

КАЛМЫЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра общей физики

Лабораторная работа № 9

*«Определение теплоты перехода воды в пар
при температуре кипения»*

Лаборатория № 211

Лабораторная работа № 9

«*Определение теплоты перехода воды в пар при температуре кипения*»

Цель работы: ознакомление с фазовыми переходами первого рода. Определение удельной теплоты парообразования воды.

Приборы и принадлежности: лабораторный автотрансформатор с вольтметром, кипятильник, колба с исследуемой жидкостью, конденсатор пара, мензурка, штатив с держателями.

Т е о р и я

Химические системы могут быть гомогенными - физически однофазными. Например, вода и водяной пар, взятые по отдельности, являются гомогенными системами. Если водяной пар находится под поверхностью воды, то вся эта система (пар + вода) называется *гетерогенной системой*. По определению, фаза - это гомогенная часть гетерогенной системы, ограниченная поверхностью раздела. Пар над поверхностью воды - паровая фаза H_2O . Вода - жидкая фаза H_2O .

Фазовым переходом называется изменение фазового или агрегатного состояния вещества без изменения химического состава.

Фазовые переходы первого рода характеризуются тем, что при их осуществлении поглощается или выделяется теплота. Это процессы плавления и кристаллизации, испарения и конденсации и т.д. В данной работе изучаются процессы парообразования и конденсации. Для того чтобы испарение жидкости происходило при постоянной температуре, к жидкости необходимо подводить определённое количество теплоты.

Величина, численно равная количеству теплоты, которое необходимо подвести к единице массы жидкости для превращения её в пар при постоянной температуре, называется удельной теплотой перехода жидкости в пар.

Обычно её обозначают буквой λ . В системе СИ λ измеряется в Дж/кг.

Теплота, подводимая к жидкости при изотермическом испарении, идёт на работу по преодолению сил молекулярного притяжения (внутренняя теплота перехода жидкости в пар) и на работу против внешнего плавления (внешняя теплота перехода).

Работа A_1 , совершаемая против сил молекулярного притяжения при испарении единицы массы, будет численно равна разности удельных внутренних энергий пара и жидкости. Следовательно, $A_1 = U_n + U_{жс}$, где U_n и $U_{жс}$ - соответственно удельная внутренняя энергия пара и жидкости.

Работу, совершаемую против внешнего давления при испарении единицы массы жидкости, можно определить по формуле:

$$A_2 = p (V_n - V_{жс}),$$

где p - внешнее давление, V_n - удельный объём пара, $V_{жс}$ - удельный объём жидкости.

Удельная теплота перехода жидкости в пар равна сумме внутренней λ_1 и внешней λ_2 теплоты перехода: $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2$, но так как $\lambda_1 = A_1$, а $\lambda_2 = A_2$, то для удельной теплоты перехода жидкости в пар получаем:

$$\lambda = U_n - U_{жс} + p (V_n - V_{жс}).$$

Работу $A_1 = U_n - U_{жс}$ можно выразить иначе. Если при переходе из жидкости в пар одной молекулы против сил молекулярного сцепления совершается работа A_1' , то при испарении единицы массы из жидкости в пар перейдёт N_A/μ молекул и

$$A_1 = \frac{N_A}{\mu} A_1'.$$

Тогда
$$\lambda = \frac{N_A}{\mu} A_1' + p (V_n - V_{жс}),$$

где N_A - число Авогадро, а μ - молекулярная масса.

Удельная теплота перехода жидкости в пар зависит от природы жидкости, а для определённой жидкости является функцией температуры. С увеличением температуры удельная теплота перехода жидкости в пар убывает, с

уменьшением - возрастает. В критическом состоянии различие между жидкостью и её насыщенным паром исчезает, и удельная теплота перехода обращается в нуль.

