

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

Отчет по лабораторной работе 2.4.1
Определение теплоты испарения жидкости.

Выполнил студент:
Сериков Василий Романович
группа: Б03-102

Москва, 2022 г.

Аннотация

Цель работы:

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

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 объем жидкости меньше объема 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 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).

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 – 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 $\ln P$.

Экспериментальная установка

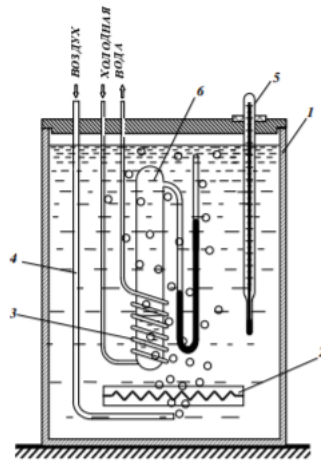


Рис. 1: Схема установки для определения теплоты испарения.

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

Экспериментальный прибор В представляет собой емкость 12, заполненную водой. В нее погружен запаянный прибор 13 с исследуемой жидкостью 14. Перед заполнением исследуемой жидкостью 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.

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 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 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 1–3 минут.

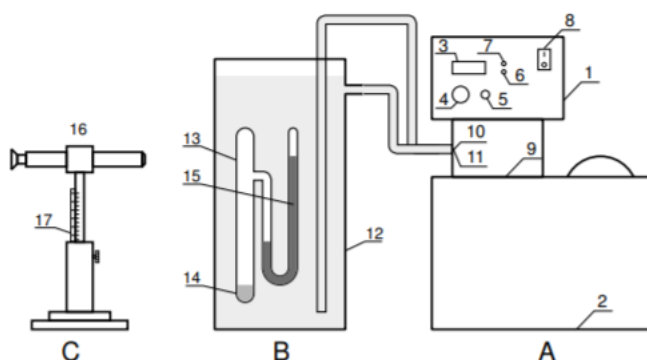


Рис. 2: Схема установки для определения теплоты испарения.

В работе используются:

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

Результаты измерений и обработка данных:

1. Измерим разность уровней Δh в ртутном U -образном манометре с помощью микроскопа и температуру по индикаторному табло. Полученные результаты занесем в таблицу ($\Delta P = \rho_{\text{ртуть}} g \Delta h$).

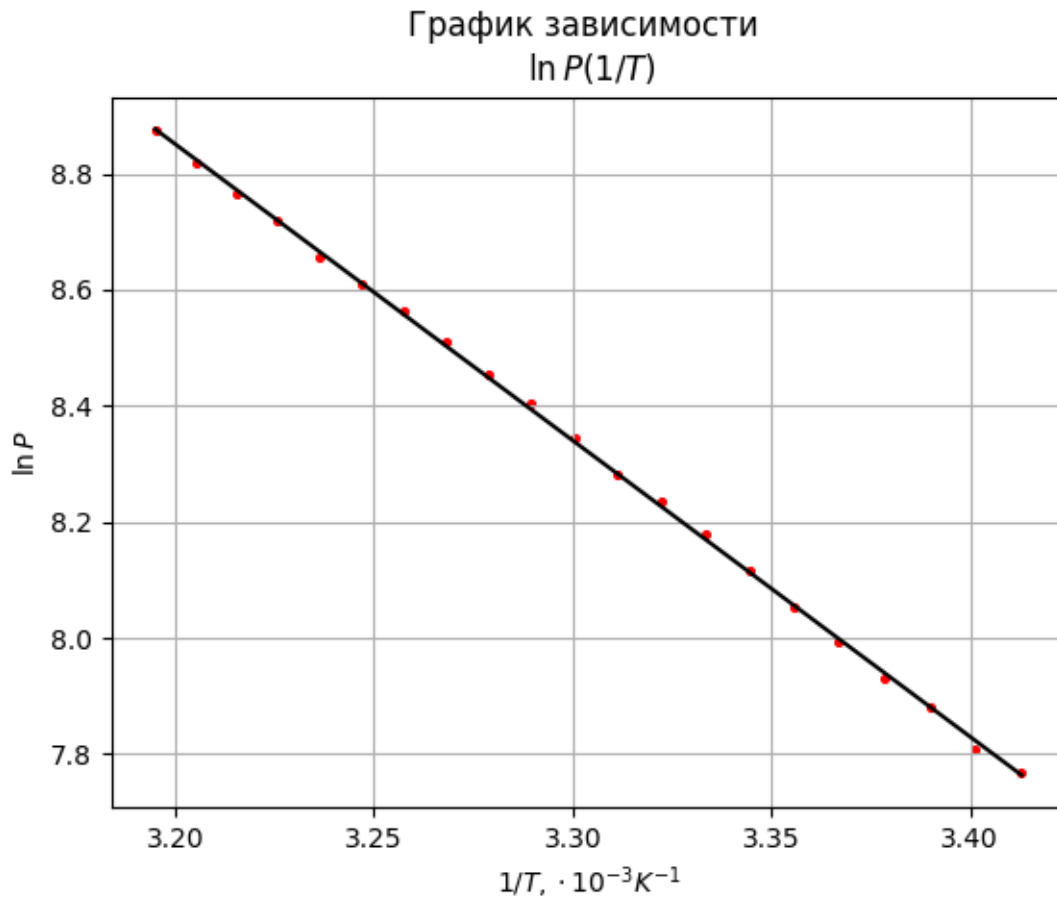
Т, $^{\circ}\text{C}$	Δh , мм	ΔP , Па
20	17,4	2365
21	18,1	2461
22	19,45	2644
23	20,45	2780
24	21,8	2964
25	23,1	3141
26	24,65	3351
27	26,25	3569
28	27,75	3773

