

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5.11

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЛЯРНОЙ ТЕПЛОТЫ ИСПАРЕНИЯ ВОДЫ ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ КИПЕНИЯ

Цель работы: экспериментальное определение молярной теплоты испарения воды при атмосферном давлении и температуре кипения и расчет постоянной Ван-дер-Ваальса.

Литература: [4] гл. 7 §§ 7.4–7.5, 7.9, 7.10; [7] гл. 6; [11] гл. VIII §§ 97, 98, 100–103.

Приборы и принадлежности: прибор для определения молярной теплоты испарения, ампервольтваттметр переменного тока, стабилизатор напряжения, мензурки или аналитические весы, секундомер, стакан, стакан малой емкости.

ВВЕДЕНИЕ

Для испарения жидкости требуются затраты тепла. Чтобы испарение жидкости происходило изотермически, к единице массы жидкости необходимо подводить определенное количество энергии, которое называется удельной теплотой испарения λ . При испарении одного моля жидкости говорят о молярной теплоте испарения λ_m . В соответствии с первым началом термодинамики, подводимое тепло dQ идет на изменение внутренней энергии системы dU и совершение работы pdV по расширению массы жидкости при ее испарении:

$$dQ = dU + pdV . \quad (1)$$

Внутренняя энергия реального газа зависит не только от температуры, но и от объема. Согласно модели Ван-дер-Ваальса, потенциальная энергия моля газа или жидкости обратно пропорционально занимаемому объему V :

$$E_n = -\frac{a}{V},$$

где a – постоянная Ван–дер–Ваальса, зависящая от рода вещества, а также от температуры.

Таким образом, для испарения одного моля жидкости при постоянной температуре требуется затратить энергию

$$\lambda_M = a \left(\frac{1}{V_{ж}} - \frac{1}{V_n} \right) + P (V_n - V_{ж}), \quad (2)$$

где $V_{ж}$ – молярный объем жидкости, V_n – молярный объем пара. Учитывая,

что $V_{ж} = \frac{M}{\rho_{ж}}$ (M – молярная масса, $\rho_{ж}$ – плотность жидкости), $V_n = \frac{RT}{p}$ (пар

можно считать идеальным газом) и что $V_{ж} \ll V_n$ (вдали от критической температуры), молярную теплоту испарения можно приближенно рассчитать по формуле, следующей из формулы (2):

$$\lambda_M \approx \frac{a\rho_{ж}}{M} + RT. \quad (3)$$

В данной работе предлагается измерить значение λ_M для воды при температуре кипения и атмосферном давлении (сведения о процессах, происходящих в жидкостях при кипении, приведены в описании работы 5.12 в книге «Лабораторный практикум по общей и экспериментальной физике», а также в приложении к данному описанию).

Теплота передается воде от электрического нагревателя, по которому протекает переменный ток. Проходя через нагреватель, электрический ток совершает за время τ работу P_1 , где P_1 – мощность нагревателя.

При стационарном режиме, когда температура жидкости равна температуре кипения, вся работа тока идет на превращение воды в пар и на нагревание окружающей среды (тепловые потери), т.е.

$$P_1 \tau = \lambda_M \nu_1 + q, \quad (4)$$

где ν_1 – число молей воды, испарившейся за время τ , q – тепловые потери за это же время. Аналогичное уравнение можно записать для другого

стационарного режима, характеризующегося другим значением мощности P_2 нагревателя. Если время испарения такое же, как и в первом случае, то и тепловые потери одинаковы, поэтому

$$P_2 \tau = \lambda_M v_2 + q . \quad (5)$$

Сравнивая (5) и (4), получим выражение для расчета молярной теплоты испарения:

$$\lambda_M = \frac{\tau(P_1 - P_2)}{v_1 - v_2} . \quad (6)$$



ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Схема прибора для определения молярной теплоты испарения воды и схема включения нагревателя изображены на рисунке 5.11.1.

Сосуд 1 с водой плотно закрывается крышкой 2. Через крышку проходят выводы нагревателя 3, а также трубка 4, отводящая пар в конденсор 5. Через конденсор пропускают холодную воду. Образующийся при кипении воды пар, проходя через конденсор, превращается в воду, которая собирается в стакан 6. Подаваемая на нагреватель мощность регулируется поворотом ручки стабилизатора напряжения и измеряется ваттметром.