Экспериментальная установка

Прибор для определения удельной теплоты перехода воды в пар при температуре кипения изображен на рис. 1. Колба **1**, в которую наливается вода, закрывается плотно пробкой, через которую проходят трубки с выводами кипятильника - **2**, служащего нагревателем, а также трубка **3**, отводящая пар в конденсатор пара **4**. В охлаждающей рубашке конденсатора циркулирует вода из крана водопровода.

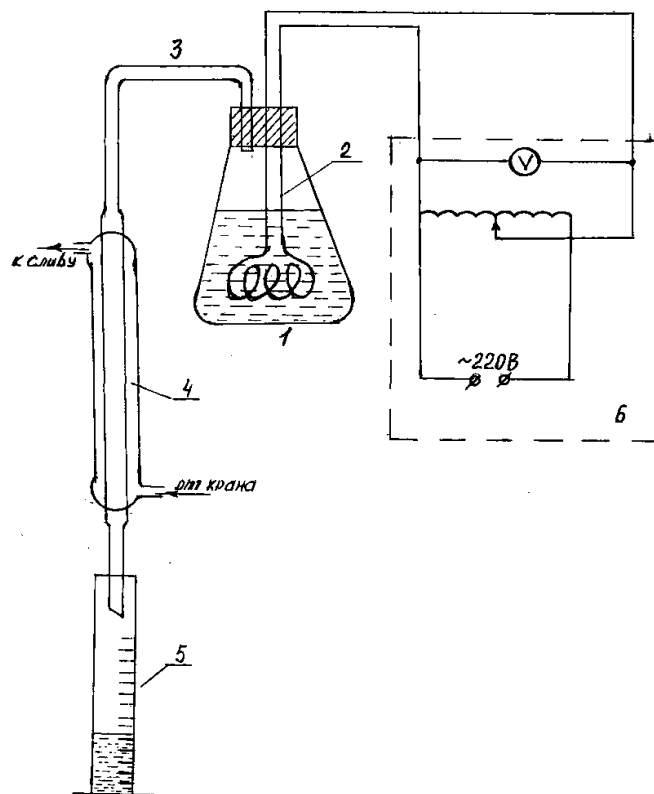


Рис. 1.

Образующийся при кипении воды пар, проходя через конденсатор, превращается в воду, которую собирают при проведении измерений в мензурку **5**. До начала измерений конденсат стекает в другой сосуд. Для нагревания кипятильника используется переменный ток, эффективную силу которого можно изменять, меняя эффективное напряжение с помощью автотрансформатора **6**. Эффективную силу тока можно вычислить по закону Ома, зная эффективное напряжение и сопротивление нагревателя кипятильника R_k при температуре кипения воды. Эффективное напряжение измерить с помощью встроенного в автотрансформатор **6** вольтметра.

Используя данную установку, можно определить удельную теплоту пе-

рехода воды в пар при температуре кипения под атмосферным давлением.

Если нагреть воду в колбе до температуры кипения и дать ей покипеть 5-6 мин, то за это время прибор прогреется настолько, что процессы, происходящие в нём, можно считать стационарными (не зависящими от времени). Это будет означать, что установится в среднем постоянная разность температур колбы и окружающей среды, что весь образующийся за некоторое время пар при прохождении через конденсатор будет успевать превращаться в жидкость за то самое время.

Пусть эффективная сила тока, идущего по спирали, равна J_1 , эффективное напряжение на её концах U_1 . Проходя по спирали, электрический ток нагревает её, совершая за время τ работу $J_1 U_1 \tau$. Отдаваемая спиралью теплота идёт на превращение воды в пар при температуре кипения и на нагревание окружающей среды вследствие теплообмена между ней и колбой. В случае стационарного режима тепловые потери за единицу времени постоянны, а следовательно, постоянно и количество теплоты, расходуемое за единицу времени на превращении воды в пар. Тогда

$$J_1 U_1 \tau = Q_1 + q, \quad (1)$$

где Q_1 - количество теплоты, идущее на образование пара в течение времени τ , а q - тепловые потери за то же самое время. Если за время τ испарилась масса воды m_1 , то

$$Q_1 = m_1 \lambda,$$

где λ - удельная теплота перехода воды в пар при температуре кипения под атмосферным давлением. В этом случае

$$J_1 U_1 \tau = m_1 \lambda + q.$$

Масса m_1 испарившейся за время τ воды может быть найдена экспериментально, так как при стационарном режиме она будет равна массе воды, полученной за то же самое время при конденсации пара.

