

Работа 2.4.1  
Сибгатуллин Булат, Б01-007

### Определение теплоты испарения жидкости

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

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

Испарением называется переход вещества из жидкого в газообразное состояние. При испарении молекулы вылетают из жидкости, образуя на ней пар, также они должны преодолеть силы молекулярного сцепления и совершить работу против внешнего давления. Поэтому только молекулы, обладающие достаточной кинетической энергией способны вылететь из жидкости, следовательно, чтобы испарение проходило без изменения температуры, к жидкости нужно подводить тепло.

В нашей работе для определения теплоты применен метод основанный на формуле Клапейрона-Клаузиуса:

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

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. Величины  $L$ ,  $V_1$  и  $V_2$  относятся к одному и тому же количеству вещества, в нашем случае к одному молю.

В нашем приборе измерения производятся при давлениях ниже атмосферного. В этом случае задача существенно упрощается, так как  $V_1$  не превосходит 0,5% от  $V_2$ . При нашей точности опытов величиной  $V_1$  можно пренебречь. За  $V$  обозначим  $V_2$ , он будет связан с давлением и температурой уравнением Вандер-Ваальса:

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

В уравнении Вандер-Ваальса величиной по сравнению  $b$  следует пренебречь. Пренебрежение членом  $a/V^2$  по сравнению с  $P$  вносит ошибку менее 3%. При давлении ниже атмосферного ошибки становятся еще

меньше, поэтому уравнение Вандер-Ваальса мало отличается от уравнения Клапейрона:

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

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

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

**Экспериментальная установка.** Схема установки изображена на рисунке 1. Роль термостата играет наполненный водой резервуар 1. Его нагревание производится спиралью 2, а охлаждение при помощи змеевика 3, через который проходит трубопроводная вода. Вода в термостате перемешивается воздухом, поступающим через трубку 4. Температура воды измеряется термометром 5. в термостат погружен запаянный прибор 6 с исследуемой жидкостью. Давление насыщенного пара определяется по ртутному манометру. Отсчет показаний манометра производится с помощью микроскопа.

На рисунке 2 приведена более полная схема такой же установки, но с использованием современного термостата. Она включает в себя термостат А, экспериментальный прибор В и отсчетный микроскоп С.

Экспериментальный прибор В представляет собой емкость 12 заполненную водой, в которую погружён запаянный прибор 13 с исследуемой жидкостью 14 (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 отчетного микроскопа 16, его показания снимаются по шкале 17.

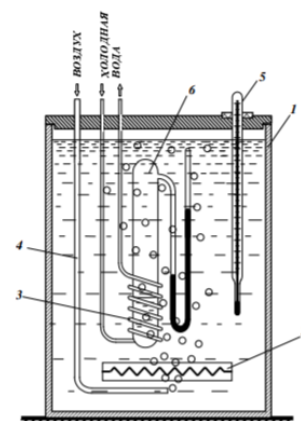


Рис. 1. Схема установки для определения теплоты испарения

**1.** Проведем измерения и запишем их результаты в таблицы. Первая будет содержать в себе данные температуры и давления при повышении температуры, вторая при понижении. Причем давления в Паскалях получим из давления в миллиметрах ртутного столба по формуле:

$$P_{Па} = P_{мм.рт.ст} * 133,32$$

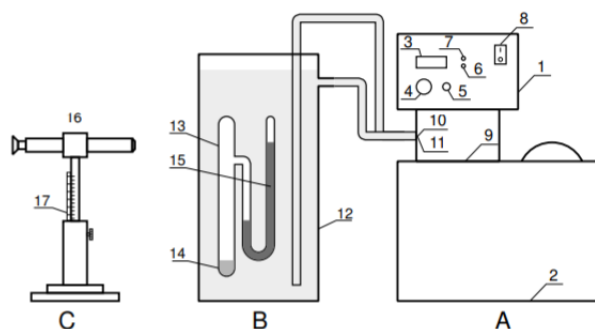


Рис. 2. Схема установки для определения теплоты испарения

P, мм.рт.ст.	35,8	37,8	41,6	43,5	46,0	49,6	52,8
P, Па	4772,9	5039,6	5546,2	5799,5	6132,8	6612,8	7039,4
T, К	293,5	294,7	295,7	296,5	297,5	298,9	299,5
P, мм.рт.ст.	56,5	59,9	63,6	67,9	71	76	81,1
P, Па	7532,7	77986,0	8479,3	9052,6	9465,9	10132,5	10812,5
T, К	300,5	301,5	302,5	303,5	304,5	305,5	306,7

P, мм.рт.ст.	80,0	75,8	69,9	65,8	62,0	58,9	51,4
P, Па	10665,8	10105,8	9319,2	8772,6	8265,9	7852,7	6852,8
T, К	306,5	305,3	304,1	303,1	302,1	301,1	298,9
P, мм.рт.ст.	48,3	46,0	42,4	39,9	37,6	35,1	32,7
P, Па	6439,5	6132,8	5652,9	5319,6	5020,0	4679,6	4259,6
T, К	298,1	297,1	296,1	295,1	294,1	293,1	292,1

Построим графики используя метод наименьших квадратов, в итоге будет получена линейная зависимость вида  $y = a + bx$ . Так как вычисления занимают много места, они были вынесены в отдельный файл с названием вычисления. Здесь я запишу только итоговые результаты.

1. Для зависимости  $P$  от  $T$ :

$$b_1 = 449,08$$

$$a_1 = -127251,73$$

$$\sigma_{b_1} = 8,08$$

$$\sigma_{a_1} = 34,81$$

2. Для зависимости  $\ln(P)$  от  $1/T$ :

$$b_2 = -5613,90$$

$$a_2 = 27,60$$

$$\sigma_{b_2} = 71,56$$

$$\sigma_{a_2} = 0,00345$$

Погрешности измерений определяются их техническими характеристиками:

$$\sigma_T = 0,1K \quad \sigma_P = 13,3Па$$

$$\varepsilon_{T_{cp}} = 0,03\% \quad \varepsilon_{P_{max}} = 0,3\%$$

Определить погрешности логарифма давления можно по формуле:

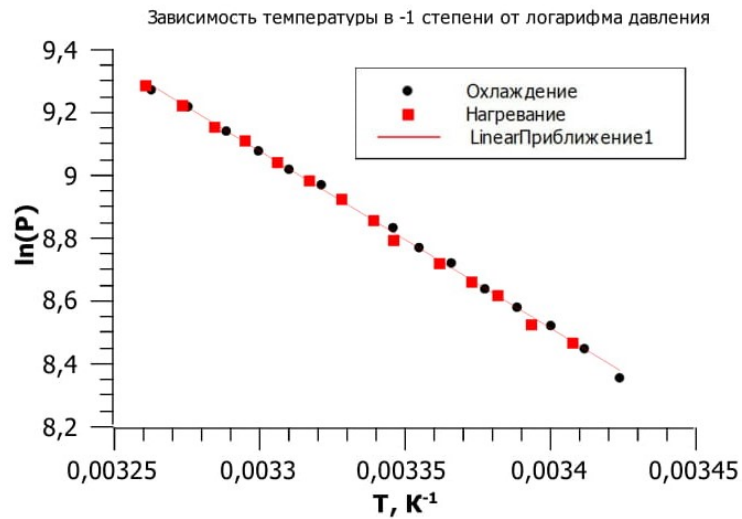
$$\sigma_{\ln(P)} = \frac{1}{P} \sigma_P$$