Измерительные приборы (ампервольтваттметр, секундомер, аналитические весы или мензурка) позволяют найти значения всех величин, необходимых для экспериментального определения λ_M .

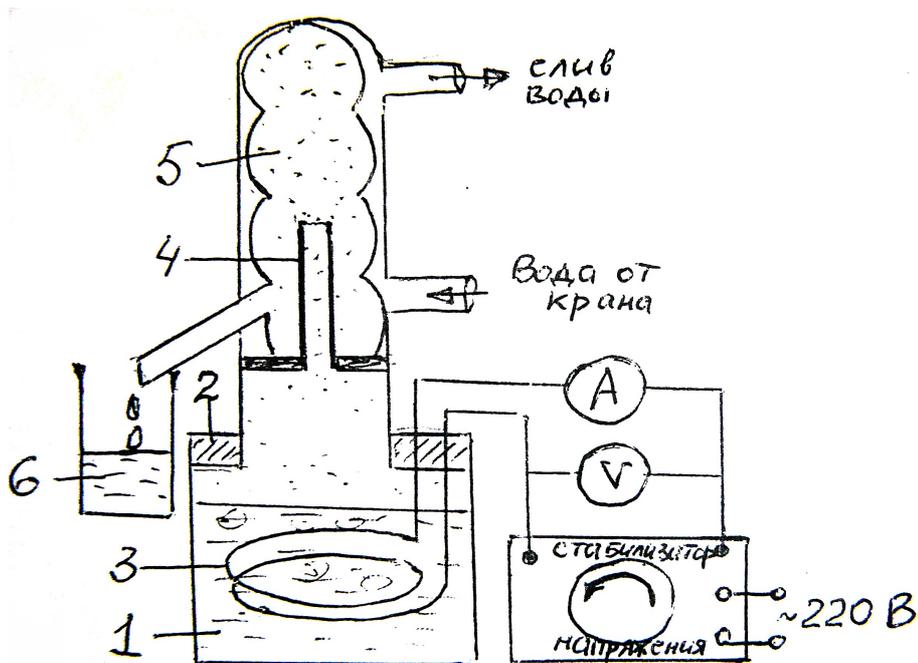


Рис. 5.11.1

ИЗМЕРЕНИЯ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Подготовка установки к работе.



Проверьте, что вода в сосуде 1 налита до такого уровня, чтобы закрыть нагреватель 3. Откройте центральный красный кран, соединяющий систему с водопроводом. Плавно открывая синий кран, пустите в конденсор холодную воду.

Проверьте готовность ампервольтваттметра к работе. Для измерения мощности переключатель Π_2 (см. фото слева) должен стоять в положении “W”. Предел напряжения установлен “300 V”. Переключатель Π_1 пределов по току установите в положение “2,5 A”. При этом предельная мощность, измеряемая прибором,

будет равна $300\text{В} \cdot 2,5\text{А} = 750\text{Вт}$. Отсчет мощности производится по верхней

шкале “W” (фото внизу). Рассчитайте цену деления шкалы на выбранном пределе.



Замкните электрическую цепь (с разрешения преподавателя или лаборанта) и установите с помощью стабилизатора напряжение 500 Вт в цепи нагревателя. К измерениям приступайте по истечении 5-7 минут после закипания воды в сосуде - за это время прибор прогреется настолько, что процессы, происходящие в нем, можно считать стационарными.

Задание 1. Проведение измерений и расчет молярной теплоты испарения воды.

Конденсированную воду собирайте в стакан б в течение времени $\tau = 80$ с. Время τ сбора конденсата измеряйте секундомером. ***Оно должно быть одним и тем же во всех измерениях!***

Закончив сбор конденсата, установите другое значение мощности (400 Вт), чтобы установка готовилась к следующему измерению. Пока происходит установление нового стационарного режима (в течение 5-7 мин.), измерьте массу m собранной в стакан б воды с помощью мензурки или аналитических весов (объем мензуркой измеряется с точностью до 0,2 мл; взвешивание производится с точностью до 100 мг). Рассчитайте число молей ν испарившейся воды.

