

В нашем опыте температура жидкости измеряется термометром, давление пара определяется при помощи манометра, а производная dP/dT $d(\ln P)/d(1/T)$ находятся графически как угловой коэффициент касательной к кривой $P(T)$ или соответственно к кривой, у которой по оси абсцисс отложено $1/T$, а по оси ординат $\ln P$.

3. Методика измерений

- **Экспериментальная установка:**

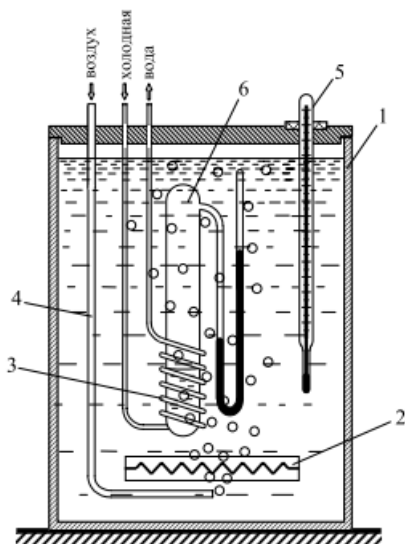


Рис. 1. Схема установки для определения теплоты испарения

Схема установки изображена на рис. 1. 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. Над ней находится насыщенный пар (перед заполнением прибора воздух из него был откачан). Давление насыщенного пара определяется по ртутному манометру, соединённом с исследуемым объёмом. Отсчёт показаний манометра производится при помощи микроскопа. Описание прибора указывает на второе важное преимущество предложенного косвенного метода измерения L перед прямым. При непосредственном измерении теплоты испарения опыты нужно производить при неизменном давлении, и прибор может быть не запаян. При этом невозможно обеспечить такую чистоту и неизменность экспериментальных условий, как при нашей постановке опыта. Описываемый прибор обладает важным недостатком: термометр определяет температуру термостата, а не исследуемой жидкости (или её

пара). Эти температуры близки друг к другу лишь в том случае, если нагревание происходит достаточно медленно. Убедиться в том, что темп нагревания не является слишком быстрым, можно, сравнивая результаты, полученные при нагревании и при остывании прибора. Такое сравнение необходимо сделать. Для ориентировки укажем, что температуру воды в калориметре следует менять не быстрее, чем на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 1—3 минут.

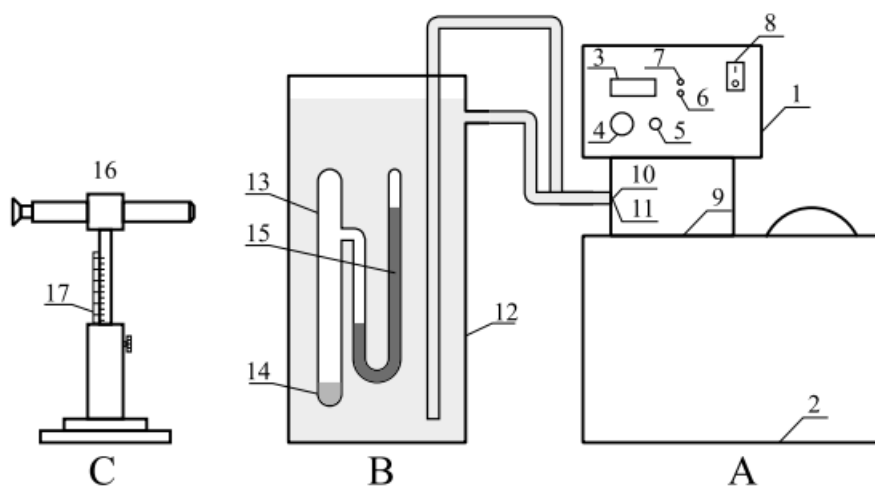


Рис. 2. Схема установки для определения теплоты испарения

• Методика измерений:

1. Измерения разности уровней жидкости ртутного столба с помощью штангенциркуля при нагреве калориметра.
2. Проведение п.1 только при охлаждении калориметра для сравнения точности проведенных измерений на предыдущем пункте.
3. Построение зависимости $P(T)$ для вычисления молярной теплоты испарения воды.

- **Используемое оборудование:**

Термостат; герметический сосуд, заполненный исследуемой жидкостью; отсчётный микроскоп.

