

ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Кафедра общей физики

Лабораторная работа 2.4.1

Определение теплоты испарения жидкости

Преподаватель: доцент Игуменов А.Ю.

Обучающийся: Готов А.А.

Долгопрудный
2022

1 Введение

1.1 Аннотация

Данная работа посвящена изучению явления испарения жидкости при изменении температуры окружающей среды и давления насыщенных паров. Используются следующие методы: линеаризация и анализ графиков зависимости $P(T)$. Значения T устанавливаем с помощью термостата, значения давления - при помощи гидростатического манометра (ртуть)

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; отсчетный микроскоп.

1.2 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 . 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 ее 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 ее насыщенных паров, называется молярной теплотой испарения (парообразования).

1.3 Схема эксперимента

Экспериментальный прибор В представляет собой емкость 12, заполненную водой. В нее погружен запаянный прибор 13 с исследуемой жидкостью 14. Перед заполнением исследуемой жидкости воздух из запаянного прибора был удален, так что 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 отсчетного микроскопа 16, настраиваемого последовательно на нижний и верхний уровни столбика ртути манометра. Показания микроскопа снимаются по шкале 17.

1.4 Методика измерений

Теплоту парообразования жидкостей можно измерять 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 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.

При нашей точности опытов величиной V_1 в (1) можно пренебречь.

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

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

Из табличных данных следует, 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 менее 3%. При давлении ниже атмосферного ошибки становятся еще меньше. Таким образом, при давлениях ниже атмосферного уравнение Ван-дер-Ваальса для насыщенного пара мало отличается от уравнения Клапейрона. Положим поэтому

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

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

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

В нашем опыте температура жидкости измеряется термометром, давление пара определяется при помощи манометра, а производные dP/dT или $d(\ln P)/d(1/T)$ 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 $\ln P$.

1.5 Экспериментальная установка

Схема установки изображена на рисунке 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.

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

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

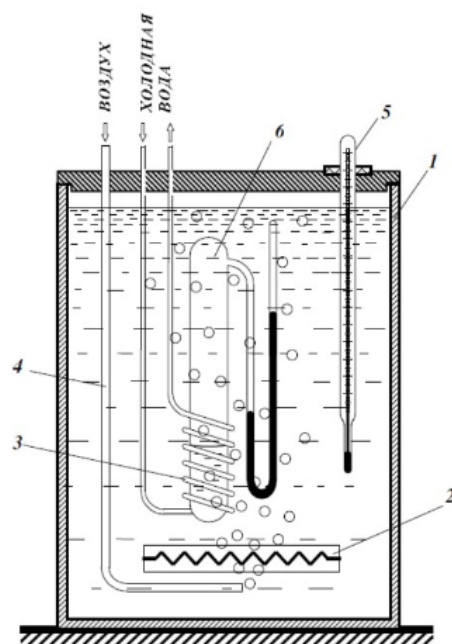


Рис. 1: Схема первой установки

нии, и прибор не может быть 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 ее 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°C в течение 1–3 минут.

