

Лабораторная работа № 5

Определение удельной теплоты перехода воды в пар при температуре кипения

Цель работы определение теплоты фазового перехода первого рода на примере испарения воды.

Теоретическая часть

Переход вещества из одной фазы в другую при изменении внешних условий: температуры, давления, магнитного и электрического полей и т.д. называется **фазовым переходом**. Значение температуры, давления или какой-либо другой физической величины, при которой происходит фазовый переход, называется **точкой перехода**.

Различают фазовые переходы двух родов. При фазовом переходе 1-го рода скачком меняются такие термодинамические характеристики вещества, как плотность, концентрация компонентов, а в единице массы вещества выделяется или поглощается вполне определённое количество теплоты, называемое теплотой фазового перехода. Примерами фазовых переходов 1-го рода являются испарение и конденсация, плавление и затвердевание, некоторые структурные переходы в твёрдых телах, например, образование мартенсита¹ в сплаве железо-углерод (сталь).

При фазовом переходе 2-го рода некоторая физическая величина, равная нулю с одной стороны от точки перехода, постепенно растёт (от нуля) при удалении от точки перехода в другую сторону, при этом плотность изменяется непрерывно, теплота не выделяется и не поглощается. К примерам фазовых переходов 2-го рода относятся переход парамагнетик - ферромагнетик или переход металла в сверхпроводящее состояние при температуре ниже критической.

В жидкостях при любой температуре имеется некоторое количество молекул, энергия которых оказывается достаточной для того, чтобы преодолеть притяжение к другим молекулам, покинуть поверхность жидкости и перейти в газообразную фазу. Переход жидкости в газообразное состояние называется *испарением*. При испарении жидкость покидают наиболее быстрые молекулы, вследствие чего средняя энергия оставшихся молекул уменьшается, и

¹Мартенсит (от имени немецкого металловеда А. Мартенса (A. Martens; 1850–1914)) – микроструктура игольчатого вида, наблюдаемая в закалённых металлических сплавах и чистых металлах.

жидкость охлаждается. Чтобы поддерживать температуру испаряющегося тела неизменной, к нему нужно подводить тепло. Количество теплоты, которое необходимо подвести к единице жидкости для превращения её в пар при постоянной температуре, называется *удельной теплотой* перехода жидкости в пар. Обычно её обозначают r и измеряют в Дж/кг.

Теплота, подводимая к жидкости при изотермическом испарении, идёт на работу A_1 по преодолению сил молекулярного взаимодействия и на работу A_2 , связанную с увеличением объёма вещества при переходе его из жидкого состояния в газообразное.

Работа A_1 при испарении единицы массы будет численно равна разности внутренних энергий пара и жидкости. Так как средние кинетические энергии молекул пара и жидкости одинаковы при постоянной температуре, разность удельных внутренних энергий будет равна разности потенциальных энергий единицы массы пара и жидкости. Согласно теории Ван-дер-Ваальса¹ межмолекулярное взаимодействие приводит к появлению добавочного внутреннего давления, которое равно

$$p' = \frac{a}{V^2}, \quad (1)$$

где a – постоянная Ван-дер-Ваальса для единицы массы жидкости, V – удельный объём. Тогда работа против сил межмолекулярного взаимодействия при испарении единицы массы жидкости будет равна

$$A_1 = \int_{V_{ж}}^{V_n} p' dV = \int_{V_{ж}}^{V_n} \frac{a}{V^2} dV = \frac{a}{V_{ж}} - \frac{a}{V_n}, \quad (2)$$

где $V_{ж}$ – удельный объём жидкости, V_n – удельный объём пара. Работу A_2 , совершаемую против внешнего давления, при испарении единицы массы жидкости найдем по формуле

$$A_2 = p(V_n - V_{ж}), \quad (3)$$

где p – внешнее давление.

Удельная теплота перехода жидкости в пар равна сумме этих работ

¹ Ван-дер-Ваальс (van der Waals) Йоханнес Дидерик (1837–1923) – нидерландский физик. Вывел уравнение состояния для реальных газов (уравнение Ван-дер-Ваальса). Нобелевская премия (1910).

$$r = a \left(\frac{1}{V_{жс}} - \frac{1}{V_n} \right) + p(V_n - V_{жс}). \quad (4)$$

Удельная теплота перехода жидкости в пар зависит от природы жидкости, а для данной жидкости является функцией температуры. С увеличением температуры удельная теплота перехода жидкости в пар убывает. В критическом состоянии различие между жидкостью и её насыщенным паром исчезает, и удельная теплота перехода обращается а нуль, т.к. $V_{жс} = V_n$.