4. Результаты измерений и обработка данных

Вода

Т, °С	h ₁ , мм(верхний)	h ₂ , мм(нижний)	Δh, мм	Р, Па
20	65,9	49,2	16,7	2219
21	66,6	48,9	17,7	2352
22	67,2	48,5	18,7	2485
23	68,3	47,7	20,6	2737
24	69,0	47,2	21,8	2897
25	69,3	46,3	23	3056
26,1	70,3	45,6	24,7	3282
27	71,0	44,7	26,3	3495
28	71,7	44,2	27,5	3654
29	72,5	43,5	29	3854
30	73,4	42,6	30,8	4093
31	74,4	41,9	32,5	4319
32	75,2	40,9	34,3	4558
33	76,4	39,8	36,6	4864
34	77,3	38,9	38,4	5103
35	78,3	37,8	40,5	5382
36	79,4	36,7	42,7	5674
37	80,7	35,5	45,2	6006
38	82,0	34,4	47,6	6325
37	79,5	35,4	45,1	5993
36	79,7	36,8	42,9	5701

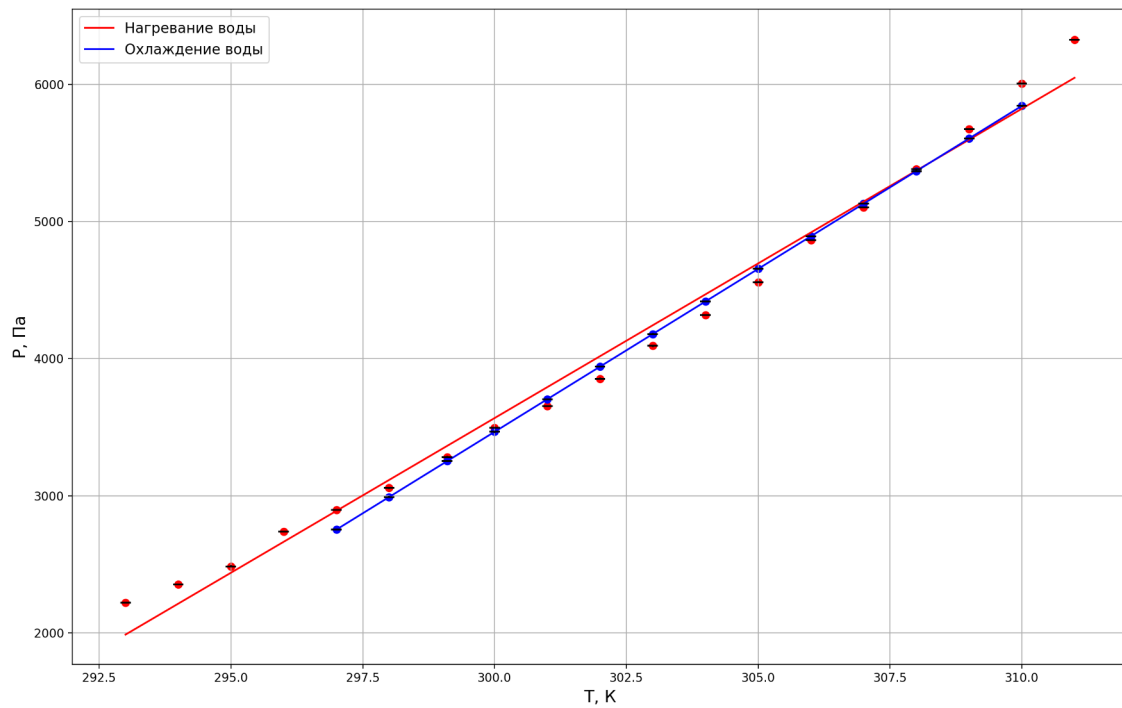
35	78,5	37,5	40,4	5369
34	77,4	38,7	38,3	5090
33	76,2	39,9	36,4	4837
32	75,4	40,8	34,3	4558
31	74,6	41,8	32,6	4332
30	73,5	42,4	30,9	4106
29	72,8	43,2	29	3854
28	71,5	44,1	27,6	3668
27	71,2	44,8	26,4	3508
26	70,0	45,2	24,6	3269
25	69,4	46,2	22,8	3030
24	68,8	47,5	21,7	2884

