

Лабораторная работа №2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОТЫ ПАРООБРАЗОВАНИЯ ВОДЫ

Цель работы – определение удельной и молярной теплоты парообразования воды при фазовом переходе первого рода по экспериментально полученной зависимости давления насыщенных паров от температуры.

Теория метода.

Фазой называется однородная часть вещества, имеющая границу с другими частями системы, в которой она находится, и которая может быть отделена от этой системы. Переход вещества из одного фазового состояния в другое называется фазовым переходом. Фазовый переход первого рода всегда сопровождается поглощением или выделением скрытой теплоты Q и изменением удельного

объема $v = \frac{V}{m}$ и молярного объема вещества $\mu v = \frac{V}{\nu}$, где ν – число молей,

$\nu = \frac{m}{\mu}$; m – масса; μ – молекулярная масса вещества.

Поскольку количество скрытой теплоты зависит от массы вещества, преобладающей фазовой переход, для характеристики процесса используется удельная теплота перехода q , отнесенная к единице массы вещества:

$$q = \frac{Q}{m}, \quad (10.1)$$

и молярная теплота перехода μq , отнесенная к одному молю вещества:

$$\mu q = \frac{Q}{\nu}. \quad (10.2)$$

При постоянном давлении фазовый переход всегда происходит при определенной температуре, называемой температурой перехода, при которой возможно термодинамическое равновесие фаз при данном давлении. Для рассмотрения фазового перехода «жидкость-пар» обратимся к изотермам, построенным для нескольких значений температуры (T_1, T_2) на P - V диаграмме (рис. 10.1). Горизонтальные участки изотерм отвечают областям фазового перехода. В процессе перехода молярный объем скачкообразно изменяется от величины μv_1 , что соответствует молярному объему жидкой фазы, до величины μv_2 , что соответствует молярному объему газообразной фазы. Интервал μv_1 - μv_2 представляет собой область двухфазного состояния (жидкость-пар) вещества. Среди всех возможных температур есть одна, называемая критической температурой $T_{кр}$, при которой горизонтальный участок изотермы, что отвечает фазовому переходу, вырождается в точку перегиба. При температуре вещества, больше критической,

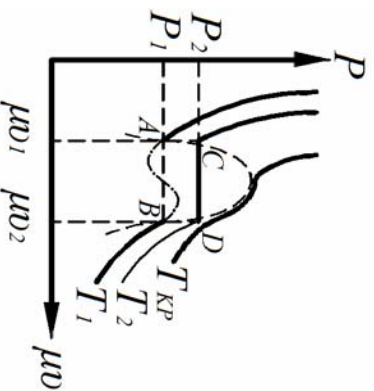


Рисунок 10.1 Изотермы Ван-дер-Ваальса и реального вещества

исчезает разницы между паром и жидкостью, а вещество ни при каком давлении невозможно перевести из газообразного в жидкое состояние. За областью фазового перехода состояние реального вещества в жидкой и газообразной фазах достаточно точно описывается уравнение Ван-дер-Ваальса, которое для одного моля газа имеет вид

$$\left(p + \frac{a}{V^2} \right) \cdot (V - b) = RT,$$

где параметры a и b введены для учета потенциального взаимодействия между молекулами и собственного объема молекул газа. Изотерма, описываемая уравнением Ван-дер-Ваальса на P - V диаграмме для температуры T_1 , изображена на рис. 10.1 штрихпунктирной линией.

Для вычисления изменения давления насыщенного пара в зависимости от температуры проведем для одного моля вещества цикл Карно, в который входят горизонтальные участки изотерм реального вещества AB и CD (рис. 10.1). Пусть $P_1 = P$, $P_2 = P + dP$, $T_1 = T$, $T_2 = T + dT$. Выполненная за цикл работа δA равна площади этого цикла на P - V диаграмме, а сам цикл, учитывая близость изотерм его образующих, можно приближенно считать параллелограммом.

Тогда

$$\delta A = (\mu v_2 - \mu v_1) \cdot dP.$$

В ходе изотермического фазового перехода (участок AB) вещество получает от нагревателя количество теплоты, равное молярной теплоте перехода μq . Поэтому КПД цикла можно записать в виде

$$\eta = \frac{(\mu v_2 - \mu v_1) \cdot dP}{\mu q} = \frac{(v_2 - v_1) \cdot dp}{q} \quad (10.3)$$