Экспериментальная часть

Описание установки и метод измерения

Прибор для измерения удельной теплоты перехода воды в пар при температуре кипения схематически изображён на рис. 1. Фото установки представлено на рис. 2.

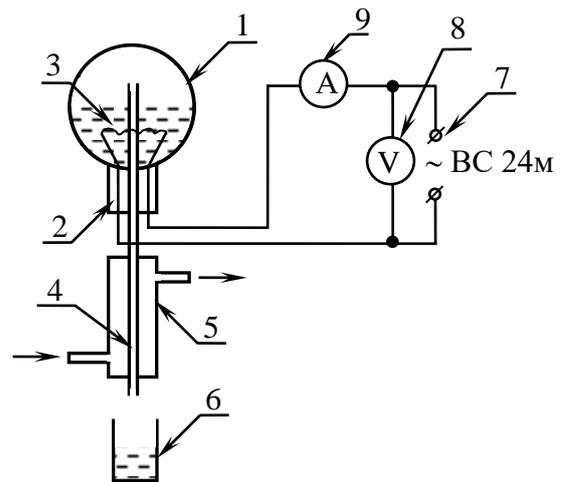


Рис. 1. Схема установки

Сферическая колба (1), в которую наливается дистиллированная вода, закрыта резиновой пробкой (2), через которую проходят выводы спирали (3), служащей нагревателем, и трубка (4), отводящая пар в конденсатор (5). Конденсатор охлаждается проточной водой из водопровода.

Образующийся при кипении пар, проходя через конденсатор, превращается в воду, которую можно собирать в специальный стакан (6). Нагреватель (3) питают переменным током от сети через источник тока ВС–24м (7), с помощью которого можно изменять напряжение на нагревателе. Напряжение и ток через нагреватель измеряются вольтметром (8) и амперметром (9).

Если нагреть воду в колбе до кипения и дать ей покипеть 10-15 минут, между колбой и окружающей средой установится постоянная разность температур, и все тепловые процессы в приборе перестанут зависеть от времени (стационарные процессы).

Отдаваемая спиралью за некоторый промежуток времени теплота равна работе электрического тока

$$A = IU\tau, \quad (5)$$

где I – сила тока через спираль, U – напряжение на спирали. Часть этой теплоты Q идёт на превращение воды в пар при температуре кипения, а другая её часть q теряется за счёт теплообмена колбы с окружающей средой, то есть

$$IU\tau = Q + q. \quad (6)$$

Если за время τ испарилась масса воды m , то $Q = mr$, и тогда

$$IU\tau = mr + q. \quad (7)$$

При достаточном расходе охлаждающей воды вся испарившаяся при кипении вода будет конденсироваться в конденсаторе. Конденсат можно собрать и определить его массу, которая будет равна испарившейся массе воды m . Тепловые потери q экспериментально определить трудно, поэтому опыт повторяют дважды при различной величине силы тока через нагреватель. Так как разность температур между колбой и окружающей средой будет такой же, как и в первом опыте, тепловые потери за равные промежутки времени будут равны. В результате получаем систему двух уравнений

$$\begin{cases} I_1 U_1 \tau = m_1 r + q \\ I_2 U_2 \tau = m_2 r + q, \end{cases} \quad (8)$$

решая которую получаем

$$r = \frac{(I_2 U_2 - I_1 U_1) \tau}{m_2 - m_1}. \quad (9)$$

Основным недостатком данного метода, как и многих других методов определения удельной теплоты перехода жидкости в пар, является трудность получения сухого пара. В таких установках всегда имеется вероятность уноса с паром капель кипящей жидкости, что приводит к ошибке в значении удельной теплоты парообразования. Поэтому нужно следить, чтобы интенсивность кипения не была чрезмерной. Необходимо также соблюдать условия полной конденсации пара в конденсаторе.



