

Московский физико-технический институт

Лабораторная работа 2.4.1
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОТЫ ИСПАРЕНИЯ
ЖИДКОСТИ

Отчёт студента группы Б02-303
Долговой Екатерины

г.Долгопрудный, 2024

Лабораторная работа 2.4.1

Определение теплоты испарения жидкости

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

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

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, которые обладают 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 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 — абсолютная температура жидкости и пара, L — теплота испарения жидкости, V_2 — объём пара, V_1 — объём жидкости.

В нашем приборе измерения производятся при давлениях ниже атмосферного, что существенно упрощает задачу.

Тогда можно применить уравнение Менделеева-Клайперона, таким образом (для одного моля газа)

$$V = \frac{RT}{P}, \quad (2)$$

где R — универсальная газовая постоянная, V — его объём.

Подставив (2) в (1), пренебрегая V_1 , получим

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

Формула (3) и будет окончательной для нас.

Экспериментальная установка

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, соединенному с исследуемым объемом. Отсчет показаний манометра производится при помощи микроскопа.

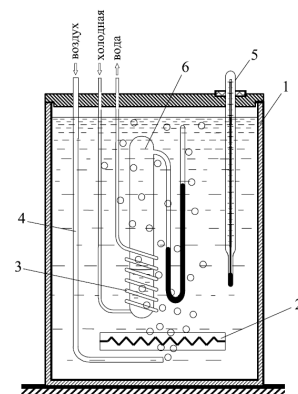


Рис. 1: Схема установки для определения теплоты испарения

На рис. 2 приведена более полная схема такой же установки, но с использованием современного термостата. Установка включает термостат А, экспериментальный прибор В и отсчётный микроскоп С.

Экспериментальный прибор В представляет собой ёмкость 12, заполненную водой. В неё погружён запаянный прибор 13 с исследуемой жидкостью 14. Перед заполнением исследуемой жидкостью воздух из запаянного прибора был удалён, так что над жидкостью находится только ее насыщенный пар. Давление пара определяется по ртутному манометру 15, соединённому с ёмкостью 13. Численная величина давления измеряется по разности показаний отсчётного микроскопа 16, настраиваемого последовательно на нижний и верхний уровни столбика ртути манометра. Показания микроскопа снимаются по шкале 17.

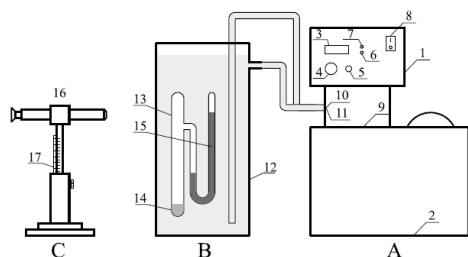


Рис. 2: Схема установки для определения теплоты испарения

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°C в течение 1–3 минут.

Формула расчета P :

$$P = \rho g \Delta h, \quad (4)$$

где ρ — плотность ртути, равная $13\,596\text{ кг/м}^3$, g — ускорение свободного падения ($9,80665\text{ м/с}^2$), Δh — разность показаний манометра.

Ход работы

1. Измерим разность уровней в ртутном U-образном манометре с помощью микроскопа и температуру по индикаторному табло.

2. Включим термостат. Через 1–2 градуса будем измерять разность показаний манометра. Результаты занесем в таблицу. Будем повышать температуру спирта не выше, чем до 40°C.
3. Проведем те же измерения при охлаждении спирта. Установим необходимый нам темп снижения температуры. Результаты так же занесем в таблицу.

$T, ^\circ\text{C}$	$\Delta h, \text{мм}$	$P, \text{кПа}$	$\ln P$	$T, \text{К}$	$1/T, \text{К}^{-1} \cdot 10^{-3}$
25,39	53,11	7,1	8,87	298,54	3,35
27,33	58,49	7,8	8,96	300,48	3,33
29,22	66,31	8,8	9,09	302,37	3,31
30,19	69,97	9,3	9,14	303,34	3,30
31,12	75,00	10,0	9,21	304,27	3,29
32,19	77,70	10,4	9,25	305,34	3,28
33,13	83,22	11,1	9,31	306,28	3,26
34,11	87,88	11,7	9,37	307,26	3,25
35,12	92,83	12,4	9,42	308,27	3,24
36,10	97,56	13,0	9,47	309,25	3,23
37,19	109,80	14,6	9,59	310,34	3,22
38,11	110,38	14,7	9,60	311,26	3,21
39,17	115,02	15,3	9,64	312,32	3,20
37,13	103,93	13,9	9,54	310,28	3,22
34,95	93,53	12,5	9,43	308,10	3,25
33,06	84,64	11,3	9,33	306,21	3,27
31,00	75,11	10,0	9,21	304,15	3,29
29,00	67,08	8,9	9,10	302,15	3,31
27,07	60,33	8,0	8,99	300,22	3,33
25,00	53,27	7,1	8,87	298,15	3,35
23,14	45,36	6,0	8,71	296,29	3,38