1 способ:

Строим график зависимости $P(T)$, аппроксимируем полученную кривую под зависимость от полинома нужной степени(в данной работе кривая аппроксимировалась к прямой) и, зная уравнение, ее описывающее, находим L по данной формуле:

$$L = \frac{RT^2}{P} \frac{dP}{dT}$$

Зависимость давления от температуры



$$k = \frac{\langle PT \rangle - \langle P \rangle \langle T \rangle}{\langle T^2 \rangle - \langle T \rangle^2}, \text{ где } k = \frac{dP}{dT}$$

$$\sigma_k = \sqrt{\frac{1}{N-1} \left(\frac{\langle P^2 \rangle - \langle P \rangle^2}{\langle T^2 \rangle - \langle T \rangle^2} - k^2 \right)}$$

$$k_h = 225,6 \pm 18,1 \text{ Па/К} \quad k_o = 237,6 \pm 19,4 \text{ Па/К}$$

$$\sigma_T = 0,05 \text{ К}$$

$$\sigma_h = 0,05 \text{ мм}$$

$$\sigma_P = \sigma_h \rho_{\text{рт}} g = 7 \text{ Па}$$

$$\varepsilon_L = \sqrt{4 \varepsilon_T^2 + \varepsilon_P^2 + \varepsilon_{\frac{dP}{dT}}^2}$$

$$L_h = 42852 \pm 2798 \text{ Дж/моль}$$

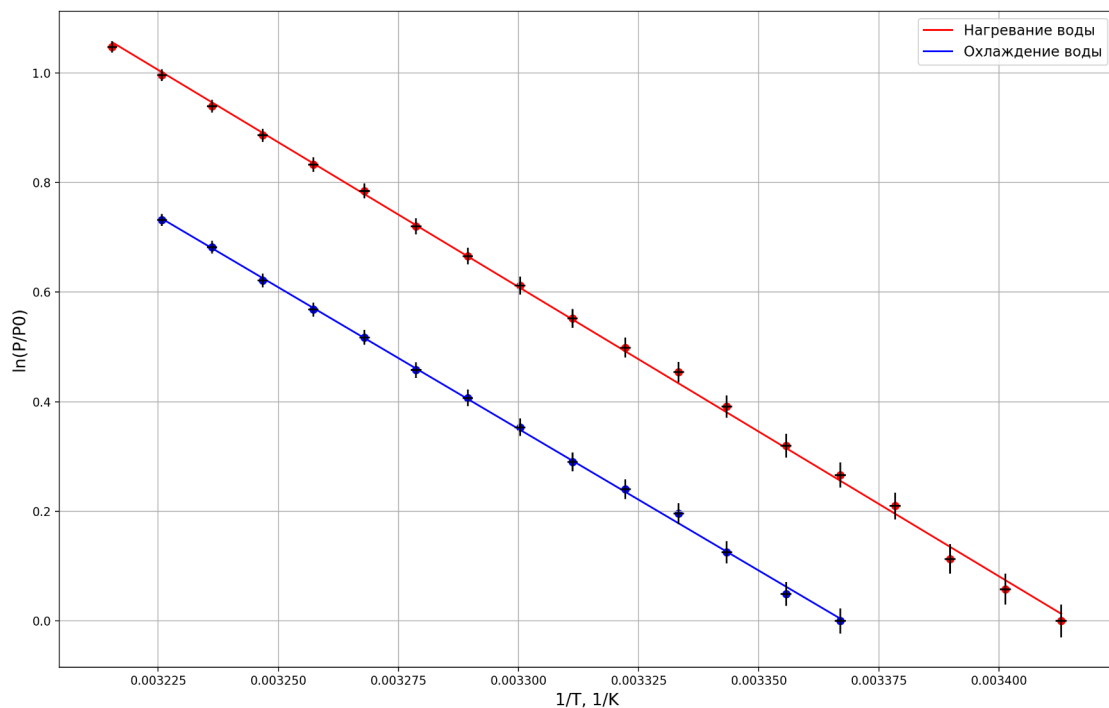
$$L_o = 43567 \pm 2945 \text{ Дж/моль}$$

2 способ:

Аналогично 1 способу строим график зависимости $\ln(P/P_0)(1/T)$, аппроксимируем полученную кривую под зависимость от полинома нужной степени (в данной работе кривая аппроксимировалась к прямой) и, зная уравнение, ее описывающее, находим L по данной формуле:

$$L = -R \frac{d(\ln \frac{P}{P_0})}{d(1/T)}$$

Зависимость $\ln(P/P_0)$ от $1/T$



$$\sigma_{1/T} = \left| \frac{d(1/T)}{dT} \right| * \sigma_T = \frac{\sigma_T}{T^2}$$

$$\sigma_{\ln P} = \left| \frac{d \ln P}{dP} \right| * \sigma_P = \frac{\sigma_P}{P}$$

$$k = \frac{\langle \ln(\frac{P}{P_0}) \frac{1}{T} \rangle - \langle \ln(\frac{P}{P_0}) \rangle \langle \frac{1}{T} \rangle}{\langle \frac{1}{T} \rangle^2 - \langle \frac{1}{T} \rangle^2}, \text{ где } k = \frac{d(\ln \frac{P}{P_0})}{d \frac{1}{T}}$$

$$k_h = -4266 \text{ K}^{-1} \quad k_o = -4078 \text{ K}^{-1}$$

$$\sigma_k = \sqrt{\frac{1}{N-1} \left[\frac{\langle \ln(\frac{P}{P_0})^2 \rangle - \langle \ln(\frac{P}{P_0}) \rangle^2}{\langle \frac{1}{T} \rangle^2 - \langle \frac{1}{T} \rangle^2} - k^2 \right]}$$

$$\varepsilon_L = \varepsilon_k$$

$$L_h = 41852 \pm 2093 \text{ Дж / моль}$$

$$L_o = 40013 \pm 2420 \text{ Дж / моль}$$

5. Обсуждение результатов

В ходе работы с помощью штангенциркуля и микроскопа измерялась разность уровней в ртутном U-образном манометре, с помощью которой вычислялось давление, и температура по термометру. Были исследованы зависимости $P(T)$ и $\ln(P/P_0)(1/T)$ для нахождения молярной теплоты испарения жидкости по формулам:

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

Табличное значение молярной теплоты испарения:

$$L_n = 40800 \text{ Дж / моль}$$

Значения, получившиеся первым способом:

$$k_n = 225,6 \pm 18,1 \text{ Па / К} \quad k_o = 237,6 \pm 19,4 \text{ Па / К},$$

$$\text{где } k = \frac{dP}{dT}$$

$$L_n = 42852 \pm 2798 \text{ Дж / моль}$$

$$L_o = 43567 \pm 2945 \text{ Дж / моль}$$

Значения, получившиеся вторым способом:

$$k_n = -4266 \pm 2133 \text{ К}^{-1} \quad k_o = -4078 \pm 2234 \text{ К}^{-1},$$

$$\text{где } k = \frac{d(\ln \frac{P}{P_0})}{d\frac{1}{T}}$$

$$L_n = 41852 \pm 2093 \text{ Дж / моль}$$

$$L_o = 40013 \pm 2420 \text{ Дж / моль}$$

Сравнивая полученные экспериментальные значения с табличным, можно сказать, что оно попало в предел погрешности каждого из них. Такой результат связан, во-первых, с большей точностью косвенного измерения по сравнению с

прямым, во-вторых, с достаточно большой случайной погрешностью, которая может быть обусловлена не полностью установившейся температурой в калориметре, потерями тепла в окружающую среду, неравномерным нагревом жидкости, а также систематическими погрешностями штангенциркуля и термометра, которые играют незначительную роль по сравнению со случайными. Также можно заметить, что вторым способом было получено более точное значение величины L . Это может быть связано с тем, что во второй формуле L зависит только от угла наклона графика, который с хорошей точностью был аппроксимирован до линейного, в то время в первой формуле L зависит также от величины T и P в каждой точке, в результате чего L сильно разнится.

6. Вывод

В данной работе была успешно измерена зависимость разности уровней ртутного столба в зависимости от температуры, используя которую мы построили графики $P(T)$ и $\ln(P/P_0)(1/T)$. Найдя их углы наклонов, были вычислены величины молярной теплоты испарения жидкости как при нагреве воды, так и при ее остывании. Полученные экспериментальные данные с хорошей точностью сходятся с табличным, что говорит об успешном проведении эксперимента.