Такие измерения проведите при четырех разных значениях мощности (500, 400, 300, 200 Вт), но в течение одного и того же времени $\tau = 80$ с.

Результаты опытов представьте в виде таблицы.

№	P , Вт	m , мг	v , моль	
1	500			$\tau = 80 \text{ с}$
2	400			
3	300			
4	200			

Рассчитайте λ_M по формуле (6) и оцените погрешность результата.

Рассчитайте удельную теплоту испарения воды $\lambda = \frac{\lambda_M}{M}$ и сравните полученное значение с табличным ($\lambda = 2,25 \cdot 10^6$ Дж/кг).

Задание 2 . Расчет постоянной Ван–дер–Ваальса a .

С помощью формулы (3) найдите значение постоянной Ван–дер–Ваальса a для моля воды и сравните полученное значение с табличным ($a = 5,52$ атм·л²/моль – для сравнения переведите это значение в СИ).

ВОПРОСЫ И УПРАЖНЕНИЯ

1. Почему при кипении при постоянном давлении температура жидкости не изменяется?
2. Как объяснить с точки зрения молекулярно-кинетической теории убывание молярной теплоты испарения при возрастании температуры? Чему равна теплота испарения воды при критической температуре?
3. С помощью формулы (3) определите, какая часть теплоты испарения при 100°C идет на увеличение внутренней энергии, а какая – на совершение внешней работы.
4. Запишите уравнение Ван–дер–Ваальса и поясните смысл входящих в него поправок. Изобразите в координатах (p, V) изотермы Ван–дер–Ваальса и экспериментальные изотермы реального газа.
5. Что такое критическое состояние вещества? Как рассчитываются критические параметры в модели Ван–дер–Ваальса?

6. Изобразите диаграмму фазового равновесия H_2O в координатах (p, T) . Укажите на ней области, соответствующие твердому, жидкому и газообразному состояниям.

7. Получите теоретическую зависимость $p(T)$ для давления насыщенных паров, считая пар идеальным газом.

8. С помощью уравнения Клапейрона–Клаузиуса рассчитайте, при каком внешнем давлении температура кипения воды будет равна 95°C ? 105°C ?

9. Что такое перегретая жидкость? Пересыщенный пар? Как можно получить такие состояния вещества?

ПРИЛОЖЕНИЕ О КИПЕНИИ ЖИДКОСТИ

Известно, что испарение жидкости может происходить при любой температуре. Наличие атмосферы, однако, существенно влияет на картину процесса. Испарение выглядит совершенно различным образом, в зависимости от того, будет ли давление насыщенного пара p_n при данной температуре меньше или больше внешнего атмосферного давления p .

Если $p_n < p$, происходит сравнительно медленное испарение с поверхности. Если же p_n достигает (или несколько превосходит) давления окружающей атмосферы, возникает **кипение** жидкости. При этом парообразование происходит во всем объеме жидкости. Центрами образования пара являются мельчайшие пузырьки посторонних газов, обычно существующие на стенках сосуда (или на взвешенных в жидкости пылинках). Жидкость испаряется внутрь газового пузырька, поэтому пузырек оказывается наполненным не только газом, но и насыщенным паром.

При увеличении температуры до некоторого значения объем пузырька становится таким, что Архимедова сила заставляет пузырек всплывать, оставляя на стенке зародыш нового пузырька. Остаточный пузырек не

находится в равновесии, так как внутреннее давление в нем превышает внешнее, поэтому он быстро раздувается и вновь всплывает. Жидкость закипает. Если жидкость кипит при постоянном внешнем давлении, то ее температура остается неизменной в течение всего процесса кипения.

Кипения жидкости можно добиться как путем нагревания жидкости при неизменном давлении, так и путем изменения внешнего давления при неизменной температуре (например, при откачивании воздуха насосом вода может закипеть при комнатной температуре).

При каждом заданном давлении **кипение воды будет происходить при той температуре, при которой давление ее насыщенного пара равно данному внешнему давлению.** Отсюда следует, что график $P(T)$, представляющий зависимость давления насыщенного пара от температуры, определяет также зависимость температуры кипения от давления.