Тепловые потери экспериментально определить трудно. Поэтому для исключения их из уравнения опыт повторяет при другой мощности электри-

ческого тока. При этом снова собирают конденсат в условиях стационарного режима за то же время. Так как во втором случае масса пара, образующегося за единицу времени, будет иной, то для обеспечения его полной конденсации необходимо соответственно изменить скорость потока охлаждающей воды в конденсаторе (например, при увеличении массы образующегося пара необходимо увеличить скорость потока охлаждающей воды). Тепловые потери во втором опыте при соблюдении выше указанных условий можно принять равными тепловым потерям в первом опыте. Тогда

$$J_2 U_2 \tau = Q_2 + q,$$

но так как $Q_2 = m_2 \lambda$, то

$$J_2 U_2 \tau = m_2 \lambda + q, \quad (2)$$

где J_2 - эффективная сила тока, идущего по спирали, U_2 - эффективное напряжение на концах спирали, τ - время, m_2 - масса конденсата, собранного за время τ в условиях второго опыта.

Из формул (1) и (2) находим:

$$\lambda = \frac{(J_1 U_1 - J_2 U_2) \tau}{m_1 - m_2}.$$

Ошибку измерений можно значительно уменьшить, увеличив число измерений. В данной работе предлагается повторять опыты не при двух только, а при нескольких значениях мощности нагревателя. Результаты измерений в данном случае можно наглядно представить в виде графика, отложив по оси абсцисс массу испаряющейся воды за одно и то же время τ при разных значениях мощности $P = JU$ кипятильника, откладываясь по оси ординат (рис.2). Уравнение (1) можно записать в этом случае в виде:

$$P \cdot \tau = \lambda m + q, \quad (3)$$

т.е. это обычная линейная функция $P \cdot \tau$ от массы m с угловым коэффициентом, равным λ и постоянным слагаемым q . Если полученную прямую экстраполировать до оси ординат, то она пересечёт эту ось в точке q . Таким образом, можно определить тепловые потери в окружающем пространстве, а

поделив q на τ , вычислить мощность потерь. Угловой коэффициент λ , равный тангенсу угла наклона прямой, можно вычислить, взяв отношение

$$\lambda = \frac{\Delta(P \cdot \tau)}{\Delta m}$$

(рис.2.). Таким образом, из графика можно определить как мощность тепловых потерь q/τ так и теплоту парообразования λ . В данной работе мощность, выделяемая кипятильником, определяется по формуле

$$P = \frac{U^2}{R}, \quad (4)$$

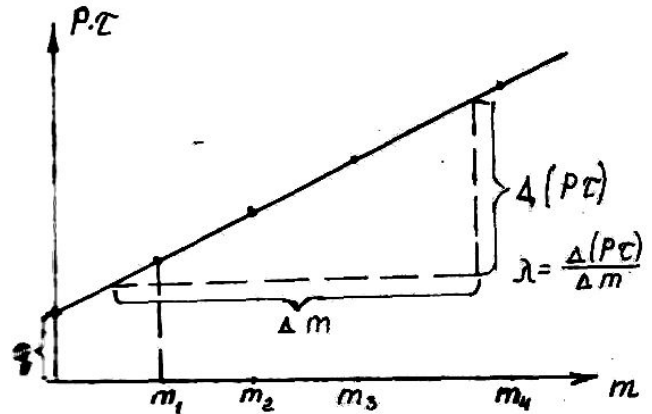


Рис. 2.

