

Лабораторная работа 2.4.1

Определение теплоты испарения жидкости

Рашковецкий М.М., группа 526т

29 марта 2016 г.

Цель работы: измерение давления насыщенного пара жидкости при разной температуре; вычисление по полученным данным теплоты испарения жидкости по уравнению Клапейрона — Клаузиуса.

Оборудование и материалы: термостат; герметичный сосуд с исследуемой жидкостью; отсчётный микроскоп.

Краткая теория

Непосредственное измерение теплоты парообразования очень неточно из-за неконтролируемых потерь тепла. Поэтому в работе используется косвенный метод, основанный на уравнении Клапейрона — Клаузиуса:

$$\frac{dP}{dT} = \frac{L}{T(v_{\text{п}} - v_{\text{ж}})}, \quad (1)$$

где P — давление насыщенного пара, T — температура, L — удельная или молярная теплота парообразования, $v_{\text{п}}$ и $v_{\text{ж}}$ — удельные или молярные объёмы пара и жидкости соответственно.

У большинства веществ $v_{\text{п}}$ на несколько порядков превышает $v_{\text{ж}}$, поэтому последним можно пренебречь, тогда первое обозначают просто v .

Запишем для насыщенного пара уравнение Ван-дер-Ваальса:

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

Обратимся к реальным параметрам для воды: при $P = 1 \text{ атм}$ $T_{\text{к}} = 373 \text{ К}$, $v_{\text{ж}} = 18 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^3}{\text{моль}}$, $v_{\text{п}} = 31 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{моль}}$, $b = 26 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^3}{\text{моль}}$, $a = 0,4 \frac{\text{Па} \cdot \text{м}^6}{\text{моль}^2}$. Видно, что $v_{\text{п}} \gg v_{\text{ж}}$ и пренебрежение последним даёт ошибку около 10^{-3} . Поправку на неидеальность, связанную с параметром a , можно оценить как

$$\frac{a}{Pv_{\text{п}}^2} \approx 10^{-4},$$

поправку, связанную с b — как

$$\frac{b}{v_{\text{п}}} \approx 10^{-3}.$$

При понижении температуры молярный объём возрастает, поэтому эти поправки становятся ещё меньше при приближении к комнатной температуре. Значит, с хорошей точностью можно считать газ идеальным, тогда просто

$$V = \frac{RT}{P}$$

и можно переписать (1) как

$$L = \frac{RT^2}{P} \frac{dP}{dT} \quad (3)$$

или

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

Таким образом, если построить график в координатах $(1/T, \ln P)$ и аппроксимировать линейной функцией, то по угловому коэффициенту прямой легко найти удельную теплоту парообразования.

Установка

Рис. 1: Схема установки

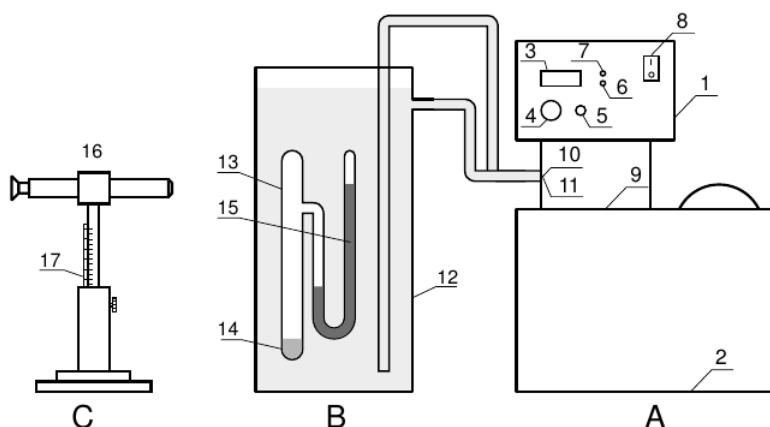


Схема установки приведена на рис. 1. На ней показаны:

- 12. резервуар с водой;
- 13. запаянный прибор;
- 14. исследуемая жидкость;
- 15. ртутный манометр;
- 16. отсчётный микроскоп;
- 17. шкала штангенциркуля для снятия показаний.