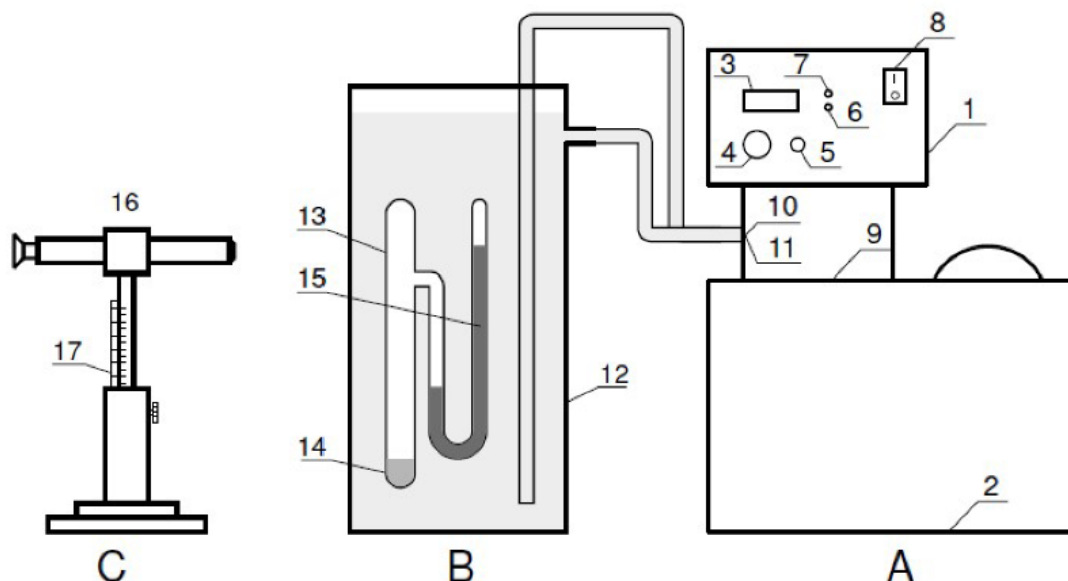


Рис. 2: Схема второй установки

2 Результаты измерений и обработка данных

2.1 Проведение измерений

Для определения теплоты парообразования воды измерим давление насыщенного пара при различных значениях температуры. Давление определяем при помощи ртутного манометра. При помощи штангенциркуля находим высоты h_1 и h_2 ртутных столбиков и по формуле

$$\Delta P = \rho g(h_1 - h_2) \quad (5)$$

находим давление насыщенного пара при определённой температуре. Результаты измерений заносим в таблицу 1.

При оценки погрешности измерения давления по формуле (5) следует использовать следующие соотношения:

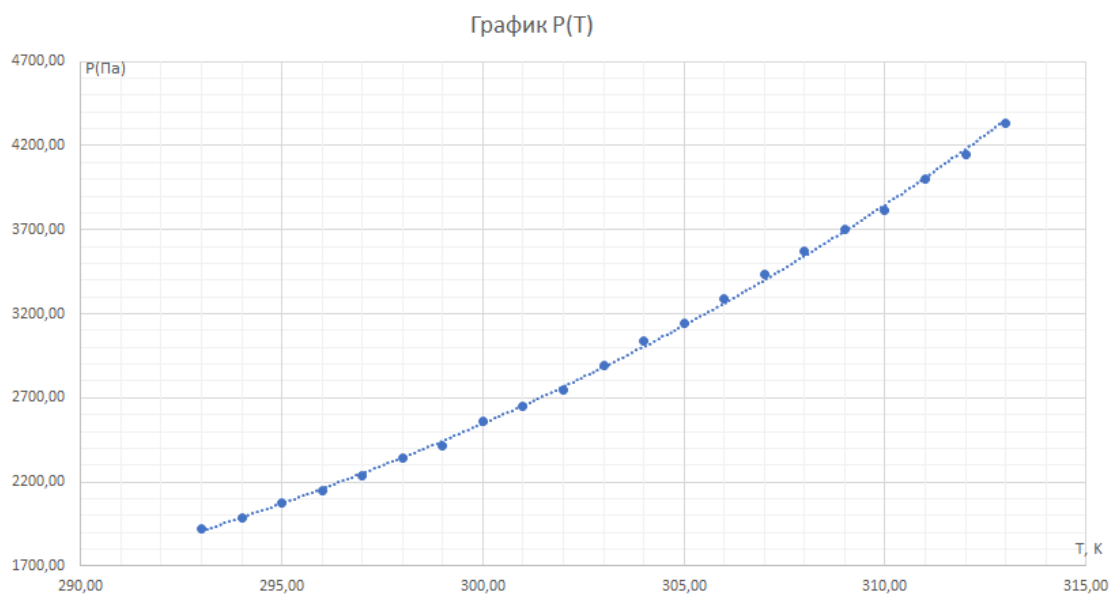
$$\begin{aligned} \sigma_{A \pm B}^2 &= \sigma_A^2 + \sigma_B^2, \\ \varepsilon_{A \cdot B}^2 &= \varepsilon_A^2 + \varepsilon_B^2. \end{aligned}$$