Рис. 2. Экспериментальная установка

Выполнение работы

1. Внимательно ознакомиться с устройством экспериментальной установки. Определить цену деления амперметра и вольтметра, их класс точности. Проверить, стоят ли на нуле стрелки приборов. Соединить конденсатор с водопроводным краном.
2. После проверки электрической цепи преподавателем включить выпрямитель ВС–24м в сеть и, меняя напряжение с помощью регулировочной ручки выпрямителя, установить силу тока 4-5 ампер. Для сбора конденсата в процессе прогрева установить вспомогательный сосуд.
3. После того как вода закипит, установить силу тока 3-4 ампера (значение задает преподаватель).
4. Через 10-15 минут (это время необходимо для установления стационарного режима) плавно поворачивая кран, пустить воду, отрегулировав скорость потока воды через конденсатор так, чтобы весь пар успевал конденсироваться в конденсаторе при минимальной скорости потока воды и приступить к измерениям.
5. В сухой специальный сосуд в течение 200 секунд собирать сконденсированную воду, одновременно записывая показания амперметра и вольтметра через каждые 40 секунд (значения заносить в таблицу).
6. Установить вспомогательный сосуд. Увеличить силу тока через нагреватель на 1 ампер.
7. Взвесить сосуд с конденсатом (массу сосуда находить не нужно, т.к. в расчётную формулу входит лишь разность масс воды, собранной в двух сериях измерений). Затем вылить воду из сосуда и насухо протереть его.
8. Повторить пункт 5. При этом измерении конденсат собирать в тот же сосуд, что и при первом измерении.

№		I_1, A	U_1, B	I_2, A	U_2, B
1					
2					
3					
4					
5					
τ, c	$m_1, \text{кг}$	$m_2, \text{кг}$	$\langle I_1 \rangle, \text{A}$	$\langle U_1 \rangle, \text{B}$	$\langle I_2 \rangle, \text{A}$

9. Вычислить среднее значение токов и напряжений и определить по формуле (9) удельную теплоту парообразования воды.
10. Рассчитать абсолютную Δr и относительную ε_r погрешности. Записать окончательный результат и сравнить его с табличным с учётом погрешности.

Контрольные вопросы

1. В чём состоит существенное отличие фазовых переходов первого и второго рода?
2. Что называют удельной теплотой фазового перехода и в каких единицах она измеряется в системе СИ?
3. Объясните процесс кипения. Чем кипение отличается от испарения?
4. Как объяснить с точки зрения молекулярно-кинетической теории убывание удельной теплоты перехода жидкости в пар при возрастании температуры?
5. Какова физическая природа внутренней и внешней составляющих удельной теплоты перехода жидкости в пар?

Литература

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики: Учеб. пособие: Для вузов. В 5 т. Т. II. Термодинамика и молекулярная физика. – 5-е изд. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 544 с.
2. Кикоин И.К., Кикоин А.К. Молекулярная физика.– СПб. Лань, 2008. — 480 с.
3. Физические величины Справочник / Под ред. И. К. Кикоина.– М. Атомиздат, 1976.

Лабораторная работа № 5. Лист отчёта
Определение удельной теплоты перехода воды в пар
при температуре кипения

Выполнил студент _____
 Факультет _____ курс _____ группа _____
 Проверил _____
 Показания сняты _____
 Зачтено _____

Погрешности измерительных приборов $\alpha =$ _____

Измерительный прибор	ω – цена деления	$\Delta_{\text{окр}}$ – округления	$\Delta_{\text{пр}}$ – приборная	$\Delta_{\text{суб}}$ – субъективная	Единицы измерения
Весы					
Амперметр					
Вольтметр					
Секундомер					

Результаты измерений

№			I_1, A	U_1, B	I_2, A	U_2, B
1						
2						
3						
4						
5						
τ, c	$m_1, \text{кг}$	$m_2, \text{кг}$	$\langle I_1 \rangle, \text{A}$	$\langle U_1 \rangle, \text{B}$	$\langle I_2 \rangle, \text{A}$	$\langle U_2 \rangle, \text{B}$

Формулы для расчёта косвенных измерений

Ответ:

Величина	Значение		Абсолютная погрешность	Единицы измерения	Относительная погрешность
$r =$		\pm			
Табличное значение					
$r_T =$		\pm			

Интервалы сравнений