Из запаянного прибора перед погружением был удалён воздух, так что в нём находится только жидкость и её насыщенный пар. Давление снимается по разности показаний отсчётного микроскопа, настраиваемого последовательно на нижний и верхний уровни столбика ртути манометра.

Преимущество выбранного метода над прямым в том, что при непосредственном измерении требуется постоянное давление и прибор не может быть запаян, из-за чего нельзя достигнуть высокой точности.

Важный недостаток установки в том, что термометр измеряет температуру термостата, а не исследуемой жидкости, поэтому нагревание должно идти достаточно медленно. Для того, чтобы проверить это, проводятся измерения при нагревании и при охлаждении жидкости в термостате.

Ход работы

1. Мы измерили начальную температуру ($t_0 = 24^\circ\text{C}$) и разность уровней в манометре ($h_0 = 2,05\text{ см}$).
2. Включили термостат и стали постепенно нагревать воду до $t_1 = 50^\circ\text{C}$.
3. Через каждый градус записывали разность уровней в манометре.
4. Пустили холодную воду, охлаждая термостат до начальной температуры.
5. Через каждый градус записывали разность уровней в манометре.

Обработка результатов

Результаты эксперимента приведены в таблице 1.

Поскольку давление, измеряемое манометром $P = \rho gh$, то

$$\ln \frac{P}{P_0} = \ln \frac{h}{h_0}.$$

По снятым точкам для нагревания и охлаждения исследуемой жидкости я получил нужные логарифмы и оценил их погрешность как

$$\sigma_{\ln(h/h_0)} = \frac{\sigma_h}{h},$$

где σ_h было оценено как одно деление на шкале отсчётного микроскопа (две половины, потому что отсчёт ведётся два раза), отдельно было измерено 50 дел $\approx 1,41\text{ см}$.

Экспериментальные точки для нагревания и охлаждения жидкости отдельно были аппроксимированы линейной функцией по методу наименьших квадратов с различными весами точек (по погрешностям) и нанесены на график (рис. 2) вместе с линеаризациями.

Как мы видим, большинство точек при охлаждении находятся чуть выше, чем при нагревании, что свидетельствует о том, что температура менялась несколько быстрее, чем следовало, из-за чего при нагревании реальная температура газа была чуть ниже, чем измеренная, а при охлаждении — наоборот (как можно увидеть из графика или из таблицы, точки почти совпадают, только смещены на $\approx 1^\circ\text{C}$).

Таблица 1: Результаты

$t, ^\circ\text{C}$	$h_{\text{н}}, \text{см}$	$h_{\text{о}}, \text{см}$
25	2.1	2.04
26	2.19	2.21
27	2.27	2.38
28	2.41	2.55
29	2.55	2.67
30	2.72	2.83
31	2.83	3.0
32	3.0	3.23
33	3.2	3.4
34	3.4	3.57
35	3.6	3.74
36	3.82	4.02
37	4.08	4.3
38	4.3	4.58
39	4.53	4.75
40	4.81	4.98
41	5.03	5.26
42	5.32	5.54
43	5.65	5.88
44	5.94	6.22
45	6.22	6.56
46	6.56	6.84
47	6.84	7.29
48	7.29	7.63
49	7.69	7.97
50	8.02	8.25

Из угловых коэффициентов прямых по (4) были вычислены молярные теплоты парообразования для кривых нагревания и охлаждения:

$$L_{\text{н}} = (44,1 \pm 0,2) \frac{\text{кДж}}{\text{моль}},$$

$$L_{\text{о}} = (43,8 \pm 0,3) \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}.$$

Эти результаты практически сходятся в пределах погрешности.

Вообще говоря, теплота парообразования зависит от температуры, хоть и не очень сильно. В справочнике (Енохович А.С. Краткий справочник по физике. М., «Высш. школа», 1976) приведена удельная теплота парообразования воды при температуре $t_1 = 50^\circ\text{C}$ $\lambda_1 = 2,38 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$, а при $t_2 = 20^\circ\text{C}$ — $\lambda_2 = 2,45 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$. В пересчёте на моль это соответственно $L_1 = 42,8 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$ и $L_2 = 44,1 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$. Наши экспериментальные результаты попадают в этот диапазон, что тоже свидетельствует об их адекватности.

Рис. 2: График