$T, \text{ K}$	$h_1, \text{ мм}$	$h_2, \text{ мм}$	$\Delta P, \text{ Па}$
293	96,30	81,9	1919,2
294	96,80	81,90	1985,9
295	97,50	81,90	2079,2
296	98,00	81,90	2145,8
297	98,70	81,90	2239,1
298	99,50	81,90	2345,7
299	100,20	81,90	2412,4
300	101,30	81,90	2559,0
301	102,00	81,90	2652,3
302	102,70	81,90	2745,6
303	103,80	81,90	2892,2
304	104,90	81,90	3038,8
305	105,70	81,90	3145,4
306	106,80	81,90	3292,0
307	107,90	81,90	3438,6
308	109,20	81,90	3571,9
309	110,50	81,90	3705,2
310	111,30	81,90	3811,8
311	112,50	81,90	3998,4
312	113,60	81,90	4145,0
313	114,50	81,90	4331,6

Таблица 1: Измерение зависимости давления насыщенного пара от температуры жидкости

2.2 Определение теплоты парообразования по графику $P(T)$

По данным из таблицы 1 построим график зависимости давления насыщенного пара от температуры.



Аппроксимируем методом наименьших квадратов полученные на этом участке температур зависимости функциями вида

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

где a и b – неизвестные параметры. Используем следующие формулы:

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

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

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

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

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

Полученные результаты заносим в таблицу 2 и наносим зависимости на график.

$a \cdot 10^{-3}, \text{ Па}$	$\sigma_a \cdot 10^{-3}, \text{ Па}$	$b \cdot 10^{-2}, \text{ K}^{-1}$	$\sigma_b \cdot 10^{-2}, \text{ K}^{-1}$
1.90	0,29	4,68	0,05

Таблица 2: Определение коэффициентов зависимости

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

$$\frac{dP}{dT} = abe^{bT}. \quad (6)$$

Подставляя (6) в (4), получаем:

$$L = \frac{RT^2 ab}{P} e^{bT}. \quad (7)$$

По полученным выше формулам вычисляем теплоту парообразования воды. Погрешность вычисления этой величины можно оценить по следующим формулам:

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

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

Полученные результаты заносим в таблицу 3.

Полученные в этой части работы значения затем сравним со значениями, которые будут получены другим методом в следующей части.

$T, \text{ K}$	$L, \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$	$\sigma_L, \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$
293	30.0	4.7
294	30.6	4.8
295	30.9	4.8
296	31.5	4.9
297	31.8	5.0
298	32.1	5.0
299	32.9	5.1
300	32.7	5.1
301	33.3	5.2
302	33.9	5.3
303	34.0	5.3
304	34.1	5.3
305	34.8	5.4
306	35.0	5.5
307	35.4	5.5
308	35.9	5.6
309	36.5	5.7
310	37.5	5.9
311	37.7	5.9
312	38.3	6.0
313	38.7	6.0