где U - подаваемое на кипятильник напряжение, измеряемое вольтметром на ЛАТРе, R - сопротивление кипятильника при температуре кипения воды. Очень тщательные измерения показали, что сопротивление нагревательного элемента кипятильника слабо зависят от температуры и при $t = 100^\circ\text{C}$ составляет величину $R = (167,5 \pm 0,5)$ Ом (при 20°C $R = 166,5$ Ом). Поэтому с большой точностью мощность нагревателя можно вычислить по формуле (4).

Порядок проведения измерений

Соединив с водопроводным краном конденсатор пускают в него воду, плавно поворачивая кран. Замыкают электрическую цепь и с помощью автотрансформатора подают на кипятильник напряжение, указанное преподавателем. Через 4-5 минут после закипания воды приступают к измерениям при напряжении 130 вольт. Конденсат собирают в сухую мензурку в течение $\tau = 600 - 900$ сек.(10-15 мин.). Количество образовавшегося конденсата находят по делениям шкалы мензурки.

Увеличив напряжение до 150 В и выдержав 2-3 минуты при это напря-

жении проводят вторую серию аналогичных измерений. Измерения проводятся при $U = 130, 150, 170, 190$ и 210 вольт.

Задание 1. Ознакомьтесь с приборами, которыми будете пользоваться.

Задание 2. Проведите 4-5 серий измерений, результат занесите в таблицу и постройте график как показано на рис. 2.

$U, \text{В}$	$P = \frac{U^2}{R}$	$\tau, \text{сек}$	Масса конденсата $m, \text{кг}$	$\lambda, \text{Дж/кг}$	$q, \text{Дж}$
130					
150					
170					
190					
210					

Определите значения λ и q из графика. λ вычислите в Дж/кг. Переведите Дж/кг в кал/г, пользуясь соотношением $1 \text{ кал.} = 4,1868 \text{ Дж}$.

Задание 3. Сравните значение λ с табличным.

Задание 4. Определите абсолютные и относительные погрешности измерений λ и q .

Задание 5. Рассчитайте внешнюю удельную теплоту перехода воды в пар при температуре кипения λ_2 , приняв, что пар в колбе является насыщенным. Для расчёта воспользуйтесь таблицей. Температуру кипения воды найдите в таблице зависимости температуры кипения воды от давления. Давление определите по барометру.

Задание 6. Определите внутреннюю теплоту перехода воды в пар по формуле:

$$\lambda_T = \lambda - \lambda_2,$$

где λ - экспериментально определённое значение удельной теплоты перехода воды в пар при температуре кипения.

Задание 7. Вычислите работу, совершаемую против сил молекулярного протяжения, при переходе одной молекулы воды из жидкой фазы в

парообразную.

Контрольные вопросы

1. Как объяснить с точки зрения молекулярно-кинетической теории убывание удельной теплоты перехода жидкости в пар при возрастании температуры?

2. Как скажется на значении удельной теплоты перехода воды в пар попадание капелек воды в трубку **3**?

3. Сравните работу выхода одной молекулы из жидкости A_1' с величиной $kT/2$.

4. При каком условии для расчёта удельной внешней теплоты перехода воды в пар можно применить формулу $\lambda_2 \approx pV_n = \frac{1}{\mu}RT$, где μ - молекулярная масса, R - универсальная газовая постоянная, T - абсолютная температура? Произведите расчёт λ_2 по этой формуле и сравните полученный результат со значением λ_2 рассчитанным в задании 5.

Л и т е р а т у р а

1. Фрищ С.Э., Тиморева А.В. Курс общей физики, т.1, изд. 10 стереотип. М., Физматгиз., 1962.

2. Штрауф Е..А. Курс физики, т.1, Л., Судпромгиз, 1961.

3. Кикоин И.К. и Кикоин А.К. Молекулярная физика. М., Физматгиз, 1963.