Поскольку рассматривается цикл Карно, КПД этого цикла можно также записать, используя теорему Карно:

$$\eta = \frac{T_2 - T_1}{T_2} = \frac{dT}{T}. \quad (10.4)$$

Приравняв выражения (10.3) и (10.4), получим

$$\frac{dP}{dT} = \frac{q}{T \cdot (v_2 - v_1)}. \quad (10.5)$$

Соотношение (10.5) называется уравнением Клапейрона-Клаузиуса. Его можно использовать для определения теплоты парообразования жидкости. Учитывая, что при температурах, далеких от критической, $v_2 \gg v_1$, получаем

$$\frac{dP}{dT} = \frac{q}{T \cdot v^2}. \quad (10.6)$$

На участках невысоких давлений к пару можно применить законы идеального газа, и тогда удельный объем v_2 можно определить из уравнения Клапейрона-Менделеева:

$$v_2 = \frac{R \cdot T}{\mu \cdot P} \quad (10.7)$$

Подставляя значение v_2 из формулы (10.7) в соотношение (10.6), получим

$$\frac{dP}{P} = \frac{\mu \cdot q}{R} \cdot \frac{dt}{T^2} \quad (10.8)$$

Считая величину q постоянной для исследуемого интервала изменения температуры, проинтегрируем уравнение (10.8):

$$\ln P = -\frac{\mu \cdot q}{R \cdot T} + const. \quad (10.9)$$

Полученная формула устанавливает связь между молярной теплотой парообразования воды, давлением и температурой водяного пара. Изменяя температуру пара T , необходимо построить график зависимости $\ln P = f\left(\frac{1}{T}\right)$, по углу наклому коэффициенту которого $K_a = \frac{\mu \cdot q}{R}$ можно определить молярную теплоту парообразования воды.

Экспериментальная установка

Для определения теплоты парообразования воды предназначена экспериментальная установка ФПТГ-10, общий вид которой показан на рис. 10.2.

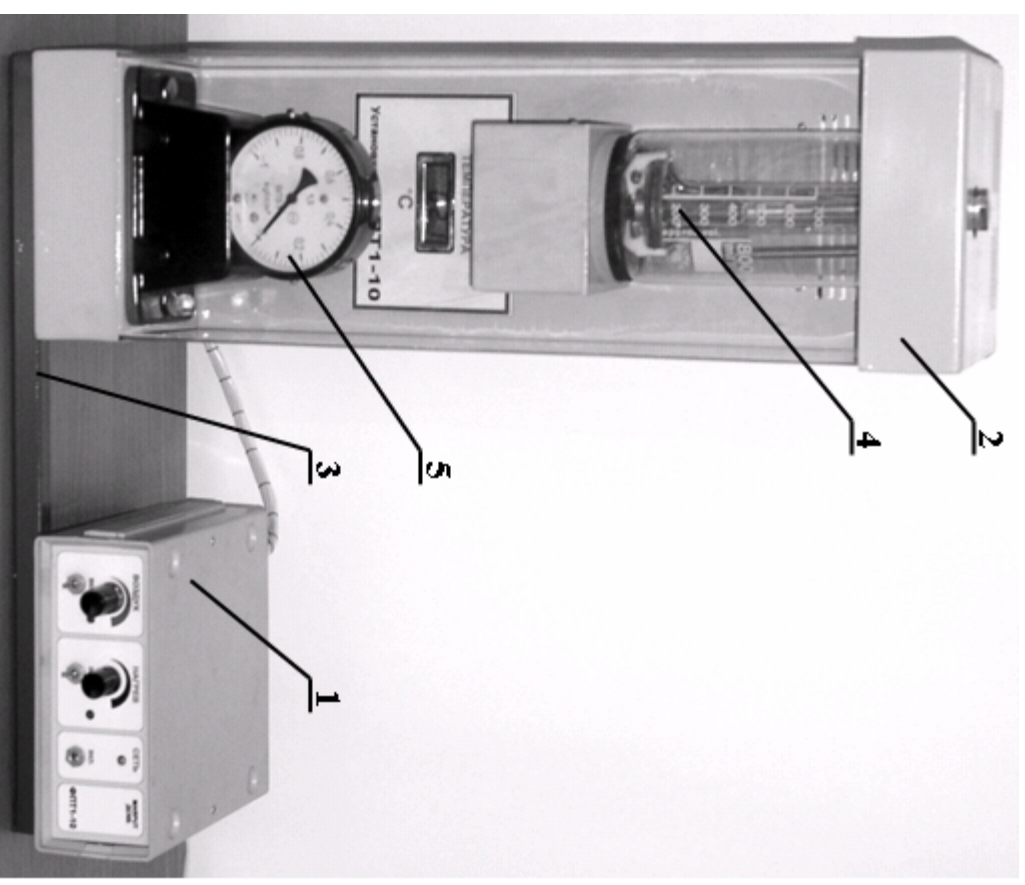


Рисунок 10.2 Общий вид экспериментальной установки ФПТГ-10:
1 – блок приборое; 2 – блок рабочего элемента; 3 – стойка;
4 – термометр; 5 – вакуумметр