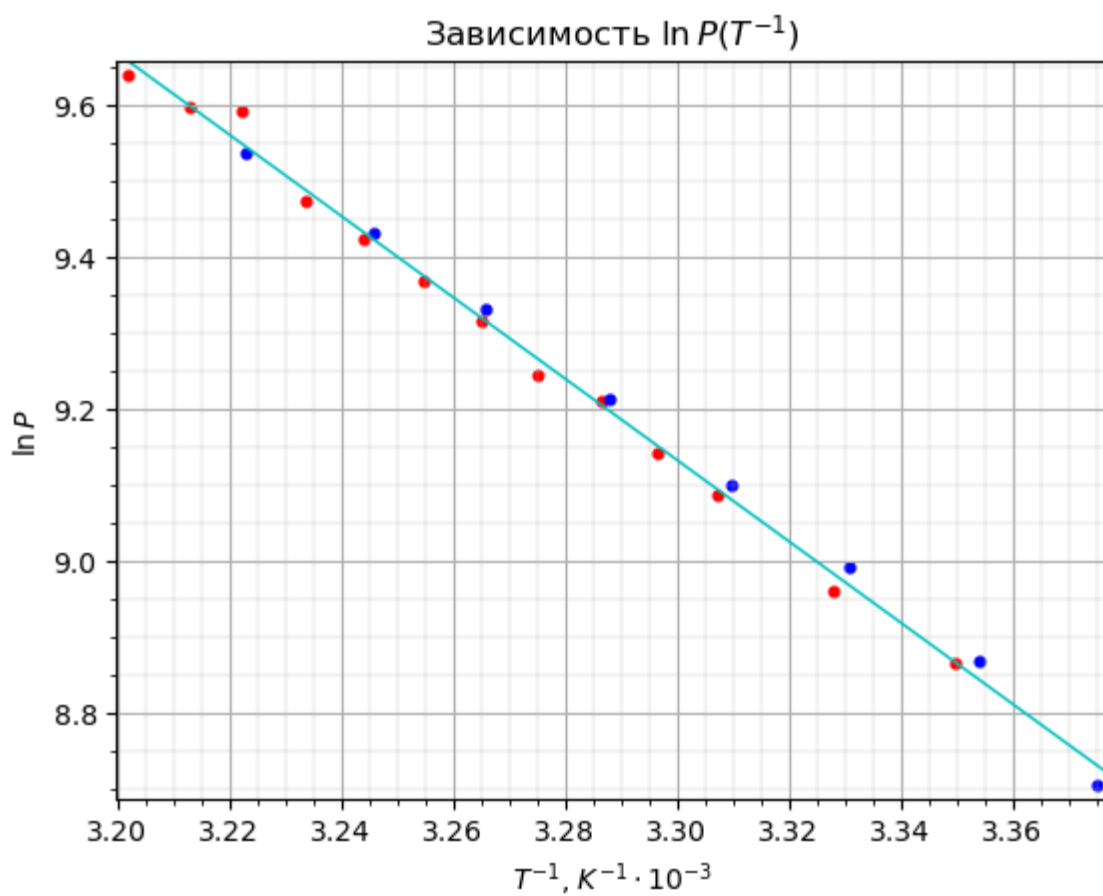
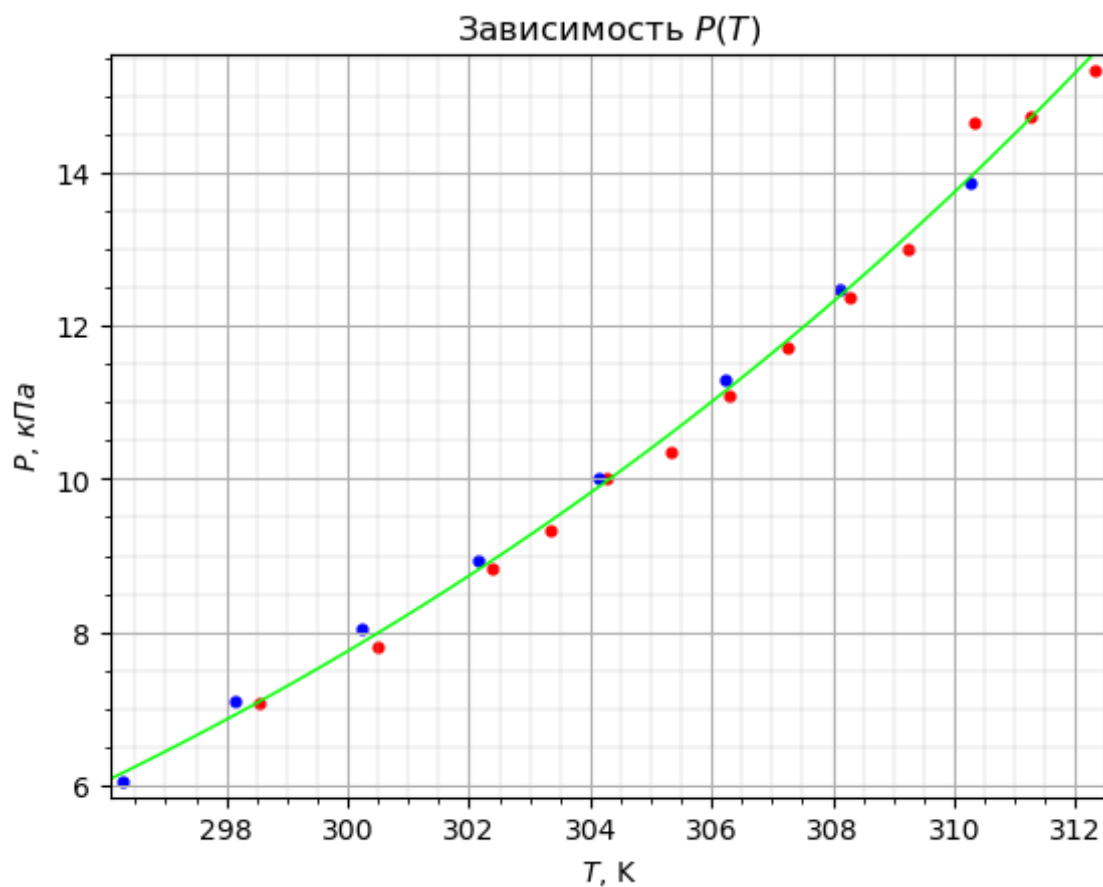
4. Построим графики в координатах T, P и в координатах $1, \ln P$.
5. По построенным графикам найдем L с помощью формулы (3). Для первого графика: Рассмотрим касательные к полученному графику:

№ касательной	1	2	3	4	5	6	7
$P, \text{кПа}$	7,80	9,09	10,36	11,20	12,04	13,01	14,72
$T, \text{К}$	298,54	302,75	305,34	306,21	307,51	308,96	311,26
$dP/dT, \text{кПа/К}$	0,44	0,53	0,60	0,63	0,67	0,71	0,79
$L, \text{кДж/моль}$	41,44	44,80	45,16	43,75	43,58	43,50	43,29

$$\bar{L} = \frac{1}{7} \sum_i L_i = 43,65 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$$

$$\sigma_L^{\text{случ}} = \sqrt{\frac{1}{6 \cdot 7} \sum_i (L_i - \bar{L})^2} = 0,45 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$$

$$\varepsilon_L^{\text{косв}} = \sqrt{(3\varepsilon_T)^2 + (2\varepsilon_P)^2} = 0,0003$$



$$\sigma_L^{\text{КОСВ}} = \bar{L}\varepsilon_L^{\text{КОСВ}} = 0,01 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$$

$$\sigma_L = \sqrt{(\sigma_L^{\text{СЛУЧ}})^2 + (\sigma_L^{\text{КОСВ}})^2} = 0,45 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}} \approx 0,5 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$$

окончательный результат:

$$L_1 = (43,7 \pm 0,5) \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$$

Для второго графика:

$$\beta = \frac{d(\ln P)}{d(1/T)} = -\frac{L}{R} = -5340 \text{ K}$$

$$\sigma_\beta^{\text{МНК}} = \frac{\langle xy \rangle - \langle x \rangle \langle y \rangle}{\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2} = 80 \text{ K}$$

$$\varepsilon_\beta^{\text{МНК}} = \frac{\sigma_\beta^{\text{МНК}}}{|\beta|} = 0,015$$

$$\varepsilon_\beta^{\text{КОСВ}} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_P}{\bar{P} \cdot \ln \bar{P}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_T}{\bar{T}^2}\right)^2} = 0,005$$

$$\varepsilon_\beta = \sqrt{(\varepsilon_\beta^{\text{МНК}})^2 + (\varepsilon_\beta^{\text{КОСВ}})^2} = 0,016$$

$$\bar{L} = -\beta \cdot R = 44,4 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$$

$$\varepsilon_L = \varepsilon_\beta = 0,016$$

$$\sigma_L = \bar{L}\varepsilon_L = 0,7 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$$

окончательный результат:

$$L_2 = (44,4 \pm 0,7) \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$$

Сравним результаты: Видим, что L_1 и L_2 имеют достаточно большую область взаимного перекрытия. Сравним оба значения с табличным: возьмем удельную теплоту испарения этилового спирта C_2H_5OH при температуре 20-40°C $915 \frac{\text{Дж}}{\text{г}}$ и умножим ее на молярную массу $46 \frac{\text{г}}{\text{моль}}$, получим $42,1 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$.

Значение, полученное из первого графика, отклоняется от табличного на 3,8%, из второго — на 5,5%, что говорит о достаточно точном эксперименте.

Вывод

Мы измерили давление насыщенного пара жидкости при разной температуре и вычислили по полученным данным теплоту испарения с помощью уравнения Клапейрона-Клаузиуса.