29	29,1	3956
30	30,9	4201
31	32,85	4466
32	34,5	4691
33	36,5	4963
34	38,5	5235
35	40,4	5493
36	42,25	5744
37	45	6118
38	47,15	6410
39	49,7	6757
40	52,5	7138

Таблица 1: Полученные данные

2. Построим графики в координатах T, P и в координатах $1/T, \ln P$





3. Вычислим L , пользуясь данными полученными из графика $T(P)$.

Аппроксимируем по МНК функцией вида:

$$P = \alpha \exp^{\beta T} \Rightarrow \ln P = \beta T + \ln \alpha$$

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

$$\ln \alpha = \langle \ln P \rangle - \beta \langle T \rangle.$$

Получим:

$$\alpha = 1,4 \pm 0,2 \cdot 10^{-4} \text{ Па},$$

$$\beta = 5,6 \pm 0,1 \cdot 10^{-2} \text{ K}^{-1}$$

4. По полученным коэффициентам вычислим теплоту парообразования воды:

$$\frac{dP}{dT} = \alpha \beta e^{\beta T}.$$

Подставляя, получаем:

$$L = \frac{RT^2 \alpha \beta}{P} e^{\beta T}.$$

5. По полученной формуле подсчитаем L для каждой температуры, полученные данные занесем в таблицу. ($\varepsilon_L \approx 13\%$)

Т, К	293	294	295	296	297	298	299	300	301	302	303
L, Дж/г	2237	2291	2272	2302	2301	2314	2310	2311	2329	2366	2374

Т, К	304	305	306	307	308	309	310	311	312	313
L, Дж/г	2379	2413	2429	2453	2490	2537	2537	2579	2606	2627

Таблица 3: Полученная теплота парообразования

6. Теперь получим теплоту парообразования из 2-го графика. Коэффициент наклона прямой - искомая производная:

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

где $k = -5104 \pm 223 \text{ К}$ - найдено по МНК.

7. Получим $L = 2356 \pm 103 \text{ Дж/г}$

Обсуждение результатов:

В ходе данной работы мы изучали явление парообразования воды и получали зависимость давления насыщенного пара от температуры. Обработав полученные данные двумя способами, мы получили следующие теплоты парообразования воды: $\bar{L}_1 = 2432 \pm 316 \text{ Дж/г}$ - получено по графику $P(T)$, $L_2 = 2356 \pm 103 \text{ Дж/г}$ - получено по графику $\ln P(1/T)$. Можно заметить, что второй результат более точный и ближе находится к табличному значению ($L_{\text{табл}} = 2259 \text{ Дж/г}$)

Выводы:

В данной работе мы определили теплоту парообразования воды и, обрабатывая данные двумя способами, полученное значение совпадет с табличным в пределах погрешности.