Рабочий элемент установки представляет собой стеклянную ампулу с исследуемым веществом (в данной работе исследуется вода), из которой отсасан воздух до давления минус 55 ... минус 69 кПа (минус 0,6 ... минус 0,7 кг/см²), размещенную в термостате 4. Ампула соединена с вакуумметром 5, показания которого P соответствуют разности между атмосферным давлением в лаборатории P_0 и давлением водяного пара в ампуле P_n , следовательно:

$$P_n = P_0 - P$$

Температура пара измеряется цифровым термометром, датчик которого находится в термостате, и регистрируется на цифровом индикаторе «Температу-

ра» блока рабочего элемента 2. Для нагрева ампулы с исследуемой жидкостью в термостате, заполненном водой, находится нагревательный элемент, выполненный из нихромовой спирали, помещенной в трубку из кварцевого стекла.

Для получения достаточной точности эксперимента нагревание воды в термостате должно считаться равной температуре воды в термостате. Необходимая мощность нагревателя устанавливается регулятором «Нагрев», который находится на передней панели блока приборов 1.

В блоке рабочего элемента находится микрокомпрессор, с помощью которого в термостат можно подавать сжатый воздух. Микрокомпрессор обеспечивает равномерное нагревание воды в термостате. Интенсивность подачи сжатого воздуха устанавливается регулятором «Воздух», который находится на передней панели блока приборов.

Порядок выполнения работ.

1. Убедиться в том, что уровень воды в термостате не менее чем на 2 см выше верхнего края ампулы, после чего включить установку тумблером «Сеть».
2. Включить тумблер подачи воздуха и регулятором «Воздух» установить такую интенсивность подачи сжатого воздуха в термостат, при которой обеспечивается перекипывание воды без ее сильного бурления.
3. Включить тумблер «Нагрев», регулятор мощности «Нагрев» установить в крайнее правое положение.
4. После нагревания воды до температуры $65 \text{ }^{\circ}\text{C}$ уменьшить мощность нагревателя, вращая регулятор мощности «Нагрев» влево.
5. В диапазоне температур термостата ($68 \dots 98$) $^{\circ}\text{C}$ снимать показания вакуумметра через каждые $2 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Перевести показания N вакуумметра в единицы давления $P = aN$, где a – цена деления шкалы вакуумметра; $a = 400 \text{ Па/дел}$. Регулятор мощности «Нагрев» вывести в крайнее левое положение, выключить тумблер «Нагрев». Результаты измерений занести в таблицу 10.1.

Таблица 10.1

№ изм.	$t, \text{ }^{\circ}\text{C}$	$T, \text{ К}$	$1/T, \text{ К}^{-1}$	$P, \text{ Па}$	$P_{II}, \text{ Па}$	$\ln P_{II}$	$\mu q, \text{ Дж/моль}$	$q, \text{ Дж/К}^2$

6. Выключить подачу сжатого воздуха тумблером «Воздух».
7. Выключить установку тумблером «Сеть».

Обработка результатов измерений.

1. По формуле (10.10) вычислить давление водяного пара в ампуле.
2. Построить график зависимости давления пара в ампуле от температуры пара $P_{II} = f(T)$, которая соответствует фазовому переходу жидкостью и паром.

3. Вычислить значения $\frac{1}{T}$ и $\ln P_{II}$ и построить график зависимости

$$\ln P_{II} = f\left(\frac{1}{T}\right).$$

Определить угловой коэффициент K_a графика.

4. Используя найденный угловой коэффициент K_a , определить молярную теплоту парообразования воды μq по формуле $\mu q = K_a \cdot R$.
5. Вычислить удельную теплоту парообразования воды q , учитывая, что молярная масса воды $\mu = 18 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$.
6. Оценить ошибки результатов измерения.

Контрольные задания.

1. Что такое фазовый переход? Назовите виды фазовых переходов.
2. Кака величина называется скрытой теплотой перехода?
3. Запишите и объясните уравнение Ван-дер-Ваальса.
4. Изобразите на P - V диаграмме изотермы Ван-дер-Ваальса и реального вещества для нескольких значений температуры. Что такое критическая температура?
5. Расскажите о цикле Карно. Запишите формулу КПД цикла Карно.
6. Выведите уравнение Клапейрона-Клаузиуса. Поясните физический смысл этого уравнения.
7. Выведите основную расчетную формулу, используемую в данной работе.
8. В чем заключается метод определения теплоты парообразования воды с использованием экспериментальной зависимости $P_{II}(T)$?
9. Для чего ампулу с исследуемым веществом помещают в термостат?
10. Какие основные источники ошибок данного метода измерений?