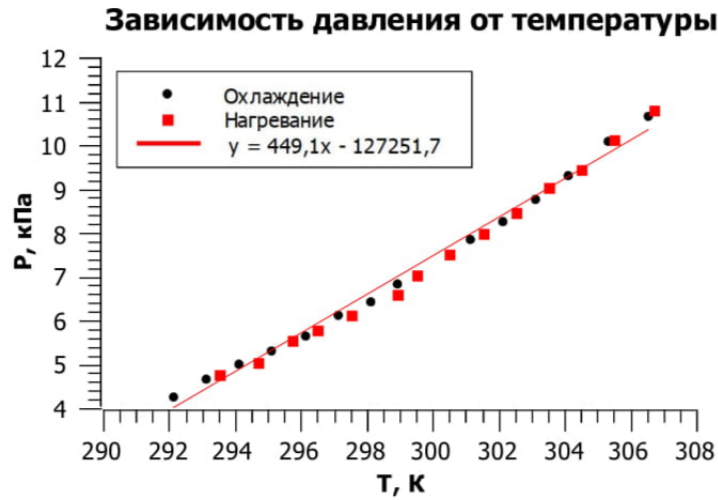
$$\sigma_{\ln(P)_{max}} = 0,3 \quad \varepsilon_{\ln(P)_{max}} = 0,3\%$$

Погрешность температуры в минус превой степени определяется так:

$$\frac{\sigma_{1/T}}{1/T} = \sqrt{\frac{\sigma_T^2}{T^2}}$$

$$\varepsilon_{1/T} = \varepsilon_T = 0,3\%$$





В первом графике  $L$  зависит от температуры и давления по формуле (4), поэтому я возьму среднее значение  $\frac{RT^2}{P}$  (оно посчитано в документе с названием вычисления-2.4.1, я перенес их туда, так как они заменяли достаточно много места), а  $\frac{dP}{dT}$  возьму как коэффициент  $b_1$ .

$$L = \left\langle \frac{RT^2}{P} \right\rangle \cdot \frac{dP}{dT} = \frac{R \langle T^2 \rangle}{\langle P \rangle} \cdot b_1 = 102,51 \cdot 449,08 = 46032,98 \text{ Дж/моль}$$

$$\sigma_L = L \sqrt{\left(\frac{\sigma_{b_1}}{b_1}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_T}{T}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_P}{P}\right)^2} = L \sqrt{\varepsilon_{b_1}^2 + \varepsilon_{T_{cp}}^2 + \varepsilon_{P_{max}}^2}$$

$$\sigma_L = 46031,98 \cdot \sqrt{0,0179^2 + 0,003^2 + 0,0003^2} = 837,78 \text{ Дж/моль}$$

Во втором графике  $L$  находится по формуле (4):

$$L = -R \frac{d(\ln P)}{d(1/T)} = -R \cdot b_2 = 8,31 \cdot 5613,90 = 46651,51 \text{ Дж/моль}$$

$$\sigma_L = L \sqrt{\left(\frac{\sigma_{b_2}}{b_2}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{1/T}}{1/T}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\ln P}}{\ln P}\right)^2} = L \sqrt{\varepsilon_{b_2}^2 + \varepsilon_{1/T}^2 + \varepsilon_{\ln P_{max}}^2}$$

$$\sigma_L = 46651,51 \cdot \sqrt{0,0127^2 + 0,003^2 + 0,0003^2} = 608,94 \text{ Дж/моль}$$

**Вывод.** Значение теплоты измерения в обоих графиках оказалось равным в пределах погрешности:

$$L_1 = 46032,98 \pm 837,78 \text{ Дж/моль}, \quad L_2 = 46651,51 \pm 608,94 \text{ Дж/моль}$$

Табличные значения для спирта показывают 40000 Дж/моль, что не совпадает с нашими данными. Этому может быть несколько объяснений, в нашем опыте используется не чистый спирт, а смесь спирта с другой жидкостью и что наша температура отличается от той, для которой написаны табличные значения.

**1.** Табличные значения для спирта показывают 40000 Дж/моль, что не совпадает с нашими данными. Полученные мной данные отличаются от табличных на 15

**2.** Теплота испарения с увеличением температуры должна уменьшаться, так как кинетическая энергия молекул увеличивается, и им нужно дать меньше энергии, чтобы они покинули жидкую среду.