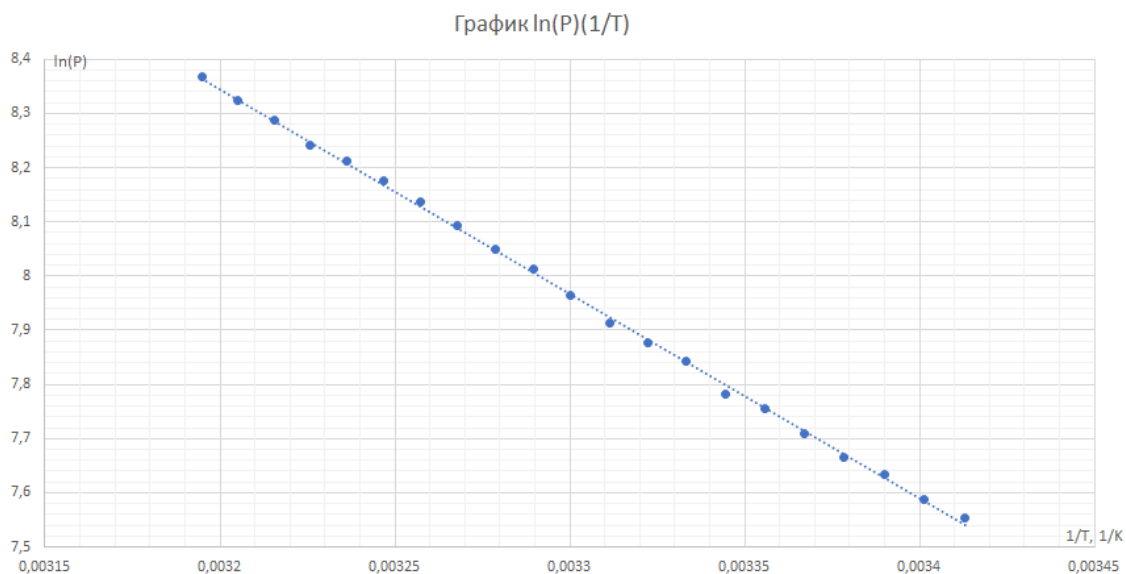
Таблица 3: Результаты вычисления теплоты парообразования

Усредняя все наши значения L , получим, что

$$L = (35.9 \pm 0.5) \frac{\text{кДж}}{\text{моль}},$$

2.3 Определение теплоты парообразования по графику $\ln P$ от $1/T$

Для построения графика преобразуем данные из таблицы 1. Преобразованные результаты измерений занесём в таблицу 4. Полученные значения наносим на график.



$T \cdot 10^{-3}, \text{ K}^{-1}$	$\ln P$
3,411	7.55
3,401	7.59
3,390	7.63
3,378	7.67
3,367	7.71
3,356	7.76
3,344	7.78
3,333	7.84
3,322	7.88
3,311	7.91
3,300	7.96
3,289	8.01
3,279	8.05
3,268	8.09
3,257	8.14
3,247	8.18
3,236	8.21
3,226	8.24
3,215	8.29
3,205	8.32
3,195	8.37

Таблица 4: Зависимость $\ln P$ от $1/T$

С помощью формул, описанных в 2.2, вычислим значение и погрешность определения коэффициента $\frac{d(\ln P)}{d(1/T)}$ с помощью метода наименьших квадратов. Таким образом, получаем

$$\left(\frac{d(\ln P)}{d(1/T)} \right) = (-4410 \pm 48) \text{ K},$$

По формуле (4) вычисляем теплоту парообразования. Получаем:

$$L_+ = (36,7 \pm 0,4) \frac{\text{кДж}}{\text{моль}},$$

Полученные значения будут сравнены с эталонными значениями и со значениями, полученными в предыдущей части работы, в п. 3.

3 Обсуждение результатов и выводы

В ходе выполнения работы:

- была исследована зависимость давления насыщенных паров воды от давления жидкости;
- были вычислены теплоты парообразования воды для различных температур двумя разными способами.

Теплота парообразования, определенная с помощью графика зависимости $P(T)$, пересчитанная в необходимые размерности из ранее полученных значений:

$$L = (2,0 \pm 0,3) \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad (\varepsilon = 15\%),$$

Также теплота парообразования была определена при помощи графика зависимости $\ln P$ от $1/T$. По результатам этих измерений получили:

$$L = (2,04 \pm 0,02) \frac{\text{МДж}}{\text{кг}} \quad (\varepsilon = 1,1\%),$$

Данные, полученные при помощи двух различных методов, вполне совпадают друг с другом.

Сравним полученные данные с табличными. Из табличных данных:

$$L = 2,26 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}.$$

Таким образом, полученные данные достаточно близки с табличными. В пределах погрешности с табличными данными совпадают результаты по точечного измерения теплоты парообразования. В тоже время, у этого метода высокая случайная погрешность вычисления.

При вычислении теплоты парообразования по графику зависимости $\ln P$ от $1/T$ мы получаем среднее значение для всего исследуемого отрезка температур. Из-за этого у данного метода небольшая погрешность, т.к. происходит усреднение по множеству точек.